

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 30

Дніпро

2025

Редакційна колегія

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

Белоконь 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 Є. 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 електропостачання 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

Гричук 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 нанотехнологій 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 процеси 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

Сасенко Ю. Л.: доктор технічних наук (05.09.05 – Теоретична електротехніка; 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), професор, декан енергетичного факультету, професор кафедри електротехнічних систем електропостачання, 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

**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)

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 №6 від 29.12.2025р.). Видається 2 рази на рік.

© Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), 2025

ЗМІСТ

Захарова І.В., Куров Є.В.

Дослідження впливу швидкості після зварювального охолодження на експлуатаційні властивості зварних з'єднань прямошовних труб великого діаметру класу міцності к60 (х70)..... 8

Зусін А.М.

Оптимізація хімічного складу низьковуглецевого хромомарганцевого наплавленого металу з метастабільним аустенітом методом регресійного аналізу 15

Щетинін С.В., Десятський С.П.

Одностороннє зварювання складовим електродом на флюсовій подушці..... 30

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

Високошвидкісне наплавлення на низькій енергії шийок чавунних валків 38

Попов С.М., Лаптева Г.М., Гребешков М.О., Капустян О.Є.

Наукові задачі трибоматеріалознавства при аналізі трибосистем..... 45

Беженев С.О., Капустян О.Є.

Аналіз впливу параметрів залишкових поверхневих макронапружень на механічні характеристики сплаву нікелю з використанням методу акустичної емісії..... 54

Сидоренко М.В., Капустян О.Є., Кравченко Є.О., Фролов Р.О., Козак Д.С.

Визначення залишкової довговічності кінцевих балок мостових кранів з використанням методу акустичної емісії..... 61

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

Наноарт та металургія: використання інформаційних технологій при обробці мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів..... 69

Григоренко В.У., Зінченко С.М., Іскрижицький Д.В.

Особливості процесу холодної пільгерної прокатки труб на станах з можливістю виконання різних сполучень подачі та повороту перед деформуванням прямим та зворотним ходом кліті та області його використання..... 81

Григоренко В.У., Проців В.В., Куцевол С.В.

Розробка ведучих шестерень зі змінним ділильним радіусом у парі з нерухомою зубчастою рейкою для забезпечення природного процесу холодної пільгерної прокатки труб..... 87

Овсяников В.В.

До питання застосування закордонних марок сталей для вітчизняних магістральних трубопроводів..... 92

Черевко О.О., Лубкін Б.В.

Визначення рівню і маси металу та шлаку в проміжному ковші мблз шляхом математичного моделювання..... 99

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

Розвинення технології виробництва гнутих профілів з використанням низьковуглецевих сталей підвищеної міцності з термомеханічної обробки при виробництві холодногнутих профілів..... 108

Щербаков С. В.

Оптимізація гранулометричного складу продукту подрібнення залізної руди в системах з адаптивним управлінням..... 114

Нефьодов І.О., Лаврик В.П., Суглобов В.В.

Дослідження напружено-деформованого стану несучих елементів автотранспорту..... 121

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

Якість різку прокату дисковими пилами..... 126

Бабенко О. М., Капустян О. Є.	
Аналіз впливу покриття нітриду титану на втомну міцність компресорних лопаток	132
Горобець М.М., Романіченко Г.М., Капустян О.Є.	
Граденти векторів напруженості електричного і магнітного полів випромінювання диполя герця на кінцевій відстані.....	141
Костенко В. О., Капустян О.Є.	
Електроживлення сигналізації від повітряних ліній електропередач надвисокої напруги.	148
Матвієнко М.С., Баранов І.О., Кіріцева О.В.	
Удосконалення технології забезпечення автоматизованих навігаційних систем диспетчерського управління міжнародними автомобільними перевезеннями	159
Михайлов Є.В.	
Обрання раціональних схем завантаження м'яких контейнерів, що мають форму циліндру, у вантажні приміщення транспортних засобів.....	170
Каращук В.О.	
Перспективи впровадження гібридного залізничного рухомого складу для пасажирських перевезень.....	179
Селіванова Н.Ю.	
Оцінка ризиків автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану в Україні: маршрутизація та спеціальні режими супроводу.....	192
Хомяк А.Е., Баранов І.О., Кіріцева О.В.	
Підвищення ефективності міжнародних перевезень деревини автомобільним транспортом.....	207
Процик О. П., Хмельов І. В., Бутенко Г. М., Данєвський М. О., Красулін О.С.	
Сучасні цифрові технології управління транспортними процесами автомобільного транспорту у міжнародному сполученні.....	217
Цокотун П.В., Капустян О.Є.	
Аналіз впливу руху транспортного засобу при спуску і підйомах.....	226
Ширяєва С.В., Хоміцька А.С.	
Клієнтоорієнтованість в транспортно-експедиторській діяльності.....	233
Сова Н.В., Савченко Б.М., Ляшок І.О., Крюкова О.А., Рейвах О.В.	
Переробка відходів біополімерів для мінімізації негативного впливу на міське середовище.....	242
Плаван В.П., Резанова Н.М., Ляшок І.О., Саблій Л.А., Резанова В.Г., Савченко Б.М.	
Очищення рідких та газових середовищ з використанням тонковолокнистих фільтрувальних матеріалів.....	249
Нестеров О.В., Рубан В.Т., Капустян О.Є.	
Альтернативні шляхи підтримання працездатності об'єктів енергетики в умовах великомасштабної агресії.....	257
Новини України та світу.....	266
Вимоги до публікацій.....	270

CONTENTS

Zaharova I.V., Kurov Y.V.

Investigation of the influence of post-weld cooling rate on service properties of welded joints of large diameter longitudinally welded pipes of strength class k60 (x70)..... 8

Zusin A. M.

Optimization of the chemical composition of low-carbon chromium–manganese weld deposit metal with metastable austenite using regression analysis..... 15

Shchetinin S.V., Desyatskyi S.P.

The one-sided high-speed composite electrode welding on a flux cushion..... 30

Shchetynina V.I., Volenko I.V.

High-speed low-energy surfacing of cast iron rolls..... 38

Popov S.M., Laptieva H.M., Hrebieshkov M.O., Kapustian O.Ye.

Scientific problems of tribomaterials science in the analysis of tribosystems..... 45

Bezhenov S.A., Kapustian O.Ye.

Analysis of the influence of residual surface macronestress parameters on the mechanical characteristics of nickel alloy using the acoustic emission method..... 54

Sidorenko M. V., Kapustian O.Ye., Kravchenko Ye.O., Frolov R. O., Kozak D.S.

Determination of the residual life of end beams of bridge cranes using the acoustic emission method..... 61

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

Nanoart and metallurgy: use of information technologies in processing micro-and macrostructures of ferro and non-ferro metals and alloys..... 69

Grigorenko V.U., Zinchenko S.M., Iskryzhytsky D.V.

Features of the cold pilgrims rolling process of pipes on rolling rollers with the possibility of performing various feed and rotation combinations before deforming by direct and return movement of the cage and areas of its application..... 81

Grigorenko V.U., Protsiv V.V., Kutsevol S.V.

Development of drive gears with variable pitch radius in pair with a fixed gear rack to provide a natural process of cold pipe rolling..... 87

Ovsyanikov V.V.

On the issue of using foreign steel brands for domestic main pipelines..... 92

Cherevko O., Lubkin B.

Determination of the level and mass of metal and slag in the intermediate bailer of the continuous casting machine by mathematical modeling..... 99

Grigorenko V.U., Zabolotniy O.M.

Development of technology for the production of bent profiles using low-carbon steels increased strength from thermo-mechanical treatment in the production of cold-die profiles... 108

S. Shcherbakov

Optimization of the granulometric composition of iron ore grinding product in systems with adaptive control..... 114

Nefyodov I.O., Lavryk V.P., Suglobov V.V.

Research of the stress-deformed state of the loader elements..... 121

Ishchenko A.O., Bilodidenko S.V., Kapustin S.V., Kravchenko V.M.

Quality of cutting rolled steel with circular saws..... 126

Babenko O. M., Kapustian O.Ye.

Analysis of the influence of titanium nitride coating on the fatigue strength of compressor blades..... 132

Gorobets N.N., Romanichenko H.N., Kapustian O.Ye.	
Gradients of tension vectors of electrical and magnetic fields of radiating dipolar hertz on end distance.....	141
Kostenko V. O., Kapustian O.Ye.	
Power supply of signalling from overhead power lines of extra high voltage.....	148
Baranov I. O., Matviienko M. S., Kiritseva O. V.	
Improvement of technology for automated navigation systems for dispatch control of international road transportation.....	159
Mikhailov E.V.	
Selection of rational schemes for loading soft cylinder-shaped containers into cargo compartments of vehicles.....	170
Karashchuk V. O.	
Prospects for the implementation of hybrid railway rolling stock for passenger transportation...	179
Selivanova N.Y.	
Risk assessment of road transportation of dangerous goods under martial law in Ukraine: routing and special escort regimes.....	192
Baranov I. O., Homyak A.E., Kiritseva O. V.	
Improving the efficiency of international timber transport by road.....	207
Procyk O. P., Khmelyov I. V., Butenko G. M., Danevsky M. O., Krasulin A. S.	
Modern digital technologies for management of transport processes of road transport in international connection.....	217
Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye.	
Analysis of the impact of vehicle motion during descents and climbs.....	226
Shyriaieva S. V., Khomitskaya A. S.	
Customer focus in transport and forwarding activities.....	233
Sova N.V., Savchenko B.M., Liashok I.O., Kryukova O.A., Reivakh O.V.	
Biopolymers waste processing to minimize of the negative impact on the urban environment.....	242
Plavan V.P., Rezanova N. M., Liashok I.O., Sablii L.A., Rezanova V.G., Savchenko B.M.	
Purification of liquid and gaseous media using fine fibre filtering materials.....	249
Nesterov O.V., Ruban V.T., Kapustian O.Ye.	
Alternative ways to replace high-alloy special-purpose steels.....	257
News of Ukraine and the world	266
Requirements for publications	270

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ШВИДКОСТІ ПІСЛЯЗВАРЮВАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРУ КЛАСУ МІЦНОСТІ К60 (Х70)

Забезпечення надійності газотранспортної системи та енергетичної інфраструктури України є питанням національної безпеки, особливо в умовах триваючої військової агресії.

Важливо отримувати зварні з'єднання труб великого діаметру про прокладанні та ремонті з гарантованою якістю й довгостроковими властивостями.

Метою дослідження є визначення впливу термічних циклів зварювання на структурно-фазові перетворення та механічні властивості трубної сталі групи міцності К60 (Х70).

Через складну будову та малі розміри зон термічного впливу (ЗТВ) оцінювання змін у металевій структурі здійснювали на основі імітації зварювального нагріву, що дозволяє дослідити вплив тепловкладення без проведення реального процесу зварювання.

Зразки нагрівали зі швидкістю 260 °С/с до 1350 °С та охолоджували в діапазоні швидкостей 0,2–200 °С/с. На основі дилатометричних кривих побудовано термодинамічну діаграму розпаду переохолодженого аустеніту, яка показала, що основним перетворенням у досліджуваній сталі є бейнітне, тоді як феритне перетворення спостерігається лише за низьких швидкостей охолодження. За швидкості до 5 °С/с формується полігональний ферит уздовж границь зерен, що свідчить про потенційно низьку ударну в'язкість. У діапазоні до 10 °С/с утворюється верхній бейніт гранулярної морфології, тоді як за 10–30 °С/с — нижній бейніт голчастої морфології. За швидкостей понад 30 °С/с формується рейковий бейніт із дисперсними прошарками МА. Зі збільшенням швидкості охолодження зменшується величина вихідного зерна аустеніту.

Встановлено, що мікроструктура ЗТВ суттєво визначає в'язкопластичні властивості сталі: гранулярний бейніт характеризується низькою розорієнтованістю та гіршою ударною в'язкістю, тоді як голчастий і рейковий бейніт забезпечують покращення механічних характеристик.

Для отримання оптимальних властивостей у промислових умовах рекомендовано забезпечувати швидкість охолодження 10–20 °С/с шляхом інтенсифікації охолодження та зменшення погонної енергії зварювання.

Ключові слова: *Високоміцна трубна сталь; сталь класу К60 (Х70); зона термічного впливу (ЗТВ); імітація термічного циклу зварювання; термодинамічна діаграма; структурно-фазові перетворення; бейнітна структура; швидкість охолодження; ударна в'язкість.*

Постановка проблеми. *Забезпечення надійності газотранспортної системи та енергетичної інфраструктури України є питанням національної безпеки, особливо в умовах триваючої військової агресії. Історично склалося, що до 2017 року флагманом виробництва труб великого діаметру (ТВД) в Україні був ПАТ «Харцизький трубний завод» (м. Харцизьк, Донецька обл.), потужності якого дозволяли випускати понад 1 млн. т. продукції на рік. Внаслідок окупації частини Донбасу контроль над цим стратегічним підприємством було втрачено, що створило значний дефіцит на ринку вітчизняної трубної продукції.*

У відповідь на цей виклик в Україні розпочався процес створення нових виробничих потужностей. Низка вітчизняних підприємств освоїла технологію виробництва прямошовних зварних труб діаметром 406–1422 мм, використовуючи метод автоматичного електродугового зварювання під флюсом (SAWL) із застосуванням експандування для калібрування геометрії

Машинобудування і зварювальне виробництво

та зміцнення металу. Основними споживачами такої продукції виступають стратегічні підприємства: ТОВ «Оператор ГТС України», АТ «Укртрансгаз» та НАК «Нафтогаз України» [1]. Окрім нафтогазової галузі, ТВД критично необхідні для будівництва магістральних водогонів та як конструкційні елементи (палі) ліній електропередач.

Актуальність досліджень у цьому напрямі набула критичного значення після подій осені 2025 року. За офіційними повідомленнями НАК «Нафтогаз України», масовані атаки ворога на об'єкти газовидобутку стали наймасштабнішими за весь період війни. Руйнування зазнали не лише наземні об'єкти підготовки газу та компресорні станції, але й обв'язка газових свердловин. Відновлення цих об'єктів вимагає колосальних обсягів високоякісних зварних труб, здатних витримувати високий тиск та складні умови експлуатації. Це накладається на нагальну потребу в ремонтах магістральних газопроводів та інфраструктури ТЕС/ТЕЦ (котлоагрегати, паропроводи), які також зазнають систематичних ушкоджень.

У таких умовах новостворені українські виробництва стикаються з подвійним викликом: необхідністю швидкого нарощування обсягів випуску та жорсткими вимогами до якості зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей класу міцності K60. Саме ці сталі є основним матеріалом для відповідальних трубопроводів високого тиску.

Критичним етапом технологічного процесу є зварювання. Зона термічного впливу (ЗТВ) у сталях даного класу є «слабкою ланкою», де внаслідок термічних циклів зварювання можуть відбуватися небажані структурні перетворення, що призводить до зниження в'язкості та ризику крихкого руйнування. З огляду на це, наукове обґрунтування режимів зварювання, зокрема дослідження впливу швидкості охолодження на формування структури та експлуатаційних властивостей з'єднань труб вітчизняного виробництва, є актуальним науково-технічним завданням, що має пряме прикладне значення для енергетичної безпеки держави.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На структурні перетворення у ЗТВ зварних з'єднань серед інших факторів впливає і режим нагріву та охолодження під час дугового зварювання. ЗТВ має декілька структурних ділянок, які відрізняються за формою і будовою зерен, та характеристики кожної ділянки різняться в залежності від температури. При зварюванні низьковуглецевих низьколегованих сталей в ЗНВ можливе утворення гартівних структур і тріщин [2-4].

Значний внесок у дослідження впливу термічних циклів зварювання на структуру та властивості високоміцних низьколегованих трубних сталей класів міцності K60–K65 (X70) зробили вчені Інституту електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України. Зокрема, у роботах Познякова В.Д. та ін. [5-6] встановлено, що критичним фактором для забезпечення холодостійкості зварних з'єднань є обмеження погонної енергії зварювання. Фундаментальні аспекти фазових перетворень та кінетики розпаду аустеніту в трубних сталях детально розглянуті в працях Костіна В.А. та Григоренка Г.М. [7], де показано схильність цих матеріалів до утворення гартівних структур.

Дослідниками Mohsen Mohammadijoo та ін. встановлено, що для сталей класу міцності X70 застосування технології тандемного зварювання під флюсом з додаванням холодного дроту дозволяє знизити тепловкладення та пікову температуру, що сприяє подрібненню зерна аустеніту та зменшенню частки крихких М-А (мартенсит-аустеніт) складових у крупнозернистій ділянці ЗТВ [8].

Проте, незважаючи на значний обсяг даних, питання впливу широкого діапазону швидкостей охолодження на формування конкретних морфологічних типів бейніту в сталях K60 залишається недостатньо вивченим, що і зумовлює мету цієї роботи.

Мета дослідження. Метою даної роботи є вивчення впливу термічних циклів зварювання на експлуатаційні властивості трубної сталі групи міцності K60 (X70).

ЗТВ складається з п'яти ділянок, що мають різний структурно-фазовий склад, складну конфігурацію та відносно малі розміри, унаслідок чого її дослідження ускладнене. У зв'язку з цим вивчення впливу термічного циклу зварювання на структурно-фазовий склад і механічні властивості сталі здійснювали на основі імітації зварювального нагріву. Цей метод дозволяє оцінити вплив зварювання плавленням на основний метал у ЗТВ, при якому тепловий вплив на метал відбувається без виконання самого процесу зварювання.

Вплив термічного циклу на сталь оцінюють за взаємозв'язком швидкості охолодження (тепловкладення під час зварювання) зі структурою, що утворюється, та властивостями зварного з'єднання.

Циліндричні зразки діаметром 6 мм і довжиною 70 мм, вирізані з листів досліджуваних сталей, нагрівали прямим пропусканням електричного струму зі швидкістю 260 °C/с, характерною для зварювального нагріву, до температури 1350 °C, витримували протягом 1 секунди та охолоджували за заданими режимами; швидкість охолодження змінювали в межах від 0,2 до 200 °C/с. Охолодження зразків здійснювали шляхом тепловідведення через захвати за рахунок регульованого зниження сили струму, що проходив через зразок.

Основний матеріал дослідження. Вивчення кінетики фазових перетворень, що відбуваються в досліджуваній сталі в умовах зварювального нагріву й охолодження, здійснювали на основі побудови та аналізу термокінетичної діаграми розпаду переохолодженого аустеніту. Побудову термокінетичної діаграми виконували на основі дилатометричних кривих, за якими визначали точки початку утворення аустеніту A_{c1} ; завершення утворення аустеніту A_{c3} ; початку феритного перетворення F_s ; початку бейнітного перетворення B_s ; завершення бейнітного перетворення B_f . За отриманими координатами точок будували термокінетичну діаграму (рис. 1).

Для сталі у досліджуваному інтервалі швидкостей охолодження основним перетворенням на термокінетичній діаграмі розпаду переохолодженого аустеніту є бейнітне; також спостерігається коротка область феритного перетворення. Утворення вільного фериту пригнічується за швидкості охолодження 5 °C/с і більше.

Чітко виражених перегинів, що відповідали б перебігу мартенситного перетворення, на дилатограмі не спостерігається навіть за швидкостей охолодження понад 100 °C/с. Аналіз мікроструктури методом оптичної мікроскопії не дозволяє однозначно відрізнити реєчний бейніт від реєчного мартенситу. Єдиною видимою зміною морфології мікроструктурних складових зі збільшенням швидкості охолодження вище 20...30 °C/с є зменшення товщини рейок α -фази. Можна припустити, що аж до найвищих швидкостей охолодження основною мікроструктурною складовою залишається реєчний бейніт, оскільки межі рейок протравлюються, що свідчить про наявність значної кількості збагачених вуглецем другорядних фаз, розташованих уздовж меж рейок. Більш чітке розмежування цих структурних складових не є принциповим для даної роботи.

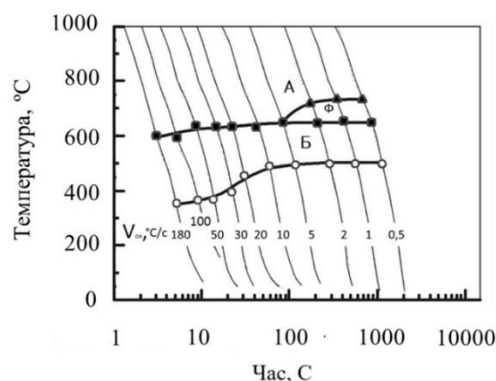


Рисунок 1 – Термокінетична діаграма досліджуваної сталі

Машинобудування і зварювальне виробництво

У ході металографічних досліджень було встановлено, що за швидкостей охолодження $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ і нижче спостерігається утворення полігонального фериту по межах аустенітних зерен, який формує так звану феритну окаймівку (рис. 2). Феритна окаймівка вздовж меж аустенітних зерен є непрямою ознакою низької ударної в'язкості металу; внутрішньозерна мікроструктура представлена верхнім бейнітом гранулярної морфології (рис. 2).

Гранулярний бейніт у досліджуваній сталі утворюється за низьких швидкостей охолодження — до $10\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, за яких встигають перебігати дифузійні процеси. Спочатку відбувається виділення бейнітної α -фази, а внаслідок дифузії формуються ділянки, перенасичені вуглецем, де утворюються острівці МА. Таким чином відбувається формування гранулярного бейніту, у якому великорозмірні включення МА розташовуються між округлими субзернами бейнітної α -фази (рис. 3).

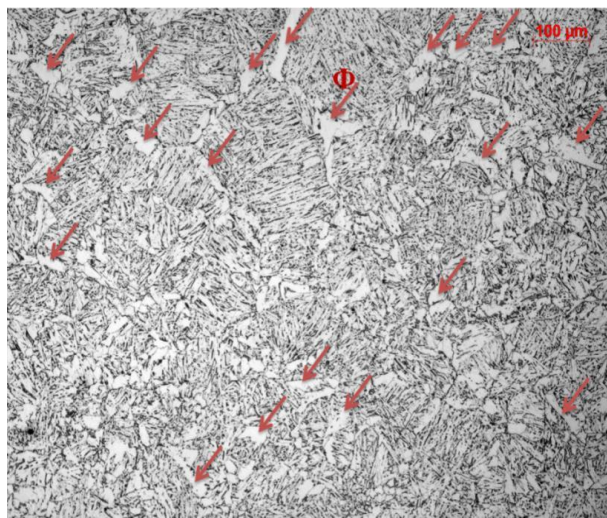


Рисунок 2 – Виділення полігонального фериту (Ф)

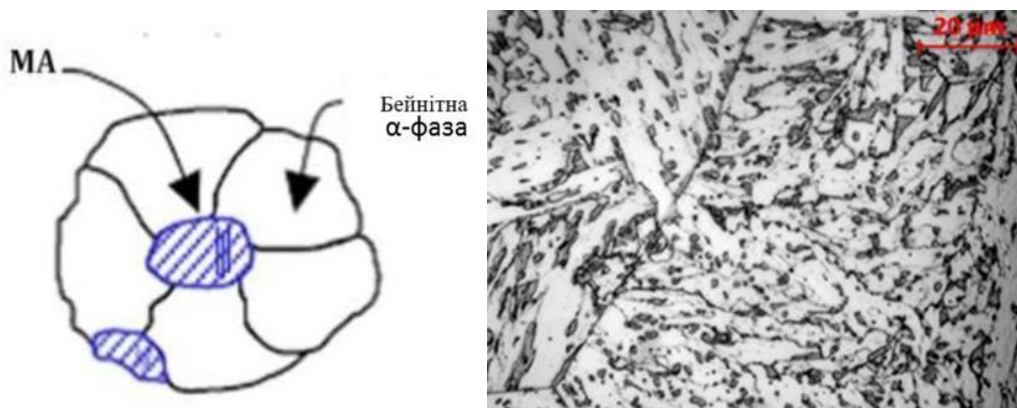


Рисунок 3 – Гранулярний бейніт:

а) схематичне зображення; б) фотографія мікроструктури (x1000)

З підвищенням швидкості охолодження в діапазоні $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ дифузійні процеси встигають протікати меншою мірою. Острівці МА формуються у вигляді тонких прошарків між голками бейнітної α -фази. Верхній бейніт гранулярної морфології замінюється нижнім бейнітом голчастої морфології (рис. 4).

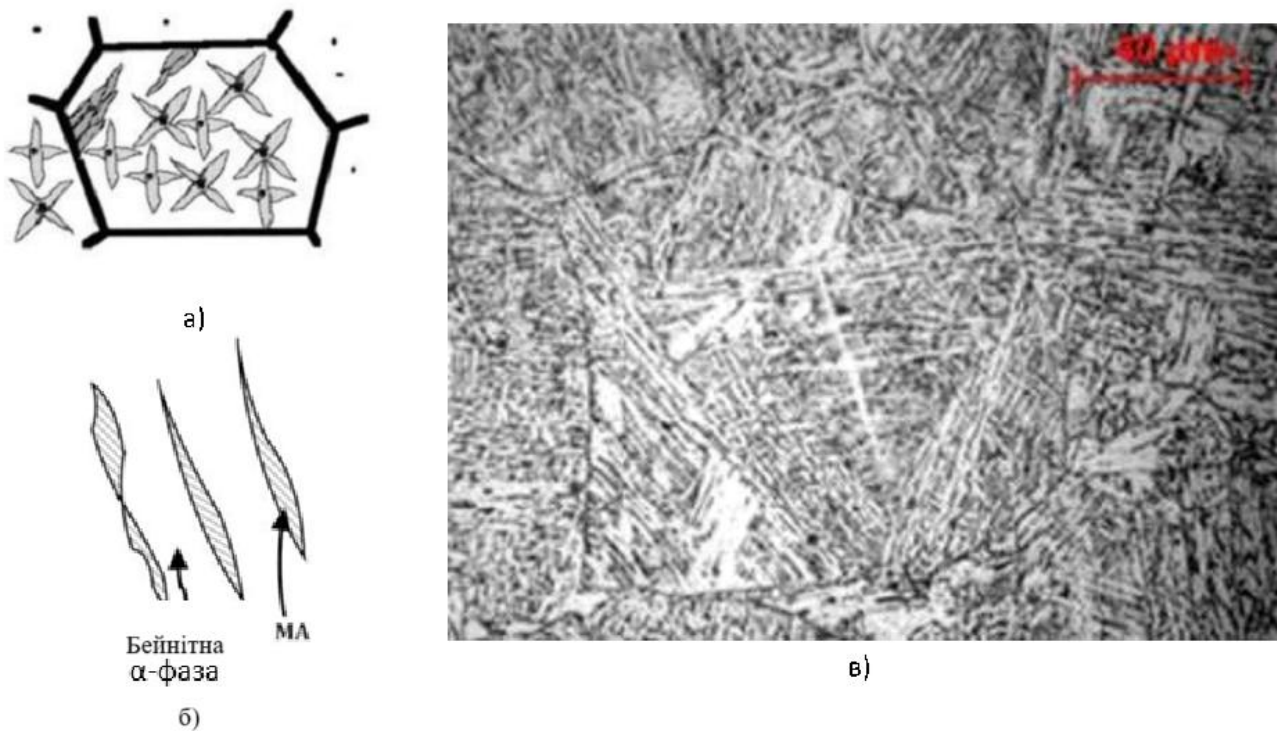


Рисунок 4 – Голчастий бейніт:
а) схематичне зображення; б) форма МА; в) фотографія мікроструктури, збільшення x500

При подальшому підвищенні швидкості охолодження понад 30 °С $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення відбувається за дифузійно-зсувним механізмом. Відбувається утворення рейкового бейніту з невеликими дисперсними прошарками МА (рис. 5) через малу дифузію вуглецю.

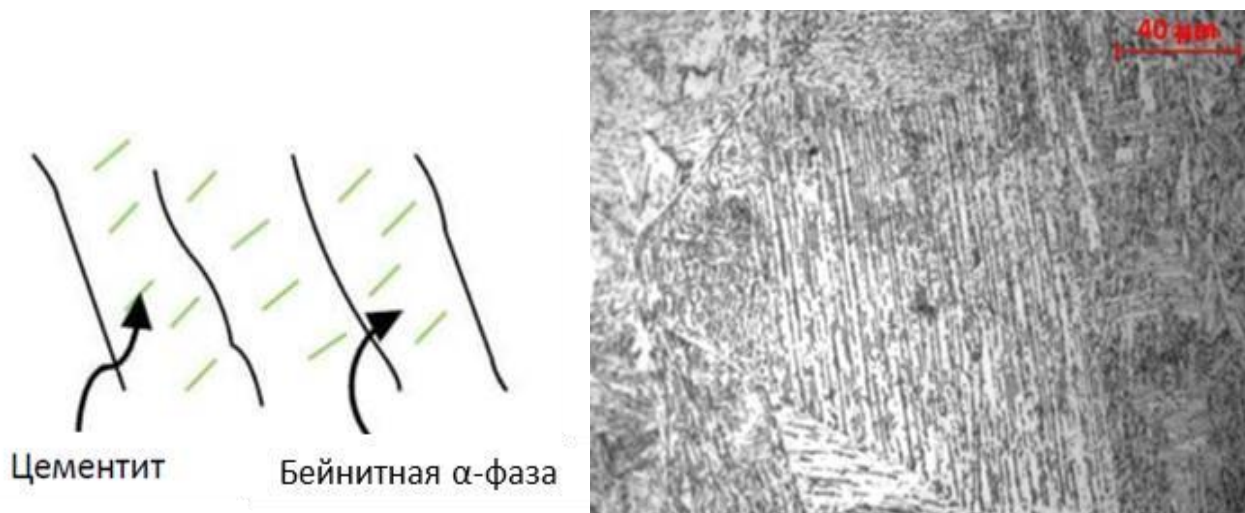


Рисунок 5 – Рейковий бейніт:
а) схематичне зображення; б) фотографія мікроструктури, збільшення x500

У ході металографічних досліджень було здійснено вимірювання величини вихідного зерна аустеніту. Результати вимірювань представлені у таблиці 1.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 1 – Залежність величини зерна від швидкості охолодження

Швидкість охолодження, °C/c				
1	5	10	30	100
Величина зерна, км				
98	83	76	70	59

Спостерігається тенденція зменшення величини вихідного зерна аустеніту зі збільшенням швидкості охолодження. Це пов'язано зі скороченням часу перебування зразка при температурі активного зростання зерна аустеніту (понад 1000-1100°C). Залежність величини вихідного зерна аустеніту від швидкості охолодження досліджуваної сталі представлені на рис. 6.

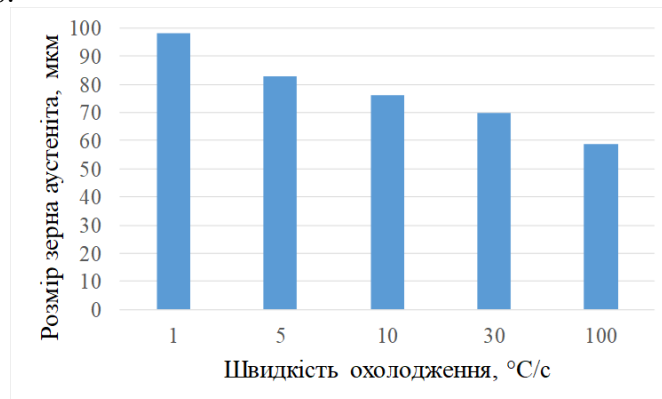


Рисунок 6 – Залежність величини зерна вихідного аустеніту від часу перебування сталі при температурі понад 1000°C за умов зварювального циклу.

ВИСНОВКИ

Отримані в ході досліджень результати свідчать, що в'язкопластичні та корозійні властивості (ударна в'язкість, твердість) поздовжніх зварних з'єднань ТВД залежать від типу мікроструктури, сформованої в зоні перегріву ЗТВ, яка, своєю чергою, визначається швидкістю охолодження. За швидкості охолодження в зоні перегріву ЗТВ нижче 10 °C/c формується верхній бейніт гранулярної морфології. Низькі значення в'язкопластичних властивостей металу в зоні перегріву ЗТВ при формуванні бейніту гранулярної морфології зумовлені низьким ступенем розорієнтованості такої мікроструктури.

Формування нижнього бейніту голчастої та рейкової морфології забезпечує високий ступінь розорієнтованості внутрішньозеренної структури та часту зміну напрямку поширення тріщини й енергоємності її росту під час руйнування, що приводить до підвищення в'язкопластичних властивостей сталі.

Для забезпечення швидкості охолодження в зоні перегріву в інтервалі 10–20 °C/c під час виробництва ТВД необхідно збільшити інтенсивність охолодження, наприклад шляхом підохолодження перед виконанням зовнішнього поздовжнього шва, а також за рахунок зниження загальної погонної енергії зварювання.

Список використаних джерел

1. *Віталій Чекме́з*: «Як розвивається сегмент труб великого діаметру в Україні». URL: <https://gmcenter.ua/interview/vitalij-chekmez-yak-rozvivaetsya-segment-trub-velikogo-diametru-v-ukraini/> (дата звернення 04.12.2025)

2. Гольдштейн М. И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
3. Грабин В.Ф. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей / В.Ф. Грабин, А.В. Денисенко. К.: Наук. думка, 1978. – 272с.
4. Пантейков С.П. Спеціальна металургія сталей і сплавів. Т.1. Спеціальні сталі і сплави : навчальний посібник / С.П. Пантейков, М.А. Кащев. Кам'янське : ДДТУ, 2021.– 118 с.
5. Позняков В.Д. Технології зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із високоміцних сталей / В.Д. Позняков. Вісник НАН України, 2017, № 1 С.64-70
6. Позняков В.Д. Структура и свойства сварных соединений стали С390 (S355J2) / В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.А. Максименко. Автоматическая сварка. 2012. № 8. С. 7—11.
7. Костін В.А. Структурні перетворення металу зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних броньових сталей / В.А. Костін, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Т.О. Зубер. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2019. Т. 55, № 6. С. 78-83.
8. Mohsen Mohammadijoo Characterization of HAZ of API X70 Microalloyed Steel Welded by Cold-wire Tandem Submerged Arc Welding / Mohsen Mohammadijoo, Stephen Kenny, Laurie Collins, Hani Henein. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, Volume 48, pages 2247–2259.

Zaharova I.V., Kurov Y.V.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF POST-WELD COOLING RATE ON SERVICE PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF LARGE DIAMETER LONGITUDINALLY WELDED PIPES OF STRENGTH CLASS K60 (X70)

The aim of the study is to determine the influence of welding thermal cycles on the structural-phase transformations and mechanical properties of K60 (X70) strength class pipe steel.

Due to the complex morphology and narrow width of the heat-affected zone (HAZ), the assessment of changes in the metal structure was performed using welding thermal cycle simulation, which allows investigating the influence of heat input without conducting the actual welding process.

The specimens were heated at a rate of 260 °C/s to 1350 °C and cooled within the range of 0.2–200 °C/s. Based on the dilatometric curves, a continuous cooling transformation (CCT) diagram of supercooled austenite decomposition was constructed. It showed that the dominant transformation in the investigated steel is bainitic, whereas ferritic transformation is observed only at low cooling rates. At cooling rates up to 5 °C/s, polygonal ferrite forms along the grain boundaries, indicating potentially low impact toughness. In the range up to 10 °C/s, granular bainite (upper bainite) is formed, while at 10–30 °C/s — acicular bainite (lower bainite). At rates exceeding 30 °C/s, lath bainite with dispersed MA constituents forms. The prior austenite grain size decreases as the cooling rate increases.

It was established that the HAZ microstructure significantly determines the toughness properties of the steel: granular bainite is characterized by low misorientation and inferior impact toughness, while acicular and lath bainite provide improved mechanical characteristics.

To achieve optimal properties under industrial conditions, it is recommended to maintain a cooling rate of 10–20 °C/s by intensifying cooling and reducing the welding heat input.

Keywords: *High-strength pipe steel; X70 steel; heat-affected zone (HAZ); welding thermal cycle simulation; CCT diagram; phase transformations; bainite structure; cooling rate; impact toughness.*

Стаття надійшла 04.12.2025р.

ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО ХРОМОМАРГАНЦЕВОГО НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ З МЕТАСТАБІЛЬНИМ АУСТЕНІТОМ МЕТОДОМ РЕГРЕСІЙНОГО АНАЛІЗУ

Наведено результати комплексного дослідження та оптимізації хімічного складу низьковуглецевого наплавленого металу на Fe-Cr-Mn-C-N-Ni основі методом багатofакторного регресійного аналізу. У роботі використано центральний композиційний план другого порядку 2^{5-1} з додаванням зіркових точок, що включає 31 експериментальний склад з 5 повторами в центрі плану для оцінки помилки експерименту. Визначаються вмістом вуглецю (0,10–0,25 %), хрому (10–16 %), марганцю (10–16 %), азоту (0,02–0,08 %) та нікелю (0–4 %). Наплавка здійснювалася порошковими дроти діаметром 3,6–4,0 мм в три шари під флюсом АН-26 на пластини товщиною 30 мм зі сталі 09Г2С при строго контрольованих режимах: сила струму 350 ± 5 А, напруга 32–33 В, температура 38 ± 1 м. Після наплавлення всі зразки піддавали відпустці при 650 ± 10 °С протягом 1 години з подальшим охолодженням на повітрі для активізації динамічного мартенситного деформаційного перетворення (ДДМП).

Отримано статистично значущі математичні моделі другого порядку ($R^2 = 0,91–0,96$, $adjusted\ R^2 = 0,87–0,94$, $p < 0,001$), що встановлюють кількісні залежності зносостійкості при сухому терті (ϵ_1), абразивному (ϵ_2 6-А), процедура (ϵ_3 , $K_d = 2,2$) зношуванні від вмісту легуючих елементів. Проведено крос-валідацію моделей методом *leave-one-out*, що показала середню помилку прогнозування не більше 6,2%. Встановлено значний вплив всіх досліджених чинників та його парних взаємодій (C-Cr, C-Mn, C-N, Mn-Ni) на комплекс властивостей наплавленого металу. Показано, що азот є високоефективним легуючим елементом, що одночасно підвищує зносостійкість усіх типів на 8–12 % на кожні 0,01 % N, твердість на 1,4 HRC та ударну в'язкість на 2,1 Дж/см² завдяки дисперсійному твердінню дрібними карбонитридами (50–20). Нікель суттєво підвищує ударну в'язкість (до 95 ± 5 Дж/см²) та ударно-абразивну зносостійкість, маючи оптимальний вміст 2–3 % при балансі між в'язкістю та економічністю.

На підставі отриманих регресійних моделей з урахуванням обмежень щодо технологічної міцності (відсутність тріщин), оброблюваності ($HRC \leq 35$) та в'язкості ($KCU \geq 60$ Дж/см²) визначено три оптимальні склади: для сухого тертя ($\epsilon_1 = 4,9 \pm 0,3$, що на 1 14X12Г12СТ), універсальний економічний склад зі збалансованими властивостями, та склад для ударно-абразивного зношування ($\epsilon_3 = 3,2 \pm 0,2$, в 3,2 рази вище стали 110Г13Л). Перевірочні експерименти на незалежній вибірці з 5 складів підтвердили адекватність моделей (розбіжність розрахунків-експеримент трохи більше 8 %). Всі оптимізовані склади показали відсутність тріщин при наплавленні без попереднього підігріву та високу технологічну міцність.

Ключові слова: Наплавлений метал, метастабільний аустеніт, регресійний аналіз, зносостійкість, TRIP-ефект, оптимізація складу, азот, нікель, динамічне деформаційне мартенситне перетворення.

Постановка проблеми. Підвищення довговічності деталей машин та механізмів, що працюють в умовах інтенсивного зношування, є актуальним завданням ресурсозбереження.

Одним з ефективних способів зміцнення швидкозношуваних деталей є електродугове наплавлення порошковими дротами зносостійкого шару.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перспективним напрямком є застосування низьковуглецевих хромомарганцевих наплавних матеріалів, що забезпечують отримання в структурі метастабільного аустеніту, що перетворюється на мартенсит при навантаженні в процесі експлуатації. Цей ефект, відомий як TRIP (Transformation-Induced Plasticity), був вперше описаний в 1967 [1] і активно досліджується в контексті сучасних високоміцних сталей [2, 3].

Фізичною основою TRIP-ефекту є низька енергія дефектів упаковки (SFE – stacking fault energy) метастабільного аустеніту, що забезпечує легкість зародження та зростання мартенситних кристалів під впливом прикладених напруг [4]. Критична роль SFE у контролі механізмів деформації (ковзання, мартенситне перетворення) детально обговорюється у роботах [5, 6] для TRIP/TWIP сталей автомобільного призначення.

Азот як легуючий елемент в аустенітних сталях відіграє особливу роль, одночасно підвищуючи міцність через твердорозчинне та дисперсійне зміцнення, стабілізуючи аустеніт та знижуючи SFE [7, 8]. Роботи [9] показали, що азот у кількості 0,05–0,15 % може замінити частину вуглецю в Cr-Mn аустенітних сталях, забезпечуючи краще поєднання міцності та пластичності. Однак у процесах дугового наплавлення контроль азоту утруднений через його часткові втрати через дугу і зварювальну ванну [10].

Розроблений раніше порошковий дріт ПП-Нп 14Х12Г12СТ (~0,14 % С, 12 % Cr, 12 % Mn) показав високу ефективність при відновленні кранових коліс та інших деталей [11, 12]. У порівнянні з традиційними наплавними матеріалами типу ПП-АН 101 (Fe-27Cr-2,5C-4Ni-2Si) і високомарганцевими складами типу 110Г13Л, низьковуглецеві Cr-Mn склади забезпечують унікальне поєднання зносостійкості, оброблюваності різанням і відсутності.

Однак можливості подальшого підвищення зносостійкості за рахунок оптимізації хімічного складу з урахуванням ролі азоту та нікелю вивчені недостатньо. Зокрема, відсутні кількісні дані щодо комплексного впливу п'яти ключових елементів (C, Cr, Mn, N, Ni) на зносостійкість у різних умовах зношування з використанням статистично обґрунтованих методів планування експерименту.

Мета дослідження. Визначити методом регресійного аналізу кількісні залежності зносостійкості низьковуглецевого хромомарганцевого наплавленого металу від хімічного складу та оптимізувати його стосовно різних умов експлуатації.

Основний матеріал дослідження. Об'єктом досліджень був наплавлений метал, отриманий способом дугового наплавлення порошковими дротиками. Для дослідних робіт виготовлялися порошкові дрони діаметром 3,6–4,0 мм (коефіцієнт заповнення 35–38%) з оболонкою із сталі 08кп завтовшки 0,3 мм. Сердечник складався з суміші порошкових компонентів: хрому металевого (99,5 % Cr, фракція < 100 мкм), марганцю металевого (98 % Mn, фракція < 150 мкм), нікелю порошкового (99,8 % Ni, фракція < 63 мкм), ферованадію азот графіту (99% C, фракція < 50 мкм), порошку залізного (ПЗ-4, < 160 мкм). Розрахунок шихти виконувався з урахуванням коефіцієнтів засвоєння елементів під час дугового наплавлення під флюсом: C – 0,95, Cr – 0,90, Mn – 0,82, Ni – 0,98, N – 0,35–0,45, V – 0,88.

Наплавку проводили у три шари під флюсом АН-26 на пластини розміром 250×70×30 мм із сталі 09Г2С (0,09 % C, 1,8 % Mn, 0,8 % Si, бал зерна 7–8). Режим наплавлення строго контролювався: сила струму $I = 350 \pm 5$ А, напруга $U = 32-33$ (вимірювалося цифровим мультиметром), швидкість наплавлення $V = 38 \pm 1$ м/год (контролювалася за довжиною і часом проходу), виліт електрода 35–40 мм. Проходи виконували після остигання до температури не вище 180 ° С (контроль контактним термометром). Перекриття валиків становило 50%. Міжпрохідна пауза: 3-5 хвилин між валиками, 8-12 хвилин між шарами.

Розрахункове тепловкладання складо $Q = (U \times I \times 60) / v = (32,5 \times 350 \times 60) / (38 \times 100/60) \approx 10,8$ кДж/см, що забезпечувало помірний термічний цикл та мінімізацію зростання зерна.

Після наплавлення усі зразки піддавалися відпуску в електропечі SNOOL при температурі 650 ± 10 °С (контроль термопарою ХА типу К) з витримкою 1 годину та подальшим охолодженням на спокійному повітрі (швидкість охолодження $650 \rightarrow 400$ °С становила ~ 50 - 80 °С/хв). Цей режим термообробки, як показано раніше [12], забезпечує дисперсійне твердіння карбонитридами та активізацію динамічного деформаційного мартенситного перетворення (ДДМП).

Хімічний аналіз та контроль розведення. Хімічний склад наплавленого металу визначався методом оптичної емісійної спектроскопії (спектрометр SPECTROMAXx) на зразках, вирізаних із третього шару наплавленого. Азот визначався методом газового аналізу на аналізаторі LECO ONH836 (метод інертного газу з плавленням). До кожного складу виконувалося щонайменше 3 виміри з усередненням результатів.

Розведення основним металом розраховувалося за формулою:

$$\eta = (A_{\text{осн}} \times N_{\text{пр}}) / (A_{\text{пр}} \times (N_{\text{пр}} + N_{\text{напл}})) \times 100 \% \quad (1)$$

де $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{пр}}$ – площі перерізу проплавленого основного металу та дроту (за металографією поздовжніх шліфів), $N_{\text{пр}}$, $N_{\text{напл}}$ – глибина проплавлення та висота наплавленого валика.

Для першого шару розведення становило 22-28%, для другого шару 8-12%, для третього шару менше 5%. Фактичний хімічний склад третього шару відрізнявся від розрахункового не більше ніж: $\pm 0,02$ % для С, $\pm 0,5$ % для Cr та Mn, $\pm 0,01$ % для N, $\pm 0,15$ % для Ni.

План експерименту. Для досліджень методом багатофакторного експерименту використовувався центральний композиційний план (ЦКП) другого порядку 2^{5-1} з додаванням зіркових точок. Факторами, що варіюються, були обрані змісту: вуглецю (x_1), хрому (x_2), марганцю (x_3), азоту (x_4) і нікелю (x_5). Рівні та інтервали варіювання факторів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	Позначення	Основний рівень ($x=0$)	Інтервал (Δx)	Нижній рівень ($x=-1$)	Верхній рівень ($x=+1$)	Зоряні точки ($x=\pm 1,5$)
С, %	x_1	0,175	0,075	0,10	0,25	0,0625/0,2875
Cr, %	x_2	13	3,0	10,	16,0	8,5/17,5
Mn, %	x_3	13	3,0	10,	16,0	8,5/17,5
N, %	x_4	0,05	0,03	0,02	0,08	0,005/0,095
Ni, %	x_5	2,0	2,0	0,0	4,0	0*/5,0

* Для Ni нижня зіркова точка -1,0% фізично неможлива, тому використано мінімум 0%.

Для математичної обробки результатів експерименту значення факторів прийняті у кодованому вигляді згідно з формулами (2):

$$x_1 = (C - 0,175) / 0,075; x_2 = (Cr - 13,0) / 3,0; x_3 = (Mn - 13,0) / 3,0; x_4 = (N - 0,05) / 0,03; x_5 = (Ni - 2,0) / 2,0 \quad (2)$$

Матриця планування експерименту включала:

- 16 точок дробового факторного плану 2^{5-1} (генератор $I = x_1 x_2 x_3 x_4 x_5$)
- 10 зіркових точок ($\pm 1,5$ по кожній осі)
- 5 дослідів у центрі плану для оцінки помилки експерименту

Разом: 31 експеримент.

Методики випробування: Рентгеноструктурний аналіз. Фазовий склад визначався на дифрактометрі ДРОН-4 Cu-K α випромінюванні ($\lambda = 1,54178$ Å) при напрузі 30 кВ і струмі 20 мА. Зйомка проводилася в діапазоні кутів $2\theta = 40$ - 100° з кроком $0,05^\circ$ та експозицією 3 с у точці. Кількість аустеніту і мартенситу розраховувалося методом прямого порівняння

інтегральних інтенсивностей дифракційних максимумів $(111)\gamma$, $(200)\gamma$, $(220)\gamma$, $(200)\alpha'$, $(211)\alpha'$ [14]. Помилка визначення фазового складу не перевищувала $\pm 3\%$.

Кількість магнітної α' -фази (мартенситу) також контролювалося магнітним методом за допомогою приладу ФА-1М за величиною струму відриву зонда. Калібрування проводилося за еталонними зразками з відомим вмістом мартенситу (певним рентгенівським методом). Порівняння двох методів показало їх хороший збіг (розбіжність трохи більше 4 %).

Твердість. Визначалася за методом Роквелла (HRC) на твердомірі ТК-2М (навантаження 150 кгс, алмазний конус 120°) або за методом Брінелля (HB) на твердомірі ТШ-2М (навантаження 187,5 кгс, кулька $\varnothing$ 2,5 мм) для зразків. Для кожного зразка виконувалося не менше 5 вимірювань з відкиданням викидів та усередненням. Конверсія HB $\leftrightarrow$ HRC проводилася за стандартними таблицями ASTM E140.

Мікроструктура. Дослідження проводилися на оптичному мікроскопі Neophot-32 та електронному мікроскопі JSM-6490LV. Кількісний аналіз вмісту карбідної/нітридної фази проводився точковим методом на 10 полях зору зі збільшенням $\times 500$ з використанням сітки 100 точок. Розмір зерна аустеніту визначався за методом січення згідно ASTM E112.

Ударна в'язкість. Визначалася на копрі МК-30А на стандартних зразках $10 \times 10 \times 55$ мм з V-подібним надрізом глибиною 2 мм і радіусом 0,25 мм. Для кожного складу випробовувалося 3 зразки за кімнатної температури (20 ± 2 °C). Додатково оцінювався приріст кількості мартенситу після ударного руйнування методом рентгеноструктурного аналізу поверхні зламу для характеристики активності ДДМП.

Зносостійкість при сухому терті (ε_1). Визначалася за методикою випробувань на встановленні М1-М за схемою колодка-ролик. Зразки-колодки розміром $10 \times 10 \times 25$ мм притискалися до ролика, що обертається $\varnothing$ 50 мм з рейкової сталі М76 з твердістю 320 ± 10 HB. Параметри випробувань: навантаження $P = 200$ Н, швидкість ковзання $v = 0,5$ м/с (частота обертання ролика 190 об/хв), шлях тертя $L = 1000$ м (час випробування 33 хв) без мастила. Еталоном порівняння служила сталь 45 у відпаленому стані з твердістю 200 ± 10 HB. Зразки зважувалися до і після випробування на аналітичних терезах з точністю 0,1 мг. Відносна зносостійкість ε_1 визначали як:

$$\varepsilon_1 = (\Delta m_{\text{эт}}) / (\Delta m_{\text{обр}}) \quad (3)$$

де $\Delta m_{\text{эт}}$, $\Delta m_{\text{обр}}$ – вагові втрати еталона та зразка, р. Для кожного складу випробовувалося 2 зразки із усередненням результатів.

Абразивна зносостійкість (ε_2). Визначалася відповідно до методики стандарту ASTM G65-16, процедура А (сухий пісок/гумова колесо). Зразки розміром $25 \times 75 \times (6-12)$ мм притискалися із зусиллям $F = 130$ Н до гумового диска, що обертається (твердість 60 ± 5 Shore А, діаметр 228,6 мм, ширина 12,7 мм). Між диском та зразком подався кварцовий пісок AFS 50-70 (розмір зерен 0,21-0,30 мм) з витратою 300-400 г/хв. Параметри випробувань: швидкість обертання диска 200 об/хв, кількість обертів 6000 (шлях ковзання 4309 м), загальний час випробування 30 хвилин. Зношування здійснювалося без ударних навантажень (коефіцієнт динамічності $K_d \approx 1,0$). Еталон - сталь 45 (200 HB). Зразки зважувалися до та після випробування. Відносна зносостійкість:

$$\varepsilon_2 = (\Delta m_{\text{эт}}) / (\Delta m_{\text{обр}}) \quad (4)$$

Ударно-абразивна зносостійкість (ε_3). Визначалася за методикою випробувань у барабані, що обертається [15]. Зразки розміром $40 \times 40 \times 10$ мм закріплювалися на внутрішній поверхні порожнистого барабана $\varnothing$ 300 мм. Місткість барабана на 25 % об'єму (15 л) завантажувалася шматками абразивних корундових кіл (твердість CM1-CM2, фракція 20-40 мм, загальна маса 9 кг) і сталевими кулями $\varnothing$ 30-40 мм (загальна маса 3,5 кг, що становило 15

Машинобудування і зварювальне виробництво

%). Швидкість обертання барабана 46 об/хв (окружна швидкість 0,72 м/с), час випробування 6 годин із заміною абразиву через кожні 2 години. При цьому робоча поверхня зазнає значних ударних навантажень, що характеризуються коефіцієнтом динамічності $K_d = 2,2$ (визначеним за методикою [15] через зміцнення сталі 110Г13Л). Еталоном служила сталь 110Г13Л (лита, вихідна твердість 180-200 НВ). Відносну зносостійкість ε_z оцінювали за формулою (5):

$$\varepsilon_z = (P_{\text{эт}} / S_{\text{эт}}) / (P_{\text{обр}} / S_{\text{обр}}) \quad (5)$$

де $P_{\text{эт}}$, $P_{\text{обр}}$ – втрати ваги еталона та зразка після 6 годин випробувань, г; $S_{\text{эт}}$, $S_{\text{обр}}$ – площі зношеної поверхні зразка та зразка, мм². Для кожного складу випробовувалося 2 зразки.

Статистична обробка результатів

Рівняння регресії мали вигляд полінома другого порядку (6):

$$y = b_0 + \sum b_i \cdot x_i + \sum b_{ij} \cdot x_i x_j + \sum b_{ii} \cdot x_i^2 \quad (6)$$

де y – досліджувана властивість; x_i – кодовані значення факторів; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – коефіцієнти регресії.

• Обробка експериментальних даних проводилася у програмі Statistica 10.0 із використанням модуля Multiple Regression. Коефіцієнти регресії розраховувалися шляхом найменших квадратів. Значимість коефіцієнтів оцінювалася за t-критерієм Стюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$. Незначні коефіцієнти ($p > 0,05$) виключалися з моделі. Адекватність моделей перевірялася за F-критерієм Фішера.

Якість моделей оцінювалася за такими показниками:

- R^2 (coefficient of determination) – частка поясненої дисперсії
- Adjusted R^2 – скоригований R^2 з урахуванням кількості параметрів
- RMSE (root mean square error) – середньоквадратична помилка
- Lack-of-fit test – тест на адекватність (порівняння залишкової дисперсії з дисперсією помилки експерименту з 5 дослідів у центрі плану)

Кросвалідація проводилася методом leave-one-out (LOO): щоразу один експеримент виключався з навчальної вибірки, модель перераховувалася на 30 експериментах, що залишилися, і робився прогноз для виключеного. Середньоквадратична помилка прогнозування (RMSECV) розраховувалася як:

$$\text{RMSECV} = \sqrt{(\sum (y_i - \hat{y}_{i(-)})^2 / n)} \quad (7)$$

де y_i – експериментальне значення, $\hat{y}_{i(-)}$ – прогноз моделі без i-го експерименту.

Додатково було проведено незалежну валідацію на 5 складах, що не входять до матриці планування, для остаточної перевірки передбачуваної спроможності моделей.

Результати досліджень: Фазовий склад та мікроструктура. Рентгенофазовий аналіз показав, що у всіх досліджених зразках наплавленого металу після відпустки при 650 °С фазовий склад включав у різних співвідношеннях аустеніт (γ -фаза, ГЦК грати), мартенсит (α' -фаза, ОЦК грати), карбіди типу $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_7$ ($\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ (кубічні грати), а також карбонітриди на основі титану та ванадію ($\text{Ti}, \text{V})(\text{C}, \text{N})$ (кубічні грати типу NaCl).

Кількість метастабільного аустеніту варіювалася від 65% (склад: 0,25% С, 10% Cr, 10% Mn, 0,02% N, 0% Ni) до 88% (склад: 0,10% С, 16% Cr, 16% Mn, 0,08% N, 4 Кількість вихідного мартенситу змінювалося відповідно від 25 до 5%. Параметр грат аустеніту варіювався в діапазоні $a_\gamma = 3,594\text{--}3,608 \text{ \AA}$ залежно від вмісту легуючих елементів.

Мікроструктурні дослідження виявили, що у всіх зразках після відпустки при 650 °С формується переважно аустенітна структура з дисперсними виділеннями карбідів та карбонітридів. Розмір виділень варіювався в діапазоні 0,05–0,5 мкм залежно від хімічного складу: більш високий вміст азоту та ванадію призводило до утворення найдрібніших частинок (50–150 нм). Кількість зміцнюючої фази (карбіди + карбонітриди) варіювалася від 8% (низький С та N) до 22% (високий С та N). Розмір аустенітного зерна становив 25–45 мкм (бал зерна 6–8 за ASTM E112) залежно від хімічного складу: підвищення вмісту титану та азоту сприяло подрібненню зерна до 25–30 мкм.

Карбіди розташовувалися переважно всередині аустенітних зерен у вигляді дисперсних частинок, а також меншою мірою по межах зерен. Важливо відзначити, що навіть при максимальному вмісті вуглецю (0,25 %) не спостерігалось утворення безперервних карбідних сіток за межами зерен, що характерно для високовуглецевих складів (>0,8 % С) при відпустці 650 °С. Це пояснює відсутність катастрофічного крихтіння у дослідженому діапазоні складів.

Регресійні моделі. На підставі обробки отриманих експериментальних даних визначено регресійні залежності для наступних властивостей наплавленого металу після відпустки при 650 °С: кількість магнітної фази М (%), твердість HRC, відносна зносостійкість ε_1 , ε_2 і ε_3 , ударна в'язкість KCU (Дж/см²)

Значні коефіцієнти регресії в рівняннях, їх статистичні характеристики та показники якості моделей представлені у таблицях 2 та 3.

Таблиця 2 – Коефіцієнти регресії та їх статистична значимість

Коэф.	М, %	p-value	HRC	p-value	ε_1	p-value	ε_2	p-value	ε_3	p-value	KCU, Дж/см ²	p-value
b ₀	22,4	<0,001	30,2	<0,001	4,25	<0,001	2,68	<0,001	2,15	<0,001	82,5	<0,001
b ₁ (C)	-4,2	<0,001	4,8	<0,001	1,15	<0,001	0,82	<0,001	0,35	0,002	-8,2	0,001
b ₂ (Cr)	-3,8	<0,001	-0,9	0,048	-0,11	0,042	0,14	0,018	0,18	0,008	1,4	0,231
b ₃ (Mn)	-8,4	<0,001	-2,8	<0,001	-0,28	<0,001	-0,15	0,015	0,31	<0,001	5,8	<0,001
b ₄ (N)	-2,1	0,004	1,4	0,003	0,24	0,01	0,19	0,004	0,12	0,026	2,1	0,042
b ₅ (Ni)	-1,9	0,008	-0,6	0,186	-0,08	0,148	0,09	0,089	0,26	<0,001	6,4	<0,001
b ₁₂ (C×Cr)	2,1	0,006	1,9	0,001	0,21	0,003	0,16	0,012	0,13	0,032	-	-
b ₁₃ (C×Mn)	2,3	0,003	1,2	0,014	0,18	0,008	-0,12	0,044	-0,14	0,019	-3,1	0,009
b ₁₄ (C×N)	-	-	1,1	0,021	0,14	0,019	0,11	0,058	-	-	-	-
b ₃₄ (Mn×N)	1,8	0,014	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
b ₃₅ (Mn×Ni)	-	-	-	-	-	-	-	-	0,15	0,039	2,8	0,016
b ₁₁ (C ²)	-	-	-	-	-	-	-0,19	0,022	-	-	-	-
b ₃₃ (Mn ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,21	0,08	-	-
b ₅₅ (Ni ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,16	0,028	-	-

Примітка: "-" означає, що коефіцієнт статистично незначний (p>0,05) і виключений з моделі. М – кількість вихідного мартенситу; ΔМ – приріст мартенситу після зношування (показник активності ДДМП).

Таблиця 3 – Статистичні показники якості регресійних моделей

Показник	М, %	HRC	ε_1	ε_2	ε_3	KCU, Дж/см ²	ΔМ, %
R ²	0,948	0,936	0,952	0,918	0,941	0,912	0,906
Adjusted R ²	0,932	0,921	0,938	0,896	0,925	0,891	0,88
RMSE	1,24	1,18	0,142	0,098	0,084	4,62	1,58
RMSECV (LOO)	1,38	1,29	0,158	0,112	0,095	5,21	1,74
F-статистика	59,8	62,4	68,2	41,6	58,9	43,2	41,8
p-value (модель)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Lack-of-fit p-value	0,312	0,428	0,384	0,267	0,341	0,298	0,256

RMSECV – середньоквадратична помилка кросвалідації методом leave-one-out. Lack-of-fit p-value > 0,05 вказує на адекватність моделі (залишкова дисперсія не перевищує дисперсію помилки експерименту).

Високі значення R^2 (0,906–0,952) та adjusted R^2 (0,884–0,938) вказують на те, що побудовані моделі пояснюють 88–95 % мінливості досліджуваних властивостей. Різниця між R^2 та adjusted R^2 становить 1,4–2,8 %, що свідчить про відсутність надмірної кількості параметрів у моделях. Значення F-статистики (41,6-68,2) з $p < 0,001$ підтверджують високу статистичну значущість усіх моделей.

Крос-валідація методом leave-one-out показала, що середня помилка прогнозування (RMSECV) становить 4,8–11,4 % середнього значення властивості, що є прийнятним для такого типу досліджень. Найбільшу передбачальну здатність мають моделі для твердості HRC (RMSECV/середнє = 4,3%) та зносостійкості ε_1 (RMSECV/середнє = 3,7%).

Тести на адекватність (lack-of-fit) дали p-values у діапазоні 0,256-0,428, що значно перевищує критичний рівень 0,05. Це означає, що залишкова дисперсія моделей не перевищує дисперсію чистої помилки експерименту, визначену за 5 повторами в центрі плану, і моделі адекватно описують експериментальні дані.

Незалежна валідація. Для остаточної перевірки передбачуваної здатності моделей були виготовлені та випробувані 5 додаткових складів, що не входять до матриці планування (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати незалежної валідації моделей

№	C, %	Cr, %	Mn, %	N, %	Ni, %	Властивість	Розрахунок	Експеримент	Помилка, %
V1	0,12	11,0	14,0	0,04	1,5	ε_3	2,48	2,62	5,3
V2	0,20	15,0	11,0	0,07	0,5	ε_1	4,82	4,67	3,2
V3	0,17	12,0	15,0	0,06	3,5	KCU	91,2	88,4	3,2
V4	0,15	14,0	12,5	0,055	2,0	HRC	31,1	30,6	1,6
V5	0,22	13,5	10,5	0,065	1,0	ε_2	3,08	3,21	4,00

Середня абсолютна помилка прогнозування на незалежній вибірці склала 3,5%, максимальна – 5,3%, що підтверджує високу надійність побудованих моделей та їх застосовність для оптимізації складів наплавних матеріалів.

Аналіз впливу легуючих елементів: Вплив вуглецю. Вуглець має найбільший вплив на твердість ($b_1 = 4,8$, $p < 0,001$) та зносостійкість при сухому терті ($b_1 = 1,15$, $p < 0,001$). Підвищення вмісту вуглецю від 0,10 до 0,25 % збільшує твердість на 9,6 HRC та зносостійкість ε_1 на 2,3 одиниці (на 54 %). Це зумовлено збільшенням кількості карбідної фази з 8% до 18% за даними кількісної металографії.

Одночасно вуглець стабілізує аустеніт, знижуючи кількість вихідного мартенситу ($b_1 = -4,2$, $p < 0,001$). Кожні 0,1% вуглецю знижують частку мартенситу на 5,6% абсолютних. Це з зниженням температури мартенситного перетворення M_s на ~ 40 -50 °З відповідно до рівнянню Andrews. Однак зниження вихідного мартенситу не означає втрати здатності до деформаційного перетворення - навпаки, стабільніший аустеніт активніше перетворюється при навантаженні, що підтверджується позитивними коефіцієнтами для приросту мартенситу M .

Важливо відзначити, що у дослідженому низьковуглецевому діапазоні (0,10-0,25 %) не спостерігалось катастрофічного крихтіння, характерного для високовуглецевих складів (>0,8 % C) при відпустці 650 °С. Ударна в'язкість знижується помірно ($b_1 = -8,2$, $p = 0,001$) зі збільшенням вуглецю, але залишається на прийнятному рівні вище 60 Дж/см² для всіх складів. При максимальному вмісті вуглецю 0,25 % KCU становить 66 ± 4 Дж/см², що значно перевищує типові високовуглецеві наплавки типу ПП-АН 101 (15–25 Дж/см²).

Наявність значних парних взаємодій C-Cr ($b_{12} = 1,9$, $p = 0,001$ для HRC) і C-Mn ($b_{13} = 1,2$, $p = 0,014$ для HRC) вказує на синергетичний ефект: вплив вуглецю на твердість посилюється

при підвищеному вмісті. Це пояснюється збільшенням кількості карбідів хрому та марганцю при одночасному підвищенні їх вмісту.

Вплив хрому. Хром має слабкий та неоднозначний вплив на твердість ($b_2 = -0,9$, $p = 0,048$), що пов'язано з компенсацією двох різноспрямованих ефектів: збільшення частки аустеніту (м'яка фаза) та збільшення кількості твердих карбідів хрому. При низькому вмісті вуглецю (0,10 %) хром знижує твердість на 1,2 HRC при підвищенні з 10 до 16 %, а за високого вуглецю (0,25 %) – навпаки, підвищує на 2,4 HRC завдяки парній взаємодії C–Cr.

Підвищення вмісту хрому від 10% до 16% позитивно впливає на ударно-абразивну зносостійкість ($b_2 = 0,18$, $p = 0,008$), збільшуючи ε_3 на 0,36 одиниці (на 17%). Це пов'язано зі збільшенням об'ємної частки високотвердих карбідів хрому $(Cr, Fe)_7C_3$ (мікротвердість 1200-1500 HV) і $(Cr, Fe)_{23}C_6$ (мікротвердість 1000-1200 HV), які ефективно опираються ударно-абра.

Для абразивної зносостійкості ε_2 вплив хрому також позитивний ($b_2 = 0,14$, $p = 0,018$), хоча і менш виражений, ніж для ε_3 . Цікаво, що для сухого тертя вплив хрому слабо негативний ($b_2 = -0,11$, $p = 0,042$), що може бути пов'язане зі збільшенням частки м'якого аустеніту, менш ефективного при дряпанні та мікрорізанні без ударних навантажень.

Хром практично не впливає на ударну в'язкість ($b_2 = 1,4$, $p = 0,231$ – статистично незначний), що підтверджує відсутність хрумкої дії хрому в дослідженому діапазоні 10–16 % для низьковуглецевих складів.

Вплив марганцю. Марганець є сильним стабілізатором аустеніту, що проявляється у значному зниженні кількості мартенситу ($b_3 = -8,4$, $p < 0,001$). Підвищення вмісту марганцю від 10 до 16 % знижує частку вихідного мартенситу на 16,8 % абсолютних, що відповідає зниженню $M_s \sim 90-100$ °C. Кожен відсоток марганцю знижує M_s приблизно на 30 °C відповідно до рівняння Andrews, що узгоджується з отриманими даними.

Підвищення вмісту марганцю знижує твердість ($b_3 = -2,8$, $p < 0,001$) за рахунок збільшення частки м'якого аустеніту, але позитивно впливає на ударно-абразивну зносостійкість ($b_3 = 0,31$, $p < 0,001$) і ударну в'язкість ($b_3 = .$ У разі підвищення марганцю з 10 до 16 % зносостійкість ε_3 збільшується на 0,62 одиниці (на 29 %), а ударна в'язкість – на 11,6 Дж/см² (на 14 %). З ударно-абразивному навантаженні важливіша здатність матеріалу поглинати енергію удару через пластичну деформацію і деформаційне мартенситне перетворення, ніж вихідна твердість.

Наявність негативного квадратичного члена $b_{33} = -0,21$ ($p = 0,008$) для ε_3 свідчить про існування оптимуму по марганцю. Диференціювання рівняння регресії для ε_3 по x_3 та прирівнювання похідної до нуля дає оптимальний вміст марганцю:

$$Mn_{opt} = 13,0 + 3,0 \times (0,31 - 0,14x_1 + 0,15x_5) / (2 \times 0,21) \approx 13-14 \% \quad (8)$$

залежно від вмісту вуглецю та нікелю. При низькому вуглеці та наявності нікелю оптимум зміщується до 14–15 % Mn, за високого вуглецю – до 12–13 % Mn.

Парне взаємодія C-Mn (b_{13}) значимо більшість властивостей. Для твердості HRC ця взаємодія є позитивною ($b_{13} = 1,2$, $p = 0,014$), вказуючи на те, що при високому вуглеці вплив марганцю на зниження твердості послаблюється за рахунок збільшення кількості карбідів. Для зносостійкості ε_3 взаємодія C-Mn негативна ($b_{13} = -0,14$, $p = 0,019$), що вказує на необхідність зниження марганцю при підвищенні вуглецю для досягнення максимальної ударно-абразивної зносостійкості.

Вплив азоту. Азот проявляє себе як високоефективний легуючий елемент, що одночасно підвищує зносостійкість при всіх типах зношування: $b_4 = 0,24$ ($p = 0,001$) для ε_1 , $b_4 = 0,19$ ($p = 0,004$) для ε_2 , $b_4 = 0$. Підвищення вмісту азоту від 0,02 до 0,08% (на 0,06% абсолютних) збільшує зносостійкість на 8-12% залежно від типу зношування.

Це зумовлено кількома механізмами:

1. Дисперсійне твердіння за рахунок утворення дрібних карбонітридів (Ti, V)(C,N) розміром 50-200 нм за даними електронної мікроскопії. Ці частинки створюють ефективні бар'єри руху дислокацій, підвищуючи межу плинності матриці на 40–60 МПа на кожні 0,01 % N.

2. Твердорозчинне зміцнення аустеніту. Азот, розчиняючись у міжвузлях ГЦК решітки аустеніту (аналогічно вуглецю), створює пружні спотворення решітки та підвищує опір пластичної деформації. Ефективність азоту в зміцненні аустеніту в ~1,5 рази вище, ніж вуглецю [16].

3. Стабілізація аустеніту. Азот знижує температуру мартенситного перетворення M_s приблизно на 15–20 °C на кожні 0,01 % N, що можна порівняти з ефектом 0,03–0,04 % вуглецю. Це підтверджується коефіцієнтом $b_4 = -2,1$ ($p = 0,004$) кількості вихідного мартенситу M .

4. Зниження енергії дефектів пакування (SFE). Роботи [9] показали, що азот в аустенітних сталях знижує SFE з ~25-30 мДж/м² до ~15-20 мДж/м², що полегшує деформаційне двійниковання та мартенситне $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення. Це пояснює позитивний вплив азоту на приріст мартенситу деформації M ($b_4 = 1,6$, $p = 0,018$).

Азот підвищує твердість ($b_4 = 1,4$, $p = 0,003$) та ударну в'язкість ($b_4 = 2,1$, $p = 0,042$) одночасно, що є рідкісним та цінним ефектом. Зазвичай елементи, що підвищують твердість, знижують в'язкість і навпаки. Азот забезпечує поєднання високої міцності (через дисперсійне твердіння) та високої пластичності/в'язкості (через стабілізацію аустеніту та активізацію TRIP).

Парна взаємодія C-N ($b_{14} = 1,1$, $p = 0,021$ для HRC) позитивно, вказуючи на синергетичний ефект цих двох інтерстиційних елементів у зміцненні аустеніту. Спільне легування 0,18 % C + 0,07 % N дає твердість на 1,5–2 HRC вище, ніж можна було б очікувати із суми індивідуальних ефектів.

Взаємодія Mn-N ($b_{34} = 1,8$, $p = 0,014$ для M) також позитивно, що пояснюється тим, що марганець підвищує розчинність азоту в аустеніті та сприяє утворенню стабільнішого твердого розчину (Mn,Fe)-N. Це посилює стабілізуючий ефект обох елементів.

Важливо, що азот є технологічно складним елементом для контролю при дуговій наплавці. Коефіцієнт засвоєння азоту варіювався від 35% до 45% залежно від режимів наплавлення та типу флюсу. При високих струмах (>400 А) та довгій дузі втрати азоту досягали 60-65%, що вимагало коригування складу шихти. Для стабілізації азоту використовувався феррованадій азотований (5-7% N), в якому азот пов'язаний з ванадієм у вигляді нітридів і більш стійкий до випаровування, ніж вільний азот.

Вплив нікелю. Нікель стабілізує аустеніт, не утворюючи карбідів або нітридів (на відміну Cr, Mn, V, Ti), що призводить до "чистої" стабілізації без додаткового зміцнення виділеннями. Це проявляється у зниженні кількості вихідного мартенситу ($b_5 = -1,9$, $p = 0,008$) та слабкому зниженні твердості ($b_5 = -0,6$, $p = 0,186$ – статистично незначний на рівні $\alpha = 0,05$). Нікель знижує M_s приблизно на 17 °C на кожен відсоток змісту згідно з рівнянням Andrews.

Головна цінність нікелю проявляється у суттєвому підвищенні ударної в'язкості ($b_5 = 6,4$, $p < 0,001$) та ударно-абразивної зносостійкості ($b_5 = 0,26$, $p < 0,001$). Додавання 4 % нікелю (щодо складу без нікелю) збільшує KCU на 12,8 Дж/см² (на 15,5 %) та ϵ_z на 0,52 одиниці (на 24 %). Це пояснюється кількома факторами:

1. Підвищення пластичності аустеніту. Нікель знижує критичні зсувні напруги в аустеніті та підвищує його здатність до гомогенної пластичної деформації, що перешкоджає локалізації деформації та зародженню тріщин [17].

2. Гальмування зростання тріщин. Аустеніт який має у складі нікель має більш високу в'язкість руйнування, що уповільнює поширення тріщин при ударному навантаженні.

3. Оптимізація стабільності аустеніту для TRIP. Нікель у кількості 2–3 % у поєднанні з марганцем 12–14 % забезпечує оптимальну стабільність аустеніту: достатньо стабільний, щоб

не перетворюватися спонтанно при охолодженні, але є метастабільним для ефективного $\gamma \rightarrow \alpha'$ перетворення при ударному навантаженні. Це підтверджується позитивним коефіцієнтом $b_5 = 1,2$ ($p = 0,038$) для приросту мартенситу деформації М.

Наявність негативного квадратичного члена $b_{55} = -0,16$ ($p = 0,028$) для ε_3 свідчить про існування оптимуму по нікелю близько 2–3 %. При вмісті нікелю вище 4% аустеніт стає занадто стабільним, TRIP-ефект послаблюється і зносостійкість починає знижуватися. Це узгоджується з літературними даними для TRIP-сталей автомобільного призначення [6].

Парна взаємодія Mn-Ni ($b_{35} = 0,15$, $p = 0,039$ для ε_3 ; $b_{35} = 2,8$, $p = 0,016$ для KCU) позитивно, що свідчить про синергетичний ефект цих двох аустенітоутворюючих елементів. Спільне легування 14 % Mn + 3 % Ni забезпечує зносостійкість та в'язкість вище, ніж можна досягти, використовуючи лише марганець (16–18 %) або лише нікель (6–8 %). Це має важливе практичне значення для зниження вартості наплавних матеріалів, тому що часткова заміна дорогого нікелю недорогим марганцем економічно вигідна за збереження необхідних властивостей.

Приріст мартенситу деформації. Важливим показником активності ДДМП є приріст кількості мартенситу після зношування $\Delta M = M_{\text{після}} - M_{\text{вихідн}}$. За даними рентгеноструктурного аналізу зношених поверхонь, ΔM варіюється від 18 % (склад: 0,25 % C, 10 % Cr, 10 % Mn, 0,02 % N, 0 % Ni – найменш стабільний аустеніт) до 32 % (склад: 0,14 % C, 15 % C, 16 % Ni – оптимально стабільний аустеніт).

Регресійний аналіз показав, що найбільший приріст мартенситу спостерігається за:

- Помірний вміст вуглецю 0,14–0,18 % (негативний коефіцієнт $b_1 = -2,1$)
- Підвищений вміст хрому, марганцю, азоту та нікелю (усі коефіцієнти b_2, b_3, b_4, b_5 позитивні)

Це відповідає концепції оптимальної стабільності аустеніту для максимального TRIP-ефекту [2, 5]. Занадто нестабільний аустеніт (низький Mn, Ni, N, високий C) перетворюється на мартенсит ще при охолодженні після наплавлення або на початку навантаження, не даючи значного приросту ΔM . Занадто стабільний аустеніт (дуже високий Mn+Ni) взагалі не перетворюється при навантаженні. Оптимум досягається за проміжної стабільності, коли Ms знаходиться в діапазоні від -50 до +20 °C.

Встановлено хорошу кореляцію між приростом мартенситу ΔM та ударно-абразивною зносостійкістю ε_3 (коефіцієнт кореляції Пірсона $r = 0,78$, $p < 0,001$). Це підтверджує, що TRIP-ефект є головним механізмом підвищення зносостійкості при ударно-абразивному навантаженні досліджених низьковуглецевих складів.

Негативна парна взаємодія C-Mn ($b_{13} = -1,4$, $p = 0,041$) для М вказує на те, що при підвищенні вуглецю ефект марганцю в активізації TRIP послаблюється. Це пов'язано з тим, що вуглець сам є сильним стабілізатором, і додаткова стабілізація марганцем при високому C може призвести до надмірної стабільності аустеніту.

Оптимізація складів. На підставі аналізу отриманих регресійних моделей з урахуванням вимог до технологічної міцності (відсутність тріщин), оброблюваності різанням ($HRC \leq 35$) та ударної в'язкості ($KCU \geq 60$ Дж/см²) було визначено три оптимальні склади наплавленого металу для різних умов експлуатації.

Оптимізація проводилася методом нелінійного програмування з використанням цільової функції виду:

$$\Omega = w_1 \cdot \varepsilon_1 + w_2 \cdot \varepsilon_2 + w_3 \cdot \varepsilon_3 \rightarrow \max \quad (9)$$

при обмеженнях:

- $HRC \leq 35$
- $KCU \geq 60$ Дж/см²
- $0,10 \leq C \leq 0,25$

Машинобудування і зварювальне виробництво

- $10 \leq Cr \leq 16$
- $10 \leq Mn \leq 16$
- $0,02 \leq N \leq 0,08$
- $0 \leq Ni \leq 4$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що задають пріоритети різних типів зношування.

Результати оптимізації представлені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Оптимальні склади та розрахункові властивості наплавленого металу

Варіант	C, %	Cr, %	Mn, %	N, %	Ni, %	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	HRC	KCU, Дж/см ²	ΔM , %	Ваговий коеф. ($w_1: w_2: w_3$)
А	0,18	14,0	12,0	0,06	1,5	4,9	3,1	2,4	32,0	75,0	26,0	0,50:0,30:0,20
Б (універсал)	0,16	13,0	13,0	0,06	1,0	4,5	2,9	2,6	31,0	82,0	27,0	0,33:0,33:0,34
В	0,14	12,0	14,0	0,05	3,0	4,1	2,6	3,2	29,0	95,0	30,0	0,20:0,25:0,55
Базовий (14X12Г12СТ)	0,14	12,0	12,0	0,03	0	4,25	2,68	2,15	30,0	82,5	24,8	-

Примітка: значення властивостей розраховані за регресійними моделями. ΔM – приріст мартенситу після зношування.

Склад А оптимізований для умов сухого тертя та контактного навантаження (вагові коефіцієнти $w_1:w_2:w_3 = 0,50:0,30:0,20$, пріоритет зносостійкості ϵ_1). Підвищений вміст вуглецю (0,18 %) і хрому (14 %) забезпечує максимальну зносостійкість при сухому терті $\epsilon_1 = 4,9$, що на 15 % перевершує базовий дріт ПП-Нп 14X12Г12СТ ($\epsilon_1 = 4,55$) і в 4,9 раз. та нікелю (1,5 %) забезпечує оптимальну стабільність аустеніту для активного ДДМП при терті (приріст мартенситу $M = 26$ %). Твердість HRC = 32 дозволяє механічну обробку різанням стандартним твердосплавним інструментом. Ударна в'язкість KCU = 75 Дж/см² є достатньою для роботи без інтенсивних ударних навантажень. Склад рекомендується для наплавлення кранових коліс, катків, напрямних, підшипників ковзання та інших деталей, що працюють в умовах сухого тертя ковзання або кочення з контактною напругою.

Склад Б (універсальний) є поліпшеним варіантом базового дроту з оптимізованим співвідношенням елементів для збалансованих властивостей (вагові коефіцієнти рівні: $w_1:w_2:w_3 = 0,33:0,33:0,34$). Порівняно з базою (0,14% C, 12% Cr, 12% Mn, 0,03% N, 0% Ni) підвищено вміст вуглецю до 0,16%, хрому до 13%, марганцю до 13%, азоту до 0,06%, введено 1% Ni. Ці зміни забезпечують приріст зносостійкості: ϵ_1 на +6 %, ϵ_2 на +8 %, ϵ_3 на +21 % за збереження відмінної оброблюваності (HRC = 31) та високої в'язкості (KCU = 82 Дж/см²). Склад є універсальним для широкого спектру застосувань та економічно ефективним, оскільки вміст дорогого нікелю мінімізовано до 1 %, вартість на 3-5 % вища за базовий дріт при істотно кращих властивостях. Рекомендується як заміна базового дроту ПП-Нп 14X12Г12СТ скрізь, де потрібне підвищення довговічності без суттєвого подорожчання.

Состав В оптимізовано для роботи в умовах ударно-абразивного зношування (вагові коефіцієнти $w_1:w_2:w_3 = 0,20:0,25:0,55$, пріоритет ϵ_3). Низький вміст вуглецю (0,14 %), помірний хром (12 %), підвищений марганець (14 %) та максимальний нікель (3 %) забезпечують високу частку метастабільного аустеніту (~82 %) з оптимальною стабільністю. Це призводить до максимальної ударно-абразивної зносостійкості $\epsilon_3 = 3,2$, що в 3,2 рази вище стали 110Г13Л при Кд = 2,2 і на 49 % вище базового дроту ($\epsilon_3 = 2,15$). Приріст мартенситу при навантаженні становить 30%, що підтверджує високу активність ДДМП. Визначна ударна в'язкість KCU = 95 Дж/см² (на +15 % вище за базу) забезпечує відсутність крихкого руйнування при інтенсивних ударах. Твердість HRC = 29 відносно невисока, але це компенсується здатністю до деформаційного зміцнення: після навантаження твердість поверхневого шару підвищується до 42-46 HRC. Склад рекомендується для наплавлення зубів ковшів екскаваторів (особливо для роботи в кар'єрах з великокусковими породами), бив молоткових дробарок, траків

Машинобудування і зварювальне виробництво

гусениць важкої техніки, футерування кульових млинів та інших деталей, що працюють при комбінованому ударно-абразивному впливі. Недолік – підвищена вартість (на 15–20 % вища за базу через нікель), проте збільшення довговічності в 1,5–2 рази окупає додаткові витрати.

Перевірочні експерименти підтвердили адекватність розрахункових значень властивостей всіх трьох оптимальних складів. Зразки були виготовлені, наплавлені та випробувані за повною програмою. Розбіжність між розрахунковими (табл. 5) та експериментальними значеннями складала:

- Для ε_1 : 2,1–4,8 %
- Для ε_2 : 3,2–5,6 %
- Для ε_3 : 1,9–6,2 %
- Для HRC: 0,5–1,2 HRC
- Для KCU: 3,1–7,4 Дж/см²

Всі три оптимізовані склади показали відсутність тріщин при наплавленні без попереднього підігріву на пластини зі сталі 09Г2С завтовшки 30 мм, що підтверджує їх високу технологічну міцність. Це є важливою перевагою порівняно з високовуглецевими зносостійкими наплавками, що вимагають підігріву до 250–350 °С.

Порівняння із комерційними матеріалами. Для оцінки конкурентоспроможності розроблених складів було проведено порівняння з широко застосовуваними комерційними наплавними матеріалами (табл. 6).

Таблиця 6 – Порівняння властивостей оптимізованих та комерційних наплавних матеріалів

Матеріал	Система легування	HRC	ε_1	ε_2	ε_3	KCU, Дж/см ²	Оброблюваність різанням	Тріщини без підігріву	Вартість* віднос.од.
Склад А	0,18C-14Cr-12Mn-0,06N-1,5Ni	32	4,9	3,1	2,4	75,0	Так	Нема	1,05
Склад Б	0,16C-13Cr-13Mn-0,06N-1Ni	31	4,5	2,9	2,6	82,0	Так	Нема	1,03
Склад В	0,14C-12Cr-14Mn-0,05N-3Ni	29	4,1	2,6	3,2	95,0	Так	Нема	1,18
14X12Г12СТ	0,14C-12Cr-12Mn-следи N-0Ni	30	4,25	2,68	2,15	82,5	Так	Нема	1,00
ПП-18Х1Г1М	Fe-1C-1Cr-1Mn-1Mo (ферит)	26	0,85	1,0	0,9	30,0	Так	Нема	0,95
ПП-АН101	Fe-27Cr-2,5C-4Ni-2Si (ледебурит)	58	3,3	4,2	1,2	18,0	Ні	Має (підогрів 300°С)	1,85
110Г13Л (лита сталь)	Fe-13Mn-1,2C	20 (180 HB)	3,0	1,8	1,0	120,0	Ні	-	1,10
Stoody 2109-FCO [18]	Fe-15Cr-4Mn-0,4C (закордон.)	35	3,8	3,0	2,1	55,0	Так	Нема	1,50
Weld Mold 765 [19]	Fe-21Cr-2Mn-2,8C-8Ni (закордон.)	62	3,5	5,8	0,8	12,0	Ні	Має	2,40

* Відносна вартість розрахована на основі цін феросплавів та порошкових компонентів станом на 2024 р., базовий дріт 14X12Г12СТ прийнятий за 1,00.

Як очевидно з табл. 6, оптимізовані склади демонструють унікальне поєднання властивостей:

Машинобудування і зварювальне виробництво

1. Зносостійкість при сухому терті ε_1 оптимізованих складів (4,1–4,9) значно перевершує ферит но-перлітні наплавки типу ПП-18Х1Г1М (0,85) і сталь 110Г13Л (3,0), порівнянна з високохромистою наплавкою ПП Stoodu 2109 (3,8).

2. Ударно-абразивна зносостійкість ε_3 складу (3,2) в 2,7 рази вище високохромистої наплавки ПП-АН 101 (1,2), в 3,2 рази вище стали 110Г13Л (1,0) і в 1,5 рази вище зарубіжного аналога Stoodu 2. При цьому ударна в'язкість (95 Дж/см²) порівнянна зі сталлю Гадфільда (120 Дж/см²) і в 5–8 разів вище за високохромисті наплавки (12–18 Дж/см²).

3. Оброблюваність різанням усіх оптимізованих складів ($HRC \leq 32$) значно краще, ніж у високохромистих ($HRC 58–62$) та високомарганцевих (після наклепу до 45–50 HRC) наплавок. Це знижує витрати на фінішну механічну обробку.

4. Технологічна міцність: відсутність тріщин при наплавленні без підігріву – критична перевага, що спрощує технологію та знижує собівартість наплавних робіт.

5. Економічна ефективність: вартість оптимізованих складів (1,03–1,18 відн. од.) істотно нижча від зарубіжних аналогів (1,50–2,40) та високохромистих наплавок (1,85) при порівнянних чи кращих властивостях.

Зарубіжні високохромисті наплавки типу Weld Mold 765 показують видатну абразивну зносостійкість $\varepsilon_2 = 5,8$, але повністю непридатні для ударно-абразивних умов ($\varepsilon_3 = 0,8$) через вкрай низьку в'язкість ($KCU = 12$ Дж/см²) і потребу. Розроблені склади займають оптимальну нішу для комбінованих умов зношування.

ВИСНОВКИ

1. Методом регресійного аналізу з використанням центрального композиційного плану другого порядку 2^{5-1} (31 експеримент) встановлено кількісні залежності зносостійкості при сухому терті, абразивному та ударно-абразивному зношуванні низьковуглецевого хромомарганцевого наплавленого металу від вмісту вуглецю діапазоні 0,10–0,25% С, 10–16% Cr, 10–16% Mn, 0,02–0,08% N, 0–4% Ni. Побудовані моделі мають високі показники якості ($R^2 = 0,906–0,952$, adjusted $R^2 = 0,884–0,938$, $p < 0,001$) та підтверджені кросвалідацією (середня помилка прогнозування 4,8–11,4 %) та незалежною валідацією на 5 %.

2. Встановлено, що азот є високоефективним легуючим елементом, що одночасно підвищує зносостійкість всіх типів (на 8–12 % на кожні 0,01 % N), твердість (на 1,4 HRC на кожні 0,03 % N) та ударну в'язкість (на 2,1 Дж/см² на 3 карбонітридами розміром 50–200 нм, стабілізації аустеніту та зниження енергії дефектів упаковки. Нікель підвищує ударну в'язкість (на 6,4 Дж/см² на кожен 1 % Ni) та ударно-абразивну зносостійкість (на 0,26 одиниць на кожен 1 % Ni), маючи оптимальний вміст 2–3 % при балансі між в'язкістю та економічністю.

3. Визначено три оптимальні склади наплавленого металу для різних умов експлуатації: склад А (0,18% С, 14% Cr, 12% Mn, 0,06% N, 1,5% Ni) забезпечує максимальну зносостійкість при сухому терті $\varepsilon_1 = 4,9 \pm 0,3$ (15% вище Х1; універсальний економічний склад Б (0,16% С, 13% Cr, 13% Mn, 0,06% N, 1% Ni) показує збалансовані властивості з приростом зносостійкості на 6–21% щодо бази при подорожчанні лише на 3%; склад В (0,14 % С, 12 % Cr, 14 % Mn, 0,05 % N, 3 % Ni) має максимальну ударно-абразивну зносостійкість $\varepsilon_3 = 3,2 \pm 0,2$ (у 3,2 рази вище стали 110Г13Л, на 49 % вище бази) і на 49 % вище бази) Дж/см².

4. Підтверджено, що відпустка при 650 ± 10 °С протягом 1 години з охолодженням на повітрі низьковуглецевого (0,10–0,25 % С) хромомарганцевого наплавленого металу активізує динамічне деформаційне мартенситне перетворення за рахунок дисперсійного твердіння з дрібними оптимізаціями стабільності аустеніту. Приріст кількості мартенситу деформації після зношування становить 18–32 % залежно від складу, що корелює з ударно-абразивною зносостійкістю ($r = 0,78$, $p < 0,001$).

5. Всі оптимізовані склади показали відсутність тріщин при наплавленні без попереднього підігріву на сталь 09Г2С, хорошу оброблюваність різанням ($HRC \leq 32$) та високу ударну в'язкість ($KCU \geq 75$ Дж/см²). Порівняння з комерційними наплавними матеріалами показало, що розроблені склади забезпечують унікальне поєднання зносостійкості, в'язкості, технологічності та економічності, перевищуючи зарубіжні аналоги за вартості на 25–50 % нижче.

Отримані регресійні моделі дозволяють проектувати хімічний склад низьковуглецевих хромомарганцевих наплавних матеріалів стосовно конкретних умов експлуатації з урахуванням вимог до зносостійкості, технологічної міцності та економічної ефективності. Методика може бути застосована для подальшої оптимізації складів із запровадженням додаткових легуючих елементів (Mo, Nb, В та ін.).

Список використаних джерел

1. *Zackay V.F.* The enhancement of ductility in high-strength steels / *V.F. Zackay, E.R. Parker, D. Fahr, R. Busch* // Trans. ASQ. – 1967. – Vol. 60. – P. 252-259.
2. *De Cooman B.C.* Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite / *B.C. De Cooman* // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2004. – Vol. 8. – P. 285-303.
3. *Jacques P.J.* Transformation-induced plasticity for high strength formable steels / *P.J. Jacques, Q. Furnémont, F. Lani, T. Pardoen, F. Delannay* // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2004. – Vol. 8. – P. 259-265.
4. *Olson G.B.* A general mechanism of martensitic nucleation / *G.B. Olson, M. Cohen* // Metallurgical Transactions A. – 1976. – Vol. 7A. – P. 1897-1923.
5. *Allain S.* Correlations between the calculated stacking fault energy and the plasticity mechanisms in Fe–Mn–C alloys / *S. Allain, J.-P. Chateau, O. Bouaziz, S. Migot, N. Guelton* // Materials Science and Engineering A. – 2004. – Vol. 387-389. – P. 158-162.
6. *De Cooman B.C.* High Mn TWIP Steels for Automotive Applications / *B.C. De Cooman, K. Chin, J. Kim* // New Trends and Developments in Automotive System Engineering, ed. M. Chiaberge. – InTech, 2011. – P. 101-128.
7. *Berns H.* High nitrogen austenitic steels / *H. Berns, S. Siebert* // ISIJ International. – 1996. – Vol. 36, No 7. – P. 927-931.
8. *Simmons J.W.* Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels / *J.W. Simmons* // Materials Science and Engineering A. – 1996. – Vol. – P. 159-169.
9. *Gavriljuk V.G.* Nitrogen in Iron and Steel / *V.G. Gavriljuk, H. Berns* // ISIJ International. – 1999. – Vol. 39, No. 8. – P. 807-815.
10. *Pokhodnya I.K.* Nitrogen uptake and retention in arc welding of steels / *I.K. Pokhodnya, V.I. Golovko, R. Solana* // Welding International. – 2001. – Vol. 15, No. 4. – P. 298-304.
11. *Малинов Л.С.* Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии / *Л.С. Малинов, В.Л. Малинов*. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. – 352 с.
12. *Малинов В.Л.* Повышение износостойкости метастабильного аустенитного хромомарганцевого наплавленного металла / *Л.С. Малинов* // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2011. – № 2 (23). – С. 239-242.
13. *Малинов В.Л.* Исследование методом регрессионного анализа зависимостей износостойкости в условиях абразивного и ударно-абразивного изнашивания от химического состава наплавленного металла на Fe-Cr-Mn-V-C основе / *Л.С. Малинов* // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2011. – № 2 (23). – С. 107-117.

14. ASTM E975-13. Standard practice for X-ray determination of retained austenite in steel with near random crystallographic orientation. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.
15. Ефременко В.Г. Влияние фазового и структурного состояния сплавов на основе железа на износостойкость в условиях помола высокоабразивного материала / В.Г. Ефременко, Ф.К. Ткаченко, Т.А. Еременко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2003. – Вип. 13. – С. 113-118.
16. Speidel M.O. Nitrogen containing austenitic stainless steels / M.O. Speidel // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. – 2006. – Vol. 37, No. 10. – P. 875-880.
17. Tomota Y. Tensile behavior of TRIP-aided multi-phase steels studied by in situ neutron diffraction / Y. Tomota, H. Tokuda, Y. Adachi, M. Wakita, N. Minakawa, A. Moriai, Y. Morii // Acta Materialia. – 2004. – Vol. 52. – P. 5737-5745.
18. Stoodly Company. Product Data Sheet: Stoodly 2109-FCO. – USA, 2023. – 4 p.
19. Weld Mold Company. Technical Manual: Weld Mold Hardfacing Alloys. – USA, 2022. – P. 45-47.

Zusin A. M.

OPTIMIZATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF LOW-CARBON CHROMIUM-MANGANESE WELD DEPOSIT METAL WITH METASTABLE AUSTENITE USING REGRESSION ANALYSIS

The results of a comprehensive study and optimization of the chemical composition of low-carbon weld-deposit metal based on the Fe-Cr-Mn-C-N-Ni system using multifactor regression analysis are presented. A second-order central composite design 2^{5-1} with added star points was employed, comprising 31 experimental compositions with 5 replications at the design center to assess experimental errors. The varying factors were the contents of carbon (0.10–0.25%), chromium (10–16%), manganese (10–16%), nitrogen (0.02–0.08%), and nickel (0–4%). Welding was performed with flux-cored wires 3.6–4.0 mm in diameter in three layers under AN-26 flux onto 30-mm-thick 09G2S steel plates, using strictly controlled parameters: current 350 ± 5 A, voltage 32–33 V, travel speed 38 ± 1 m/h, and interpass temperature not exceeding 180 °C. After welding, all samples were tempered at 650 ± 10 °C for 1 hour followed by air cooling to activate dynamic deformation-induced martensitic transformation (DDIMT).

Statistically significant second-order mathematical models were obtained ($R^2 = 0.91$ – 0.96 , adjusted $R^2 = 0.87$ – 0.94 , $p < 0.001$), establishing quantitative relationships between wear resistance under dry sliding (ϵ_1), abrasive wear (ϵ_2 , ASTM G65-A procedure), and impact-abrasive wear (ϵ_3 , impact coefficient $K_d = 2.2$) and the content of alloying elements. Cross-validation using the leave-one-out method showed an average prediction error of no more than 6.2%. Significant effects of all investigated factors and their pairwise interactions (C–Cr, C–Mn, C–N, Mn–Ni) on the property set of the weld deposit were identified. It was shown that nitrogen is a highly effective alloying element, simultaneously increasing all types of wear resistance by 8–12% for every 0.01% N, hardness by 1.4 HRC, and impact toughness by 2.1 J/cm² due to dispersion strengthening by fine carbonitrides (50–200 nm) and austenite stabilization. Nickel significantly increases impact toughness (up to 95 ± 5 J/cm²) and impact-abrasive wear resistance, with an optimal content of 2–3% ensuring a balance between toughness and cost-effectiveness.

Based on the obtained regression models and considering constraints on technological soundness (absence of cracking), machinability ($HRC \leq 35$), and toughness ($KCU \geq 60$ J/cm²), three optimal compositions were determined: one for dry sliding wear ($\epsilon_1 = 4.9 \pm 0.3$, 15% higher than the reference wire PP-Np 14Kh12G12ST), a universal cost-effective composition with balanced

properties, and a composition for impact-abrasive wear ($\epsilon_3 = 3.2 \pm 0.2$, 3.2 times higher than 110G13L steel). Validation experiments on an independent set of 5 compositions confirmed the adequacy of the models (calculated vs. experimental discrepancy not exceeding 8%). All optimized compositions exhibited crack-free weldability without preheating and high technological soundness.

Keywords: Weld-deposit metal, metastable austenite, regression analysis, wear resistance, TRIP effect, composition optimization, nitrogen, nickel, dynamic deformation-induced martensitic transformation.

Стаття надійшла 28.11.2025р.

УДК 621.791.753.042

doi.org/10.31498/2522-9990302025347040

Щетинін С.В., Десятський С.П.

ОДНОСТОРОННЄ ЗВАРЮВАННЯ СКЛАДОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ НА ФЛЮСОВІЙ ПОДУШЦІ

Енергія, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу.

Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань. Для зниження енергії за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Струм тече по шляху найменшого опору, тому дуга обертається торцем електроду в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці зі склоподібним флюсом незалежно від зазору в стику і закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Тиск зварювальної дуги вимірювали за розробленою методикою з використанням кварцевого зонду, температура розм'ягчення якого 2023 K, але внаслідок низької теплопровідності кварцу та переміщення під дією тиску дуги залишається в твердому стану довше ніж тантал. При наближенні дуги під дією тиску зонд опускається вниз, при видаленні дуги зонд підіймається нагору. Лінійні переміщення зонду по вертикалі перетворюються електронно-механічним перетворювачем в пропорційний електричний сигнал, що осцилографується і дає осцилограму тиску дуги в процесі одностороннього зварювання під флюсом.

Встановлено, що природа тиску дуги електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Основна закономірність, характерна для всіх процесів, зі збільшенням площі, якою обертається дуга, і підвищенням швидкості зварювання тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості

зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує зниження енергії, тиску зварювальної дуги, електромагнітного і гідродинамічного тиску рідкого металу ванни, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг і щільності дислокацій, саморегулювання та автоматичне регулювання дуги, якісне формування швів незалежно від зазору в стику, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

Ключові слова: Одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, тиск дуги, площа, якою обертається дуга, енергія, швидкість зварювання та кристалізації рідкого металу ванни, здрібнення мікроструктури, ударна в'язкість зварних з'єднань.

Постановка проблеми. Одностороннє високошвидкісне зварювання, обмежено витіканням рідкого металу ванни під дією плазмових потоків і тиску дуги, електромагнітного і гідродинамічного тисків, порушенням формування швів, що приводить 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. Загальновідомо, що при зменшенні погонної енергії внаслідок збільшення швидкості охолодження підвищується ймовірність утворення холодних тріщин [1]. Однак М.М. Прохоров зазначає, що значне зниження погонної енергії та відповідне збільшення швидкості охолодження можуть привести до зниження ймовірності утворення холодних тріщин. Ці данні підтверджено значною мірою. Дослідження тиску зварювальної дуги, вплив швидкості зварювання і погонної енергії на формування швів при односторонньому зварюванні та ударну в'язкість зварних з'єднань досліджено недостатньо [2 – 9].

Мета досліджень. Дослідження тиску зварювальної дуги та розробка одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що забезпечує регулювання обертання дуги, зниження енергії, тиску дуги, тепловкладення, структурні перетворення, підвищення якості формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань.

Основний матеріал дослідження. При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле, яке при протіканні струму по провіднику, вивчено Р.М. Уайтом [2]. Наявність сильного магнітного поля при зварюванні в області активної плями підтверджується тим, що дуга діє як насос, який всмоктує з навколишнього середовища повітря, що є діаманетиком, і втягує його в неоднорідне магнітне поле, розігріває і викидає у бік виробів у вигляді потужних плазмових потоків з швидкістю до 10^3 м/с [3]. Міцні плазмові потоки створюють тиск зварювальної дуги, яке залежить від руху активної плями торцем електрода.

Магнітне поле створює стиснення дуги під дією власного поля – пінч-ефект. В області переходу від активних плям до стовпа та його розширення значення напруженості магнітного поля, щільності струму і, отже, тиск знижуються в осьовому напрямку. Це призводить до виникнення плазмових потоків в сторону розширення та тиску дуги. Природа тиску зварювальної дуги під дією пінч-ефекта електромагнітна.

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

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R} \quad (1)$$

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

Діюча на дугу електромагнітна сила зварювального струму пропорційна струму I , індукції магнітного поля B і довжині дуги L_d [3]:

$$F_{EMD} = IB l_d, \text{ Н.} \quad (2)$$

Швидкість обертання дуги торцем стрічковим електродом, під дією електромагнітної сили зварювального струму, що визначена за кінограмою процесу збудження дуги та підйому стрічки, $V_d = 3,3$ м/с, діаметр дуги $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Тиск зварювальної дуги прямо пропорційний квадрату струму та обернено пропорційний площі, якою обертається дуга [3]:

$$P_{\max} = 10^{-7} \frac{I^2}{\pi R_A^2}, \text{ Па,} \quad (3)$$

де I – зварювальний струм, А;

πR_A^2 – площа, якою обертається дуга, м².

Коефіцієнт 10^{-7} підтверджує електромагнітну природу тиску дуги.

Основна закономірність тиску зварювальної дуги, яка характерна для всіх процесів, з підвищенням площі, якою обертається дуга, тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці.

Площа, якою обертається дуга, визначається законом найменшого опору, згідно якого струм тече шляхом найменшого опору, і дуга збуджується при закорочуванні електрода на виріб. Згідно принципу мінімуму Штеєнбека, дуга прагне горіти при мінімумі енергії. Тому, дуга обертається торцем електрода. Пінч-ефект і обертання дуги торцем електрода визначають тиск зварювальної дуги.

Енергія, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу. Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для зниження енергії, за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання, розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Дуга обертається торцем електрода в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці з склоподібним флюсом незалежно від зазору в стикі.

Як встановлено, швидкість плазових потоків при зварюванні дротом $V = 2,37 \cdot 10^3$ м/с, при зварюванні складовим електродом $V = 1,18 \cdot 10^3$ м/с, що забезпечує зниження тиску дуги.

Кінетична енергія плазових потоків при зварюванні плав'ячимся електродом, перетворюється в кінетичну енергію рідини, що рухається, і визначає рух рідкого металу в зварювальній ванні.

Зниження тиску дуги в 4 рази підтверджено тим, що для формування зворотного валику було зменшено тиск повітря в флюсовій подушці з 3,5 атм до 0,8 атм.

При односторонньому зварюванні складовим електродом швидкість зварювання і кристалізації підвищується з 40 м/г до 75 м/г, погонна енергія зменшується. Зростає швидкість кристалізації, подрібнюється мікроструктура, зменшується міжатомна відстань, підвищуються міжатомні зв'язки і ударна в'язкість зварних з'єднань.

Спектральним аналізом на дифрактометрі ДРОН-3 встановлено, що зі зростанням швидкості зварювання і зниженням погонної енергії мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зменшуються, що забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для вимірювання тиску в реальних умовах дуги, що рухається і горить на плав'ячомуся електроді під флюсом, розроблена спеціальна методика (рис.1), яка полягає в наступному. При наближенні електрода (1) спрацьовує фотоелемент (2) і попередньо встановлений по осі шва зонд (3) переміщається під дією тиску дуги по вертикалі. Лінійні переміщення зонда перетворюються електронно-механічним перетворювачем (4), в пропорційний електричний сигнал постійного струму, який посилюється підсилювачем (5) і фіксується осцилографом (6). Живлення фотоелемента здійснюється за допомогою блока (7). Для вимірювання товщини рідкого прошарку метал зачеканивається тантал (8). Зварювання пластин (9) проводиться під флюсом (10).

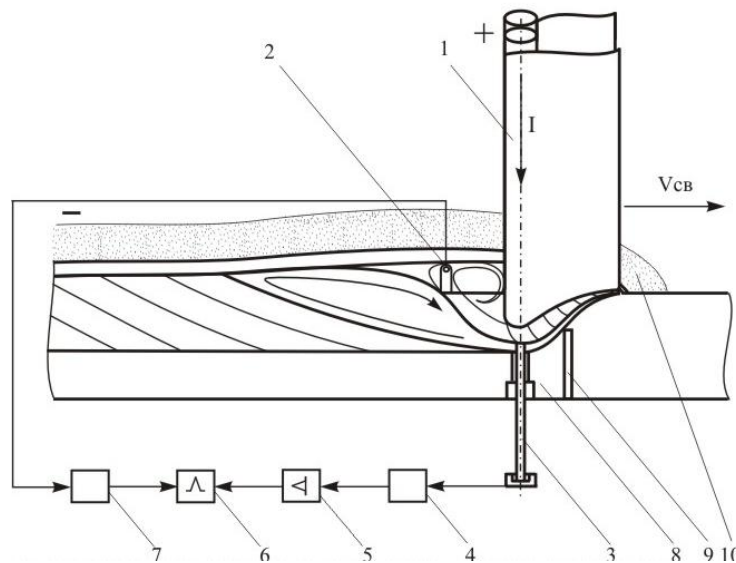


Рисунок 1 – Методика виміру розподілу тиску зварювальної дуги

Вимірювання лінійних переміщень зонда, пропорційних тиску дуги, дає закономірність розподілу тиску по активній плямі. Як зонд використовується стрижень з кварцового скла, що характеризується низькою теплопровідністю – у 400 разів менше теплопровідності міді та мінімальним коефіцієнтом лінійного розширення $5,5 \cdot 10^{-7}$. Температура розм'якшення кварцу 20230К, але в результаті низької теплопровідності та руху під дією тиску дуги він залишається у твердому стані більш тривалий час, ніж тантал.

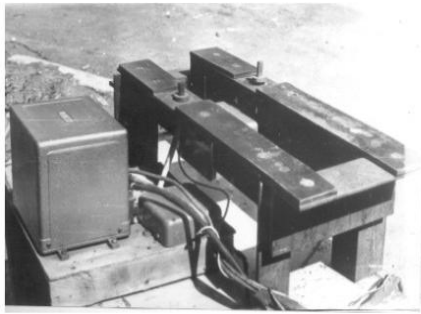


Рисунок 2 – Установка для виміру розподілу тиску зварювальної дуги

Зонд вводиться в просвердлений із зворотного боку отвір (рис.2) на глибину, що забезпечує вимірювання тиску зварювальної дуги в області стовпа, безпосередньо прилеглої до активної плями:

$$l = (S - h_{\text{ПР}} + S_{\text{ПР}} + 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (4)$$

де S – товщина пластини, м;

$h_{\text{ПР}}$ – глибина проплавлення, м;

$S_{\text{ПР}}$ – товщина рідкого прошарку, м.

Обробка експериментальних даних тиску дуги проводилась методом математичної статистики при числі вимірювань не менше п'яти.

Визначення впливу форми електрода на розподіл тиску дуги виробляли при наплавленні струмом зворотної полярності на пластини розміром 0,016x0,25x0,6 м, що забезпечують мінімальні деформації та виключають вплив на показання датчика. Як джерело живлення використовували випрямляч ВМГ-5000. Наплавлення проводили на режимі зварювання складовим електродом: $I = 2100 \text{ А}$; $U = 32 \text{ В}$; $V = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$.

Встановлено, що природа тиску дуги електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Зі збільшенням площі, якою обертається дуга, і підвищенням швидкості зварювання тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Дія форми електрода на тиск дуги підтверджується формуванням швів.

Формування швів при зварюванні дротяним електродом вузьке, з великим проплавленням 0,012 м та глибокими підрізами (рис.3). При зварюванні складовим електродом шов широкий, без підрізів, з плавним переходом до основного металу та в 2 рази меншою глибиною проплавлення 0,006 м (рис.2.256)

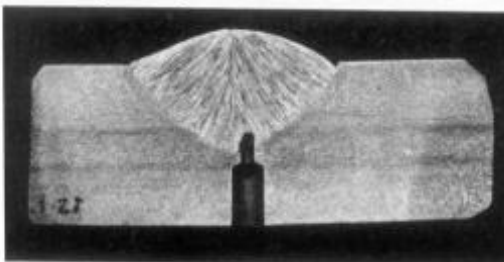


Рисунок 3 – Макрошліф шва з кварцовим стрижнем

Машинобудування і зварювальне виробництво

При зварюванні дротом внаслідок значного занурення дуги і малої ширини шва на поверхні гази не встигають виділитися, тому пористий шов і з тріщинами. При зварюванні складовим електродом внаслідок великої ширини дзеркала зварювальної ванни та шва, гази встигають виділитися, тому шов щільний, без тріщин.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом забезпечується закон мінімуму енергії Закон найменшого опору підтверджує закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує зниження тиску зварювальної дуги, якісне формування швів незалежно від зазору, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

При односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом, внаслідок обертання дуги торцем U-подібної стрічки, збільшується площа, знижується тиск дуги, що забезпечує якісне формування зворотного валика 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 та котлів залізничних цистерн.

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, що дуга передає металу, визначає процеси в зварювальній ванні. З підвищенням енергії тиск дуги, електромагнітний і гідродинамічний тиски, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і зварювальні напруги зростають, що приводить до порушення формування швів і зниження ударної в'язкості зварних з'єднань, яка характеризує тріщиностійкість наплавленого металу. Ефективним способом зниження погонної енергії є підвищення швидкості зварювання та кристалізації рідкого металу, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, зростання міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Для зниження енергії за рахунок обертання дуги і підвищення швидкості зварювання розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, який складається з дроту та U-подібної стрічки. Струм тече по шляху найменшого опору, тому дуга обертається торцем електроду в повздовжньому і перпендикулярному напрямках. Площа обертання дуги збільшується, що забезпечує зниження тиску дуги в 4 рази, одностороннє високошвидкісне зварювання і якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці зі склоподібним флюсом незалежно від зазору в стику і закон мінімуму енергії, згідно якому мінімум енергії – максимум якості та ударної в'язкості зварних з'єднань.

Тиск зварювальної дуги вимірювали за розробленою методикою з використанням кварцевого зонду, температура розм'ягчення якого 2023 К, але внаслідок низької теплопровідності кварцу та переміщення під дією тиску дуги залишається в твердому стану довше ніж тантал. При наближенні дуги під дією тиску зонд опускається вниз, при видаленні дуги зонд підіймається нагору. Лінійні переміщення зонду по вертикалі перетворюються електронно-механічним перетворювачем в пропорційний електричний сигнал, що

осцилографується і дає осцилограму тиску дуги в процесі одностороннього зварювання під флюсом.

Встановлено, що природа тиску дуги під дією пінч-ефекта електромагнітна. Тиск дуги змінюється за законом нормального розподілу. При наближенні дуги тиск зростає, досягає максимуму на осі, де максимальна щільність струму, з видаленням від осі тиск зменшується. Зі збільшенням площі, якою обертається дуга, тиск зменшується, що забезпечує якісне формування зворотного валику на флюсовій подушці незалежно від зазору в стику. З ростом швидкості зварювання погонна енергія, кількість наплавленого металу, мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій зменшуються і ударна в'язкість зварних з'єднань підвищується.

Розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом на флюсовій подушці, що забезпечує мінімум енергії, зниження тиску зварювальної дуги, електромагнітного і гідродинамічного тисків рідкого металу ванни, мікростворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг і щільності дислокацій, саморегулювання та автоматичне регулювання дуги, якісне формування швів незалежно від зазору в стику, зростання швидкості зварювання та кристалізації, здрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зав'язків і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

Список використаних джерел

1. Фуджита Ю. Технологія зварювання в сучасній промисловості промисловості Японії / Ю. Фуджита, Ю. Наканісі, Н. Юріока // Автоматичне зварювання. – 2008. – Листопад. – С.48 – 54.
2. Бернадський В.Н. Японія визначає пріоритети в зварюванні на ХХІ століття / В.Н. Бернадський // Автоматичне зварювання. – 2002. – №3. – С.46.
3. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань / Р.М. Рижов, В.Д. Кузнецов. – К.: Екотехнологія, 2010. – 288 с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. – К.: Світ, 1992. – 306 с.
5. Рижов Р.Н. Використання шостиполусної електромагнітної системи для керування параметрами формування швів при зварюванні електродом що не плавиться / Р.Н. Рижов, В.Д. Кузнецов, А.В. Малишев // Автоматичне зварювання. – 2004. – №2. – С.45 – 49.
6. Розмишляєв О.Д. Магнітне керування формуванням швів при дуговому зварюванні / О.Д. Розмишляєв. – Маріуполь, 2000. – 241 с.
7. Черниш В.П., Рижов Р.М. Залежність параметрів керуючого магнітного впливу від енерговкладення встик при дуговому зварюванні / В.П. Черниш, Р.Н. Рижов // Автоматичне зварювання. – 1998. – №5. – С.49 – 51.
8. Корольков П.М. Природа виникнення та методи усунення магнітного дуття при зварюванні / П.М. Корольков // Зварювальне виробництво. – 1998. – №5. – С.6 – 8.
9. Norman E.W.D. Magnetic arc blow. Part 1. The origin of magnetic fields // Metal Construction. – 1994. – №7. – Vol.16. – P.441 – 445.

THE ONE-SIDED HIGH-SPEED COMPOSITE ELECTRODE WELDING ON A FLUX CUSHION

The energy that the arc transfers to the metal determines the processes in the welding bath. With high-energy arc vice, electromagnetic and hydrodynamic vice, micro-permeable crystal lattice, micro-stresses, dislocation strength and welding stresses grow, which leads to damage to the molding of seams and a decrease in welded joints impact toughness, which characterizes the crack resistance of the deposited metal. An effective way to reduce linear energy is to increase the welding speed and crystallization of the liquid metal, refine the microstructure, reduce the interatomic distance, increase interatomic bonds and welded joints impact toughness.

To reduce energy by rotating the arc and increase the welding speed, a process of one-sided high-speed welding with a composite electrode has been developed, which consists of a wire and a U-shaped tape. The current flows along the path of least resistance, so the arc rotates along the end of the electrode in the longitudinal and transverse directions. The area of rotation increases, which ensures a 4-fold reduction in arc pressure, one-sided high-speed welding on a flux cushion with a glassy flux regardless of the gap in the joint, and the law of minimum energy, according to which minimum energy is the maximum quality and impact welded joints toughness.

The welding arc pressure was measured using a developed method using a quartz probe, the softening temperature of which is 2023 K, but as a result of the low thermal conductivity of quartz and movement under the action of the arc pressure, it remains in a solid state longer than tantalum. pressure the probe goes down, when the arc is removed the probe goes up. The linear vertical movements of the probe are converted by the electronic-mechanical converter into a proportional electrical signal, which is oscillographed and gives an oscillogram of the arc pressure during one-sided submerged arc welding.

It has been established that the nature of the welding arc pressure under the influence of the pinch effect is electromagnetic.. The arc pressure varies according to the normal distribution law. As the arc approaches, the pressure increases, reaches a maximum on the axis where the current density is maximum, and the pressure decreases with distance from the axis. The main pattern, characteristic of all processes, is that with an increase in the area over which the arc rotates, the pressure decreases, which ensures high-quality formation of the return bead on flux cushion regardless of the gap in the joint. With increasing welding speed, the linear energy, the amount of deposited metal, microdistortion of the crystal lattice, microstresses, welding stresses, dislocation density decrease and the welded joints impact toughness increases.

The one-sided high-speed composite electrode welding on a flux cushion has been developed, which provides a reduction in energy, welding arc pressure, electromagnetic and hydrodynamic pressure of the liquid metal bath, microdistortions of the crystal lattice, microstresses, welding stresses. and dislocation density, self-regulation and automatic arc regulation, high-quality formation of seams regardless of the gap in the joint, increased welding and crystallization speed, refinement of the microstructure, reduction of interatomic distance, increase in interatomic bonds and welded joints impact toughness by 2 times.

Keywords: *One-sided high-speed compound electrode welding on flux pad, arc pressure, arc rotating area, energy, welding and crystallization rate of liquid metal of the bath, microstructure grinding, impact toughness of welded joints.*

Стаття надійшла 08.12.2025р.

ВИСОКОШВИДКІСНЕ НАПЛАВЛЕННЯ НА НИЗЬКІЙ ЕНЕРГІЇ ШИЙОК ЧАВУННИХ ВАЛКІВ

При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження, в наплавленому металі виникають вакансії, оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжвузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікростворень кристалічної решітки та мікронапруг. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Підвищення енергії призводить до зростання мікростворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин.

Для запобігання утворення тріщин необхідно знижувати енергію. Енергія знижується, шляхом підвищення швидкості наплавлення, при якому посилюється охолодження, зменшуються розміри активних плям, погонна енергія і тепловкладання, глибина проплавлення і ширина шва, частка участі основного металу в наплавленому, вміст вуглецю, мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги і щільність дислокацій, зварювальні напруги і подрібнюється структура, що приводить до підвищення тріщиностійкості.

Природа утворення тріщин електромагнітна. Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги, які визначаються енергією, тепловкладанням і деформаціями. Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість при високошвидкісному аргонодуговому наплавленні чавуну на низькій енергії хромонікелевим дротом підвищуються, в результаті утворення карбідів хрому, мінімуму вуглецю, зменшення енергії, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном зменшення тиску дуги, глибини проплавлення, і частки участі основного металу в наплавленому. Мінімум вмісту вуглецю запобігає утворенню тріщин, через випадання карбідів хрому і розшарування по межах зерен, забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості. Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, низьку частку участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази в порівнянні зі зварюванням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Розроблено енергозберігаючий процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій енергії шийок чавунних валків з підігрівом низьковуглецевим хромонікелевим дротом Зв06Х19Н9Т, що забезпечує утворення карбідів хрому, аустеніту, максимальний перехід легуючих елементів, модифікацію, зростання пластичності, швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення енергії, вмісту вуглецю, мікростворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

Ключові слова: Чавунні валки, високошвидкісне наплавлення на низькій енергії, аргонодугове наплавлення низьковуглецевим хромонікелевим дротом, зварювальні напруги, тріщиностійкість, зносостійкість, корозійна стійкість.

Постановка проблеми. Чавун, що містить більш ніж 2% вуглецю, домішки, сірки та фосфору характеризується низькою пластичністю, схильністю до утворення тріщин і відноситься до важкозварюваних сплавів. Тому, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавунних валків є важливою науково-технічною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високий вміст вуглецю в чавуні призводить до зниження пластичності, утворення холодних і гарячих тріщин. При збільшенні вмісту вуглецю, енергії, тепловкладання і зварювальних напруг схильність до утворення тріщин зростає. Механізм утворення тріщин не встановлено [1]. Однак, Н. М. Прохоров відмічає, що при значному зменшенні погонної енергії тріщиностійкість зростає. Вплив енергії та хімічного складу наплавленого металу на структуру, тріщиностійкість, зносостійкість та корозійну стійкість чавуну досліджено недостатньо [1–9].

Мета досліджень. Встановити механізм утворення тріщин і розробити процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії, що забезпечує підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуна.

Основний матеріал дослідження. При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження в наплавленому металі виникають вакансії [1], оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікрспотворень кристалічної решітки та мікронапруг:

$$\sigma = E \frac{\Delta a}{a}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

де E – модуль пружності, $19,68 \cdot 10^4 \text{ МПа}$,
 $\frac{\Delta a}{a}$ – мікрспотворення кристалічної решітки.

Дослідження впливу погонної енергії на мікрспотворення кристалічної решітки проводили рентгеноструктурним аналізом на рентгенівському дифрактометрі ДРОН–3.

Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Щільність дислокацій досліджено по уширенню рентгенівських ліній [2]:

$$\rho = 3,46 \cdot 10^{19} \beta_{211}^2 (\text{рад}), \text{ м}^{-2}. \quad (2)$$

В результаті встановлено, що при наплавленні на низьких погонних енергіях щільність дислокацій знижується. Це відповідає впливу погонної енергії на мікрспотворення кристалічної решітки, оскільки джерелом дислокацій є сукупність вакансій та неметалеві включення.

Підвищення енергії призводить до зростання мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин. При зменшенні тепловкладання і прискореному охолодженні знижується рівень пластичної деформації, що запобігає руйнуванню.

Ступінь забрудненості наплавленого металу з підвищенням швидкості наплавлення знижується, внаслідок інтенсивних конвективних потоків та швидкості руху рідкого металу. Основними неметалевими включеннями є марганець та кремній. Встановлений вплив погонної енергії на ступінь забрудненості наплавленого металу неметалевими включеннями добре узгоджується з впливом на щільність дислокацій.

Для запобігання утворенню тріщин і відшарувань наплавленого металу, при наплавленні чавуну, необхідно забезпечити мінімальний вміст вуглецю, глибину проплавлення і частку

Машинобудування і зварювальне виробництво

участі основного в наплавленому металі γ (рис.1), якою називається відношення площі проплавлення $F_{\text{ПР}}$ до площі шва F :

$$\gamma = \frac{F_{\text{ПР}}}{F} \quad (3)$$

Глибина проплавлення і ширина валика визначають хімічний склад і властивості шва, особливо при наплавленні чавунів, високий вміст вуглецю яких призводить до утворення тріщин, зниження тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості. Для отримання міжатомних зв'язків, які виникають на міжатомній відстані 10-19 м, необхідно мінімум енергії та проплавлення основного металу, що забезпечує мінімальні мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

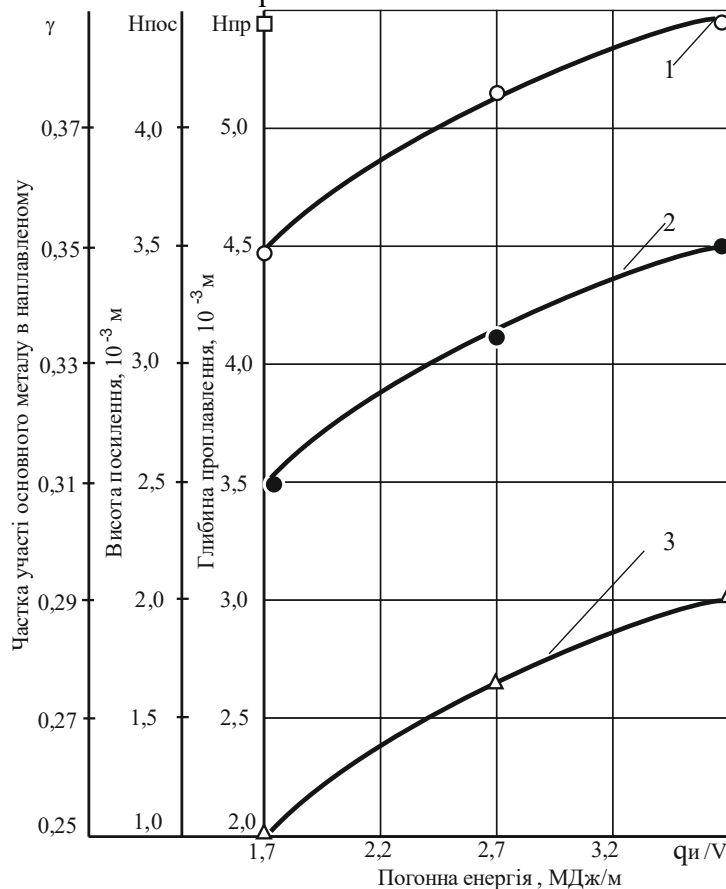


Рисунок 1 – Залежність частки участі основного металу в наплавленому (1), висоти посилення (2) і глибини проплавлення (3) від погонної енергії

Для зменшення частки участі основного металу в наплавленому, рекомендується проводити високошвидкісне наплавлення на низькій погонній енергії, що забезпечує зменшення енергії, тепловкладання, глибини та ширини валиків, вмісту вуглецю та підвищення тріщиностійкості.

Ефективним способом зменшення енергії є підвищення швидкості зварювання, що забезпечує зниження тепловкладання, ширини, висоти валика і глибини проплавлення, мікростворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуну. При зменшенні енергії, частка участі основного металу в наплавленому, висота посилення і глибина проплавлення

зменшується (рис.1), що забезпечує зниження вмісту вуглецю, підвищення пластичності, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості чавуну. При підвищенні швидкості нагріву та охолодження, зростає дисперсність мікроструктури, скорочується міжатомна відстань, підвищуються міжатомні зв'язки, тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість чавуну.

Найбільш ефективно проводити наплавлення чавуну зварювальним дротом Зв06Х19Н9Т, що містить: вуглець (не більш 0.08%), кремній (0.40-1.00%), марганець (1.00-2.00%), хром (18.00-20.00%), нікель (8.00-10.00%), і титан (0.50-1.00%). Вуглець впливає на міцність і твердість. Мінімум вмісту вуглецю забезпечує корозійну стійкість. Хром утворює карбіди хрому, підвищує зносостійкість, тріщиностійкість і корозійну стійкість. Нікель підвищує пластичність, ударну в'язкість і тріщиностійкість. Титан здрібнює структуру, поліпшує зварюваність металу і стійкість до міжкристалічної корозії.

Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість, при високошвидкісному аргондуговому напавленні чавуну хромонікелевим дротом, підвищується в результаті зменшення енергії, мінімуму вмісту вуглецю, утворення карбідів хрому, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном зменшення тиску дуги, глибини проплавлення, вмісту вуглецю і частки участі основного металу в наплавленому.

Утворення тріщин, через випадання карбідів хрому по межах зерен, є наслідком міжкристалічної корозії. При напавленні хромонікелевими електродами, хром зв'язується з вуглецем, утворюючи карбіди хрому по межах зерен. Це призводить до збіднення прилеглих областей зерна хромом, який необхідний для забезпечення корозійної стійкості. В результаті збідненні хромом ділянки призводять до корозії, утворення тріщин і розшарування по межах зерен. Мінімум вмісту вуглецю забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Найбільш ефективно проводити наплавлення в середовищі аргону, який є нейтральним газом і забезпечує максимальний перехід легуючих елементів в наплавлений метал, струйний переніс електродного металу і стабільність процесу. В.І. Дятлов пояснює перехід до струйного перенесення збільшенням діаметра стовпа, коли активна пляма охоплює бічну поверхню краплі та збільшуються стискаючі сили. Кінець електрода загострюється, крапля витягується в конус, і виникає струйне перенесення.

Наплавлення в аргоні характеризується низьким значенням суми приелектродних падінь напруги U_{K+A} і градієнта потенціалу в стовпі дуги E , В/мм (табл.1)

В результаті низького значення катодного падіння напруги, при напавленні в аргоні, зменшується глибина проплавлення та частка участі основного металу у наплавленому, що підвищує тріщиностійкість. Внаслідок низького градієнта потенціалу в стовпі, дуга в аргоні "м'яка", еластична і забезпечує стабільність процесу.

Таблиця 1 – Енергетичні характеристики дуги

Захисний газ і флюс	Градієнт потенціалу в стовпі дуги, E , В/мм	Сума приелектродних падінь напруги, U_{K+A} , В
Аргон	2,2 – 2,4	16–18
Вуглецевий газ	2,4–2,8	17–19
Гелій	2,2-2,4	10–12
Флюс АН-348А	3,8–4,2	20–22

Машинобудування і зварювальне виробництво

Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, струйний переніс електродного металу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, мінімум частки участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази, в порівнянні зі зварюванням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Аргонодугове наплавлення проводиться на зворотній полярності, так як на електроді розташовується менш рухливий анод і забезпечується стабільність процесу. При електродуговому наплавленні тріщиностійкість чавунів визначається вмістом вуглецю та енергією. Для підвищення тріщиностійкості, зі зростанням вмісту вуглецю, погонну енергію необхідно зменшувати.

Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше межі міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги, які визначаються енергією, тепловкладанням і деформаціями.

Встановленні закономірності і розроблений спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій енергії хромонікелевим електродом чавунних валків можуть бути використані при високошвидкісному наплавленні занурювальних барабанів агрегату цинкування.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси високошвидкісного наплавлення на низькій енергії чавунів низьковуглецевими хромонікелевими дротами, які забезпечують підвищення тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

ВИСНОВКИ

При електродуговому наплавленні, під дією теплового збудження, в наплавленому металі виникають вакансії, оскільки енергія активації виникнення вакансій менша за енергію утворення міжузельних атомів. У зоні виникнення вакансій порушується статична рівновага сил міжатомної взаємодії, що призводить до зміщення сусідніх атомів з їх рівноважних положень, мікрспотворень кристалічної решітки та мікронапруг. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин, механізм яких зв'язують з дислокаціями. Підвищення енергії призводить до зростання мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин. Для запобігання утворення тріщин необхідно знижувати енергію.

Енергія знижується шляхом підвищення швидкості наплавлення, при якому посилюється охолодження, зменшуються розміри активних плям, погонна енергія і тепловкладання, глибина проплавлення і ширина шва, частка участі основного металу в наплавленому, вміст вуглецю, мікрспотворення кристалічної решітки, мікронапруги щільність дислокацій, зварювальні напруги і подрібнюється структура, що призводить до підвищення тріщиностійкості. Природа утворення тріщин електромагнітна. Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги.

Тріщиностійкість, зносостійкість і корозійна стійкість, при високошвидкісному аргонодуговому наплавленні чавуну на низькій енергії хромонікелевим дротом, підвищуються в результаті утворення карбідів хрому, мінімуму вуглецю, зменшення енергії, зростання пластичності та ударної в'язкості, що характеризує тріщиностійкість, за рахунок нікелю, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, модифікації титаном, зменшення тиску дуги, глибини проплавлення і частки участі основного металу в наплавленому. Мінімум вмісту вуглецю запобігає утворенню тріщин через

Машинобудування і зварювальне виробництво

випадання карбідів хрому і розшарування по межах зерен, забезпечує підвищення зносостійкості та корозійної стійкості.

Енергозберігаюче аргонодугове наплавлення на низькій енергії, за рахунок низького катодного падіння напруги, забезпечує мінімум енергії, стабільність процесу, максимальний коефіцієнт легування, низький тиск дуги, низьку частку участі основного металу в наплавленому і зниження енергії в 1,5 – 2 рази, в порівнянні з наплавленням під флюсом. Підвищення ефективності високошвидкісного наплавлення на низькій енергії підтверджує закон мінімуму енергії.

Розроблено енергозберігаючий процес аргонодугового високошвидкісного наплавлення на низькій енергії шийок чавунних валків, з підігрівом низьковуглецевим хромонікелевим дротом Зв06Х19Н9Т, що забезпечує утворення карбідів хрому, аустеніту, максимальний перехід легуючих елементів, модифікацію, зростання пластичності, швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення енергії, вмісту вуглецю, мікрспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості, зносостійкості та корозійної стійкості.

Список використаних джерел

1. Прохоров Н.М. Фізичні процеси у металі при зварюванні / Н.М. Прохоров. - Т.П. - К.: Металургія, 1996. - 600 с.
2. Порівняльне визначення щільності дислокацій у напівкристалах по ширині рентгенівських ліній та електронномікроскопічно / О.М.Іванов, Ю.О. Меженний, А.Е. Острів та інших. // Заводська лабораторія. - 1997. - №2. - С.43 - 48.
3. Фінкель В.М. Фізика руйнування / В.М. Фінкель. - К.: Металургія, 2000. - 376с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - К.: Світ, 1992. - 306с.
5. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітним дротом / 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.
8. Стійкість наплавленого шару проти відшаровування у водневмісних середовищах / О.І. Стеклов, А.П. Алексєєв, О.А. Александров та ін. // Зварювальне виробництво. - 2009. - №12. - С.8 - 10.
9. Кархін В.А. Напружено-деформаційний стан зварного з'єднання з м'яким та твердими прошарками / В.А. Кархін, В.І. Михайлов, Г.П. Петров // Зварювальне виробництво. – 2004. – №3. – С.6 – 7.

HIGH-SPEED LOW-ENERGY SURFACING OF CAST IRON ROLLS

At the electric arc surfacing, under the influence of thermal excitation, vacancies appear in the deposited metal, since the activation energy for the formation of vacancies is less than the energy for the formation of interstitial atoms. In the zone where vacancies occur, the static balance of interatomic interaction forces is disrupted, which leads to displacement of neighboring atoms from their equilibrium positions and microdistortions of the crystal lattice and microstresses. Microstresses lead to intense formation and growth of cracks, the initiation mechanism of which is associated with dislocations. Increasing energy leads to increased microdistortion crystal lattice, microstresses, dislocation density, welding stresses and the occurrence of cracks. To prevent the formation of cracks, it is necessary to reduce the energy.

Energy is reduced by increasing the deposition rate, at which the cooling rate increases, the size of active spots, heat input and heat input, penetration depth and weld width, the share of the base metal in the deposit, carbon content, microdistortion of the crystal lattice, microstresses, dislocation density, welding stresses are reduced and the structure is refined, which leads to increased crack resistance. The nature of crack formation is electromagnetic; therefore, to increase crack resistance, it is necessary to ensure minimal welding voltages.

Crack resistance, wear resistance and corrosion resistance during high-speed argon-arc surfacing of cast iron at low energy with chromium-nickel wire are increased as a result of the formation of chromium carbides, a minimum of carbon, a decrease in energy, an increase in ductility and impact toughness, which characterizes crack resistance, due to nickel, an increase in the rate of deposition and crystallization, changes in the microstructure, modification with titanium, a decrease in arc pressure, penetration depth and the share of the base metal in the deposit. Minimum carbon content prevents the formation of cracks due to precipitation of chromium carbides and delamination along grain boundaries, provides increased wear resistance and corrosion resistance.

Energy-saving argon-arc surfacing at low energy due to the low cathode voltage drop provides minimal energy, process stability, maximum alloying coefficient, low arc pressure, low share of the base metal in the deposit and energy reduction by 1.5 - 2 times compared to submerged arc surfacing. The increase in the efficiency of high-speed surfacing at low energy confirms the law of minimum energy.

An energy-saving process of argon-arc high-speed surfacing at low energy of cast iron roll journals with heating with a low-carbon chromium-nickel wire Sv06Kh19N9T has been developed, which ensures the formation of chromium carbides, austenite, maximum transfer of alloying elements, modification, increased ductility, welding and crystallization speeds, microstructure refinement, reduction in energy, carbon content, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, interatomic distance, increased interatomic bonds, crack resistance, wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: *Cast iron rolls, high-speed surfacing at low energy, argon-arc surfacing with low-carbon chromium-nickel wire, welding stresses, crack resistance, wear resistance, corrosion resistance.*

Стаття надійшла 08.12.2025р.

НАУКОВІ ЗАДАЧІ ТРИБОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ПРИ АНАЛІЗІ ТРИБОСИСТЕМ

Дослідження присвячено розробленню інтегрованого підходу до аналізу зношування трибосистем в умовах абразивного середовища та обґрунтування напрямів підвищення зносостійкості матеріалів на основі твердих включень дибориду титану. У літературі бракує узгоджених системних підходів, які б об'єднували матеріалознавчі рішення з інженерними методами розрахунку для простого і надійного прогнозу зношування в конкретних умовах експлуатації. Проведено аналіз реальних зразків після експлуатації: досліджено морфологію поверхонь тертя та характер зношування зубців деталі за допомогою оптичної мікроскопії і вимірювання геометричних параметрів спрацювання. Експериментальні дослідження зносостійкості виконано в лабораторних умовах за методикою стандартизованого абразивного випробування ДСТУ 23.208-79. В роботі проаналізовано особливості механізму зношування сталеві пари тертя при дії абразивних часток та виявлено основні чинники та характер їхнього впливу - основний внесок може давати втомне спрацювання металу. Визначено залежність інтенсивності зношування матеріалу від відносної твердості абразиву і показана можливість прогнозування спрацювання за допомогою спрощених інженерних розрахунків; підтверджено вирішальну роль параметра відносної твердості абразиву в інтенсивності зношування. Обґрунтовано наукові підходи до підвищення зносостійкості трибосполучень – матеріал повинен бути достатньо твердим, щоб протистояти різанню, але водночас достатньо в'язким і міцним, щоб чинити опір втомним тріщинам, зокрема через модифікацію матеріалу робочої поверхні включеннями TiB_2 . Окреслено перспективні напрями подальших досліджень у галузі трибоматеріалознавства - застосування нейронних мереж для прогнозу зносу деталей машин при заданих режимах навантаження і властивостях матеріалів спільно з удосконаленими матеріалами.

Ключові слова: Зношування, абразив, надійність, надтверде включення, співвідношення твердостей.

Постановка проблеми. Проблема зношування деталей у трибосистемах залишається одним з найважливіших викликів машинобудування. Відсутність чіткого алгоритму для аналізу контактної взаємодії та прогнозування ресурсу роботи пари тертя в умовах абразивного середовища ускладнює проєктування вузлів і планування їх обслуговування. Зокрема, робота механізмів у запиленому або ґрунтовому середовищі призводить до потрапляння твердих абразивних частинок у зону контакту деталей, що викликає інтенсивне спрацювання. Наслідком надмірного зношування є погіршення кінематичних характеристик вузла, зниження ККД і ризик передчасного виходу з ладу, що загрожує простим обладнанням та економічними втратами.

Для забезпечення надійності трибосистем, які працюють в абразивних середовищах, необхідний інтегрований підхід. Він має включати врахування механічних чинників (навантаження, швидкість, режим тертя), властивостей матеріалів пари тертя, впливу абразиву та потенційних корозійних ефектів. Сучасні дослідники наголошують, що комплексний аналіз, який поєднує експериментальні дані та моделювання, здатен підвищити точність прогнозування зношування і надійності трибосистем [1]. Важливим напрямом трибоматеріалознавства є також пошук нових зносостійких матеріалів. Зокрема, перспективним є використання надтвердих керамічних включень, таких як диборид титану

Машинобудування і зварювальне виробництво

(TiB₂), у складі матеріалів пар тертя для підвищення їхньої зносостійкості [2]. TiB₂ вирізняється виключно високою твердістю (близько 25...35 ГПа) при відносно низькій густині (~4,5 г/см³) та хімічній стабільності, що робить його привабливим трибоматеріалом для роботи у важких умовах. Диборид титану вже знаходить застосування у різноманітних високонавантажених вузлах (різальний інструмент, броня, електроди для металургії, елементи підшипників тощо) і може слугувати зміцнювальною фазою у композиційних матеріалах.

Таким чином, актуальними науковими задачами трибоматеріалознавства є:

- 1) всебічне дослідження механізмів зношування трибосистем в абразивних середовищах;
- 2) розробка інтегрованих методик прогнозування ресурсу вузлів тертя з урахуванням комплексу чинників;
- 3) створення нових матеріалів та технологій зміцнення поверхонь, зокрема шляхом введення надтвердих включень (TiB₂ тощо) у структуру матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню абразивного зношування матеріалів присвячено багато наукових праць. Класичні результати трибології встановили критичну роль відносної твердості абразиву і матеріалу, що зношується. Зокрема, якщо твердість абразивних частинок перевищує твердість матеріалу деталі ($H_a/H_m > 1$), відбувається інтенсивне мікрорізання поверхні та абразивне спрацювання; у протилежному випадку ($H_a/H_m < 1$) домінує втомне та пластичне спрацювання без вираженого різання [3]. Дослідження також показують наявність порогових значень цього співвідношення: при низьких значеннях H_a/H_m зношування слабке, при збільшенні до певного критичного рівня різко зростає. Наприклад, для металокерамічних покриттів встановлено, що якщо $H_a/H_m > \sim 1,2$, то спостерігається перехід до інтенсивного зношування, тоді як при $H_a/H_m < \sim 0,8$ знос мінімальний [4]. Таким чином, співвідношення твердостей є визначальним фактором механізму руйнування поверхні тертя в абразивному середовищі.

Іншим важливим напрямом досліджень є розробка зносостійких матеріалів. Відомо, що композиційні матеріали із твердими включеннями у в'язкій матриці демонструють підвищену опірність абразивному зносу [3]. Такі матеріали поєднують надтверді фази (карбіди, бориди, нітриди тощо) з металевою основою, завдяки чому дрібні тверді частинки приймають на себе основний вплив абразиву, запобігаючи глибокому врізанню його в матрицю. Для ерозійно-абразивних умов рекомендується структура типу «тверда фаза + метал», де вміст надтвердих включень перевищує 50 % [3] - це забезпечує домінування механізму мікрорізання твердою фазою і зменшує втомне руйнування матриці. З іншого боку, за ударно-абразивних впливів занадто висока частка крихких твердих фаз може погіршити міцність, тому оптимальний склад залежить від умов експлуатації.

Особливу увагу привертає диборид титану (TiB₂) як перспективний компонент зносостійких композицій. TiB₂ належить до ультрависокотемпературних керамік і має унікальний набір властивостей: надвисоку твердість (25...35 ГПа, близьку до алмазу та B₄C) і міцність, хімічну інертність (стійкий у контакті зі сплавами Fe та Al), термічну стабільність та порівняно невелику густину [2]. Завдяки цьому TiB₂ розглядають як перспективний матеріал для захисних покриттів і армувальних фаз у композитах, здатних працювати в умовах інтенсивного тертя та зношування. Показово, що введення навіть ~14...22 % TiB₂ в металеві наплавлені шари суттєво підвищує їх твердість та знижує коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу порівняно з вихідним матеріалом [5]. Таким чином, сучасні публікації підтверджують, що зміцнення поверхонь за допомогою боридів титану є дієвим шляхом підвищення зносостійкості трибоспрямижень.

Попри значний прогрес у вивченні окремих аспектів, комплексне вирішення проблеми зношування трибосистем досі залишається актуальним. Більшість робіт фокусуються або на матеріалознавчих аспектах (розробка нових сплавів, покриттів), або на моделюванні трибопроцесів, або на впливі окремих чинників (мастило, корозія, температура). Однак

реальні умови експлуатації включають супутній вплив кількох факторів одразу, тому поєднання підходів є необхідним. Окремі сучасні дослідження пропонують методики прогнозування зношування, що враховують структуру поверхні, шорсткість, зміну контактної площі тощо, і навіть використовують штучний інтелект для прогнозу ресурсу трибосистем [6]. Вони показують, що залучення даних про стан поверхонь та багатофакторний аналіз підвищує точність передбачення зносу і надійності роботи вузлів. Проте у відкритій літературі бракує узгоджених системних підходів, які б об'єднували матеріалознавчі рішення (наприклад, зміцнення TiB_2) з інженерними методами розрахунку для простого і надійного прогнозу зношування в конкретних умовах експлуатації. Це визначає напрямок даного дослідження.

Мета досліджень. Метою даної роботи є розроблення інтегрованого підходу до аналізу зношування трибосистем в умовах абразивного середовища та обґрунтування напрямів підвищення зносостійкості матеріалів на основі твердих включень дибориду титану. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати особливості механізму зношування сталеві пари тертя при дії абразивних часток, виявити основні чинники та характер їхнього впливу.
- експериментально визначити залежність інтенсивності зношування матеріалу від відносної твердості абразиву (коефіцієнт Ha/Hm) і оцінити можливість прогнозування спрацювання за допомогою спрощених інженерних розрахунків (з допустимою похибкою $\sim 5\%$).
- на основі результатів дослідження та аналізу публікацій обґрунтувати наукові підходи до підвищення зносостійкості трибосполучень, зокрема через модифікацію матеріалу робочої поверхні включеннями TiB_2 , та окреслити перспективні напрями подальших досліджень у галузі трибоматеріалознавства.

Основний матеріал дослідження. Об'єкт дослідження - сталева фрикційна пара, що працює в умовах абразивного зношування (типовий приклад - зубчастий елемент механізму, контактуючий з іншим металевим елементом у середовищі, забрудненому піском чи ґрунтом). Матеріал деталей - конструкційна вуглецева сталь 45 (аналог сталі С45 або 1045, твердість $\sim HV\ 220-250$). Попередньо проведено аналіз реальних зразків після експлуатації: досліджено морфологію поверхонь тертя та характер зношування зубців деталі за допомогою оптичної мікроскопії (збільшення до $\times 50$) і вимірювання геометричних параметрів спрацювання. Лінійний знос зубців оцінювали після певних умовних періодів роботи механізму, що дозволило встановити динаміку змін профілю та нерівномірність зношування вздовж поверхні контакту.

Експериментальні дослідження зносостійкості виконано в лабораторних умовах за методикою стандартизованого абразивного випробування (аналог ДСТУ 23.208-79) (рис. 1).

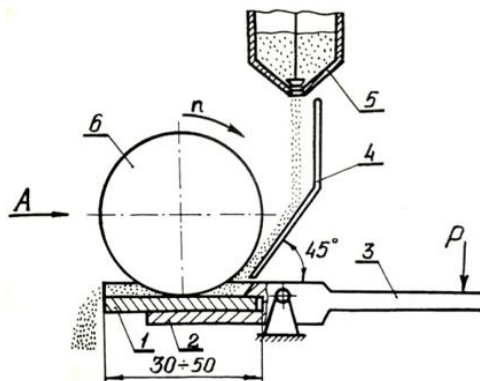


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки для визначення відносної зносостійкості

Випробування за схемою (рис. 1) проводять на випробувальній установці, яка містить привід, що забезпечує обертання навколо горизонтальної осі гумового ролика 6, тримач зразків 2, важіль 3, що притискає зразок 1 до ролика, пристрій 5, який дозує подачу абразивних частинок в зону тертя по направляючому лотку 4, пристрій 8 для контролю сумарної кількості обертів ролика в процесі випробувань. Суть методу полягає у тому, що зразок зі сталі 45 притискається до обертового гумового диска, в зону тертя подаються абразивні частки визначеного розміру, які спричиняють зношування зразка. Розмір часток абразиву становив не більше 2,0 мм (переважно 0,3...1,5 мм). Для оцінки впливу властивостей абразиву було обрано чотири типи абразивного матеріалу [7] з різною твердістю та природою: доломіт, кварцовий пісок, граніт і корунд. Мікротвердість цих абразивів (за Вікерсом) становила приблизно: 4,1 ГПа (доломіт), 13,5 ГПа (пісок кварцовий), 14,5 ГПа (граніт) та 18 ГПа (корунд). Таким чином, коефіцієнт співвідношення твердості абразиву до матеріалу (H_a/H_m) змінювався від $\sim 1,1$ (дуже м'який абразив щодо сталі) до $\sim 4,5$ (абразив значно твердіший за матеріал зразка).

Випробування зразків проводили шляхом порівняння з еталонним матеріалом (сталь 45 без обробки) для розрахунку відносної зносостійкості. Після певного часу тертя при подачі заданого абразиву фіксували втрату маси зразка. Інтенсивність зношування (E) визначалася як втрата маси зразка за одиницю часу (г/хв) при сталій нарузці та швидкості ковзання. Для підвищення достовірності результатів кожне випробування повторювали декілька разів, після чого обчислювали середнє значення E . Отримані дані зведено у таблицю, що дозволяє проаналізувати залежність зношування від твердості абразиву.

Крім того, на основі морфологічного аналізу поверхонь тертя та експериментальних результатів, було проведено багатокритеріальний аналіз трибосистеми. Зокрема, оцінювали внесок різних механізмів руйнування (втомного, абразивного, корозійного тощо) у загальне спрацювання деталі. Такий підхід дозволив кількісно визначити, який з механізмів є домінуючим за заданих умов, і зіставити ці висновки з літературними даними.

В результаті огляду деталей після експлуатації встановлено, що зношування робочих поверхонь має комплексний характер. Зубці сталеві шестірні (ведучого колеса) стираються нерівномірно: максимальний знос спостерігається на бічних поверхнях, що входять у зачеплення під навантаженням, тоді як інші ділянки стираються менше. Вже після відносно нетривалого періоду інтенсивної роботи (еквівалентного кільком місяцям безперервної експлуатації) профіль зубців суттєво змінився. Вимірювання показали, що за 7 місяців роботи величина зносу більшості зубів досягла ~ 6 мм по висоті, що відповідає гранично допустимому значенню для даного вузла. Після досягнення цієї межі деталь потребує негайної заміни чи ремонту, оскільки подальша експлуатація стає небезпечною. Для порівняння, нормативний ресурс роботи таких деталей (за стандартних умов) оцінювався приблизно у 9 місяців. Отже, у реальних забруднених умовах відбувся передчасний вихід із ладу - фактичний ресурс виявився на ~ 22 % меншим за очікуваний. Це підтверджує, що абразивне середовище суттєво прискорює спрацювання навіть міцних сталевих деталей.

Виявлено також специфічні особливості поверхневого руйнування. На зношених поверхнях зубців спостерігаються сліди мікрорізання (борозни, подряпини від твердих часток) впереміш зі згладженими площадками пластичного вирівнювання металу. Місцями фіксуються дрібні втомні тріщини та лускоподібне відшарування матеріалу. Це свідчить про одночасну дію двох основних механізмів зношування: абразивного різання і втомного спрацювання металу. Абразивні частки, потрапляючи у контакт, можуть закріплюватися між поверхнями або врзатися в метал і здійснювати різання (мультиконтактне тривале деформування), тоді як періодичне навантаження зубців призводить до накопичення втомних пошкоджень у приповерхневому шарі. Отже, реальна картина зношування має комплексний, багатоцикловий характер.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Лабораторні тести з різними абразивами кількісно підтвердили критичний вплив твердості сторонніх часток на інтенсивність зносу сталі 45 (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність інтенсивності абразивного зношування

Абразивний матеріал	Твердість H_a , ГПа	Відношення H_a/H_m	Інтенсивність зношування E , г/хв
Доломіт	$\approx 4,1$	$\approx 1,1$	7,414
Кварцовий пісок	$\approx 13,5$	$\approx 3,3$	18,231
Гранітний відсів	$\approx 14,5$	$\approx 3,9$	22,324
Корунд	≈ 18	$\approx 4,5$	24,113

Як видно, перехід від м'якого абразиву (доломіту) до середньо-твердого (кварцового піску) спричинив різке збільшення швидкості зносу сталі приблизно в 2,5 рази. Подальше підвищення твердості абразиву (граніт, корунд) вже не давало такого драматичного ефекту: при збільшенні H_a з ~ 13 до ~ 18 ГПа інтенсивність зношування зростає відносно помірно (на ~ 32 %). Графічно залежність $E = f(H_a/H_m)$ має вигляд кривої (рис. 2).

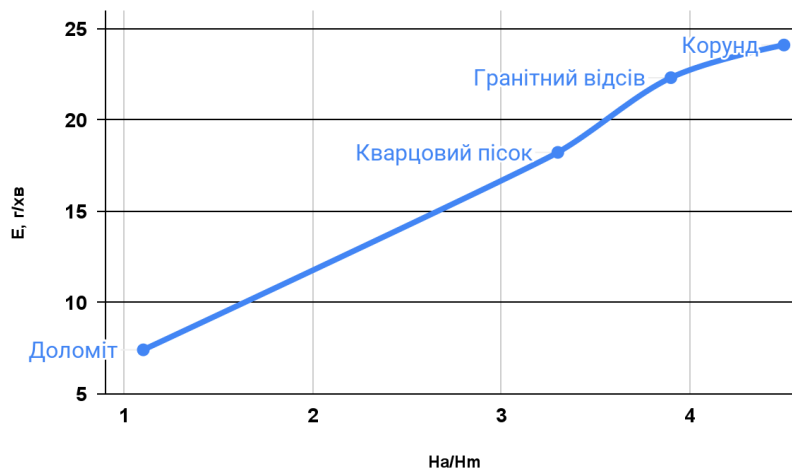


Рисунок 2 – Залежність інтенсивності зношування E від відношення твердості H_a/H_m

Таким чином, експериментально підтверджено існування певного критичного діапазону співвідношення твердостей. У нашому випадку максимальний стрибок зносу відбувається десь між $\lambda = 1 \dots 3$ (від доломіту до піску); за $\lambda > 3$ подальше зростання зносу уповільнюється. Ці результати узгоджуються з літературними даними [8] щодо ефекту насичення: коли твердість абразиву значно перевищує твердість матеріалу деталі, величина зносу досягає гранично високих рівнів і надалі змінюється незначно [9]. З практичного погляду це означає, що кварцовий пісок ($H_a \approx 13$ ГПа) можна вважати тим «агресивним» абразивом, орієнтуючись на який слід проектувати зносостійкість трибосистем, адже ще твердіші частки (корунд) збільшують знос лише незначно.

На основі експериментальних даних та морфологічних спостережень здійснено оцінку внеску різних механізмів у загальне зношування. Було встановлено, що в умовах випробуваної сталеві трибопари основну частку руйнування поверхні (~ 75 %) забезпечує багатоциклове втомне зношування металу. Це зумовлено безпосереднім контактом метал-метал (зубець пари тертя під навантаженням), який призводить до накопичення пошкоджень у матеріалі навіть без абразиву. Другий за значущістю механізм - одноциклове абразивне зношування (близько 20 % внеску). Він відповідає ситуаціям, коли поодинокі тверді частки, потрапляючи між

поверхнями, викликають мікрорізання чи видалення фрагментів поверхневого шару за один акт контакту. В нашому випадку саме взаємодія "метал - абразив" через механізми мікрорізання і викидання частинок матеріалу дала цей внесок. Третім фактором, що виявився помітним, є корозійно-механічне зношування (оцінено $\sim 4\%$). Його появу пов'язують з впливом навколишнього середовища (волога, реактивні речовини) на поверхню тертя: мікроскопічна корозія або окиснення металу спільно з тертям прискорює утрату матеріалу. Випробування проводились у відносно сприятливих умовах (без агресивних середовищ), тому частка корозійного компонента невелика. Решту ($\sim 1\%$) складають інші незначні механізми та випадкові фактори.

Отриманий розподіл підтверджує комплексний характер зношування. Основний обсяг утрати матеріалу відбувається внаслідок повторних механічних навантажень (втома), підсилених дією абразиву, що час від часу спричиняє гострі пошкодження поверхні. Така комбінація є характерною для трибосистем, що працюють у запилених середовищах: навіть коли абразив не постійно присутній у контакті, періодичне його потрапляння спричинює локальні дефекти, які далі розвиваються як втомні тріщини при продовженні роботи. Відтак, для ефективного підвищення довговічності вузла необхідно знизити як втомне спрацювання (через підвищення міцності і опору втомі матеріалу), так і абразивне (через унеможливлення врізання твердих часток або зменшення їх абразивної дії).

Результати дослідження дозволяють сформулювати низку важливих положень щодо аналізу та підвищення зносостійкості трибосистем. По-перше, підтверджено вирішальну роль параметра Ha/Hm (відносної твердості абразиву) у інтенсивності зношування. Виявлений нелінійний характер залежності (із зоною різкого росту зносу при $Ha/Hm > \sim 1 \dots 2$ і подальшим насиченням) узгоджується з відомими моделями абразивного зношування. Це означає, що при проектуванні та аналізі трибосистем слід особливу увагу приділяти саме цьому співвідношенню. Практичний висновок полягає в тому, що матеріал деталей пари тертя бажано робити якомога твердішим відносно тих абразивів, з якими він ймовірно контактуватиме. Якщо забезпечити $Hm \gg Ha$ (наприклад, шляхом зміцнення поверхні), то механізм мікрорізання майже припиняється і зношування перейде в м'який режим, визначений втомними чи легкими абразивними процесами. В ідеалі, твердість поверхневого шару деталі повинна перевищувати твердість типових абразивів середовища. Звичайно, повністю виключити знос це не зможе (бо залишиться тертя і потенційно втома), але інтенсивність спрацювання буде на порядок нижчою.

По-друге, результати підтвердили, що кварцовий пісок є одним з найнебезпечніших природних абразивів для сталевих вузлів. Це зумовлено поєднанням високої твердості кварцу ($\sim 1100 \dots 1200$ HV, або ~ 13 ГПа) та його широкою розповсюдженістю (грунт, будівельний пил тощо). Саме піщані частки найчастіше спричиняють абразивний знос у підшипниках, зубчастих передачах, гусеничних та інших вузлах машин, що працюють у відкритому середовищі. В наших випробуваннях кварцовий абразив продемонстрував різке підвищення зносу порівняно з доломітовим, тому при розробці захисних заходів варто орієнтуватися на нейтралізацію впливу саме кварцу як репрезентативного абразиву. Менш тверді частки (типу вапняку, гіпсу тощо) є менш небезпечними, а твердіші (корунд) трапляються рідше. Отже, технології захисту повинні бути ефективними в першу чергу проти піску/грунту.

По-третє, аналіз механізмів зношування показав, що навіть за наявності абразиву основний внесок може давати втомне спрацювання металу. Це означає, що конструктивні та технологічні заходи підвищення довговічності мають націлюватися не лише на абразивостійкість, але і на втомну міцність поверхневого шару. Традиційні методи зміцнення (термічна обробка, наклеп, поверхневе легування) спрямовані на підвищення твердості та зниження пластичності, що справді зменшує врізання абразиву. Однак надмірно крихкий поверхневий шар може швидше руйнуватися від багатоциклових навантажень. Тому потрібен

Машинобудування і зварювальне виробництво

збалансований підхід: матеріал повинен бути достатньо твердим, щоб протистояти різанню, але водночас достатньо в'язким і міцним, щоб чинити опір втомним тріщинам. Композиційні покриття або матеріали з градієнтною структурою можуть дати таку комбінацію властивостей. Наприклад, металокерамічний шар з твердими включеннями у відносно в'язкій матриці здатен одночасно протидіяти і абразиву, і гасити втомні напруження.

Одним з найбільш перспективних рішень, що обговорюється в контексті нашої роботи, є використання дибориду титану (TiB_2) як зміцнювальної фази в поверхневих шарах. За рахунок своєї виняткової твердості TiB_2 може ефективно протидіяти врізанню кварцових та інших абразивних часток - практично, абразив буде швидше спрацьовуватися сам або дробитися, ніж руйнувати метал навколо частинок TiB_2 . До того ж, TiB_2 хімічно стабільний і зберігає твердість при високих температурах, що важливо при інтенсивному терті. Є декілька можливих шляхів реалізації цієї ідеї: дифузійне насичення бором і титаном (отримання боридних шарів), наплавлення композиційних стрічкових електродів з порошком TiB_2 , лазерне легування сумішшю $\text{Ti} + \text{B}$ для утворення дрібнодисперсних включень TiB_2 в матриці тощо. Вже проведені дослідження боридування титанових сплавів та сталей свідчать про формування подвійних шарів $\text{TiB}_2 + \text{TiB}$ з надвисокою мікротвердістю ($\sim 1800 \text{ HV}$ і більше) та суттєвим підвищенням зносостійкості порівняно з незміцненим матеріалом (зниження коефіцієнта тертя, уповільнення зносу). Таким чином, впровадження TiB_2 як елемента трибосистеми є реальним шляхом продовження їх ресурсу.

З точки зору трибоматеріалознавства, важливо продовжити дослідження оптимального вмісту та форми твердих фаз у зміцнених шарах. Надмірна концентрація керамічних включень може призвести до крихкості, тому слід шукати компромісний склад. Дослідження композиційних матеріалів показують, що структура і мікророзмір мають велике значення: дрібні рівномірно розподілені частки (розміром порядку кількох мікрон) ефективніші в гасінні тріщин і зупинці зносу, ніж великі включення. Також перспективним є поєднання твердих фаз з само-змащувальними компонентами (наприклад, графіт + TiB_2), що одночасно зменшить тертя. Комплексний підхід до матеріалознавчого вдосконалення трибосистем одне з ключових завдань подальших робіт.

Нарешті, варто зазначити, що інтегрований підхід у трибології означає не лише матеріалознавче вирішення, але й розвиток методів моделювання та прогнозування. Отримані нами кількісні залежності (наприклад, між Ha/Hm і зносом) можуть бути використані для побудови емпіричних і напіваналітичних моделей зношування. Сучасні інструменти комп'ютерного інжинірингу та штучного інтелекту відкривають можливості для створення моделей, які, навчаючись на експериментальних даних, зможуть досить точно передбачати ресурс трибоспрямижень. Вже є успішні приклади застосування нейронних мереж для прогнозу зносу підшипників, зубчастих передач тощо при заданих режимах навантаження і властивостях матеріалів. Розвиток таких моделей спільно з удосконаленими матеріалами (наприклад, сталями, зміцненими TiB_2) дає синергійний ефект - більш надійні та довговічні трибосистеми, що піддаються інженерному розрахунку і оптимізації на етапі проєктування.

ВИСНОВКИ

Розглянуто наукові задачі трибоматеріалознавства при аналізі трибосистем. Розроблено комплексний підхід до оцінювання зносостійкості, який враховує одночасно механічні, абразивні та середовищні чинники. Показано, що застосування багатофакторного аналізу дозволяє кількісно прогнозувати ресурс вузлів тертя з похибкою, прийнятною для інженерної практики (близько 5 %). Це створює основу для побудови спрощених методик розрахунку довговічності деталей, що працюють в абразивних умовах.

Експериментально підтверджено ключову роль відносної твердості абразиву. При $Ha/Hm > 1$ спостерігається різке зростання інтенсивності зношування сталі за рахунок переходу до режиму мікрорізання абразивом. Встановлено нелінійну залежність: у діапазоні $Ha/Hm \approx 1...3$ знос зростає стрімко, тоді як при перевищенні певного порогу ($\approx 3...4$) досягається насичення подальше підвищення твердості абразиву дає лише незначне збільшення зносу. Таким чином, для оцінки трибосистеми критично враховувати значення Ha/Hm і прагнути знизити його (через збільшення твердості матеріалу деталей або зменшення твердості/кількості абразиву в контакті).

В умовах сталеві трибопари зі стороннім абразивом основними механізмами руйнування поверхні є втомне (≈ 75 % внеску) та абразивне одноциклове (≈ 20 %). Корозійний компонент вносять близько 4 % зносу у випробуваних умовах. Це означає, що навіть за наявності твердих часток більша частина матеріалу втрачається через накопичення втомних пошкоджень від повторних навантажень. Абразив прискорює руйнування, створюючи локальні дефекти, які далі ростуть під дією циклічних навантажень. Для підвищення ресурсу вузла треба одночасно зменшувати вплив обох цих механізмів - і абразивного різання, і втомного спрацювання.

Виявлено, що кварцовий пісок спричиняє найбільше прискорення зносу серед поширених абразивів, будучи своєрідним «гіршим випадком» для сталевих деталей. Це пов'язано з його високою твердістю та розповсюдженістю. Подальше збільшення твердості абразиву (до рівня корунду) не приводить до пропорційного росту зносу. Тому при проєктуванні трибосистем для роботи в запиленому середовищі доцільно приймати кварцовий абразив за еталон при виборі захисних матеріалів і технологій - матеріал, що витримує дію кварцу, забезпечить і захист від м'якших або трохи твердіших часток.

Обґрунтовано перспективність застосування TiB_2 як ефективного трибоматеріалу для підвищення зносостійкості. Висока твердість TiB_2 (25...35 ГПа) дозволяє суттєво зменшити інтенсивність абразивного різання - для включень TiB_2 відношення Ha/Hm для кварцу та корунду становить менше одиниці, що суттєво знижує абразивну дію. Додавання навіть 10...20 % TiB_2 у склад металокерамічних покриттів збільшує їх твердість та суттєво знижує знос і тертя. Рекомендується розробка композиційних зміцнювальних шарів (наприклад, боридних), де дрібні частки TiB_2 рівномірно розподілені у матриці сталі або сплаву. Такий підхід дозволить одночасно протидіяти абразиву і підвищити витривалість поверхневого шару до втомних навантажень.

Список використаних джерел

1. Al-Quraan, T. M. A., Alfaqs, F., Alrefo, I. F. S., Vojtov, V., Voitov, A., Kravtsov, A., Miroshnyk, O., Kondratiev, A., Kučera, P., & Píštěk, V. (2023). Methodological approach in the simulation of the robustness boundaries of tribosystems under the conditions of boundary lubrication. *Lubricants*, 11(1), 17. <https://doi.org/10.3390/lubricants11010017>
2. Lv, X., Yin, Z., Yang, Z., Chen, J., Zhang, S., Song, S., & Yu, G. (2024). Review on the development of titanium diboride ceramics. *Recent Progress in Materials*, 6(2), 009. <https://doi.org/10.21926/rpm.2402009>
3. Kulu, P., Tarbe, R., & Vallikivi, A. (2005). Abrasive wear of powder materials and coatings. *Materials Science (Medžiagotyra)*, 11(3), 266-271.
4. Wang, Q., Zhang, Y., Ding, X., & Seshadri, R. C. (2020). Effect of WC grain size and abrasive type on the wear performance of HVOF-sprayed WC-20Cr₃C₂-7Ni coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 29(7), 1387-1400.
5. Liu, S., & Pang, M. (2021). Effect of TiB_2 content on properties of nickel-coated graphite

self-lubricating coating prepared by laser cladding. *Coatings*, 11(12), 1501. <https://doi.org/10.3390/coatings11121501>

6. *Argatov, I.* (2019). Artificial neural networks (ANNs) as a novel modeling technique in tribology. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 5, 30. <https://doi.org/10.3389/fmech.2019.00030>

7. *Popov S.M., Hrebieshkov M.O., Kapustian O.Ye.* Problem analysis and optimization of material parameters for the creation of wear-resistant coatings // Університетська наука - 2025 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 15-16 травня 2025 р) : в 3 т. Т. 1: факультети: Навчально-науковий інститут сучасних технологій, машинобудування та зварювання, транспортний, інформаційних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2025. – С. 135-136

8. *Попов С. М.* Триботехнічні та матеріалознавчі аспекти руйнування сталей і сплавів при зношуванні / *С. М. Попов, Д. А. Антонюк, В. В. Непребко* - Запоріжжя, 2010. - 280 с.

9. *Zhang, Z., Liu, Y., & Wang, L.* (2013). Effect of particle hardness on mild-severe wear transition of hard second phase materials. *Wear*, 303(1-2), 1-6.

10. *Rosenkranz, A., Marian, M., Profito, F. J., Aragon, N., & Shah, R.* (2021). The use of artificial intelligence in tribology—A perspective. *Lubricants*, 9(1), 2. <https://doi.org/10.3390/lubricants9010002>

11. *Miroshnuk, O. O., & Tymchuk, S. O.* (2013). Uniform distribution of loads in the electric system 0.38/0.22 kV using genetic algorithms. *Technical Electrodynamics*, 2013(4), 67-73.

12. *Попов С. М.* Дослідження руйнування поверхні в умовах напруги зносостійким сплавом / *С. М. Попов, М. О. Гребешков* // *Future of science: innovations and perspectives. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference.* SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2025. pp. 122-126. - ISBN 978-91-87224-03-4

Popov S.M., Laptieva H.M., Hrebieshkov M.O., Kapustian O.Ye.

SCIENTIFIC PROBLEMS OF TRIBOMATERIALS SCIENCE IN THE ANALYSIS OF TRIBOSYSTEMS

The research is devoted to the development of an integrated approach to the analysis of wear of tribosystems in an abrasive environment and the justification of directions for increasing the wear resistance of materials based on hard inclusions of titanium diboride. The literature lacks coordinated systemic approaches that would combine materials science solutions with engineering calculation methods for a simple and reliable prediction of wear in specific operating conditions. An analysis of real samples after operation was carried out: the morphology of friction surfaces and the nature of wear of the teeth of the part were investigated using optical microscopy and measurement of geometric wear parameters. Experimental studies of wear resistance were carried out in laboratory conditions using the method of standardized abrasive testing DSTU 23.208-79. The work analyzed the features of the mechanism of wear of a steel friction pair under the action of abrasive particles and identified the main factors and the nature of their influence - the main contribution can be made by fatigue wear of the metal. The dependence of the material wear intensity on the relative hardness of the abrasive has been determined and the possibility of predicting wear using simplified engineering calculations has been shown - the decisive role of the parameter of the relative hardness of the abrasive in the wear intensity has been confirmed. Scientific approaches to increasing the wear resistance of tribocompounds have been substantiated - the material must be hard enough to resist cutting, but at the same time sufficiently viscous and strong to resist fatigue cracks, in particular

through modification of the working surface material with TiB_2 inclusions. Promising directions for further research in the field of tribomaterials science have been outlined - the use of neural networks to predict the wear of machine parts under given loading conditions and material properties in conjunction with improved materials.

Keywords: *Wear, abrasive, reliability, superhard inclusion, hardness ratio.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 620.17:539.4

doi.org/10.31498/2522-9990302025347058

Беженів С.О., Капустян О.Є.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛИШКОВИХ ПОВЕРХНЕВИХ МАКРОНАПРУЖЕНЬ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ НІКЕЛЮ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Стан поверхневого шару матеріалу, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями є найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності. Проте врахування дії просторових внутрішніх сил пружності є досі дуже проблематичним. Робота присвячена дослідженню зв'язку між різними параметрами залишкових поверхневих макронапружень та механічними характеристиками зразків сплаву нікелю з різною технологічною спадковістю із застосуванням неруйнівного методу акустичної емісії. Досліджували циліндричні зразки сплаву нікелю ХН77ТЮР-ВД з різною технологічною спадковістю: після точіння, шліфування, електрохімічного полірування, а також після поверхневого пластичного зміцнення сталевими кульками, які коливалися з ультразвуковою частотою. Величину осевих залишкових поверхневих макронапружень визначали за кривою деформації спеціальних зразків при поширеному травленні матеріалу. Особливості випромінювання акустичної емісії в зразках досліджували при ступінчастому навантаженні зразків за схемою триточкового вигину до рівня напружень $\sigma_{0.2}$. Механічні характеристики статичної міцності визначалися в результаті випробувань на одновісне розтягування зразків. Втомні випробування проводилися в умовах дії циклічних згинальних напружень, що виникають в результаті введення зразка в резонансні поперечні коливання на електродинамічному вібростенді. Визначалася обмежена границя витривалості зразків на базі 10^7 циклів. Наведено результати аналізу впливу різних параметрів залишкових поверхневих макронапружень на механічні характеристики сплаву нікелю з використанням методу акустичної емісії. Встановлено визначальні параметри залишкових поверхневих макронапружень, що контролюють процес багатоциклової втоми. Запропоновано спосіб їх визначення неруйнівним експрес методом акустичної емісії.

Ключові слова: Акустична емісія, багатоциклова втома, залишкові напруження, статистичний аналіз, технологічна спадковість.

Постановка проблеми. Найважливішим фактором, що впливає на властивості міцності матеріалу, є стан його поверхневого шару, який визначається різними параметрами, в тому числі і залишковими поверхневими макронапруженнями (ЗПМ). Проте досі дуже проблематичним залишається врахування дії просторових внутрішніх сил пружності, що є наслідком попередніх термічних і механічних ефектів. З'ясування природи зміцнення

матеріалу є настільки важким для вирішення завданням, що поки неможливо запропонувати конкретну і переконливу кількісну теорію цього питання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки опубліковано велику кількість робіт, присвячених окремим питанням зміцнення деталей поверхневою пластичною деформацією [1 – 4], але суттєвого просування до створення закінченої теорії зміцнення поки що не відбулося. Однією з причин такої ситуації є недостатня увага, що приділяється питанням вивчення впливу окремих зміцнювальних факторів на кінетику руйнування матеріалу, а також аналізу параметрів, які адекватно характеризують напружений стан поверхні. Більшість останніх досліджень у галузі зміцнення присвячено вирішенню часткових питань, що стосуються вивчення залежностей характеристик міцності матеріалу від видів і режимів поверхневої пластичної обробки матеріалів [5 – 8]. Досліджень, які розкривають механізм впливу параметрів зміцнення на механічні властивості матеріалів, явно замало.

Принципово нові можливості дослідження механізмів зміцнення з'являються при використанні акустичної емісії (АЕ) в механіці руйнування, оскільки в основу методу АЕ покладено дослідження пружних хвиль у твердому тілі, що виникають внаслідок локальної внутрішньої динамічної перебудови його структури [9, 10]. На відміну від тривалого та трудомісткого процесу визначення ЗПМ методом поширюваного стравлювання метод АЕ може виявитися дуже ефективним при вирішенні таких важливих питань, як експериментальне визначення напружено-деформованого стану мікрооб'єктів, що визначає властивості міцності матеріалу [11, 12].

Мета досліджень. Метою даної роботи є дослідити зв'язок між різними параметрами залишкових поверхневих макронапружень та механічними характеристиками зразків сплаву нікелю з різною технологічною спадковістю із застосуванням неруйнівного методу АЕ.

Основний матеріал дослідження. Матеріали та методики експериментальних досліджень. Досліджували циліндричні зразки сплаву нікелю ХН77ТЮР-ВД ($\text{Ni} - 21\text{Cr} - 2,6\text{Ti} - 0,6\text{Al} - 0,46\text{Fe} - 0,37\text{Cu} - 0,31\text{Si} - 0,29\text{Mn}$) з різною технологічною спадковістю, що мали різні епюри ЗПМ. Досліджували зразки після точіння (Т), шліфування (Ш), електрохімічного полірування (ЕХП), а також після поверхневого пластичного зміцнення сталевими кульками, які коливалися з ультразвуковою частотою (ультразвукове зміцнення, УЗЗ). Величину осевих ЗПМ визначали за кривою деформації спеціальних зразків при поширеному травленні матеріалу за методикою Давиденко [13]. Особливості випромінювання акустичної емісії в зразках досліджували за допомогою приладів АФ-15 і АЕ-100 при ступінчастому навантаженні зразків за схемою триточкового вигину до рівня напружень $\sigma_{0,2}$ за методикою [14]. Фіксували сумарний рахунок сигналів АЕ ($N_{\text{АЕ}}$), їх загальну енергію ($E_{\text{АЕ}}$) та максимальне середньоквадратичне значення амплітуди ($\bar{A}_{\text{max}}$). Застосовували перетворювач з практично рівномірною амплітудно-частотною характеристикою в діапазоні від 0.1 до 0.8 МГц. Дослідження виявили, що змінювання інтенсивності сигналів АЕ від початку навантаження мають експоненціальний характер, тому інтервал реєстрації сигналів АЕ без суттєвої втрати точності складав 10 с. Механічні характеристики статичної міцності визначалися в результаті випробувань на одновісне розтягування зразків з діаметром робочої частини 6 мм і об'ємом 2.26 см^3 на випробувальній машині УМЕ-10ТМ при швидкості переміщення рухомої частини 0.167 мм/с. Втомні випробування проводилися в умовах дії циклічних згинальних напружень, що виникають в результаті введення зразка в резонансні поперечні коливання на електродинамічному вібростенді ВЕДС-400. Оскільки встановлення горизонтальної ділянки кривої багатоциклової втоми потребує довготривалих випробувань, то визначалася обмежена границя витривалості зразків на базі 10^7 циклів.

На рис. 1 показано розподіли середніх значень осевих залишкових макронапружень у поверхневому шарі зразків з різною технологічною спадковістю. Більшість епюр ЗПМ є схожими немонотонними увігнутими кривими у вигляді "гачка". Винятком є епюра зразка

після шліфування, що має опуклу форму. Аномальність властивостей поверхневого шару після шліфування пояснюється дією великих градієнтів температур при обробці.

Оскільки розподіл середніх значень осьових ЗПМ σ_o в поверхневому шарі матеріалу являють собою складні криві з максимумом на деякій глибині під поверхнею, виникає питання встановлення характерного параметра цих епюр, що має визначальний вплив на властивості міцності матеріалу. Зазвичай таким параметром вважають максимальне значення $\sigma_{o \max}$, хоча воно не має фізичного зв'язку з будь-якою загальноприйнятою концепцією руйнування. Досить поширеним є припущення, що руйнація починається з поверхні. У цьому випадку визначальним має бути залишкове напруження σ_n на поверхні об'єкта, що досліджується. Ще однією поширеною гіпотезою руйнування є положення про те, що процес руйнування контролюється максимальними напруженнями, що розтягують $\sigma_{p \max}$, які в даному випадку є результатом накладання залишкових напружень σ_o на діючі від зовнішнього навантаження напруження σ_a : $\sigma_{p \max} = (\sigma_o + \sigma_a)_{\max}$. При простих схемах навантаження розрахунок напружень σ_a труднощів не викликає. Однак прямих і надійних методів визначення повної епюри залишкових напружень дослідники поки не мають, тому це завдання доцільно спростити. Оскільки в відносно вузькій зоні "гачка" діють стискаючі напруження значної величини, то вони повинні врівноважуватися порівняно слабкими напруженнями, що розтягують, розподіленими в решті відносно великої області перерізу зразка. З рівності площ епюр напружень, що стискають і розтягують випливає, що величина останніх у матеріалі зразка не перевищує 2 % від $\sigma_{0.2}$. Отже, з достатньою точністю можна вважати, що $\sigma_{p \max}$ дорівнюють напруженню від зовнішнього навантаження, що діє на деякій глибині h_0 від поверхні зразка, де $\sigma_o \approx 0$.

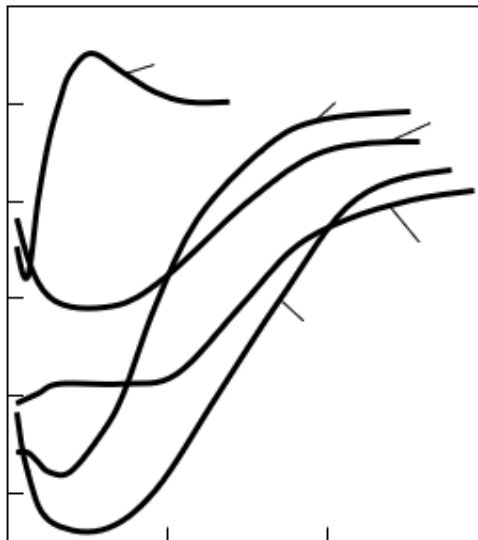


Рисунок 1 – Розподіл осьових залишкових макронапружень по глибині поверхневого шару зразків з різною технологічною спадковістю: 1 – Ш, 2 – Ш+УЗЗ, 3 – ЕХП, 4 – Т, 5 – ЕХП+УЗЗ.

Більш плідним виявляється підхід, коли дослідники пов'язують зміцнення матеріалу з його структурою, вплив якої на характеристики міцності більш за все проявляється при циклічних схемах навантаження. У роботі [15] наголошується, що на стадії інкубаційного періоду багатоциклової втоми спостерігається інтенсивніша пластична деформація поверхневого шару металу глибиною порядку розміру одного зерна. При цьому поверхневий шар матеріалу зазнає пластичної деформації, більшої, ніж внутрішні його об'єми. Якщо зміцнити поверхневий шар глибиною кілька зерен, то можна створити умови, за яких

пластичне деформування на поверхні і в середині матеріалу відбуватиметься одночасно, і обмежена границя витривалості при цьому підвищуватиметься. Виходячи з цього, характерним може вважатися результуюче напруження, що розтягує в поверхневому шарі на глибині одного зерна σ_z . Мікроструктурний аналіз матеріалів зразків із різними епюрами ЗПМ показав ідентичність їхньої структури. Середній розмір зерен у поверхневому шарі матеріалу становив близько 30 мкм. Саме на цій глибині визначалися напруження σ_z ЗПМ зразків.

Усі значення характерних параметрів ЗПМ та механічних властивостей зразків з різною технологічною спадковістю наведені у таблиці 1. Аналіз результатів показує, що залишкові поверхневі напруження практично не впливають на $\sigma_{0.2}$ і σ_B (коефіцієнти варіації $v = 0,017$ і $v = 0,008$ відповідно), але вони істотно впливають на границю витривалості σ_{-1} (коефіцієнт варіації $v = 0,180$). Таким чином, встановлено, що параметри статичної міцності виявилися менш чутливими до змін напруженого стану поверхневого шару, ніж характеристики опору втоми.

Таблиця 1 – Характерні параметри залишкових напружень, механічні властивості та значення сумарного рахунку АЕ для зразків із сплаву ХН77ТЮР-ВД з різними формами епюр ЗПМ

Параметр σ , МПа	Номер епюри ЗПМ (рис. 1)				
	1	2	3	4	5
σ_0	+35	-280	-200	-300	-360
$\sigma_{p \max}$	820	740	720	730	710
σ_{Π}	-120	-380	-130	-295	-250
σ_z	-50	-380	-180	-295	-380
σ_{-1}	495	645	395	530	595
σ_B	1200	1205	1195	1190	1205
$\sigma_{0.2}$	815	820	825	810	835
Параметр N_{AE} , імп.	650	400	550	450	250

У таблиці 2 наведено значення коефіцієнтів кореляції параметрів ЗПМ з обмеженою границею витривалості для двох вибірок. У першу (вибірка А) увійшли усі досліджені зразки. З другої (вибірка Б) було вилучено зразки з опуклою формою епюр ЗПМ. Вищі значення коефіцієнтів кореляції другої вибірки свідчать про суттєвий вплив аномальності епюри ЗПМ зразків після шліфування на характеристики втоми. Привертає увагу практично детермінований зв'язок між ЗПМ на глибині одного зерна і границею витривалості зразків, що підтверджує дієвість механізму зміцнення, описаного в роботах [15, 16]. Відсутність досить тісного зв'язку між границею витривалості зразків з різною технологічною спадковістю та максимальним рівнем ЗПМ у них не підтверджує правомірність прийняття напруження $\sigma_{0 \max}$ за основний параметр ЗПМ, що визначає характеристики опору втоми матеріалу.

Таблиця 2 – Коефіцієнти кореляції параметрів ЗПМ з обмеженою границею витривалості (σ_{-1}) та сумарним рахунком АЕ (N_{AE})

Параметр для встановлення кореляції	Вибірка	Параметри залишкових напружень			
		$\sigma_{0 \max}$	$\sigma_{p \max}$	σ_{Π}	σ_z
границя витривалості σ_{-1}	А	-0,467	-0,124	-0,843	-0,730
	Б	-0,735	0,340	-0,902	-0,982
сумарний рахунок АЕ N_{AE}	А	0,899	0,743	0,651	0,928
	Б	0,938	0,362	0,421	0,864

Науковий та практичний інтерес представляє аналіз залежностей між параметрами АЕ та ЗПМ. Результати акустоемісійних досліджень показано на рис. 2, з якого видно, що рівні загальної енергії АЕ (E_{AE}) і максимальних середньоквадратичних значень амплітуди ($\bar{A}_{max}$) при деформуванні різних зразків практично не відрізняються. І лише зразок із опуклою формою епюр ОПМ показав вищі значення параметру E_{AE} (рис. 2а). Відсутність відмінностей у залежностях $\lg E_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$ для зразків з увігнутими епюрами ЗПМ пояснюється малими відмінностями результуючих напружень у відповідних об'ємах і лише різні форми епюр ЗПМ суттєво відрізняють напружений стан матеріалу у процесі його деформування.

Значно інформативнішими виявилися залежності $\lg N_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$, які показано на рис. 2б. Значення сумарного рахунку АЕ та коефіцієнтів кореляції параметрів ОПМ з N_{AE} також представлені в таблицях 1 і 2 відповідно. З рисунку 2б видно, що всі АЕ характеристики мають дві явно виражених ділянки. Перша (полога) – спільна для всіх видів зразків. Друга (крутіша) – відмінна для зразків з різними епюрами ЗПМ. Точки перегину АЕ характеристики у зразків із різним напруженим станом поверхневого шару також різні. Початкова ділянка навантаження характеризується низькою АЕ активністю і, очевидно, відповідає пружній деформації всього об'єму матеріалу. Значне збільшення активності АЕ на другій ділянці АЕ характеристики, очевидно, зумовлено активними процесами пластичної деформації мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу. Згідно з таким підходом, точка перегину функції $\lg N_{AE} = f(\sigma/\sigma_{0.2})$ визначає зміну напружено-деформованого стану мікрооб'ємів поверхневого шару порівняно з матрицею матеріалу. В роботах [17, 18] показано, що рух дислокацій при втоми металів має спільні риси зі статичним навантаженням. Тоді процес втоми матеріалу можна уявити як циклічно діючий ефект Баушингера в поверхневому шарі матеріалу, напруженість мікрооб'ємів якого стає більшою, ніж напруженість матеріалу матриці. Пояснюється таке положення блочністю структури полікристалічного матеріалу, в якому при навантаженні діє дислокаційний механізм, що призводить до зміни напруженого стану окремих елементів структури матеріалу.

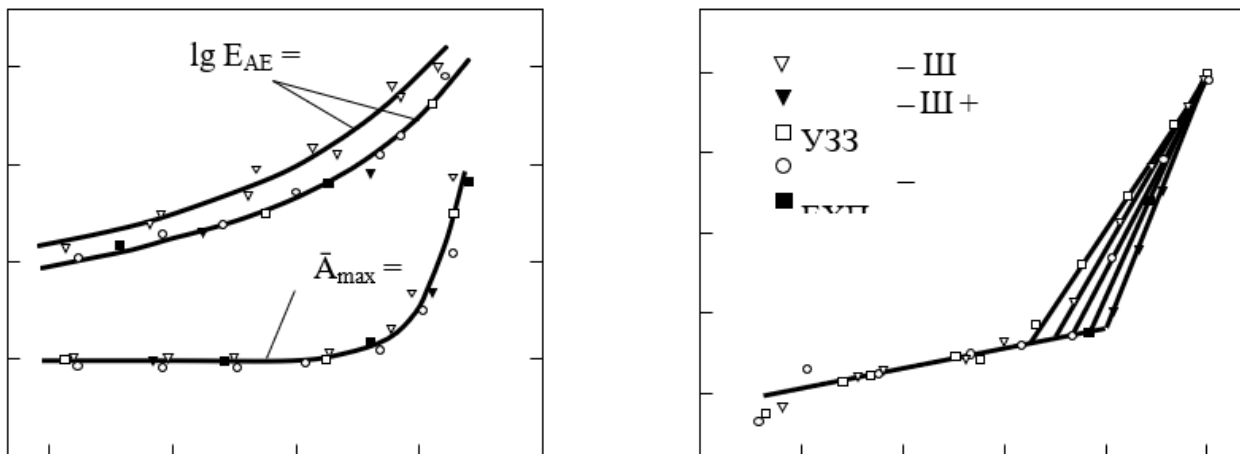


Рисунок 2 – Залежності параметрів акустичної емісії від прикладених відносних напружень:
а) – загальної енергії АЕ та максимальних середньоквадратичних значень амплітуди,
б) – сумарний рахунок сигналів АЕ

Аналіз даних таблиці 2 показує, що між усіма параметрами ЗПМ і сумарним рахунком АЕ у повній вибірці зразків (вибірка А) спостерігається досить стійкий ймовірнісний зв'язок, більш високий ніж у неповній вибірці (вибірка Б). При цьому найбільш тісна кореляція спостерігається між сумарним рахунком актів АЕ та напруженням σ_z . У вибірці зразків з винятком аномальної епюри ОПМ спостерігається найтісніший зв'язок між σ_{0max} і N_{AE} . Дещо

менший коефіцієнт кореляції між σ_z та N_{AE} у повній вибірці зразків свідчить про те, що інтенсивність актів АЕ визначається максимальними значеннями ЗПМ, проте деструктивні процеси втомного руйнування контролюються ЗПМ на глибині одного зерна.

ВИСНОВКИ

Поверхневі залишкові макронапруження у зразках практично не впливають на границю міцності та умовну границю плинності, але істотно впливають на обмежену границю витривалості при циклічному навантаженні згинальними напруженнями.

Величина ЗПМ на глибині одного зерна практично детерміновано пов'язана з його границею витривалості та сумарним рахунком сигналів АЕ.

Особливості зміни сумарного рахунку сигналів АЕ у процесі статичного навантаження матеріалу характеризують напружений стан мікрооб'ємів його поверхневого шару, що зумовлює зміну механізму деструктивного процесу в них при циклічному деформуванні.

Встановлена корельованість параметрів АЕ та ЗПМ дозволяє здійснювати оцінку напруженого стану поверхні та механічних характеристик матеріалів неруйнівним експрес методом АЕ.

Список використаних джерел

1. *Breslavsky D.V.* Consideration the influence of residual stresses and creep strains on rolling the steel sheets / *D.V. Breslavsky, V.O. Mietielov* // Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Динаміка та міцність машин". – 2016. – № 46. – С. 77–80. <http://dx.doi.org/10.20998/2078-9130.2016.46.88054>
2. *Сичов Ю. С.* (мол.) Вплив залишкових напружень на втомну міцність бурильних труб / *Ю.С. Сичов (мол.)* // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2014. – № 2. – С. 97–110. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvif_2014_2_13
3. *Roberts Jeffrey Lynn* Residual Stress Effects on Fatigue Life via the Stress Intensity Parameter, K. PhD diss. / *Roberts Jeffrey Lynn* // University of Tennessee. – 2002.
4. *Chiocca A.* Residual stresses influence on the fatigue strength of structural components / *A. Chiocca, F. Frendo, L. Bertini*. // *Procedia Structural Integrity*, Volume 38, 2022, P. 447–456. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.03.045>.
5. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навч. посіб. / *І.С. Афтаназієв*, [та ін.] ; – Житомир: ЖІТІ. – 2001. – 516 с.
6. *Дудніков А.А.* Відновлення деталей поверхневим пластичним деформуванням / *А.А. Дудніков, В.В. Дудник, О.А. Бурлака та ін.* // Вісник ПДАА. – 2020. – № 4. – С. 251–258. DOI: 10.31210/visnyk2020.04.32
7. *Jong-Hwa Hong* Effect of the residual stress induced by surface severe plastic deformation on the tensile behavior of an aluminum alloy/ *Jong-Hwa Hong, Hyeonil Park, Jinsu Kim, Moo-Young Seok, Hyunsung Choi, Yong Nam Kwon, Dong Jun Lee*. // *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, May–June 2023. – P. 7076–7090. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.018>.
8. *Samara Fayeze.* Influence of the Plastic Deformation Process on the Residual Stresses and Hardness of an Al-5Mg Alloy / *Fayeze Samara, Viorel Goanta, Bogdan Istrate, Layth Alkisswani, Corneliu Munteanu and Roxana Cosau* // *Materials* 2024. – 17(14). – 3593. <https://doi.org/10.3390/ma17143593>
9. *Скальський В.Р.* Оцінка об'ємної пошкодженості матеріалів методом акустичної емісії / *В.Р. Скальський, О.Є. Андрійків*; Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка. – 2006. – 330 с.
10. *Гудрамович В.С.* Голографічне та акустико-емісійне діагностування неоднорідних

конструкцій і матеріалів / В.С. Гудрамович, В.Р. Скальський, Ю.М. Селіванов. Львів: Простір-М. – 2017. – 492 с.

11. *Evans A.G.* Residual Stress Measurement Using Acoustic Emission / *A.G. Evans* // Journal of the American Ceramic Society. – June 2006. – 58(5/6), pp. 239 – 243.

12. *Chen Y.* Effects of normal stress on shear properties and acoustic emission characteristics of bonded rock-concrete interfaces / *Y. Chen, J. Yang, J. Wang, Z. Hou* // Sci Rep. – 2025. – 15, 29081. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14445-7>

13. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин /Ред. Сулима А.М. и др. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.

14. *Беженев С.О.* Методика дослідження поверхневого шару конструкційних матеріалів методом акустичної емісії / *С.О. Беженев* //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1999. – № 1. – С. 16 – 19.

15. *Иванова В.С.* Природа усталости металлов / *В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев.* – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

16. *Троценко В.Т.* Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 2. Продолжительность стадий зарождения и развития усталостных трещин. / *В.Т. Троценко, Л.А. Хамаза* // Проблемы прочности. – 2014. – № 4. – С. 5–20. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PPT_2014_4_3

17. *Kuhlman-Wilsdorf D.* Dislocation behavior in fatigue / *D. Kuhlman-Wilsdorf, G. Laird* // Mater. Sci. and Eng. – 1977. – Vol. 27. – P. 137 – 156. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(77\)90166-5](https://doi.org/10.1016/0025-5416(77)90166-5)

18. *Tsyban'ov G.V.* A Study of Fatigue Crack Growth Rate in Steels in Relation to Crack-Tip Plastic Deformation and Fracture. Part 2. Parametric Relation between Fatigue Crack Growth and Plastic Strains / *G.V. Tsyban'ov, A.I. Novikov, Yu.P. Kurash* // Strength of Materials. – 2020. – Vol. 52. – no. 6. – pp. 908–918. <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00244-8>

Bezhenov S.A., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF RESIDUAL SURFACE MACROSTRESS PARAMETERS ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NICKEL ALLOY USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

The state of the surface layer of the material, which is determined by various parameters, including residual surface macrostresses, is the most important factor affecting the strength properties. However, it still remains very problematic to take into account the action of spatial internal elastic forces, which are a consequence of previous thermal and mechanical effects. The work is devoted to the study of the relationship between various parameters of residual surface macrostresses and mechanical characteristics of nickel alloy samples with different technological heredity using the non-destructive acoustic emission method. Cylindrical samples of nickel alloy KhN77TYUR-VD with different technological heredity were studied: after turning, grinding, electrochemical polishing, and also after surface plastic strengthening with steel balls oscillating at ultrasonic frequency. The magnitude of axial residual surface macrostresses was determined from the deformation curve of special samples during layer-by-layer etching of the material. The features of acoustic emission radiation in the samples were studied under stepwise loading of the samples according to the three-point bending scheme to the stress level $\sigma_{0.2}$. The mechanical characteristics of static strength were determined as a result of uniaxial tensile tests of samples. Fatigue tests were carried out under conditions of cyclic bending stresses arising from the introduction of the sample into resonant transverse vibrations on an electrodynamic vibration table. The limited endurance limit of the samples was determined based on 10^7 cycles. The results of the analysis of the influence of

various parameters of residual surface macrostresses on the mechanical characteristics of a nickel alloy using the acoustic emission method are presented. The determining parameters of residual surface macrostresses that control the process of multi-cycle fatigue are established. A method for their determination by the non-destructive express method of acoustic emission is proposed.

Keywords: *Acoustic emission, multi-cycle fatigue, residual stresses, statistical analysis, technological heredity.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДК 621.873:620.179.17

doi.org/10.31498/2522-9990302025347060

Сидоренко М.В., Капустян О.Є., Кравченко Є.О., Фролов Р.О., Козак Д.С.

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ КІНЦЕВИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

Акустична емісія стає все більш розповсюдженим методом для оцінки стану, якості та міри пошкодженості металоконструкцій та матеріалів. Основна теоретична база методів оцінки параметрів якої викладена у працях Скальського В.Р. та Недосеки А.Я. Механічна міра об'ємної пошкодженості матеріалу визначається як відношення суми новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися. Механічна та акустико-емісійна міри об'ємної пошкодженості лінійно залежать від дійсної деформації полікристалічних тіл. У даній роботі забезпечували досягнення значень рівномірної деформації, отриманої попередньо при розтягуванні циліндричних зразків. Було досліджено партію зразків, що піддавались втомному навантаженню з різними коефіцієнтами асиметрії циклу 0, -100, -200 МПа. Робоча смуга частот реєстрованих сигналів становила: 0,2...0,5 МГц. Застосована теоретична модель акустико-емісійного вимірювання об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні. Проведені дослідження сигналів акустичної емісії від країв втомної тріщини та від пластичної деформації у вершині втомної тріщини для сталей S235 та S355. Підтверджена гіпотеза про те, що амплітуди сигналів пропорційні площі тріщини. При оцінці швидкості зростання тріщини за параметрами акустичної емісії виникають складнощі, пов'язані з існуванням ефекту Кайзера. Після незначних перевантажень буде спостерігатися велика кількість пасивних циклів, тобто таких, в яких рівень сигналів АЕ буде нижче порогового рівня апаратури, що реєструє. Встановлено, що для досліджуваних сталей перші сигнали від пластичної деформації у вершині тріщини виникають при перевантаженні до 10%. Вони можуть спостерігатися раніше реєстрації монотонно зростаючої амплітуди, яка передуює початку росту тріщини і служить якісним підтвердженням наявності дефекту, що розвивається. Запропоновано методики визначення залишкової довговічності кінцевих балок мостових кранів: на етапі зародження тріщини за сигналами акустичної емісії, що виникають при вдавлюванні індентора, та на етапі розвитку тріщини за під час проведення динамічних випробувань. Контроль тріщин, що розвиваються в кінцевих балках, за сигналами акустичної емісії під час експлуатації можливий, при застосуванні сучасної апаратури з низьким рівнем власних шумів.

Ключові слова: *Акустична емісія, кінцева балка, неруйнівний контроль, активні дефекти, об'ємна пошкоджуваність, індентор.*

Постановка проблеми. Акустико-емісійний контроль вантажопідйомних кранів проводиться переважно з метою локації дефектів з подальшим визначенням їх параметрів

іншими методами неруйнівного контролю [1, 2]. Його застосування для металоконструкцій кранів стримує обмежена кількість робіт з матеріалами, що застосовуються при виробництві вантажопідійомних кранів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методики для оцінки ступеня пошкодження та руйнування матеріалів і виробів при статичному навантаженні викладені в роботах українських вчених Скальського В.Р. [3, 4], Недосеки А.Я. [5-8] та ін., а при циклічному навантаженні огляд наведено в джерелі [9].

У працях В.Р. Скальського [3, 4] створено модель кількісної оцінки об'ємної пошкоженості кристалічних тіл. Механічна міра об'ємної пошкоженості матеріалу визначається як відношення суми новоутворених дефектів до об'єму, в якому вони утворилися. Механічна та акустико-емісійна міри об'ємної пошкоженості лінійно залежать від дійсної деформації полікристалічних тіл.

В альбомі [6] показано основні фактори, що знижують граничні зусилля, за яких з'являється акустична емісія (АЕ). Також показано практичне застосування АЕ при оцінці стану матеріалів конструкцій, наведено розроблені на основі АЕ технології контролю, необхідне обладнання та прилади. У монографії [7] викладено основні проблеми, пов'язані із забезпеченням безпеки експлуатації конструкцій та споруд, що виникають при розрахунку їх міцності, при випробуваннях та в процесі експлуатації. Велика увага приділена теорії, методів і засобів діагностики та оцінки стану матеріалу конструкцій, його залишкового ресурсу. Викладено основні питання теорії прогнозування та прийняття рішень при оцінці стану конструкцій. Висвітлено сучасні методи розрахунку та вимірювання температурних полів, напружень та деформацій, показано способи боротьби зі шкідливими наслідками зварювальних напружень та деформацій, розглянуто основи класичної та квантової механіки руйнування.

Відомо, що можливо реконструювати криву напруження-деформація з однієї кривої навантаження-глибина при кінетичному заглибленні сферичного індентора [10]. При цьому багато авторів застосовують вимірювання різних параметрів акустичної емісії для оцінки характеристик матеріалу при кінетичному індентуванні [11, 12].

Мета роботи. Дослідити вплив ступеня пошкодження при циклічному навантаженні на об'ємну пошкоджуваність при вдавлюванні індентора на основі використання акустичної емісії. Розробити методики оцінки залишкової довговічності кінцевих балок.

Основний матеріал дослідження. Для виконання досліджень була створена експериментальна установка на платі реєстрації акустичної емісії. Випробування на втому при різних коефіцієнтах асиметрії циклу проводили на установці осьового циклічного навантаження РС-1 [13]. Стробування сигналів проводили за циклом навантаження, щоб уникнути реєстрації шумів, як описано в [1]. Робоча смуга частот реєстрованих сигналів АЕ становила: 0,2...0,5 МГц.

У процесі зростання тріщини збільшується ексцентриситет зовнішнього навантаження на зразок і можливий його згин та провертання в захватах. Параметри навантаження, що унеможливають реєстрації сигналів АЕ від зазначених явищ, були визначені під час випробування технологічного зразка з надрізом.

Оцінка залишкової довговічності конструкцій на етапі зародження тріщини.

При вдавлюванні індентора максимумами активності АЕ відповідають мікроплинності, границі текучості та навантаженню близько 2500 Н (при діаметрі індентора 10 мм) (рис. 1), що узгоджується з [11]. При розтягуванні зразка активність АЕ, що відповідає мікроплинності, менша, ніж при досягненні границі текучості. Це пояснюється тим, що при навантаженні, що відповідає мікроплинності, відбувається деформація і руйнування мікронерівностей в зоні контакту індентор-зразок та тертя в місцях опирання зразка.

Теоретична модель акустико-емісійного вимірювання об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні

1. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості при вдавлюванні індентора пропорційна дійсній деформації при розтягуванні, отриманій при однакових ступенях деформації.

2. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості при вдавлюванні індентора зменшується в процесі напрацювання при напруженнях вище границі витривалості.

3. Акустико-емісійна міра об'ємної пошкодженості не залежить від пружних і залишкових напружень, або попереднього циклічного навантаження.

При вдавлюванні індентора приймаємо аналогічно акустико-емісійну міру пошкодженості, як відношення суми амплітуд сигналів АЕ до об'єму, в якому відбувається утворення дефектів:

$$\xi_{li} = \frac{\sum A}{V}. \quad (1)$$

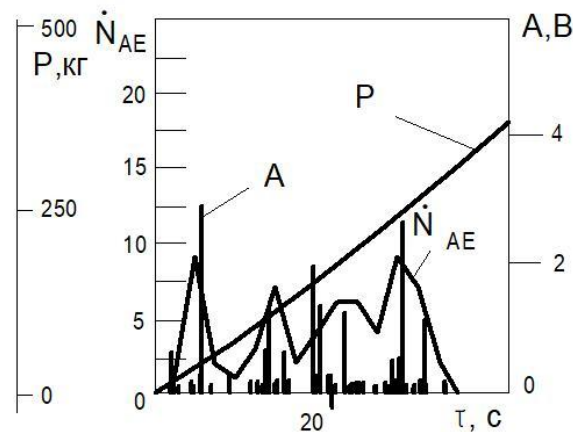


Рисунок 1 – Залежність активності АЕ $\dot{N}_{AE}$, числа імпульсів АЕ N_{AE} , амплітуди АЕ та навантаження P на індентор від часу (зразок – сталь S355)

Пластично деформована область являє собою напівсферу діаметром $D_p = 2,5 \cdot d$, де d – діаметр відбитка, об'єм якого:

$$V = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot D_p^3. \quad (2)$$

Дійсна деформація визначається за відносним звуженням ψ :

$$e = \ln \frac{1}{1 - \psi}.$$

Середня ступінь деформації еквівалентна відносному звуженню:

$$\psi = \frac{M - F}{M};$$

де M – площа сферичного сегменту, відповідного діаметра відбитку, м^2 ;
 F – площа круга, із якого видавлюється сферичний сегмент, м^2 .

$$\psi = 1 - k^2 + k^2 \cdot \left(\frac{t}{D} \right); \quad (3)$$

$$k = \frac{d_0}{d} = f\left(\frac{d}{D}\right)$$

де t – глибина відбитка, коли кулька знаходиться в ньому під навантаженням, м;
 D – діаметр індентора, м.

За результатами кінцево-елементного моделювання апроксимуюча залежність приймає вид:

$$k = -0,5 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^3 + 0,94 \cdot \left(\frac{t}{D} \right)^2 - 0,59 \cdot \left(\frac{t}{D} \right) + 1. \quad (4)$$

У даній роботі забезпечували досягнення значень рівномірної деформації, отриманої попередньо при розтягуванні циліндричних зразків.

Акустико-емісійну міру пошкодженості оцінювали за амплітудою, що огинає електричні сигнали події безперервної АЕ за 1 мс при вдавлюванні індентора діаметром 7,15 мм. Обробка результатів показала, що на етапі деформаційного зміцнення залежності $\xi_{1i} - e$, для сталей S235 та S355 у стані поставки, добре апроксимуються лінійними функціями (рис. 2): $\xi_{1i} = a_1 \cdot e + b_1$. Для S355: $\xi_{1i} = 30,6 \cdot e - 0,177$, ($R=0,98$); для S235: $\xi_{1i} = 1,45 \cdot e - 0,014$, ($R=0,975$).

З (1)-(3) випливає також, що при забезпеченні однакового ступеня деформації сума амплітуд АЕ буде пропорційна об'єму індентора, що було перевірено для інденторів діаметром 3,16; 7,15 і 9,5 мм. При використанні індентора малого діаметра можна досягти ступеня деформації, що відповідає утворенню «шийки». При цьому ξ_1 має збільшитися на порядок, за рахунок e [10]; але сума амплітуд зменшиться за рахунок розмірів зони пластичного деформування, і початкові значення амплітуд будуть знаходитися нижче порогу дискримінації. Цим обумовлений вибір діаметра індентора і ступеня деформації.

Величина критичного значення акустико-емісійної міри пошкодження визначена за результатами ідентифікування зразків, попередньо доведених до руйнування при випробуванні на втому, зі сталі S235 при симетричному циклі і зі сталі S355 при різній асиметрії циклу, при симетричному циклі та при середніх напруженнях стиснення (0, -100, -200 МПа). У межах лівої частини кривої втоми було випробувано по 4...5 зразків. Встановлено, що величина напружень і асиметрії циклу практично не впливає на АЕ міри пошкодженості. Таким чином, отримані залежності $\xi_{1i}^* - e$ характеризують граничний стан матеріалів. Для сталі S235 залежність має вигляд: $\xi_{1i}^* = 0,71 \cdot e - 0,02$; для сталі S355: $\xi_{1i}^* = 13,4 \cdot e - 0,065$.

Машинобудування і зварювальне виробництво

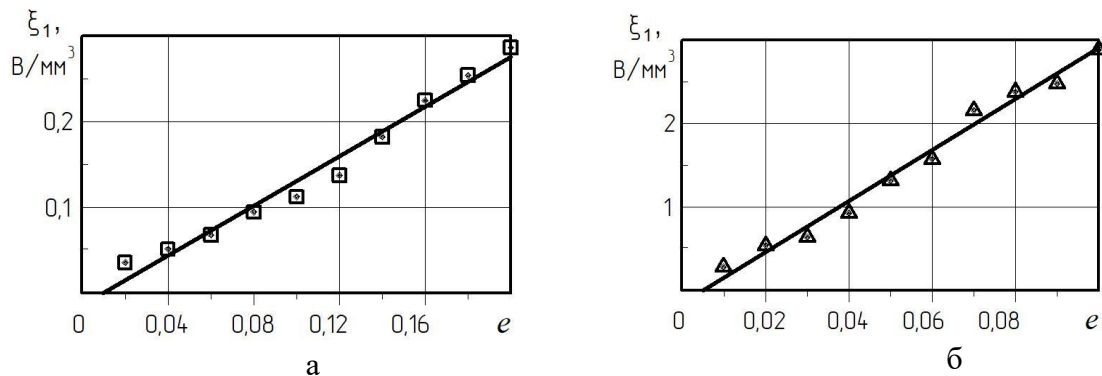


Рисунок 2 – Залежність акустико-емісійного міри пошкодженості від дійсної деформації при вдавлюванні індентора. а – S235, б – S355

Параметри АЕ можуть змінюватися при генеруванні і передачі від джерела до перетворювача акустичної емісії. Щоб уникнути впливу напружено-деформованого стану (НДС) на поширення акустичних хвиль, нижню межу смуги частот встановлюємо відповідно до [8]. Вплив залишкових напружень на твердість НВ не суттєвий [11]. Зразки досліджуваних сталей у вихідному стані навантажували до напружень стиснення -100 і -200 МПа на установці РС-1. Встановлено, що впливом пружних напружень на ξ_{1i} можна знехтувати.

На підставі запропонованої моделі акустико-емісійного міри об'ємної пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні та знайдених емпіричних залежностей можна визначити залишкову довговічність у циклах (роках):

$$N_{ост} = \frac{\xi_{1i}^p - \xi_{1i}^*}{\xi_{1i} - \xi_{1i}^p} \cdot N_p; \quad t_{ост} = \frac{\xi_{1i}^p - \xi_{1i}^*}{\xi_{1i} - \xi_{1i}^p} \cdot t_p; \quad (5)$$

де N_p , ξ_{1i}^p - число циклів, відпрацьованих на момент вимірювання, та значення АЕ міри пошкодженості при кінетичному ідентифікуванні на момент вимірювання відповідно.

Оцінка залишкової довговічності конструкцій на етапі розвитку тріщини. Оцінку порогу чутливості методу проводили за критерієм виявлення тріщини, за який прийняли перевищення амплітуди на 20% порівняно з рівнем шумів, що спостерігаються в період розвитку тріщини. Амплітуда сигналів АЕ реєструвалася по трьох каналах: в стробі 1, відповідно фазовим кутам 0-80°; в стробі 2 - 80°-100°; в стробі 3 - 100°-360°. Для сигналів у стробах 1 і 3 мінімальна площа виявленої тріщини становить 0,18 мм³ (довжина 0,07 мм) та не залежить від досліджуваного матеріалу. Для сигналів у стробі 2 мінімальна швидкість росту тріщини склала 1...2·10⁻⁴ мм/цикл для сталі S355.

Дослідження сигналів від країв втомної тріщини. Сигнали від країв втомної тріщини записували під час випробувань на тріщиностійкість з коефіцієнтом асиметрії R= -1,0. Якісно підтверджується гіпотеза про те, що амплітуди сигналів пропорційні площі тріщини. Однак, має місце суттєвий розкид експериментальних даних, що пояснюється нестабільним характером тертя через фрикційне зношування країв [9]. З огляду на те, що при розвитку тріщин у вузлах з'єднання під час експлуатаційних навантажень руйнування відбувається за змішаним механізмом деформування, розкид даних буде ще більш помітним, що було підтверджено експериментально. Зразок з вирощеною втомною тріщиною фіксували в одному

із захватів машини, а інший повертали навколо осі зразка. Відсутність залишкової деформації скручування перевіряли індикаторним годинником з ціною поділки 0,001 мм.

Дослідження сигналів від пластичної деформації у вершині втомної тріщини. Швидкість зростання втомних тріщин в основному металі вузлів з'єднання головних і кінцевих балок менше порогових значень, при яких спостерігається лінійна залежність $A - l'$. Це пояснюється високим рівнем шумів навантажувального пристрою і застосовуваної АЕ апаратури, а також низьким рівнем сигналів АЕ, що генеруються в досліджуваних матеріалах, особливо для сталі Ст.3. При оцінці швидкості зростання тріщини за параметрами АЕ виникають складнощі, пов'язані з існуванням ефекту Кайзера. Після незначних перевантажень буде спостерігатися велика кількість пасивних циклів, тобто таких, в яких рівень сигналів АЕ буде нижче порогового рівня реєструючої апаратури. Тому параметри тріщин визначали по АЕ, що виникає при проведенні динамічних випробувань вантажем $1,1 Q_{ном}$. Встановлено, що для досліджуваних сталей перші сигнали від пластичної деформації у вершині тріщини виникають при перевантаженні до 10%. Вони можуть спостерігатися раніше реєстрації монотонно зростаючої амплітуди АЕ, яка передує початку росту тріщини і служить якісним підтвердженням наявності дефекту, що розвивається. Якщо навантаження досягає величини, що відповідає початку тріщини, то за значенням K_{IS} , при відомій залежності $K = f(l) \cdot P$, можливо визначити довжину тріщини і коефіцієнт інтенсивності напружень при експлуатаційних навантаженнях.

Для розглянутих тріщин значення K_{IS} практично не буде досягнуто, тому пропонується отримати значення K_{IS} екстраполяцією. Для деяких конструкційних матеріалів залежність амплітуди сигналів АЕ від навантаження до старту тріщини задовільно описується простою залежністю. Знаючи характер залежності $\sum A_i = f(P)$ по початковій ділянці кривої, можна шляхом екстраполяції визначити навантаження, що відповідає старту тріщини. Надалі, визначивши розмах коефіцієнта інтенсивності напружень, за відомими кінетичними діаграмами циклічної тріщинозростання, можна визначити швидкість зростання тріщини і число циклів, до досягнення нею заданих розмірів (рис. 3). Для досліджуваних матеріалів встановлено, що до початку росту тріщини сума амплітуд задовільно апроксимується параболою. Для сталі S355 значення суми амплітуд, що відповідає початку тріщини: $\sum^* A_i = 7,60 \text{ } \mu\text{m}$.

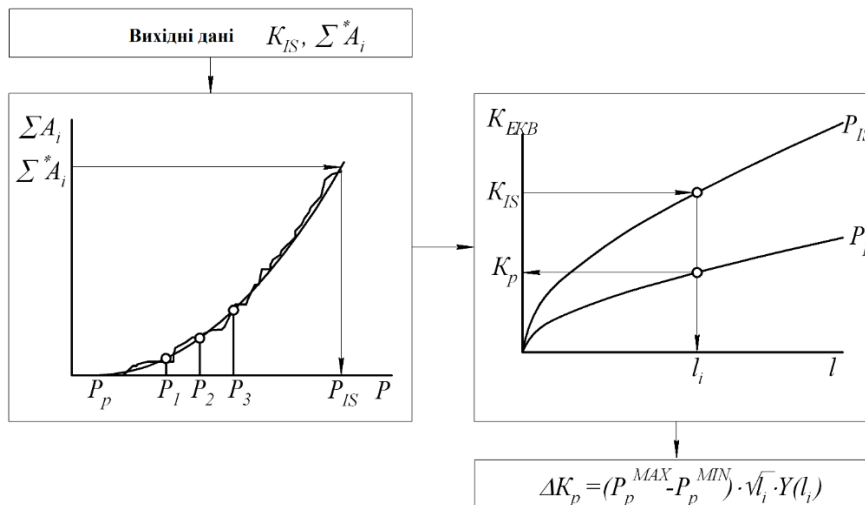


Рисунок 3 – Алгоритм оцінки залишкової довговічності за сумою амплітуд АЕ, що виникають при перевантаженні вузла з тріщиною.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано методики визначення залишкової довговічності: на етапі зародження тріщини за сигналами АЕ, що виникають при вдавлюванні індентора, та на етапі розвитку тріщини за сигналами АЕ при динамічних випробуваннях.

2. Контроль тріщин, що розвиваються в кінцевих балках, за сигналами АЕ під час експлуатації можливий, оскільки застосовується сучасна апаратура з більш низьким рівнем власних шумів.

Список використаних джерел

1. Zhang Yanbing, Yang Li. The Acoustic Emission Testing Technology on Large Crane Structure Damage. *Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 5. No. 1. P. 9-14. doi: 10.11648/j.eas.20200501.12
2. Іванов В.Н. Застосування методу акустичної емісії при діагностуванні металоконструкцій. / В.Н. Іванов, В.А. Кобзев, О.В. Суций, Н.Н. Парог // *Підйомні споруди. Спеціальна техніка*. 2002. № 8. С.19.
3. Скальський В.Р. Розробка методик і засобів оцінки об'ємної пошкодженості та руйнування матеріалів і виробів за параметрами акустичної емісії: Автореф. дис...д-ра. техн. наук: 01.02.04. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. Львів, 2003. 36с.
4. Скальський В.Р. Акустико-емісійне визначення накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл. / В.Р. Скальський // *Фіз.-хім механіка матеріалів*. 2003. №2. С. 84 - 92.
5. Недосека С.А. Використання випробувань зварних зразків для оцінки прогностичних якостей акустико-емісійного обладнання / С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко, І.Г. Волошкевич // *Технічна діагностика і неруйнівний контроль*, 2024, №3, стор. 45-48 <https://doi.org/10.37434/tdnk2024.03.07>
6. Патон Б.Е. Акустическая эмиссия и ресурс конструкций: Теория, методы, технологии, средства, применение / Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека, С.А. Недосека, М.А. Яременко // . — Киев: ИНДПРОМ, 2012. — 312 с.
7. Nedoseka A. Fundamentals of evaluation and diagnostics of welded structures / Cambridge International Science Publishing Limited, 2012.— 642 с.
8. Недосека А.Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций монография / А.Я. Недосека, С.А. Недосека // Учебное пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). - Киев : Индром. - 2020 – 886 с.
9. Huang M., Jiang L. Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research. / Huang M., Jiang L., Liaw P.K., Brooks C.R., Seeley R., Klarstrom D.L. // *JOM J. Minerals, Metals and Materials Soc*. 1998. Vol. 50. № 11. P. 1–12.
10. Pöhl F. A Methodology for Inverse Determination of Stress-strain Curves Based on Spherical Indentation. *Experimental Techniques* . 2018. Vol. 42. P. 343–353. <https://doi.org/10.1007/s40799-018-0238-1>
11. Faisal N.H. Indentation testing and its acoustic emission response: applications and emerging trends / N.H. Faisal, R. Ahmed, R.L. Reuben // *International Materials Reviews*. 2011. Vol. 56(2). P. 98-142. doi: 10.1179/1743280410Y.0000000004
12. Martinez-Gonzalez E. Damage induced by a spherical indentation test in tool steels detected by using acoustic emission technique / E.Martinez-Gonzalez, G. Ramirez, J. Romeu, D. Casellas // *Experimental Mechanics*. 2015. Vol. 55. P. 449-458. <https://doi.org/10.1007/s11340-014-9959-y>

13. Сочава А.І. До розрахунку деталей машин на опір втоми / А.І. Сочава, Л.М. Мартовицький, В.І. Глушко, Р.О. Фролов, О.А. Задорожній // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2023. Вип. 2. С. 59-66. doi: 10.15588/1607-6885-2023-2-9

Sidorenko M. V., Kapustian O.Ye., Kravchenko Ye.O., Frolov R. O., Kozak D.S.

DETERMINATION OF THE RESIDUAL LIFE OF END BEAMS OF BRIDGE CRANES USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD

Acoustic emission is becoming an increasingly common method for assessing the condition, quality and degree of damage to metal structures and materials. The main theoretical basis for methods for estimating its parameters is set out in the works of Skalsky V.R. and Nedoseka A.Ya. The mechanical measure of volumetric damage of a material is defined as the ratio of the sum of newly formed defects to the volume in which they were formed. The mechanical and acoustic emission measures of volumetric damage linearly depend on the actual deformation of polycrystalline bodies. In this work, we ensured the achievement of uniform deformation values obtained previously during the stretching of cylindrical samples. A batch of samples subjected to fatigue loading with different cycle asymmetry coefficients of 0, -100, -200 MPa was investigated. The operating frequency band of the recorded signals was: 0.2...0.5 MHz. A theoretical model of acoustic emission measurement of volumetric damage during kinetic indentation was applied. Studies of acoustic emission signals from fatigue crack edges and from plastic deformation at the tip of fatigue crack for S235 and S355 steels were conducted. The hypothesis that the amplitudes of the signals are proportional to the crack area was confirmed. When estimating the crack growth rate by acoustic emission parameters, difficulties arise due to the existence of the Kaiser effect. After minor overloads, a large number of passive cycles will be observed, i.e., those in which the level of AE signals will be below the threshold level of the recording equipment. It was established that for the studied steels, the first signals from plastic deformation at the tip of the crack appear at an overload of up to 10%. They can be observed before the registration of a monotonically increasing amplitude, which precedes the beginning of crack growth and serves as qualitative confirmation of the presence of a developing defect. Methods for determining the residual durability of end beams of bridge cranes are proposed: at the stage of crack initiation by acoustic emission signals arising during indentation of the indenter, and at the stage of crack development by dynamic tests. Monitoring of cracks developing in end beams by acoustic emission signals during operation is possible when using modern equipment with a low level of inherent noise.

Keywords: *Acoustic emission, finite beam, non-destructive testing, active defects, volumetric damageability, indenter.*

Стаття надійшла 10.12.2025р.

НАНОАРТ ТА МЕТАЛУРГІЯ: ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ОБРОБЦІ МІКРО-ТА МАКРОСТРУКТУР ЧОРНИХ ТА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

В статті акцентується увага на актуальності використання інформаційних технологій в освітньому процесі в закладах вищої освіти (ЗВО). Зазначено, що використання сучасних інтернет-технологій в освітньому процесі дають наступні можливості: автоматизувати процес навчання (систематизувати навчальні матеріали і дозволити виконувати завдання максимально швидко і легко); підвищити рівень знань здобувачів вищої освіти і якість викладання в ЗВО; можливість онлайн-навчання (або дистанційного навчання). Зауважено, що важливим для освітнього процесу при дистанційному навчанні стає пошук нових альтернативних практичних та лабораторних робіт, що зможуть поєднати в собі теоретичні та практичні складові за спеціальністю. Так безпосередньо під час дистанційного навчання в Запорізькому національному університеті для опанування сучасних інформаційно-комунікативних технологій, розкриття наукового і творчого потенціалу пропонується здобувачам вищої освіти за спеціальністю G10 «Металургія» виконання наукової роботи «НаноАрт і металургія».

Зазначена наукова робота є поєднанням науки і мистецтва через дослідження мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів, а також сприяє розвитку творчих здібностей і популяризації українського мистецтва. Ґрунтуючись на досвіді вчених різних країн світу зі створення зображень НаноАрт в даній статті запропоновано за допомогою графічних редакторів Adobe Photoshop CS та Paint 3D створення власних зображень НаноАрт. Наведено поетапний механізм створення зображення НаноАрт та показано, що кожне зображення НаноАрт має свою назву, щось символізує і залишається творчим підходом автора НаноАрт.

Підсумовуючи, слід наголосити на важливості створення зображень НаноАрт як демонстрації глядачеві можливостей техніки зі створення мікроскопічних арт-об'єктів. Під час поєднання мистецтва та металургії у вигляді зображень НаноАрт створюються унікальні картини, які демонструють красу науки та її творчий потенціал.

Ключові слова. НаноАрт, інформаційні технології, метали і сплави, мікроструктура, макроструктура, наноструктура.

Постановка проблеми. На сьогодні одним із важливих напрямків розвитку інформатизації освіти є нові комп'ютерні технології, перевагами яких є інтерактивність, інтенсифікація процесу навчання, зворотний зв'язок [1]. Нові інформаційні освітні технології на основі комп'ютерних засобів дозволяють значно підвищити ефективність навчання [2]. Найбільшого практичного застосування інформаційні технології отримали в процесі онлайн-освіти, дозволяючи візуалізувати складні поняття, моделювати процеси, використовувати інтерактивні завдання та тести, що сприяє кращому засвоєнню матеріалу [3], підвищенню рівня знань здобувачів вищої освіти і якості викладання в ЗВО [4]. Також однією з позитивних сторін застосування інформаційних систем в освітньому процесі є можливість обробляти велику кількість інформації в режимі реального часу та отримувати доступ до неї майже з будь-якого місця через бази даних [5]. При впровадженні онлайн-освіти виникає проблема у представленні навчального контенту, який буде враховувати загально-світові тенденції, що спрямовані на гнучкість та доступність освіти [6]. Розумні технології, такі як штучний інтелект

(ШІ), цифрові двійники, віртуальна та доповнена реальність, дозволяють оптимізувати освітній процес, підвищити його ефективність і зменшити затрати часу на навчання завдяки новому етапу автоматизації [7]. Серед найкращих платформ та інструментів штучного інтелекту (ШІ) слід виділити: Stable Diffusion, ComfyUI, Invoke AI, Whisper AI, DeepFaceLab, Coqui-ai, Obabooga [8], ChatGPT, Rytr, Ideogram AI, AutoDraw, Plus AI [9] та інші.

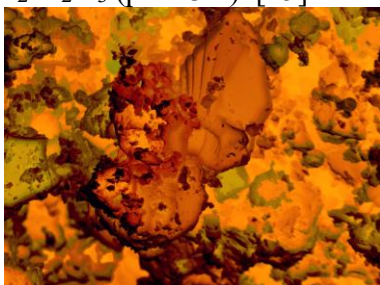
Саме тому актуальним стає пошук нових альтернативних практичних та лабораторних робіт, що зможуть поєднати в собі теоретичні та практичні складові за спеціальністю і застосовуватися під час дистанційного навчання. При формуванні у здобувачів вищої освіти навичок самостійної наукової діяльності та в межах студентських наукових гуртків доцільним є організація їх самостійної роботи завдяки застосуванню сучасних інформаційно-комунікативних технологій.

Так безпосередньо в Запорізькому національному університеті з метою розповсюдження та популяризації наукових знань у студентському середовищі, розвитку наукового мислення і творчого підходу до виконання теоретичних і прикладних проблем для здобувачів вищої освіти за спеціальністю G10 (136) «Металургія» функціонує студентська наукова проблемна група «Сучасні технології підвищення ефективності виплавки та обробки чорних металів та сплавів» [10, 11], в межах якої здобувачі опановують сучасні інформативно-комунікативні технології, розкриваючи свій науковий і творчий потенціал. В межах роботи студентської наукової проблемної групи виконуються роботи, присвячені використанню інформаційних технологій при обробці мікро- та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів. Поєднання теоретичних та практичних знань з основ матеріалознавства і металургії, а також творчий підхід до вирішення поставленої задачі дав змогу зародженню наукової роботи за темою «НаноАрт і металургія».

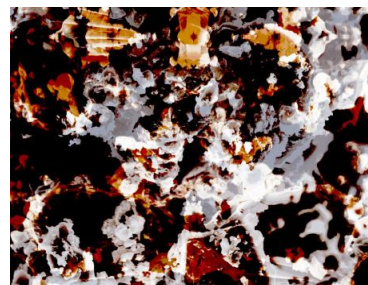
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Засновником НаноАрт вважається румунський митець і науковець Кріс Орфеску. Він маніпулює хімікатами та створює наноскульптури, які потім роздуває у великі твори мистецтва за допомогою скануючого електронного мікроскопа (рис. 1) [12, 13].

Також відомі роботи S.K. Hark з Китайського університету Гонконгу: НаноАрт «Гірський пейзаж», створений на прикладі наночастини оксиду цинку (рис. 2а) та НаноАрт «Сонячники», створений на прикладі нанотрубок розміром у кілька мікронів, які вирощені на галієвій та золотій підкладці (рис. 2б) [14].

Не обійшли увагою і роботи науковців з Ізраїлю. Зокрема відомі людству зображення наночастинок Cu_2S , отримане за допомогою скануючого електронного мікроскопа Magellan XHR (рис. 3а), скануюче зображення хіральних мікросфер полі(N-вініл α -L-фенілаланіну) (PV-L-PhA) на кристалах D-Ala (рис. 3б) та 3D-математично оброблене уявлення монохроматичних дифракційних картин від нанометричних шарів золотих плям на тонкій комбінаторній плівці повністю оксидного сонячного елемента, що складається з $\text{TEC8} [\text{TiO}_2 | \text{Co}_3\text{O}_4\text{-ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3]$ (рис. 3 в) [15].



а



б

Рисунок 1 – НаноАрт науковця Кріс Орфеску [12]: а – НаноАрт «NanoWing»; б – НаноАрт «Inferno – Dante Alighieri, In Memoriam»

Металургія

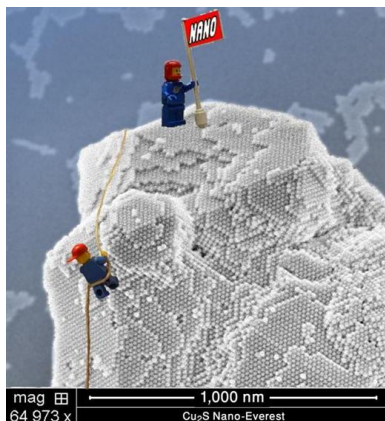


а

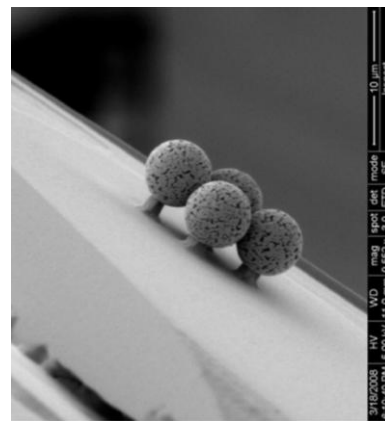


б

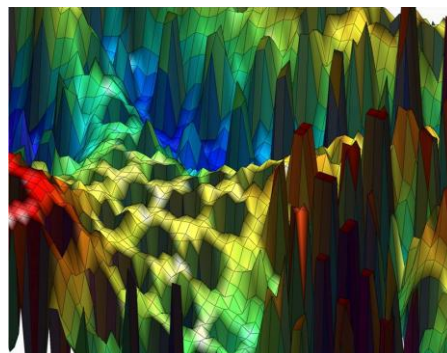
Рисунок 2 – НаноАрт науковця S.K. Hark (Китай) [14]: а – НаноАрт «Гірський пейзаж»; б – НаноАрт «Сонячники»



а



б



в

Рисунок 3 – Приклади НаноАрт науковців з Ізраїлю [15]: а – НаноАрт авторів Кеті Винокуров, Йорай Аміт, Адам Фауст із дослідницької групи професора Урі Баніна на хімічному факультеті Єврейського університету в Єрусалимі; б – НаноАрт авторів Дженні Голдштейн та Дана Д. Медіна із лабораторії С. Маргеля та Й. Масаї Інституту нанотехнологій та перспективних матеріалів хімічного факультету Університету Бар-Ілан; в – НаноАрт автора Ассаф Й. Андерсон з Університету Бар-Ілан

Науковий інтерес представляє міжнародний конкурс «Наука як мистецтво», що проводиться Товариством дослідження матеріалів (Materials Research Society) [16] та дає змогу людству побачити фотографії мікро- та наноструктур матеріалів.

Так безпосередньо НаноАрт «Прогулянка країною чудес Вольфраму» створений на основі наноструктури кристалів карбиду вольфраму (рис. 4а) [17]. НаноАрт «Наноквіти оксиду цинку» створений на основі наноструктури оксиду цинку (рис. 4б) [18]. На полотні, залитому місячним світлом, зображено багатошаровий карбід титану MXene, візуалізований у

Металургія

вигляді золотого лебедя. Двовимірні (2D) шари $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{MXene}$ були сформовані шляхом селективного травлення шарів Al з фази $\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{MAX}$ плавикової кислотою (рис. 4в) [19]. За допомогою анізотропного травлення кристала алмазу мікроскопічними каплями розплавленого нікелю (на зображенні – червоного кольору), отриманими з нанесеної на поверхню алмазу плівки товщиною 100 нанометрів можна побачити НаноАрт «Квадратура кола» (рис. 4г) [20].

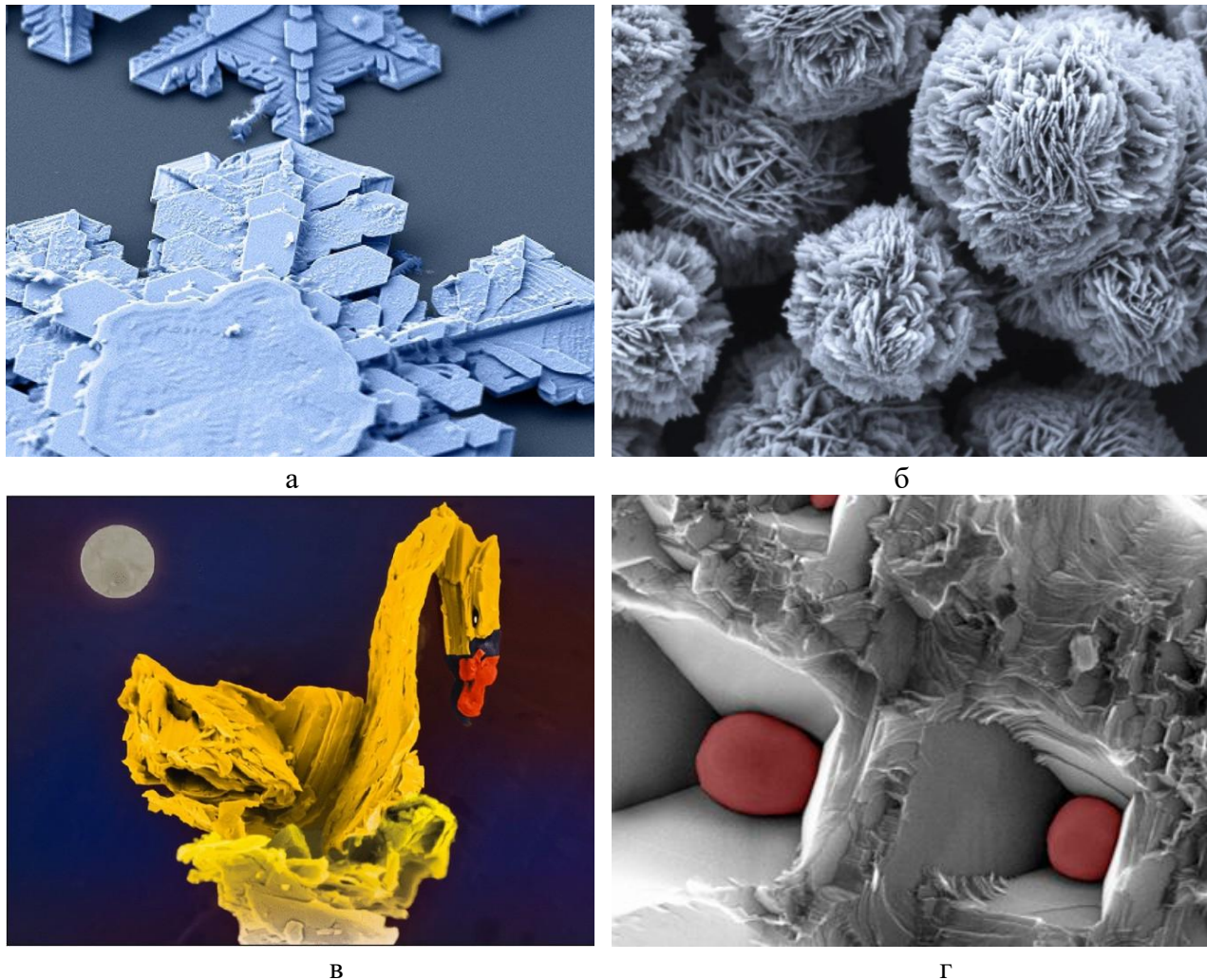


Рисунок 4 – Приклади НаноАрт, представлені на міжнародному конкурсу «Наука як мистецтво»: а – НаноАрт «Прогулянка країною чудес Вольфраму», автор Alex Sredenschek (Університет штату Пенсильванія, США) [17]; б – НаноАрт «Наноквіти оксиду цинку», автор Nderapa Andrew (Університет Північної Кароліни у Грінсборо, США) [18]; в – НаноАрт «Золотий лебідь», автор Anurpa Thakur (Університет Пердью, США) [19]; г – НаноАрт «Квадратура кола», автор Waldemar Smirnov (Фраунгоферівський інститут прикладної фізики твердого тіла, Німеччина) [20]

Наприклад, НаноАрт «Кульбаба в Наномірі» (рис. 5а) створений наступним чином: на кремнієвій підкладці за допомогою хімічного осадження з газової фази (осадження на поверхню підкладки тонкої плівки речовини, що є продуктом реакції або розкладання пар однієї або декількох речовин) синтезовані нанотрубки нітриду бору діаметром близько 50 нм. А нітрид індію, синтезований на кристалі сульфиду цинку за допомогою молекулярно-

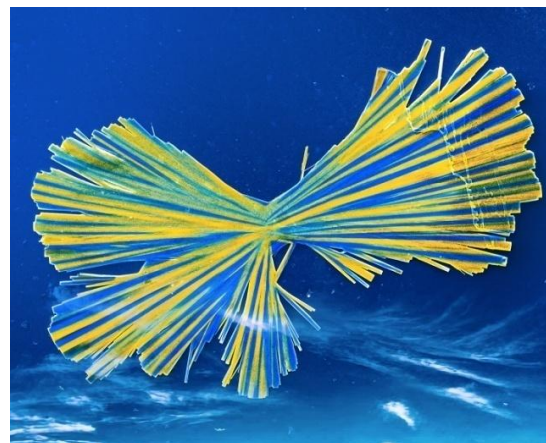
Металургія

променевої епітаксії («наростання» в умовах надвисокого вакууму одного кристала на поверхні іншого), утворює структуру, також схожу на квітку – НаноАрт «Наноквітка» (рис. 5б). Зоглядаючи під мікроскопом масив нановолокон CoFeV можна побачити НаноАрт «Нановибухи» (рис. 5в). Оксид цинку, осаджений з газу (фізичне осадження з газової фази) може утворювати красиві структури, схожі на фантастичні квіти – НаноАрт «Квіти Пандори, що світяться» (рис. 5г). Кристали селеніду міді (пластинки) та селеніду індія (голочки) утворюють скульптуру на поверхні півки селеніду меді-індія – НаноАрт «Краса природи» (рис. 5д). Нічний пейзаж складений з РЕМ-фотографій частинок пилу, покритих оксидом алюмінію дає змогу побачити НаноАрт «Пильцевий спокій» (рис. 5е) [20].

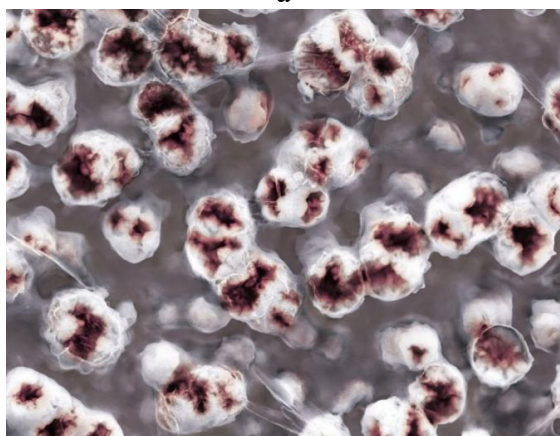
Значний інтерес також представляють і роботи українських науковців Яни Січікової та Сергія Ковачова. Зокрема в роботі [21] представлено зображення НаноАрт «Надія» (поперечний переріз пористого арсеніду галію, що нагадує блакитне небо та жовті пшеничні поля) (рис. 6а) та НаноАрт «Вільний птах» (ілюстрація характеризується голчастими кристалітами, синтезованими на кремнії шляхом електрохімічного осадження) (рис. 6б). Також популярності здобули НаноАрт «Бавовна» (мікроскопічне зображення наночастинок оксиду кадмію на сульфіді кадмію) (рис. 6в) [22] та НаноАрт «Мак пам'яті» (нанокристаліти ZnS , вирощені на поверхні поруватого кремнію) (рис. 6г) [23].



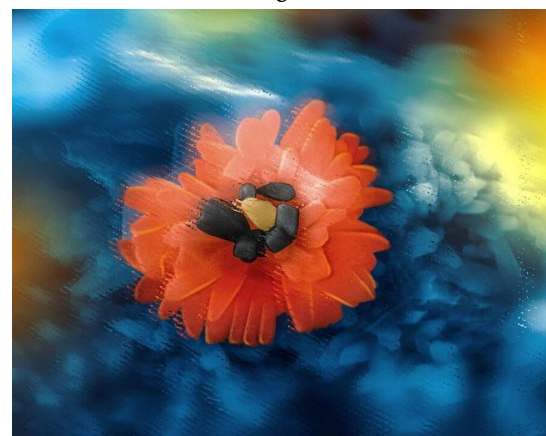
а



б



в



г

Рисунок 6 – НаноАрт авторів Яни Січікової та Сергія Ковачова (Україна): а – НаноАрт «Надія» [21]; б – НаноАрт «Вільний птах» [21]; в – НаноАрт «Бавовна» [22]; г – НаноАрт «Мак пам'яті» [23]

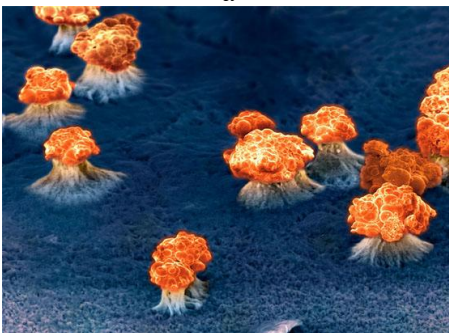
Металургія



а



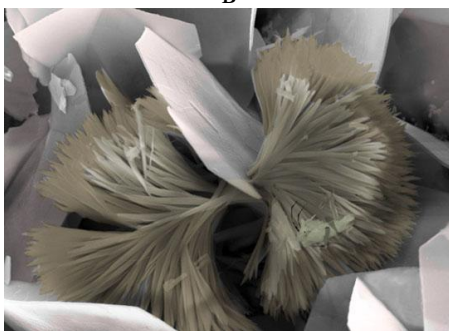
б



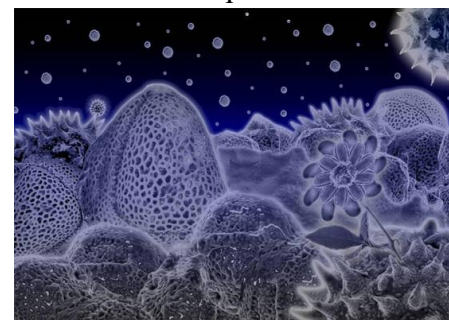
в



г



д



е

Рисунок 5 – Приклади НаноАрт, представлені на міжнародному конкурсу «Наука як мистецтво» [20]: а – НаноАрт «Кульбаба в Наномірі», автор Chee Huei Lee (Мічиганський технологічний університет, США); б – НаноАрт «Наноквітка», автор PaiChun Wei (Національний університет Тайваню); в – НаноАрт «Нановибухи», автор Fanny Beron (Монреальська політехнічна школа, Канада); г – НаноАрт «Квіти Пандори, що світяться», автор Jian Shi (Університет Вісконсіна, США); д – НаноАрт «Краса природи», автор Olga Volobujeva (Талліннський технічний університет, Естонія); е – НаноАрт «Пильцевий спокій», автор Adam Jakus (Технологічний інститут Джорджії, США)

Мета дослідження. Дослідити можливість використання сучасних інформаційних технологій в освітньому процесі, зокрема в науковій роботі при обробці мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів; показати важливість створення зображень НаноАрт як демонстрації глядачеві можливостей техніки зі створення мікроскопічних арт-об'єктів.

Основний матеріал дослідження. Створення зображення у стилі НаноАрт відбувається у три етапи: синтез наноструктури (наноматеріалу); дослідження мікро- та макроструктури чорних та кольорових металів і сплавів з отриманням зображення високої якості; «розфарбування» отриманого зображення НаноАрт за допомогою графічного редактора. В якості графічних редакторів можливим є використання як піксельної графіки (Microsoft Paint,

Adobe Photoshop CS), так і векторної графіки (Adobe Illustrator CS, Microsoft Map, CorelDraw) [24, 25].

При «розфарбуванні» отриманого зображення головним залишається творчий підхід автора НаноАрт. З однієї вихідної структури автор (або колективом авторів) може побачити різні зображення НаноАрт. Окрім зміни кольору та відтінків зображення також можуть відбуватися домалювання або видалення об'єктів. Слід зазначити, що створення зображення НаноАрт – дуже клопітлива та авторська робота, яка займає не одну годину. За основу (вихідний зразок) зображення НаноАрт може бути взята або наноструктура матеріалу, отримана як автором (або колективом авторів) самостійно або залучена з наукових робіт інших авторів (при цьому з метою не порушення авторських прав слід зазначити посилання на першоджерело наноструктури, що використовується). Кожне зображення НаноАрт має свою назву та до неї може бути доданий його стислий опис. Безпосередньо зміна кольору об'єкту НаноАрт може дати змогу побачити різні зображення НаноАрт: наприклад, зміна кольору квітів з червоного на жовтий перетворює НаноАрт «Маки» на НаноАрт «Соняшники» (рис. 7), а зміна кольору з помаранчевого на зелений показує перетворення НаноАрт «Нановибухи» (рис. 5в) на НаноАрт «Опустілий ліс» (рис. 8).

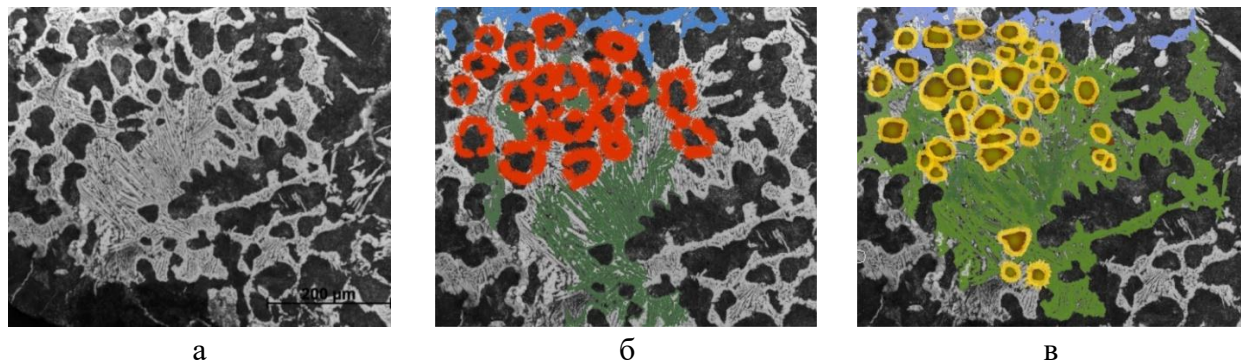


Рисунок 7 – НаноАрт, створений на прикладі доєвтектичної структури, отриманої шляхом переплавлення та науглецювання в рідкому стані: перліт і трансформований ледебурит: а – первісна структура [26]; б – НаноАрт «Маки»; в – НаноАрт «Соняшники»

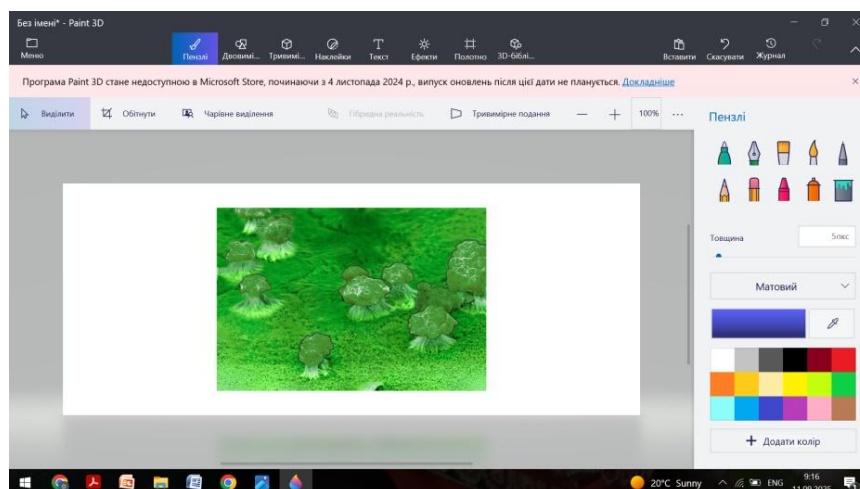


Рисунок 8 – Механізм «розфарбування» вихідної мікроструктури матеріалу за допомогою графічного редактора Paint 3D

В межах даної роботи використовувалися мікро-та макроструктури чорних та кольорових металів і сплавів з атласу структури металів та сплавів [27]. Для «розфарбування»

Металургія

вихідної структури матеріалу використовували графічний редактор Paint 3D (рис. 8). Чорно-біле зображення «розфарбується» згідно творчого погляду автора. Отримані зображення НаноАрт представлені на рис. 9 – рис.13.

На рис. 9 представлені зображення НаноАрт, які створювалися з залученням і зміни кольору, і домалювання та видалення об'єктів, а рис. 10 – рис.13 піддавалися лише обробці кольорової палітри.

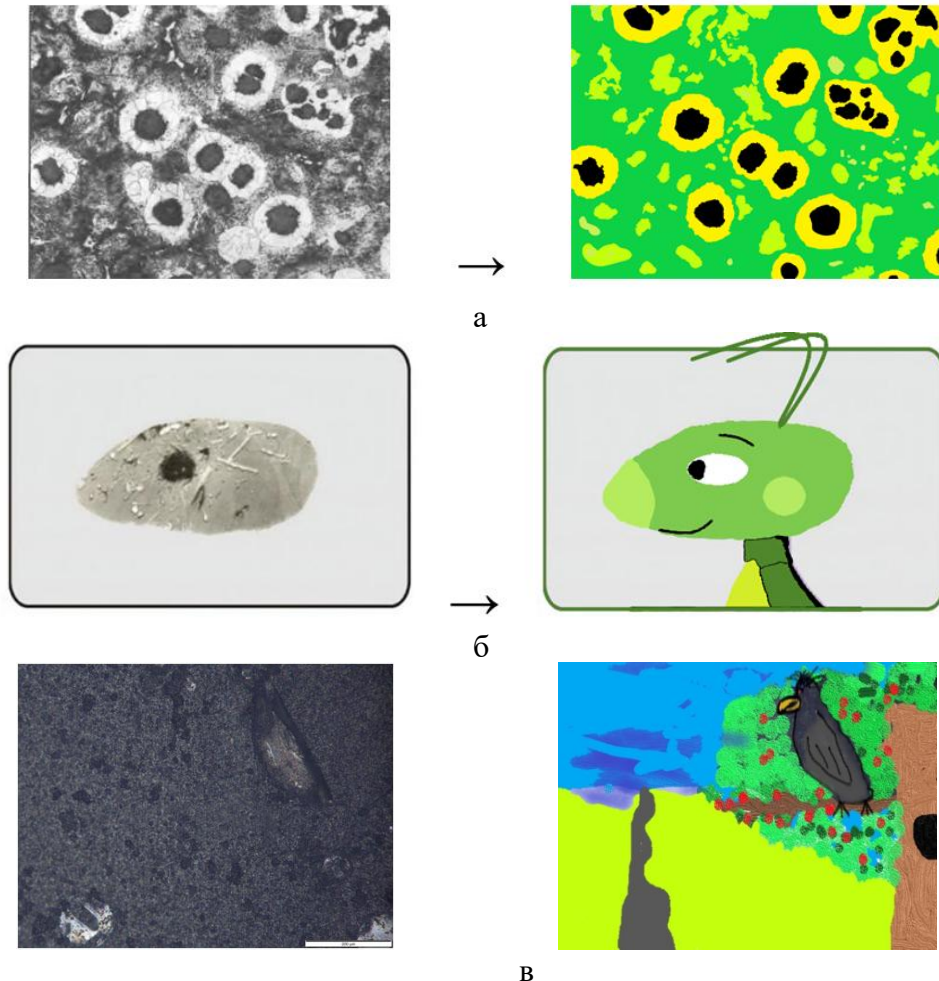


Рисунок 9 – Зображення НаноАрту: а – НаноАрт «Бактерії», створений на прикладі мікроструктури чавуну з шаровидним графітом на феритно-перлітній основі 12Х1М1Ф; б – НаноАрт «Коник», створений на прикладі мікроструктури сталі 12Х1М1Ф; в – НаноАрт «Ворона», створений на прикладі мікроструктури титану

НаноАрт «Дикий пес» (рис. 10) зображає собаку як символ вірності, відданості, пильності, дружби та надійної охорони. Так Пес Патрон є символом українських сил гуманітарного розмінування, уособлюючи хоробрість та допомогу.

Кішка як символ домашнього затишку, родючості та жіночності знайшла відображення у НаноАрт «Кішка», який був створений на прикладі мікроструктури сталі марки 08кп (рис. 11).

Найчастіше серце асоціюється з любов'ю та відданістю, але також може означати вірність, дружбу, доброту, сміливість, життя. Саме тому НаноАрт «Химерне серце» (рис. 12) наближає нас до розуміння значимості людського життя («Поки б'ється серце, надію втрачати не можна»).

Металургія



Рисунок 10 – НаноАрт «Дикий пес», створений на прикладі мікроструктури чавуну марки КЧ 35-10



Рисунок 11 – НаноАрт «Кішка», створений на прикладі мікроструктури сталі марки 08кп

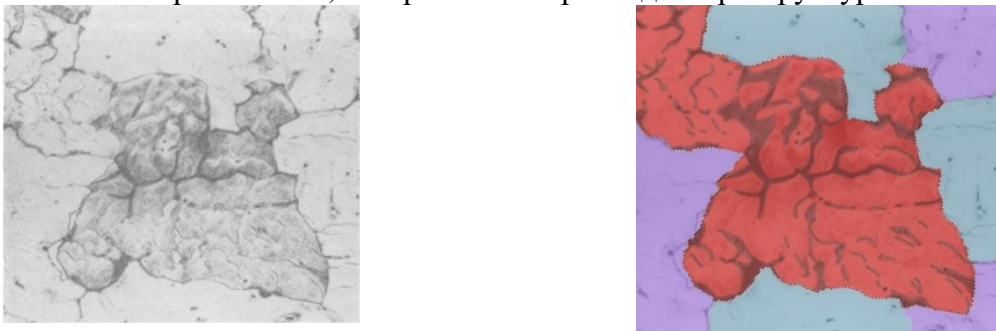


Рисунок 12 – НаноАрт «Химерне серце», створений на прикладі мікроструктури алюмінієвого сплаву марки Д712-Ф

Дивлячись на НаноАрт «Дно дорогоцінного моря» (рис. 13) згадується літо, відпочинок біля Чорного моря. Фраза «Дно дорогоцінного моря» є метафорою, що означає глибину та багатство, приховані в Чорному та Азовському морях, де існують справжні скарби – як у вигляді природних коштовностей (самоцвітів), так і в ширшому, переможному сенсі.

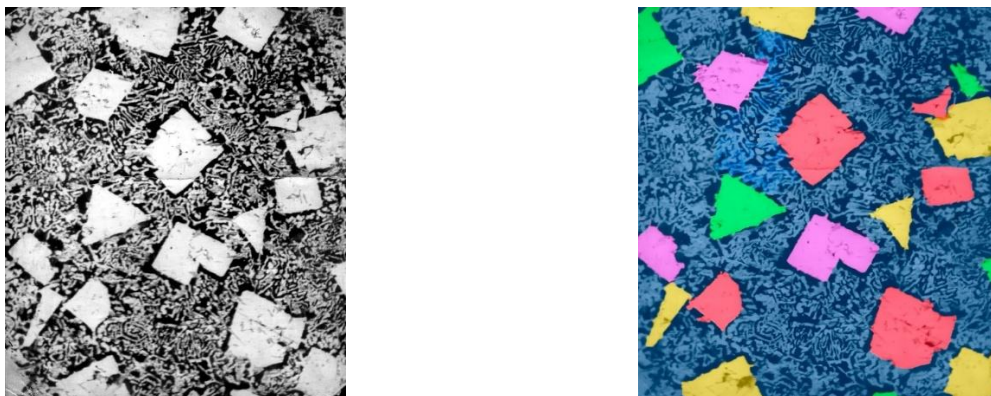


Рисунок 13 – НаноАрт «Дно дорогоцінного моря», створений на прикладі мікроструктури заевтектоїдного сплаву Pb – Sb

ВИСНОВКИ

В умовах модернізації вищої освіти в Україні особливого значення набуває впровадження сучасних інформаційно-комунікативних технологій в освітній процес ЗВО. Ґрунтуючись на принципах цифрової трансформації освіти використання сучасних інтернет-технологій в освітньому процесі дасть змогу: впровадження онлайн-навчання (або дистанційного навчання); інтенсифікувати освітній процес, зробити його мобільним, диференційованим та пристосованим до реалій сучасності; автоматизувати процес навчання (систематизувати навчальні матеріали і дозволити виконувати завдання максимально швидко і легко); розвивати цифрові навички як у здобувачів вищої освіти, так і у викладачів ЗВО; впроваджувати нові способи прийняття рішень на основі цифрових даних та інші.

В сьогоденних реаліях дистанційного навчання в ЗВО значним для освітнього процесу стає пошук нових альтернативних практичних та лабораторних робіт, що зможуть поєднати в собі теоретичні та практичні складові за спеціальністю.

Так для здобувачів вищої освіти за спеціальністю G10 «Металургія» пропонується взамін проведення в умовах лабораторій традиційних лабораторних робіт з виплавки та обробки чорних та кольорових металів і сплавів (які не має можливості проводити в прифронтових містах через воєнний стан та високу вартість електроенергії) виконання як альтернативної роботи наукової роботи «НаноАрт і металургія», яка є поєднанням науки і мистецтва через дослідження мікро- та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів. Поєднання мистецтва та металургії у вигляді зображень НаноАрт створюються унікальні картини, що демонструють красу науки та її творчий потенціал.

Список використаних джерел

1. Дядюн С. В. Використання інформаційних технологій в освіті [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Chromeextension://efaidnbmninnibpcapcglclefindmkaj/https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/01/131.pdf](chromeextension://efaidnbmninnibpcapcglclefindmkaj/https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2021/01/131.pdf) (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.
2. Dyadun S. V. Implementation of Information and Communication Technologies in the Educational Process / S. V. Dyadun // Проблеми сучасної освіти : збірник науково-методичних праць. – 2020. – №11. – С. 114–125.
3. Роль інформаційних технологій у сучасному освітньому просторі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ituniver.com/blog/rol-informacijnih-tehnologij-u-suchasnomu-osvitnomu-prostorі> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.
4. Дослідження інформаційних технологій в освіті [Електронний ресурс] / В. Кушнарєнко [та ін.] // BMC-2020: International Scientific-Practical Conference of young scientists «Build-Master-Class-2020». – Київ. – 2020. – Режим доступу: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapcglclefindmkaj/https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2022/10> (дата звернення: 05.09.2025). – Назва з екрана.
5. Антонова Л. Використання сучасних інформаційних освітніх технологій в Україні / Л. Антонова, В. Бєлозерцев, Л. Харакоз / Вісник Хмельницького національного університету. – 2023. – № 1. – С. 261–265.
6. Особливості впровадження технологій дистанційного навчання в освітній процес закладів професійної освіти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://naurok.com.ua/osoblivosti-vprovadzheniya-tehnologiy-distanciynogo-navchannya-v-osvitniy-proces-zakladiv-profesiyno-osviti-401767.html> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.
7. A.-M. Androniceanu, I. Georgescu Canonical correlation analysis and a new composite index on digitalization and labor force in the context of the industrial revolution 4.0 [Електронний ресурс]

/ A.-M. Androniceanu, I. Georgescu, M. Tvaronavičiene, A. Androniceanu // Sustainability (Switzerland). – 2020. – No 12. – Режим доступу: <https://cutt.ly/zwDHrHzY> (дата звернення 22.12.2023). – Назва з екрана.

8. Найкращі AI з відкритим вихідним кодом: Топ 17 найкращих платформ та інструментів штучного інтелекту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://profitstore.ua/uk/blog/research/najkraschi-ai-z-vidkrytym-vyhidnym-kodom> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

9. Топ-10 ШІ для роботи, навчання і творчості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kau.com.ua/top-10-shi-dlia-roboty-navchannia-i-tvorchosti/> (дата звернення: 05.08.2025).

10. Положення про студентські наукові проблемні групи в Запорізькому національному університеті [Електронний ресурс]. – Режим доступу: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.znu.edu.ua/docs/2021/ndch/polozhennya_pro_students_k_naukov_problemn_grupi_v_znu.pdf (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

11. Студентські наукові проблемні групи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.znu.edu.ua/ukr/university/11929/12623/13002/13003> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

12. NanoArt – Atomic / Molecular Sculptures and Landscapes [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.interaliamag.org/articles/cris-orfescu-nanoart-atomic-molecular-sculptures-and-landscapes/> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

13. NanoArt and Surrealist Photography [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://crisorfescu.com/> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

14. Нанокарт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://habr.com/ru/articles/24342/> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

15. Nano Art Competition [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.nanoisrael.org/article_id-17131 (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

16. Materials Research Society [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mrs.org> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

17. MVC14. 14th ANNUAL MATERIALS VISUALIZATION COMPETITION 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.matse.psu.edu/mvc14> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

18. 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: 05.08.2025). – Назва з екрана.

19. Science as art. Volume 49, page 184, (2024) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1557/s43577-024-00666-0> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

20. Science as Art [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mrs.org/programs/get-involved/science-as-art> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

21. «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.

22. Процес створення НаноАрту «Бавовна» / Наукове мистецтво [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=KT4t2wXw68E> (дата звернення: 05.03.2024). – Назва з екрана.

23. NanoArt – is a symbiosis of science and art [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.goethe.de/resources/files/pdf28>

8/nanoart.pdf (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

24. НаноАрт та металургія : симбіоз мистецтва та технологій під час війни / О. С. Воденнікова [та ін.] // Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2024 : XVI Міжнародна науково-технічна конференція (Київ, 25–26 квітня 2024р.). – Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2024. – С. 97–102.

25. НаноАрт та металургія : застосування інформаційних технологій при обробці макроструктур металів та сплавів / К. А. Піщенко [та ін.] // Наука і сталий розвиток транспорту 2024 : збірник тез доповіді всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих учених (Дніпро, 27 листопада 2024р.). – Дніпро: УДУНТ, 2024. – Т. II. – С. 94–95.

26. Adrian Wrona. The Production of High Carbon Steel Directly in Bloomery Process: Theoretical Bases and Metallographic Analyses of the Experiments Results [Електронний ресурс] / Adrian Wrona // EXARC Journal. – 2023. – Issue 2. – Режим доступу: <https://exarc.net/issue-2013-2/ea/production-high-carbon-steel-directly-bloomery-process-theoretical-bases-and-metallographic-analyses> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

27. Большаков В. И. Атлас структур металлов и сплавов / В. И. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухин. – Днепропетровск: ГВУЗ «ПГАСА», 2010. – 174 с.

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

NANOART AND METALLURGY: USE OF INFORMATION TECHNOLOGIES IN PROCESSING MICRO-AND MACROSTRUCTURES OF FERRO AND NON-FERRO METALS AND ALLOYS

The article focuses on the relevance of the use of information technologies in the educational process in higher education institutions (HEIs). It is noted that the use of modern Internet technologies in the educational process provides the following opportunities: to automate the learning process, to systematize educational materials and allow tasks to be completed as quickly and easily as possible; to increase the level of knowledge of higher education applicants and the quality of teaching in higher education institutions; the possibility of online learning or distance learning. It has been noted that the search for new alternative practical and laboratory work, that can combine theoretical and practical components in the specialty, is important for the educational process during distance learning. So directly during distance learning at Zaporizhzhia National University in order to master modern information and communication technologies, to reveal scientific and creative potential, applicants for higher education in the specialty G10 «Metallurgy» are offered to perform the scientific work «NanoArt and Metallurgy».

The specified scientific work is a combination of science and art through the study of micro- and macrostructures of ferrous and non-ferrous metals and alloys, and also contributes to the development of creative abilities and the popularization of Ukrainian art. Based on the experience of scientists from different countries of the world in creating NanoArt images, this article is proposed using the graphic editors Adobe Photoshop CS and Paint 3D creating your own NanoArt images. A step-by-step mechanism for creating a NanoArt image is presented and it is shown that each NanoArt image has its own name, symbolizes something and remains the creative approach of the NanoArt author.

In conclusion, it should be emphasized the importance of creating NanoArt images as a demonstration to the viewer of the possibilities of the technique for creating microscopic art objects. When combining art and metallurgy in the form of NanoArt images, unique paintings are created that demonstrate the beauty of science and its creative potential.

Keywords: NanoArt, information technology, metals and alloys, microstructure, macrostructure, nanostructure.

Стаття надійшла 29.09.2025р

ОСОБЛИВІСТІ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ПІЛЬГЕРНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ НА СТАНАХ З МОЖЛИВІСТЮ ВИКОНАННЯ РІЗНИХ СПОЛУЧЕНЬ ПОДАЧІ ТА ПОВОРОТУ ПЕРЕД ДЕФОРМУВАННЯМ ПРЯМИМ ТА ЗВОРОТНИМ ХОДОМ КЛІТІ ТА ОБЛАСТІ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Процес холодної пільгерної прокатки застосовується у виробництві труб з високими вимогами по точності геометрії, по поверхні та по механічним властивостям металу.

В останні роки в Україні введено в експлуатацію нові сучасні стани холодної пільгерної прокатки труб ХПТ8-40, КПВ25, ХПТ6-20, ХПТ10-45, LG20 та LG40 на яких є можливість виконувати різні сполучення подачі та повороту заготовки перед деформуванням прямим та перед деформуванням зворотним ходом кліті. А діючі стани холодної прокатки старих конструкцій мають можливість виконувати подачу заготовки лише перед деформуванням прямим ходом, а поворот перед деформуванням зворотним ходом кліті.

В роботі розглядаються особливості та області застосування процесів холодного пільгерного деформування труб з різними сполученнями подачі та повороту перед прямим та зворотним ходом кліті.

Застосування процесу холодної пільгерної прокатки з подачею та поворотом перед прямим та зворотним ходом дає можливість підвищувати продуктивність процесу, точність труб та приводить до появи градієнтної мікроструктури металу по товщині стінки. Близькі результати по точності дає процес з подачею і поворотом перед прямим ходом та з поворотом перед зворотним ходом кліті

Але є і неопозитивні фактори. При деформування зворотним ходом кліті є збільшення осьових зусиль та сили зриву труби з оправки. Це затрудняє прокатку труб з більш товстими стінками. Це потребує також і застосування більш ефективних мастил.

Описано раціональні варіанти проведення процесу пільгерного деформування з подачею та поворотом перед прямим та зворотним ходом для забезпечення підвищення продуктивності процесу, точності труб та забезпечення необхідної мікроструктури металу.

Це потрібно для розробок ефективних процесів холодної пільгерної прокатки з різними режимами подачі та повороту в єднанні з режимами деформації робочому конусі деформування.

Ключові слова: Холодна пільгерна прокатка, режими деформування, сполучення подачі та повороту перед прямим та перед зворотним ходом кліті, зрив труби з робочого конусу деформування, точність труб, мікроструктура металу труб.

Постановка проблеми. Ще 15-20 років тому в Україні в основному використовували тільки процес холодної пільгерної прокатки на станах ХПТ. Труби деформують в рівчак валка на нерухомій оправці. Рівчак має змінний поперечним профіль, що змінюється по периметру валка. Застосовують оправки конічної форми чи з криволінійною твірною форми (рис.1), де подача порціями та поворот заготовка виконується перед деформування прямим ходом кліті, а поворот перед деформуванням зворотним ходом кліті. При цьому орієнтовно 70 процентів лінійного зміщення готової труби відбувається при прямому ході (рис. 1) та 30 процентів при зворотному.

Металургія

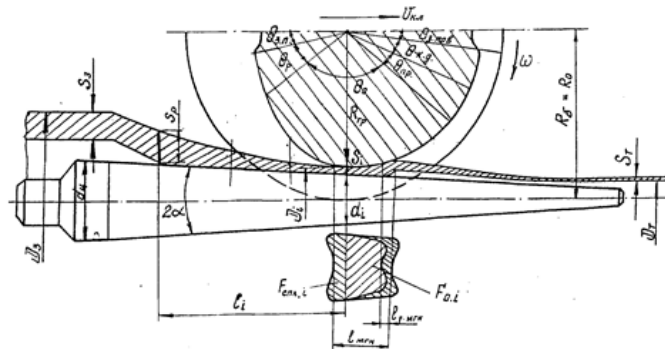


Рисунок 1 – Схема робочого конусу деформування та миттєвого осередку деформації при деформуванні прямим ходом кліті [1]: $\theta_{з.п}$ - зев подачі; θ_p - ділянка редукування; θ_o - обтискна ділянка; $\theta_{пр}$ - передоздоблювальна ділянка; $\theta_{к.д}$ - ділянка калібрування діаметра; $\theta_{з.пов}$ - зев повороту; $D_з$ - діаметр заготовки; $d_ц$ - діаметр циліндричної частини оправки; $S_з$ - товщина стінки заготовки; S_p - товщина стінки в кінці зони редукування; 2α - два кута конусності оправки; D_i - діаметр робочого конусу у положенні i ; S_i - товщина стінки у положенні i ; $R_{\delta p}$ - радіус гребня річка валка; d_i - діаметр оправки в положенні i ; R_{δ} - радіус ідеального діаметра валка; S_m - товщина стінки прокатої труби; D_t - діаметр прокатої труби; $F_{o,i}$ - горизонтальна проекція поверхні осередку деформації; $F_{зп.і}$ - величина збільшення F_o з-за плющення валка в положенні i ; $L_{мгн}$ - довжина миттєвого осередку деформування; L_i - довжина від початку зони обтиснення до точки місця положення миттєвого осередку деформації; $L_{р.мгн}$ - довжина зони редукування в миттєвому осередку деформування

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Осередок деформування у процесі холодної прокатки труб зворотним ходом представлено в роботі [2].

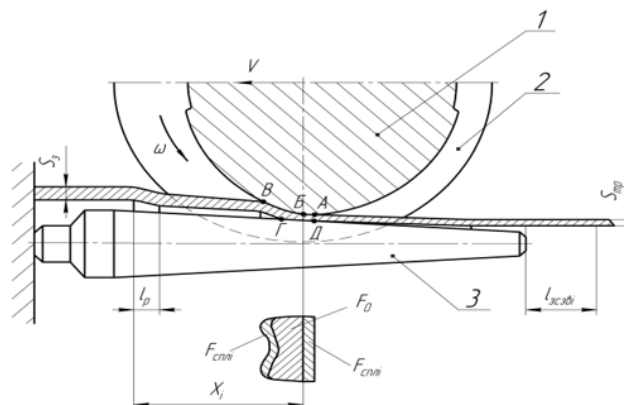


Рисунок 2 – Схема сумарного та миттєвого осередку деформації при деформуванні труби - заготовки зворотним ходом кліті: 1- валок; 2 - річка валка; 3 - нерухома оправка; $S_з$ - товщина стінки труби-заготовки; $S_{тр}$ - товщина стінки прокатої труби; АБВГД- миттєвий осередок деформації; V - поступова швидкість валка; ω - кутова швидкість валка; $l_{зсзв}$ - лінійний зсув переднього торця труби; l_p - довжина зони редукування; F_o - горизонтальна проекція площі контакту річка валка з трубою, що деформується; $F_{спл}$ - площа збільшеної частини площі контакту річка валка з трубою за рахунок сплюснення валка; X_i - довжина від початку деформованої труби-заготовки до положення валка і [2].

В роботі [1] розглянуті чотири варіанти виконання сполучень подачі та повороту при деформування прямим та зворотним ходом кліті на сучасних станах холодної пільгерної прокатки.

варіант 1 – подача труби здійснюється перед деформуванням прямим ходом кліті, а поворот труби – перед деформуванням зворотнім ходом кліті;

варіант 2 – подача труби здійснюється перед деформуванням прямим ходом кліті, а поворот труби – перед деформуванням прямим та зворотнім ходом кліті;

варіант 3 – подача труби здійснюється перед деформуванням прямим і зворотнім ходом кліті, а поворот – перед деформуванням зворотнім ходом кліті;

варіант 4 – подача та поворот труби здійснюються перед деформуванням прямим та деформуванням зворотнім ходом кліті.

В роботі [3] показано, що при застосування процесу прокатки з подачею та поворотом труби перед прямим та перед зворотним ходом кліті (варіант 4) звичайно зменшують величину подачу і відповідно розвалку калібрів і це приводить до суттєвого зменшення поперечної різностінності труб і також овальності труб. Це приводить до значного поліпшення якості по точності труб. При варіанті 2 (подача труби здійснюється перед деформуванням прямим ходом кліті, а поворот труби перед деформуванням прямим та зворотнім ходом кліті) також знижується поперечна різностінність та овальність труб.

В роботах [4, 5] теж відзначається, що на сучасних станах холодної пільгерної прокатки точність труб підвищується.

В роботі [6] показано, що застосування процесу прокатки з подачею та поворотом труби перед прямим та зворотним ходом кліті підвищує орієнтовно в двічі дрібність деформування металу, що впливає на подрібнення зерен металу і змінює його механічні характеристики. Показано, що за рахунок збільшення довжини робочого конуса і відповідно довжин зони обтиску деформування дрібність деформування зростає. З'являється градієнтна по товщині стінки мікроструктура. Дрібність деформування також розглянута в роботі для процесу холодної безперервної роликової прокатки труб де були встановлені дворядні, а також трирядні кліті [7].

В роботі [4] також йдеться про важливість досліджень з мікроструктури і механічних властивостей труб отриманих холодною пільгерною прокаткою, які працюють під внутрішнім тиском рідини.

Мета дослідження. Метою статті є визначення і особливостей процесу холодної пільгерної прокатки труб з різними сполученнями подач та повороту перед деформуванням прямим та зворотним ходом кліті та представлення областей його використання.

Основний матеріал дослідження. Розглянемо основні особливості процесу холодної пільгерної прокатки труб на станах з можливістю виконання різних сполучень подачі та повороту перед деформуванням прямим та зворотним ходом кліті. З чотирьох розглянутих варіантів виконання сполучень подачі та повороту два дають суттєві позитивні здобутки. Це варіант 2 та варіант 4 по зрівнянню з процесом за варіантом 1.

1. Підвищення точності. Підвищення точності труб забезпечується завдяки тому, що подача перед прямим та перед зворотнім ходом зменшена у два рази по зрівнянню з подачею у процесі холодної прокатки труб за варіантом 1. Сумарна величини лінійного зсуву однакова, що у процесі з подачею перед деформуванням прямим ходом, а поворотом перед деформуванням зворотнім ходом та процесом за варіантом 4.

2. Підвищення дрібності деформування Дрібність деформування має своє визначення. Дрібність деформування - це кількість циклів деформування при якому вхідний перетин труби заготовки деформується в кінцевий перетин труби.

$$n_d = 3l_o / m (1 + 2\mu_\Sigma); \quad (1)$$

де: n_d – дрібність деформування;
 l_o – довжина зони обтиску робочого конусу деформування;
 m – величина подачі металу;
 μ_Σ – величина витяжки труби-заготовки в трубу.

В результаті збільшення довжина зони обтиску робочого конусу деформування за рахунок додаткового дрібного деформування при зворотному ході кліті збільшується дрібність деформування.

3. Поява градієнтності мікроструктури по товщині стінки труби. В результаті збільшення інтенсивності деформування на контакті внутрішньої поверхні труб з нерухомою оправкою зерно дробиться в більшій мірі ніж в інших частинах товщини стінки.

4. Збільшення осьових зусиль та сили зриву труби з оправки при зворотному ході.

При зворотному ході метал не має можливості виходити з миттєвого осередка деформування в сторону прямого ходу, а виходить в сторону прямого хода кліті. Збільшується складова сил тертя сил в силі, що діє на валок.

Для нівелювання цього збільшення звичайно зменшують величину подачі вдвічі. З зменшенням подачі зменшуються сили, що діють на валок. При цьому зменшується осьові сили та сила потрібна для зриву труби перед при подачі і робота стана відбувається нормально. Крім того, при цьому продуктивність стану остається такою ж як у процесі з подачею та поворотом тільки при прямому ході. Також і значно підвищується точність труб за рахунок зниження поперечної різностінності [3] та як подача була зменшена вдвічі.

По даним авторів в даний час в Україні з використанням різних сполучень подачі та повороту перед деформуванням прямим та зворотнім ходом є можливість прокатувати труби на п'яти станах ХПТ-32, двох станах ХПТ-55 і одному ХПТ-75, стані ХПТ 6-20, ХПТ 10-45 і двох станах КРВ-25, стані ХПТ 10-45, станах, LG20 та LG40.

Області ефективного застосування процесу холодної пільгерної прокатки труб на станах, що мають можливість виконання різних сполучень подачі та повороту перед деформуванням прямим та зворотним ходом кліті:

1) Прокатка тонкостінних труб. При прокатці товстостінних труб ускладняється процес прокатки з подвійною подачею, оскільки збільшується сила зриву труби з оправки, особливо перед зворотним ходом кліті;

2) При прокатці тонкостінних труб з відносною деформацією по площі поперечного перетину труби-заготовки більше ніж 50% треба зменшувати величини подач з-за підвищення конусності оправок, і відповідно, осьових зусиль при зворотному ході кліті та збільшення сили зриву труби з оправки;

3) При прокатці з деформаціями по діаметру менше 50% тонкостінних труб із сталей з високою пластичністю співвідношення величин подач оптимальне в діапазоні - $(60 \div 50) : (40 \div 50)$, майже 50:50.

4) Тепла прокатка труб. При теплій прокатці труб знижуються сили прокатки і застосовують мастила з графітом.

ВИСНОВКИ

1. Поява в Україні нових сучасних промислових станів холодного пільгерного деформування труб, що мають конструкцію яка забезпечує здійснення різноманітних варіантів сполучень подачі та повороту поставила задачі по визначенню особливостей

Металургія

деформування та визначенню областей застосування процесу холодного пільгерного деформування труб як переднім так і заднім ходом кліті.

2. Виявлені наступні особливості процесу холодного пільгерного деформування труб на станах, що мають конструкцію яка забезпечує здійснення різноманітних варіантів сполучень подачі та повороту перед прямим та зворотним ходом кліті:

- відбувається зниження поперечної різностінності труб та овальності за рахунок зменшення подачі перед прямим та зворотним ходом кліті;

- відбувається підвищення дрібності деформування в результаті збільшення довжина зони обтиску робочого конусу деформування за рахунок додаткового деформування при зворотному ході кліті і зменшення подач перед прямим та зворотним ходами кліті;

- з'являється градієнтність мікроструктури по товщині стінки труб так як в результаті збільшення інтенсивності деформування на контакті внутрішньої поверхні труб з нерухомою оправкою зерно дробиться в більшій мірі ніж в інших частинах товщини стінки;

- збільшуються осьові сили та сили зриву труби з оправки при зворотному ході так як при зворотному ході метал не має можливості виходити з миттєвого осередка деформування в сторону прямого ходу і виходить в сторону прямого хода кліті і збільшується складова сил тертя в силі, що діє на валок.

Області ефективного застосування процесу холодної пільгерної прокатки труб на станах, що мають можливість виконання різних сполучень подачі та повороту перед деформуванням прямим та зворотним ходом кліті:

- прокатка тонкостінних труб;

- прокатці тонкостінних труб з відносною деформацією по площі поперечного перетину труби-заготовки більше ніж 50% з зменшенням величин подачі;

- прокатка з деформаціями по діаметру менше 50% тонкостінних труб із сталей з високою пластичністю з співвідношення величин подач оптимальне в діапазоні - $(60 \div 50) : (40 \div 50)$, майже 50:50;

- тепла прокатка труб.

Список використаних джерел

1. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2015). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: Монографія. Дніпропетровськ: Пороги. 120 с.

2. Григоренко В.У., Іскрижиський Д.В. (2025). Дослідження осередку холодного пільгерного деформування труби при зворотному ході кліті. Наука та виробництво. № 29 (2025). <https://doi.org/10.31498/2522-9990292025330261.C.101-106>.

3. О.П. Головченко & В.У. Григоренко (2022). Дослідження впливу на поперечну різностінність труб процесу холодної пільгерної прокатки з подвійною подачею та поворотом на сучасних станах. *Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка»*, (71), 186-193. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.186>

4. McNair, S., Chaharsooghi, A.S., Carnevale, M., Onnela, A., Daugin, J., Cichy, K., ..., Lunt, A. J.G. (2022). Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(3-4), pp.667-681. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>.

5. Azizoğlu, Y.; Sjöberg, B.; Lindgren, L.-E (2024). Modeling of Cold Pilgering of Stainless-Steel Tubes. *J. Manuf. Process.* 2024, 112, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.039>.

6. Golovchenko O., Grigorenko V., & V. Protsiv V. (2023). Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 054-059. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/054>.

7. Григоренко В.У. Розвиток наукових основ, створення та і впровадження ефективних процесів холодної безперервної періодичної роликової прокатки особливотонкостінних і багатошарових труб: дис. ... д-ра технічних наук: 05.03.05. Дніпропетровськ. 2004. 359 с.

Grigorenko V.U., Zinchenko S.M., Iskryzhytsky D.V.

FEATURES OF THE COLD PILGRIMS ROLLING PROCESS OF PIPES ON ROLLING ROLLERS WITH THE POSSIBILITY OF PERFORMING VARIOUS FEED AND ROTATION COMBINATIONS BEFORE DEFORMING BY DIRECT AND RETURN MOVEMENT OF THE CAGE AND AREAS OF ITS APPLICATION

The cold pilger rolling process is used in the production of pipes with high requirements for geometric accuracy, surface finish and mechanical properties of the metal.

In recent years, new modern cold pilger rolling mills of pipes KhPT8-40, KPV25, KhPT6-20, KhPT10-45, LG20 and LG40 have been put into operation in Ukraine, which have the ability to perform various combinations of feed and rotation of the workpiece before deformation by direct and before deformation by reverse motion of the stand. And the existing cold rolling mills of old designs have the ability to perform feed of the workpiece only before deformation by direct motion, and rotation before deformation by reverse motion of the stand.

The paper considers the features and areas of application of the processes of cold pilger deformation of pipes with various combinations of feed and rotation before direct and reverse motion of the stand.

The application of the process of cold pilger rolling with feed and rotation before direct and reverse motion makes it possible to increase the productivity of the process, the accuracy of the pipes and leads to the appearance of a gradient microstructure of the metal along the wall thickness. Similar results in terms of accuracy are obtained by the process with feed and rotation before the forward stroke and with rotation before the reverse stroke of the stand

But there are also negative factors. When deforming by the reverse stroke of the stand, there is an increase in axial forces and the force of the pipe breaking off from the mandrel. This makes it difficult to roll pipes with thicker walls. This also requires the use of more effective lubricants.

Rational options for carrying out the process of pilger deformation with feed and rotation before the forward and reverse stroke are described to ensure increased process productivity, pipe accuracy and ensuring the necessary metal microstructure.

This is necessary for the development of effective processes of cold pilger rolling with different feed and rotation modes in combination with deformation modes in the working cone of deformation.

Keywords: Cold pilger rolling, deformation modes, combination of feeds and rotation before the forward and reverse stroke of the stand, pipe breaking off from the working cone of deformation, pipe accuracy. microstructure of the pipe metal.

Стаття надійшла 19.11.2025р.

РОЗРОБКА ВЕДУЧИХ ШЕСТЕРЕНЬ ЗІ ЗМІННИМ ДІЛІЛЬНИМ РАДІУСОМ У ПАРІ З НЕРУХОМОЮ ЗУБЧАСТОЮ РЕЙКОЮ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИРОДНОГО ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОЇ ПІЛЬГЕРНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ

Стани холодної пільгерної прокатки застосовують у промисловості для виробництва труб з високими вимогами до якості.

В Україні працюють багато станів холодної пільгерної прокатки застарілих конструкцій та нові сучасні стани холодної пільгерної прокатки труб ХПТ8-40, КПВ25, ХПТ6-20, ХПТ10-45, LG20 та LG40. Всі ці стани мають один суттєвий недолік – обертання валків здійснюється за рахунок контакту зубців ведучої шестерні з зубцями нерухомої рейки, що розташована на станині стану. Причому примусовий катаючий радіус, що задається ділільним радіусом кола ведучої шестерні, не співпадає з природнім катаючим радіусом у перетинах робочого конусу деформування.

Для вирішення цієї проблеми представлено реалізацію пропозиції, де ведучі шестерні мають кожен зубець, що розташований відповідно зміні катаючого природного радіуса, а кожен зубець нерухомої зубчастої рейки розташовано так, що він є заціпленим з зубцями шестерні за закономірностями, що притаманні евольвентному зачепленню зубців шестерні та рейки.

Це забезпечує відповідність примусового катаючого радіуса, що задається відповідністю ділільного радіуса ведучої шестерні до природнього катаючого радіуса, утворюючи потрібний режим деформування металу труби рівчаком валка на нерухомій оправці.

Це знижує рівень осьових сил та сил тертя на поверхні між рівчаком валка та трубою, що деформують. Додатково, це підвищить міжремонтний термін обладнання та якість поверхні готових труб.

Ключові слова: Стани холодної пільгерної прокатки труб, ведуча шестерня, зубчаста нерухома рейка, примусовий та природний катаючий радіус, осьові сили, міжремонтний термін обладнання, якість поверхні труб.

Постановка проблеми. Стани холодної пільгерної прокатки труб з валками широко застосовуються в Україні й у світі у виробництві труб відповідального призначення для сучасних літаків, ракет, підводних і надводних човнів, автомобілів та інших машин.

Основний робочий орган станів холодної прокатки труб – це робоча кліть з валками (рис. 1.)

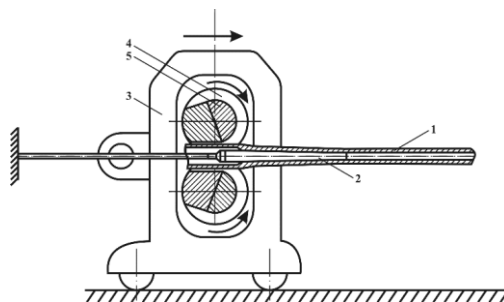


Рисунок 1 – Кліть стану ХПТ, труба та оправка зі стрижнем:
1 - труба; 2 - оправка; 3 - станина; 4 - валок; 5 – калібр [1]

Металургія

На сьогодні всі стани холодної пільгерної прокатки мають привід обертання валків по типу ведуча шестерня на осі валка – нерухома зубчаста рейка. Причому, обертання валків здійснюється за рахунок контакту зубців ведучої шестерні із зубцями нерухомої рейки, що розташована на станині стану (рис. 2).

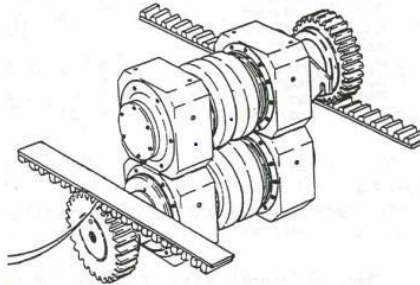


Рисунок 2 – Візуалізація приводу ведуча шестерня – нерухома зубчаста рейка на сучасних станах холодної пільгерної прокатки [2]

В процесі холодної пільгерної прокатки розрізняють природний катаючий радіус та примусовий. Природний катаючий радіус – це радіус від центра калібру валка до поверхні рівчака в точці, де коло швидкість точки рівчака (де знаходиться катаючий радіус R_k) дорівнює швидкості виходу металу з рівчака у разі вільної повздовжньої прокатки.

$$R_k = R_o - 0,76R_t \quad (1)$$

де, R_o – ідеальний радіус бочки валка, що дорівнює діаметру бочки валка, плюс зазор між валками при прокатці, R_t – радіус труби на виході металу з рівчака.

Примусовий катаючий радіус – це радіус, який дорівнює радіусу ділильного кола ведучої шестерні.

Така система приводу валків ведуча шестерня – нерухома зубчаста рейка має суттєвий недолік – тільки в одному перетині робочого конусу (поблизу середини довжини робочого конусу деформування) природний катаючий радіус дорівнює примусовому, що є рівним радіусу ділильного кола ведучої шестерні.

В інших перетинах збільшуються відносні швидкості ковзання поверхні рівчака валка та зовнішньої поверхні труби. Йде підвищений знос поверхні рівчака валка та погіршується якість поверхні труб.

Для зменшення цих негативних складових на поверхню труб наносять розділяючі шари матеріалів та застосовують мастила і охолоджуючі рідини.

Потрібно наблизити примусовий катаючий радіус до природнього. Це значно підвищить якість труб і покращить експлуатаційні показники обладнання станів холодної пільгерної прокатки труб.

В останні роки на українських підприємствах встановили імпорتنі стани ХПТ8- 40, КПВ25, ХПТ6-20, ХПТ10-45, LG20 та LG40, на яких привід валків виконується також за системою ведуча шестерня – нерухома зубчаста рейка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі описані в роботах [3, 4] пропозиції для нівелювання невідповідності примусового катаючого радіуса природньому, які були випробувані на практиці, вони такі:

- по перше, застосування шестерень, які мають зміщення отвору посадки на вісь валка на невелику відстань від центру осі валка;

- по друге, переміщення рейки під час прокатки;
- по третє, застосування рейки з перемінним кроком зубців.

Але такі рішення не знайшли використання на практиці.

Відома також пропозиція із застосування шестерні, де кожен зубець має контакт з зубцем рейки де зубці розташовані уздовж кривої, що описує зміну природнього катаючого радіусу [3, 7] та пропозиція із застосування нахиленої рейки, що наближує криву зміни примусового катаючого радіусу до природнього. В цих пропозиціях дільний радіус шестерні змінюється відповідно зі зміною природнього катаючого радіуса уздовж обтискної зони робочого конусу деформування.

У роботах [3, 4, 5 та 6] наведено розробки з розвитку пропозиції із застосування шестерні зі змінним ділільним радіусом.

Мета дослідження. Метою статті є представлення реалізації пропозиції по використанню шестерні зі змінним ділільним радіусом в парі з рейкою у САД-системах тривимірного моделювання, коли кожен її зубець розташовується у контакті із зубцями рейки за закономірностями, притаманними евольвентному зачепленню зубців шестерні та рейки.

Основний матеріал дослідження. Для забезпечення роботи шестерні з перемінним ділільним колом, її зубці встановлені таким чином у відношенні до зубців нерухомої рейки, що відстань між рейкою та центром обертання шестерні залишалася незмінною під час перекошування зубців шестерні по зубцях рейці відповідно до теорії евольвентного зачеплення (рис.3).

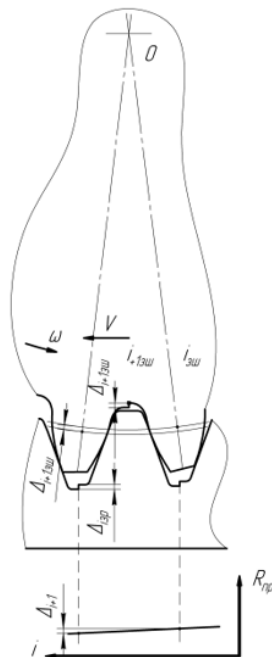


Рисунок 3 – Контури зубців ведучої шестерні в купі із зубчастою нерухомою рейкою стану холодної прокатки труб, де кожен зубець шестерні розташовано на іншому ділільному колі, діаметр якого змінено відповідно зі зміною природнього катаючого радіусу, а кожен зубець шестерні розташовується в контакті з зубцями рейки по закономірностям, притаманним евольвентному зачепленню зубців шестерні та рейки (прямий хід кліті справа уліво):

I – номер зубця; Δ – зміна природнього катаючого радіусу; зш – зубець шестерні; зр – зубець рейки; $R_{пр}$ – природний катаючий радіус; V – поступова швидкість валка; ω – кутова швидкість валка

Металургія

Але для кожної пари зубців шестерні та рейки діаметр ділительного кола шестерні змінюється (зменшується або збільшується), що, відповідно, змінює передавальне число зубчастої пари за певним законом, найпростішим з яких є лінійна функція.

Поява технологій CAD, CAM (наприклад, пакетів тривимірного моделювання та технологічного підготування виробництва Autodesk, Solidworks, Esprit та інші) дала можливість виконати розробки зубчастого зачеплення пари шестерня – рейка для станів холодної пильгерної прокатки труб зі змінними значеннями розмірів ділительного кола та профілів зубців (рис. 4 та рис.5).

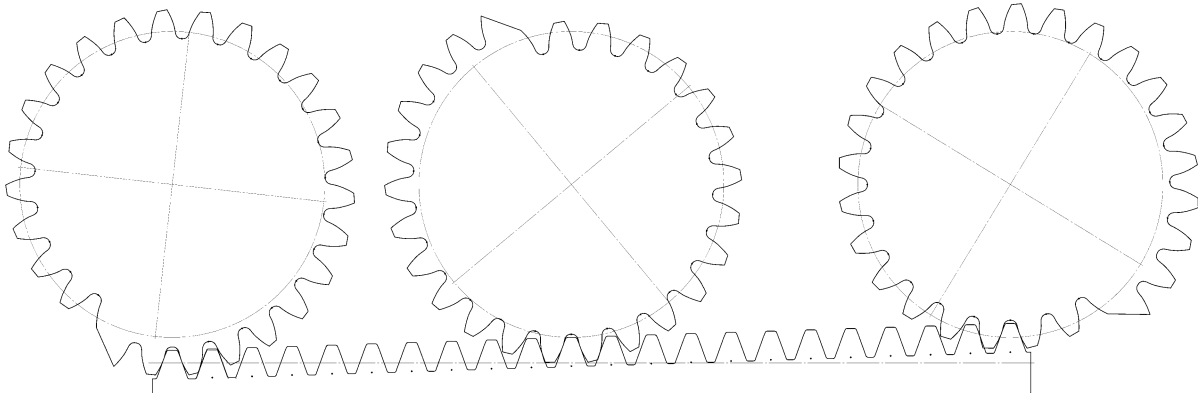


Рисунок 4 – Ведуча шестерня зі змінним значенням ділительного кола зубців у парі з нерухомою зубчастою рейкою для забезпечення природнього процесу холодної пильгерної прокатки труб (прямий хід кліті справа уліво)



Рисунок 5 – 3D модель розробки ведучої шестерня зі змінним значенням ділительного кола зубців у парі з нерухомою зубчастою рейкою для забезпечення природнього процесу холодної пильгерної прокатки труб

Поява верстатів електроерозійної різки та багатовісних фрезерувальних оброблювальних центрів з числовим програмним керуванням дає поштовх на масову реалізацію запропонованого методу в промисловості для покращення технологічних можливостей процесу холодної пильгерної прокатки і відповідно експлуатаційних характеристик обладнання.

ВИСНОВКИ

В Україні працюють багато станів холодної пильгерної прокатки труб, де обертання валків здійснюється за рахунок контакту зубців ведучої шестерні з зубцями нерухомої рейки, що розташована на станині стану.

В таких станах примусовий катаючий радіус, що задається ділильним радіусом кола ведучої шестерні, не співпадає з природнім катаючим радіусом у перетинах робочого конусу деформування. Це збільшує інтенсивність тертя між поверхнями валків та труб в осередку деформування і знижує технологічні можливості.

В роботі представлена реалізації пропозиції із застосування шестерні з змінним ділильним радіусом зубців в парі з рейкою у тривимірній комп'ютерній моделі, коли кожен зубець розташовується в контакті із зубцями рейки відповідно закономірностям, притаманним евольвентному зачепленню зубців шестерні та рейки.

Поява верстатів електроерозійної різки та багатовісних фрезерувальних оброблювальних центрів з числовим програмним керуванням дає поштовх на масову реалізацію запропонованого методу в промисловості задля покращення технологічних можливостей процесу холодної пильгерної прокатки і, відповідно, експлуатаційних характеристик обладнання.

Список використаних джерел

1. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2014). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пильгерної прокатки труб і калібровки інструмента: Монографія. Дніпропетровськ: Пороги. 120 с.
2. Azizoğlu, Y.; Sjöberg, B.; Lindgren, L.-E (2024). Modeling of Cold Pilgering of Stainless-Steel Tubes. *J. Manuf. Process.* 2024, 112, 112–125. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.039>.
3. Григоренко В.У., Куцевол С.В. (2024). Розвитку методу визначення змінних параметрів зубчастої пари шестерня - рейка станів холодної прокатки труб для забезпечення природного процесу прокатки. *ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Наука та виробництво.* № 28 (2024). С 12-18. <https://orcid.org/0000-0002-1809-2842>.
4. Володимир Григоренко, Сергій Куцевол. (2025). Визначення параметрів ведучих шестерень з змінним ділильним радіусом для станів холодної прокатки труб. *Наука та виробництво.* № 29 (2025). <https://doi.org/10.31498/2522-9990292025330259>. 95-101.
5. Григоренко В.У., Куцевол С.В. (2024) Забезпечення рівності природного та примусового катаючого радіусу по довжині зони деформування при холодній прокатці труб. *Університетська наука - 2024 : тези доп. Міжнар.науково-техн. конф. (Дніпро, 23-24 травня 2024 р) : в 3 т. Т. 1: факультети: Навчально-науковий інститут сучасних технологій, машинобудування та зварювання, транспортний, інформаційних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ«ПДТУ», 2024. – 331 с., с.27-29. https://drive.google.com/file/d/1GUhI_j5-ZS--VIMLesla7Ev0c_TQtd97/view.*
6. В.У. Григоренко, С.В. Куцевол. (2024). Умови відповідності кінематики течії металу та руху валків в станах холодної прокатки труб. *II Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми і перспективи розвитку сучасних технологій»: тези доповідей: Дніпро: ПДТУ, 2024.*
[file:///C:/Users/admin/Downloads/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%97%202024.p](file:///C:/Users/admin/Downloads/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%97%202024.pdf)
df162 с. С38-40.

7. Пат. 61108410 Японія, МКИ В21 В 21/00. Пілігримовий стан холодної прокатки труб / Сумітомо кіндзоку кочо (Японія); Масами О., Масахиро К., Мунэкацу К. (Японія). – Оpubл. 27.05.86.

Grigorenko V.U., Protsiv V.V., Kutsevol S.V.

DEVELOPMENT OF DRIVE GEARS WITH VARIABLE PITCH RADIUS IN PAIR WITH A FIXED GEAR RACK TO PROVIDE A NATURAL PROCESS OF COLD PIPE ROLLING

Cold pilger rolling mills are used in production to obtain high quality pipes. In Ukraine, many HPT mills of the old design and new modern cold pilger rolling mills of HPT8-40, KPV25, HPT6-20, HPT10-45, LG20 and LG40 operate.

All these mills have one significant drawback - the rotation of the rolls is carried out due to the contact of the teeth of the drive gear with the teeth of the fixed rack, which is located on the mill bed. In this case, the forced rolling radius, which is given by the dividing radius of the driving gear circle, does not coincide with the natural rolling radius in the sections of the working cone of deformation.

To solve this problem, an implementation of the proposal is presented where the driving gears have each tooth located in accordance with the change in the natural rolling radius, and each tooth of the stationary gear rack is located so that it is meshed with the gear teeth according to the laws present in the involute meshing of the gear teeth and the rack.

This ensures that the forced rolling radius, which is given by the dividing radius of the driving gear, corresponds to the natural rolling radius, which is given by the given mode of deformation of the pipe metal by the roll groove on a stationary mandrel.

This reduces the level of axial forces and friction forces on the surface between the roll groove and the pipe. What is deformed. In turn, this will increase the equipment's maintenance interval and the surface quality of finished pipes.

Keywords: Cold rolling mills, driving gear, fixed rack, forced and natural rolling radius, axial forces, equipment's maintenance interval, pipe surface quality.

Стаття надійшла 23.11.2025р.

УДК 621.774.2

doi.org/10.31498/2522-9990302025347108

Овсяников В.В.

ДО ПИТАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАКОРДОННИХ МАРОК СТАЛЕЙ ДЛЯ ВІТЧИЗНЯНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВІДІВ

В Україні в 2019-2022 роках на підприємстві НВП УКРТРУБОІЗОЛ введена в експлуатацію сучасна імпортна лінія з повним технологічним циклом та з спеціалізованим обладнанням по виробництву зварних сталевих труб великого діаметру. Ця лінія забезпечує можливість виробництва за технічними вимогами відповідно сучасним міжнародним стандартам і нормам.

Металургія

При виробництві сталевих зварних прямошовних труб великого діаметру за вітчизняною технічною документацією використовують товстолистовий прокат з низьковуглецевих та низьколегованих марок сталей.

Зараз багато споживачів зіткнулися із проблемою отримання зварних труб великого діаметру труб з прокату виготовленого зі сталей за вітчизняною нормативною документацією. Доводиться замовляти лист іноземних виробників. Оскільки системи трубопровідного транспорту є небезпечними техногенними об'єктами, вибір сталевих листів є вкрай важливим завданням.

В світі для виробництва зварних труб великого діаметра застосовують товстолистовий прокат з низьковуглецевих і низьколегованих сталей та лист з низьколегованих сталей після термомеханічної обробки (за контрольованої прокатки). При виборі потрібного листа виникають значна кількість питань, щодо вибору показників з механічних властивостей сталі. Ці питання треба вирішувати.

Стаття спрямована на висвітлення питань, що стосуються шляхів вирішення проблем із застосуванням зарубіжних марок сталей для вітчизняних магістральних трубопроводів.

Ключові слова: *Магістральні зварні труби великого діаметру, низьковуглецеві та низьколеговані сталі, низьколеговані сталі з термо-механічної обробки, межа міцності, межа плинності, відносне подовження, ударна в'язкість.*

Постановка проблеми. Зараз багато споживачів трубої продукції зіткнулися із проблемою отримання труб із прокату виготовленого зі сталей за вітчизняною нормативною документацією. Це обумовлено тим, що при проектуванні нових і реконструкції магістральних трубопроводів базовими нормативними вітчизняними документами на сьогодні є :

- СНиП 2.05.06-85 «Будівельні норми і правила. Магістральні трубопроводи»;
- ДСТУ 9219:2023 (на заміну ГОСТ 20295-85) Труби сталеві зварні для магістральних газонафтопроводів. Технічні умови.;
- ДСТУ 9218:2023 (на заміну ГОСТ 10706-76) «Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш затребувані класи міцності та марки сталі товстолистого прокату для труб представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Затребувані класи міцності та марки сталі товстолистого прокату для труб

Вуглецеві	Низьколеговані
К38-К42 СтЗсп, СтЗпс, сталь 20	К48-К50 09Г2С
	К52 13ГС, 17ГС, 17Г1С, 17Г1С-У
	К55 13Г1С-У
	К56 09Г2ФБ
	К60 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ

Характеристики прокату нерозривно пов'язані з технічними вимогами, що пред'являються до основного металу труб. Замовити прокат за кордоном за національним нормативним документом ДСТУ проблематично. Оскільки методи випробування та контролю продукції відрізняються від наших.

Можливо хтось вважає, що проблеми немає в заміні ГОСТовських марок на закордонні аналоги. Можна придбати прокат за Євронормами або ж самі труби зі сталей за іноземними стандартами. Але проблема полягає в тому, що зарубіжні сталі не є повними аналогами трубним сталям за вітчизняною документацією.

Металургія

Це зумовлено системою легування, технологією виробництва прокату, вимогами до металу труб з урахуванням надійності, призначення і ступеня відповідності трубопроводів.

І коли потрібно реконструювати ділянку трубопроводу, а за існуючою проєктною документацією на цій об'єкт регламентована ГОСТовська марка сталі, то для проєктантів це є формальною проблемою.

Мета дослідження. Метою статті є представлення і порівняння вимог до механічних властивостей закордонних марок сталей для ТВД з вимогами за вітчизняною нормативною документацією і представлення шляхів вирішення проблем за вибором закордонних марок сталей.

Основний матеріал дослідження. З Таблиці 2 за аналізом хімічного складу вуглецевих марок сталей з європейськими є відмінність за вмістом масової частки марганцю, проте це не є відхиленням, оскільки вміст марганцю до 1,4% сприяє стабільності механічних властивостей за умови забезпечення гарантії зварюваності.

Таблиця 2 - Порівняння хімічного складу вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі (за закордонною документацією) S235, S355 X42 L245

Нормативний документ	Марка сталі	Масова частка хімічних елементів, %, не більше								
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	N
ДСТУ 2651	СтЗсп	0,22	0,65	0,15-0,30	0,050	0,040	0,30	0,30	0,30	0,010
ДСТУ 7809	20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	0,040	0,035	0,25	0,30	0,30	0,010
ДСТУ EN 10025-2:2022	S235	0,17	1,40	-	0,025	0,025	-	-	0,55	0,012
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355	0,20	1,60	0,55	0,025	0,025	-	-	0,55	0,012
API Spec 5L	X42 L245	0,22	1,20	0,45	0,015	0,025	0,30	0,30	0,50	-

З Таблиці 3 за аналізом фізико-механічних властивостей сталь S235 найближчий аналог до сталі 20 та СтЗсп. Сталі S355, X42 L245 відповідають міцним характеристикам для сталі марки 20 і СтЗсп та перевищують їх.

Таблиця 3 – Порівняння механічні властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі (за закордонною документацією) S235, S355 X42 L245

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості, не менше				
		границя плинності, σ_t , Н/мм ² (кгс/мм ²)	границя міцності, σ_b , Н/мм ² (кгс/мм ²)	відносне видовження, δ_5 , %	ударна в'язкість	
					KV, Дж	KCU Дж/м ²
ГОСТ 10706	СтЗсп	245 (25)	372 (38)	20	-	29
ДСТУ 9218		245 (25)	410 (42)	25	-	-
ДСТУ 7809		216 (22)	353 (36)	15	-	39,2
ДСТУ EN 10025-2:2022	S235	235	360	26 24	27	-
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355	355	470	22 20	27	-
API Spec 5L	X42 L245	245	415	-	27	-

З таблиць 4 та 5 видно, що слід вважати, що сталь S355J2 та P355N є найближчим закордонним аналогом сталей 17Г1С та 17Г1С-У.

При замовленні товстолистового прокату із сталі марки S355J2 та X56 L390 для виробництва труб класу міцності K52 необхідно обумовлювати додаткову вимогу за границею міцності - не менше 510 Н/мм².

Металургія

Таблиця 4 – Порівняння плавочного хімічного складу низьколегованих сталей марок 17Г1С, 09Г2С за вітчизняною документацією з європейськими марками сталі (за закордонною документацією) P355, S355, X56 L390, X60 L415.

Нормативний документ	Марка сталі	Масова частка хімічних елементів, %, не більше														Cr+Cu+Mo+Ni
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Ti	V	Al	N	
ДСТУ 8541:2015	17Г1С	0,15-0,20	1,15-1,60	0,40-0,60	0,040	0,035	0,30	0,30	0,30	-	-	0,03	-	0,05	0,012	-
ДСТУ 8541:2015	09Г2С	0,12	1,30-1,70	0,50-0,80	0,040	0,035	0,30	0,30	0,30	-	-	0,03	-	0,05	0,012	-
ДСТУ EN 10028-2:2018	P355GH	0,10-0,22	1,10-1,70	0,60	0,025	0,010	0,30	0,30	0,30	0,08	0,040	0,03	0,02	0,02	0,012	0,70
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355JR	0,24	1,60	0,55	0,035	0,035	0,29	0,42	0,55	0,11	-	-	-	-	-	-
	S355J0	0,20	1,60	0,55	0,030	0,030	0,29	0,42	0,55	0,11	-	-	-	-	0,012	-
	S355J2	0,20	1,60	0,55	0,025	0,025	0,29	0,42	0,55	0,11	-	-	-	-	0,012	-
ДСТУ EN 10025-3:2022	S355N	0,20	0,90-1,65	0,50	0,030	0,025	0,30	0,50	0,55	0,10	0,05	0,05	0,12	0,02	0,015	-
	S355NL	0,18	0,90-1,65	0,50	0,025	0,020	0,30	0,50	0,55	0,10	0,05	0,05	0,12	0,02	0,015	-
ДСТУ EN ISO 3183 API Spec 5L	X56 L390	0,22	1,40	0,45	0,025	0,015	0,30	0,30	0,50	0,15	-	-	-	-	-	-
ДСТУ EN ISO 3183 API Spec 5L	X60 L415	0,12	1,60	0,45	0,025	0,015	0,50	0,50	0,50	0,50	-	-	-	-	-	-

Таблиця 5 – Порівняння механічних властивостей низьколегованого прокату за вітчизняною та закордонною документацією

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості для товщини прокату від 3 мм до 16 мм включно, не менш			
		границя плинності, σ_T , Н/мм ²	границя міцності, σ_B , Н/мм ²	відносне видовження, δ_5 , %	KCV _{-5°C} , Дж/см ² KV _{-20°C} , 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	510-650	20	27
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355JR0 S355J0	355	470-630	22	27
	S355J2			20	
ДСТУ EN 10025-3:2022	S355N, S355NL	355	470-630	22	40
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

Таблиця 6 – Порівняння механічних властивостей високоміцних сталей K55 та K60

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості для товщини прокату від 3 мм до 16 мм включно, не менш			
		границя плинності, σ_T , Н/мм ²	границя міцності, σ_B , Н/мм ²	відносне видовження, δ_5 , %	KCV _{-5°C} , Дж/см ² KV _{-20°C} , J
ДСТУ 9219:2023	K55	372	539	20	29,4
ДСТУ EN 10025-3:2022	S460N	460	540	17	27 ₋₂₀
EN 10025-4:2019	S460M	460	540	17	27 ₋₂₀
ДСТУ EN 10028-5:2018	P460M	460	530	17	27 ₋₂₀
ДСТУ EN ISO 3183	X65ME L450ME	450	535	18	від 40
ДСТУ 9219:2023	K60	412	588	16	29,4
ДСТУ EN ISO 3183	X70ME L485ME	485	570	18	від 40

Шляхи вирішення проблем:

1. *Розробка окремих технічних вимог на товстолистовий прокат зі сталі марки за ГОСТ.* Це актуально тільки для великих замовлень, від 100 тон де потрібно хоча б 1 і більше плавок.

Якщо обсяг замовлення становить 20-50 тон, то закордонні металургійні комбінати відмовляються розробляти окрему технологію для виплавки і прокатки менше однієї плавки металу.

Комбінувати плавки в очікуванні подібного замовлення теж не варіант, це вимагає більше часу, а він у замовника не завжди є.

2. *Підбір найближчих закордонних аналогів.* При розробці технічних вимог до прокатної/ тендерної документації враховувати механічні властивості (межа плинності, межа міцності, ударна в'язкість, відносне видовження) та зазначати найближчі аналоги закордонних марок сталей, навіть якщо є незначні відхилення за хімічним складом (кремній, марганець, вуглець), але дотримані вимоги щодо зварювання (вуглецевий еквівалент).

3. *Будівництво нових ділянок трубопроводів за гармонізованими стандартами ДСТУ ISO, ДСТУ EN.* Це потребує комплексного підходу з урахуванням досвіду і можливостей вітчизняних трубних підприємств і погодження проєктних організацій. Не всі вимоги можливо забезпечити на обладнанні українських підприємств.

4. *Внесення змін до діючої нормативної документації.* Внесення зарубіжних марок сталей в ДСТУ. Комплексний підхід з урахуванням вітчизняної НД. Це завдання для технічних комітетів зі стандартизації, проєктних та наукових організацій.

Для реалізації цих заходів потрібна співпраця замовника, постачальника, проєктних організацій, науково-дослідних інститутів, технічних комітетів зі стандартизації.

Щодо підбору найближчих закордонних аналогів марок сталей товстолистого прокату до вітчизняних класів міцності труб підготовлені порівняльні Таблиця 7 та Таблиця 8 з механічних властивостей вітчизняних та закордонних марок сталей, категорій та класів міцності. Таблиці рекомендовані в застосуванні при підборі та замовленні товстолистого прокату для виробництва труб для проєктування, реконструкції, заміні трубопроводів:

Таблиця 7 – Порівняння механічних властивостей труб (межа міцності/межа плинності/відносне подовження) та вуглецевого еквівалента за класами міцності та марками сталі на прокат товщиною до 16 мм включно за EN 10025-2 (конструкційна), EN 10025-3(нормалізована) та EN 10025-4 (термомеханічна прокатка)

Марка сталі	Клас міцності										Секв. ≤ 0,46%
	K34 (333/206/24)	K38 (372/235/22)	K42 (412/245/21)	K48 (471/295/20)	K50 (490/343/20)	K52 (510/353/20)	K54 (529/363/20)	K55 (539/372/20)	K56 (549/382/20)	K60 (588/412/16)	
S235 (360/235/24)											0,35 %
S275 (410/275/21)											0,40 %
S275N (370/275/24)											0,40 %
S275M (370/275/24)											0,34%
S355 (470/355/20)											0,45%
S355N (470/355/22)											0,43%

Металургія

S355M (470/355/22)											0,39%
S420N (520/420/19)											0,48 %
S420M (520/420/19)											0,43%
S460 550/460/17											0,47 %
S460N 540/460/17											0,53 %
S460M 540/460/17											0,45%
Пояснення											
Колір	Відповідає	Не відповідає подовження	Не відповідає подовження і міцності	Не відповідає	-						

Таблиця 8 – Порівняння механічних властивостей труб (межа міцності/межа плинності/відносне подовження) та вуглецевого еквівалента за класами міцності та марками сталі на прокат товщиною до 16 мм включно за EN 10028-2 (підвищені температури), EN 10028-3 (нормалізована) та EN 10028-5 (термомеханічна прокатка)

Марка сталі/ Клас міцності	K34 (333/206/24)	K38 (372/235/22)	K42 (412/245/21)	K48 (471/295/20)	K50 (490/343/20)	K52 (510/353/20)	K54 (529/363/20)	K55 (539/372/20)	K56 (549/382/20)	K60 (588/412/16)	Сєкв. ≤ 0,46%
P235GH (360/235/24)											За узгодж. 0,46%
P265GH (410/265/22)											За узгодж. 0,46%
P275N (390/275/24)											0,40%
P295GH (460/295/21)											За узгодж. 0,46%
P355GH (510/355/20)											За узгодж. 0,46%
P355N (490/355/22)											0,43%
P355M (450/355/22)											0,39%
P420N (540/420/19)											не відпов. 0,48 %
P420M (500/420/19)											0,43%
P460 N (570/460/16)											не відпов. 0,53 %
P460M (530/460/17)											0,45 %
Пояснення											
Колір	Відповідає	Не відповідає подовження	Не відповідає за міцністю та подовженням	Не відповідає	-						

ВИСНОВКИ

Виконано представлення і порівняння хімічного складу вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі S235, S355, X42 та L245 за закордонною документацією.

Виконано представлення та порівняння механічних властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі S235, S355, X42 та L245 за закордонною документацією.

Щодо підбору найближчих закордонних аналогів марок сталей товстолистового прокату до вітчизняних класів міцності труб підготовлені порівняльні таблиці механічних властивостей вітчизняних та закордонних марок сталей, категорій та класів міцності. Таблиці рекомендовані в застосуванні при підборі та замовленні товстолистового прокату для виробництва труб для проєктування, реконструкції, заміні трубопроводів.

Список використаних джерел

1. Виробництво труб - НВП УКРТРУБОІЗОЛ. Режим доступу: <https://uti.ua/virobnitstvo-trub/>.
2. Проців В.В., Григоренко В.У. Особливості процесу експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто та газопроводів. *Метал та лиття України*. 2021. № 3(326). С. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.087>.
3. О.Ю. Лоскутов, В.В. Овсяников, В.В. Проців, В.У. Григоренко. (2021). Процес експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто- і газопроводів та металознавчі аспекти його використання / // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2021. № 52 – Збірник наукових праць НГУ, с. 99-106: DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>.
4. Григоренко В.У., Овсяников В.В. Розвиток методу визначення параметрів деформування і залишкових напружень металу у виробництві прямошовних труб великих діаметрів з застосуванням експандування // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2023. Вип. 47. С.207: DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300060>.
5. Дмитрах І. М., Сиротюк А. М., Овсяников В. В., Лецак Р. Л. Вплив технологічної операції експандування на механічні характеристики та тріщиностійкість металу зварних прямошовних труб. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2025. Т. 61, № 2. С. 103-110. DOI: <https://doi.org/10.15407/pcmm2025.02.103>
6. Руйнування та міцність трубних сталей у водневовмісних середовищах / І. М. Дмитрах, А. М. Сиротюк, Р. Л. Лецак – Львів : ПРОСТІР-М, 2020. – 222 с. URI: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/135913>
7. Study on the residual stress relaxation in girth-welded steel pipes under bending load using diffraction methods / N. Hempela, J.R. Bunnb, T. Nitschke-Pagela, E.A. Payzanth, K. Dilger. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Volume 688. Pp. 289-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.005>.
8. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2007. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 173205. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x>.

ON THE ISSUE OF USING FOREIGN STEEL BRANDS FOR DOMESTIC MAIN PIPELINES

In Ukraine, in 2019-2022, a modern imported line with a full technological cycle and specialized equipment for the production of large-diameter welded steel pipes was put into operation at the enterprise NPP UKRTRUBOIZOL. This line provides the possibility of production according to technical requirements in accordance with modern international standards and norms.

In the production of large-diameter welded straight-seam steel pipes according to foreign technical documentation, thick-sheet rolled products from low-carbon and low-alloy steel grades are used.

Now many consumers are faced with the problem of obtaining large-diameter welded pipes from rolled products made of steel according to domestic regulatory documentation. They have to order sheet from foreign manufacturers. Since pipeline transport systems are dangerous man-made objects, the choice of steel sheet is an extremely important task.

In the world, for the production of large-diameter welded pipes, thick-sheet rolled products from low-carbon and low-alloy steels and sheets from low-alloy steels after thermomechanical treatment (under controlled rolling) are used. When choosing the right sheet, a significant number of questions arise regarding the selection of indicators of the mechanical properties of steel. These questions must be resolved.

The article is aimed at highlighting issues regarding ways to solve problems with the use of foreign steel grades for foreign-made main pipelines

Keywords: *Large-diameter welded main pipes, low-carbon and low-alloy steels, low-carbon steels with thermomechanical treatment, tensile strength, yield strength, relative elongation, impact toughness.*

Стаття надійшла 09.09.2025р.

УДК 669.162.22

doi.org/10.31498/2522-9990302025347109

Черевко О.О., Лубкін Б.В.

ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЮ І МАСИ МЕТАЛУ ТА ШЛАКУ В ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МБЛЗ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті представлено математичну модель визначення рівня і маси металу та шлаку в проміжному ковші машини безперервного лиття заготовок. Розглянуті методи вимірювання рівня розплаву в ковші, включаючи тензометричні, індукційні, ультразвукові датчики. Проаналізовано важливість контролю і регулювання співвідношення рівнів металу і шлаку, та вплив цих параметрів на якість вихідної продукції.

Запропонована в статті модель базується на використанні індукційного датчика, вмонтованого у футеровку ковша, для безперервного вимірювання рівнів металу і шлаку шляхом аналізу електричних параметрів вимірювального контуру. Струм та індуктивність контуру електричного ланцюга датчика змінюються в залежності від рівня металу та шлаку, що дозволяє точно визначати їх співвідношення.

Для розрахунку маси металу та шлаку в моделі використовується залежність їх об'ємів від висоти заповнення ковша, з урахуванням температури розплаву і змін у щільності металу

та шлаку в залежності від температури, що дозволяє забезпечити високий рівень точності розрахунків.

Розроблена математична модель є ефективним інструментом для автоматичного керування процесом лиття на МБЛЗ. Її використання в автоматизованій системі управління розливкою сталі дозволить забезпечити більш точне розділення фаз металу та шлаку, що в свою чергу знизить ризик потрапляння шлаку в кристалізатор і покращить якість зливків і їх механічні властивості. Підтримка стабільного рівня металу в проміжному ковші забезпечує рівномірне заповнення кристалізатора, що важливо для рівномірного охолодження і кристалізації зливка. Крім того, модель дозволяє підвищити ефективність роботи МБЛЗ, запобігаючи втратам металу через передчасне завершення розливки.

Таким чином використання моделі дозволить оптимізувати технологічний процес, зменшити кількість дефектів в заготовках, підвищити якість продукції та знизити ризик аварійних ситуацій, пов'язаних з переливом металу.

Ключові слова: Машина безперервного лиття заготовок, проміжний ківш, рівень металу, рівень шлаку, вимірювання, індукційний датчик, комп'ютерне моделювання, система автоматичного регулювання.

Постановка проблеми. Для отримання зливка з однорідною кристалічною структурою та запобігання утворенню дефектів у заготовках необхідно забезпечити високу точність підтримки оптимального рівня металу в кристалізаторі. У свою чергу, для підтримки сталої гідродинаміки при подачі металу в кристалізатор, слід забезпечити стабільність рівня металу в проміжному ковші [1].

У процесі розливання сталі на МБЛЗ згідно з технологічними вимогами розплавлений метал не повинен перебувати в контакті з атмосферою, оскільки це призводить до його окислення та збільшення вмісту розчинених газів. Крім того, наявність відкритого дзеркала металу призводить до швидкого охолодження. Тому в сталерозливний і проміжний ковші після заливки металу додають спеціальні шлакоутворювальні суміші. В результаті взаємодії металу та сумішей утворюється шлак, який спливає та покриває поверхню металу, захищаючи його від окислення. Випуск шлаку зі стального ковша вкрай небажаний, оскільки шлак, що потрапив у промковш, може в подальшому потрапити в кристалізатор, що призводить до дефекту в заготовках. Якщо ж припинити розливку занадто рано, значна кількість якісного металу разом зі шлаком піде у відвал. Тому підвищення точності оцінки рівнів металу в сталевому промковші та кристалізаторі є досить актуальним завданням [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У ланцюзі технологічних переливів на МБЛЗ проміжний ківш є буферною ємністю, за допомогою якого узгоджується надходження металу зі сталерозливного ковша в кристалізатор. При цьому забезпечується усереднення залитої порції металу і запобігання потраплянню шлаку в кристалізатор [1].

Регулювання рівня сталі в проміжному ковші та кристалізаторі є однією з основних операцій, що визначають якість зливка та ефективність роботи МБЛЗ [3]. Збільшення рівня сталі в промковші спричиняє переповнення кристалізатора. Це порушує тепловий баланс, призводячи до надлишку тепла. Як наслідок, доводиться знижувати швидкість витягування зливка, що негативно впливає на продуктивність установки і є неприйнятним. І навпаки, раптове зменшення рівня металу в промковші призведе до зниження рівня сталі в кристалізаторі, зміщення теплового балансу зони кристалізації металу і погіршення роботи механізмів витягування, особливо в разі застосування радіальних МБЛЗ, а також до можливості прориву металу. Тому АСУ рівнем і масою металу в промковші завжди приділялася і приділяється велика увага.

У проміжному ковші рівень розплаву можна вимірювати безпосереднім або непрямим шляхом. Розроблено та випробувано різноманітні конструкції датчиків рівня металу:

тензометричні, індукційні, радіоізотопні, фотоелектричні, акустичні, ультразвукові тощо, а також способи регулювання зміною витрати металу зі сталь- і промковша, з обох одночасно, зміною швидкості витягування зливка, зміною витрати металу і швидкості витягування одночасно [4].

На цей час на більшості МБЛЗ оцінка рівня відбувається непрямим способом за допомогою вимірювання маси ковша з металом і перерахунку показань в рівень [5]. Підтримка постійного рівня в промковші при безперервному зниженні рівня в стальковші в процесі розливу досягається за рахунок управління шибером стальковша.

Метою роботи є розробка математичної моделі визначення рівню і маси металу та шлаку в проміжному ковші МБЛЗ для удосконалення відповідної автоматизованої системи керування і підвищення якості відлитих заготовок.

Виклад основного матеріалу. В якості датчика для визначення співвідношення рівнів металу та шлаку в ковші пропонується використовувати електричний контур зі струмом, закладений у футеровку проміжного ковша (рис. 1).

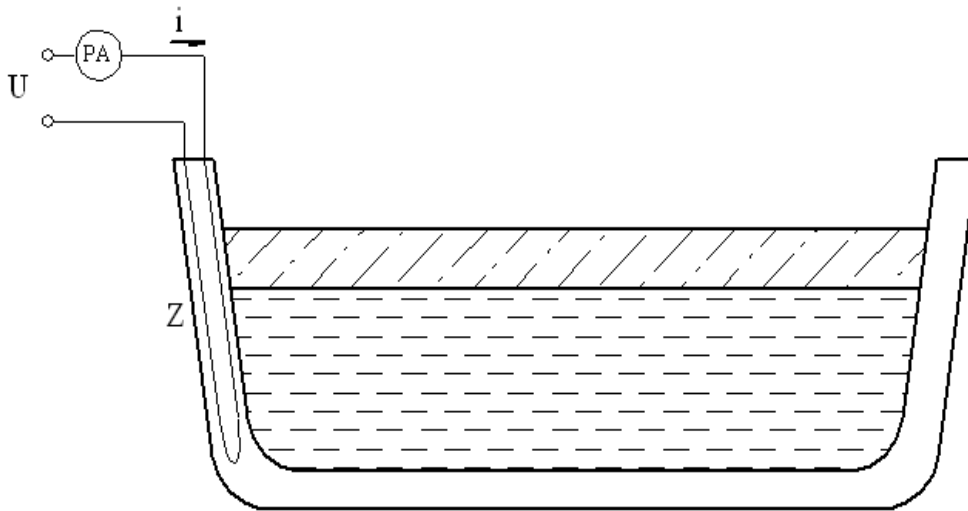


Рисунок 1 – Розташування контуру зі струмом у футеровці ковша

Датчик працює наступним чином. На розташований у футеровці промковша контур подають напругу U , величина якої є відомою і підтримується постійною. У ланцюг включений міліамперметр РА, який вимірює струм, що протікає по контуру. Цей струм можна розрахувати за законом Ома:

$$i = \frac{U}{Z}, \quad (1)$$

де Z – повний опір контуру, що складається з активного та реактивного опору:

$$Z = R_{\text{акт}} + j \cdot \omega L, \quad (2)$$

де $R_{\text{акт}}$ – активний опір проводів; L – індуктивність контуру.

Індуктивність контуру зі струмом залежить від площі розплаву, що активується контуром (рис. 2).

Металургія

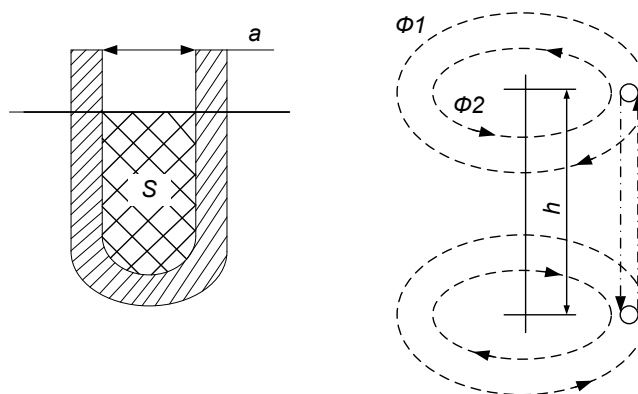


Рисунок 2 – Активований контур зі струмом у футеровці промковша

Зміна рівня металу призводить до зміни величини магнітного потоку Φ_2 , обумовленого вихровими струмами, що наводяться в металі змінним магнітним полем Φ_1 . Потіки Φ_1 та Φ_2 спрямовані зустрічно, що обумовлено законом взаємодії. Результируюча ЕРС, яка діє в контурі, дорівнює:

$$e = - \frac{d\Phi_1}{d\Phi_2}, \quad (3)$$

де

$$\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi. \quad (4)$$

У загальному випадку рівняння (3) можна записати у вигляді:

$$\Phi = \oint_S \vec{B} d\vec{s}, \quad (5)$$

де B – індукція результируючого поля; S – площа активної взаємодії контуру з металом,
 $S = a \cdot h$. (6)

Потік $\Phi_1 \approx \text{const}$, оскільки футеровка та рідкий метал, нагрітий вище точки Кюрі, є діамagnetиками.

Вимірюваним параметром є струм I . Його значення можна знайти за формулою

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L_{\text{рез}}^2}}, \quad (7)$$

де E – дійсне значення ЕРС e ; $R \rightarrow R(t_{\text{сталиС}}) \rightarrow \text{Const}$, ω – частота напруги живлення;
 $L_{\text{рез}}$ – результируюча індуктивність системи «контур-футеровка-рідкий метал», Z – повний опір контуру

$$Z = R_{\text{акт}} + j \cdot \omega(L_{\text{рез}}); \quad (8)$$

$$|Z| = \sqrt{R_{\text{акт}}^2 + \omega^2 \cdot (L_{\text{рез}})^2}; \quad (9)$$

$$i = \frac{U}{\sqrt{R_{\text{акт}}^2 + \omega^2 \cdot (L_{\text{рез}})^2}}. \quad (10)$$

Для визначення конкретного виду залежності струму, що протікає через вимірювальний контур, від співвідношення рівнів металу і шлаку для конкретного ковша проводять градування датчика. Для цього при наповненні ковша через задані поділення по висоті

Металургія

роблять виміри струму через контур і одночасно визначають рівні металу та шлаку іншим методом, наприклад опусканням у промківш металевого штиря.

Зробивши вимірювання по всьому діапазону зміни рівня розплаву при різних співвідношеннях мас металу і шлаку в промковші, одержують систему рівнянь:

$$\begin{cases} i_1 \rightarrow L_{pez1} \\ i_2 \rightarrow L_{pez2} \\ \dots\dots\dots \\ i_k \rightarrow L_{pezk} \end{cases} \quad (11)$$

Надалі на підставі отриманої системи (11) по вимірюваному струму можна визначати рівні металу і шлаку в промковші.

Перевагами пропонованого методу є простота датчика та його низька вартість і досить висока точність вимірювання, причому точність підвищується при зменшенні електропровідності шлаку. До недоліків методу можна віднести необхідність встановлення датчика під час укладання футеровки промківша та зміну градууювальної характеристики у разі прогорання футерування. Також слід зауважити, що для коректної роботи моделі електропровідність шлаку повинна залишатися постійною, у разі застосування шлаку іншого хімічного складу з іншою електропровідністю систему рівнянь (11) доведеться складати наново.

Запропонована математична модель для знаходження маси металу та шлаку в сталерозливному і проміжному ковшах.

Вихідними даними для розрахунків є:

- вага тари Q_T – вага порожнього ковша; зазвичай зважування порожнього ковша роблять щоразу перед заливкою металу;
- вага бруто Q_B – поточна вага ковша, включає вагу тари, металу і шлаку; в процесі розливання контролюється постійно;
- рівень металу та шлаку в ковші h ; в процесі розливання контролюється постійно;
- температура металу та шлаку в ковші t ; контролюється періодично за допомогою термопари занурення;
- залежність об'єму рідкого металу або шлаку в ковші від висоти заповнення ковша $V(h)$; залежить від конструкції ковша;
- залежність щільності металу та шлаку від температури $\rho_M(t), \rho_{Ш}(t)$.

Загальна маса розплаву металу та шлаку в ковші M складатиме:

$$M = M_{Ш} + M_{MET}, \quad (12)$$

де M_{MET} – маса металу в ковші; $M_{Ш}$ – маса шлаку в ковші.

З іншого боку, загальну масу металу та шлаку можна знайти як різницю між поточною масою бруто ковша та масою порожнього ковша:

$$M = Q_B - Q_T. \quad (13)$$

Масу металу в ковші можна обчислити за формулою (рис. 3):

$$M_{MET} = V(h_{MET}) \cdot \rho_M(t). \quad (14)$$

Загальний обсяг металу та шлаку в ковші:

$$V(h) = V(h_{MET}) + V_{Ш}. \quad (15)$$

Маса шлаку в ковші:

$$M_{Ш} = V_{Ш} \cdot \rho_{Ш}(t). \quad (16)$$

Металургія

$$M_{ш} = (V(h) - V(h_{мет})) \cdot \rho_{ш}(t). \quad (17)$$

Об'єми металу та шлаку можна знайти з системи, складеної з рівнянь (12) та (15):

$$\begin{aligned} V &= V_{ш} + V_M \\ Q &= \rho_{ш} \cdot V_{ш} + \rho_M \cdot V_M \end{aligned} \quad (18)$$

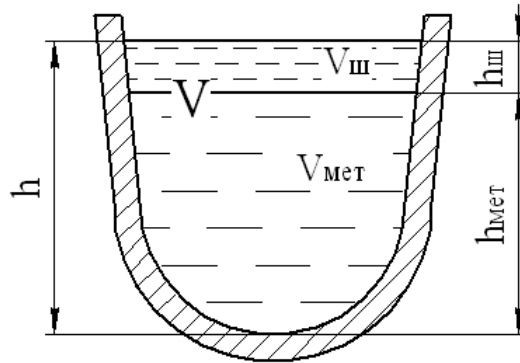


Рисунок 3 – Визначення маси металу та шлаку в ковші

Підставивши у (12) вирази (13), (14) та (17), отримаємо:

$$Q_B - Q_T = V(h_{мет}) \cdot \rho_M(t) + (V(h) - V(h_{мет})) \cdot \rho_{ш}(t). \quad (19)$$

У цьому рівнянні невідомою змінною є об'єм металу:

$$V(h_{мет}) = \frac{Q_B - Q_T - V(h) \cdot \rho_{ш}(t)}{\rho_M(t) - \rho_{ш}(t)}. \quad (20)$$

Після визначення об'єму металу в ковші можна знайти його масу:

$$M_{мет} = \frac{Q_B - Q_T - V(h) \cdot \rho_{ш}(t)}{\rho_M(t) - \rho_{ш}(t)} \cdot \rho_M(t). \quad (21)$$

Далі можна визначити масу шлаку в ковші:

$$M_{ш} = Q_B - Q_T - M_{мет}. \quad (22)$$

Знаючи для конкретного ковша залежність $V(h)$, можна після визначення об'єму металу за рівнянням (19) знайти рівень металу та товщину шару шлаку в ковші:

$$h_{ш} = h - h_{мет}. \quad (23)$$

Залежність щільності металу та шлаку від температури можна визначити, виразивши залежність лінійного розміру об'єму металу від температури через коефіцієнт лінійного розширення металу α_M :

$$L_M(t) = L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0)), \quad (24)$$

де t – температура металу; L_{T_0} – лінійний розмір металу за $t = 20^\circ\text{C}$.

При цьому об'єм металу:

$$\begin{aligned} V_M(t) &= L_M(t)^3 = (L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0)))^3 = L_{T_0}^3 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 = \\ &= V_0 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 \end{aligned} \quad (25)$$

Для металу заданої маси залежність щільності від температури:

Металургія

$$\rho_M(t) = \frac{m}{V_M(t)} = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} = \rho_{M0} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3}, \quad (26)$$

де ρ_{M0} – щільність металу при $t = 0$ °С.

Аналогічно для шлаку з коефіцієнтом розширення $\alpha_{ш}$:

$$L_{ш}(t) = L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0)); \quad (27)$$

$$V_{ш}(t) = L_{ш}(t)^3 = (L_{T_0} \cdot (1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0)))^3 = L_{T_0}^3 \cdot (1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 = V_0 \cdot (1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3; \quad (28)$$

$$\rho_{ш}(t) = \frac{m}{V_{ш}(t)} = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3} = \rho_{ш0} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3}, \quad (29)$$

де $\rho_{ш0}$ – щільність шлаку при $t = 0$ °С.

Об'єми металу та шлаку в ковші залежно від висоти можна визначити з рівнянь (відповідно до рис. 4):

$$V_2 = V_{21} + V_{22}; \quad (30)$$

$$V_{22} = R \cdot l \cdot L_2 + L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot 2 = const; \quad (31)$$

$$V_{21} = b_1 \cdot L_1 \cdot L_2 - V_1; \quad (32)$$

$$b_1 = H - h - r. \quad (33)$$

$$V = b_1 \cdot L_1 \cdot L_2 + V_{22} = V_1 + V_{21} + V_{22}$$

$$Q = \rho_{ш}(t) \cdot V_1 + \rho_M(t) \cdot (V_{21} + V_{22}) \quad (34)$$

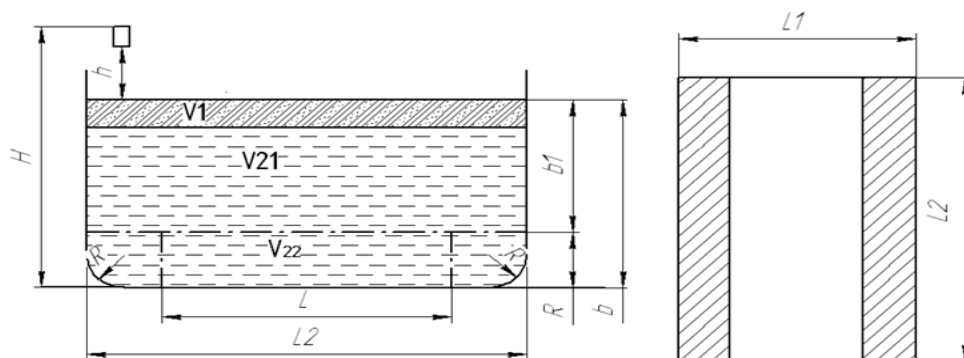


Рисунок 4 – Визначення маси металу та шлаку в ковші

Похибку обчислення маси металу можна визначити, знаючи відносні похибки параметрів, що входять до розрахункових формул:

- температура металу в промковші t , похибка 1 %;
- маса розплаву M , похибка 2 %;
- рівень металу в промковші b , похибка 1 %;
- довжина промковша $L_2 = 3$ м, задана точно;
- ширина промковша $L_1 = 1,68$ м, задана точно;

Металургія

- коефіцієнт лінійного розширення металу $\alpha_M = 11,9 \cdot 10^{-6}$;
- коефіцієнт лінійного розширення шлаку $\alpha_M = 8 \cdot 10^{-6}$;
- щільність шлаку при $t = 0^\circ\text{C}$ $\rho_{ш0} = 3 \text{ т/м}^3$, задана точно;
- щільність шлаку при $t = 0^\circ\text{C}$ $\rho_{м0} = 7,9 \text{ т/м}^3$, задана точно;
- вага тари $Q_T = 12 \text{ т}$, задана точно;
- вага бруто $Q_B = 45 \text{ т}$, задана точно;
- мала довжина промківша $L = 2,4 \text{ м}$, задана точно;
- радіус $R = 0,3 \text{ м}$, задана точно.

Відносна похибка визначення маси розплаву:

$$\gamma_v = \sqrt{1^2 + 2^2 + 1^2} = 2\% . \quad (35)$$

Розрахуємо похибку обчислення маси металу за формулою повного диференціала:

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial V}{\partial Q_6} \Delta Q_6 + \frac{\partial V}{\partial b} \Delta b . \quad (36)$$

Розрахуємо приватні похідні, які входять до рівняння (36), з урахуванням $t = 1600^\circ\text{C}$, $M = 45\text{т}$, $b = 1,1\text{м}$:

$$V = \frac{Q_6 - Q_T - \frac{\rho_{м0}}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} \cdot ((b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4}) \cdot 2)}{\frac{\rho_{ш0}}{(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3} - \frac{\rho_{м0}}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3}} ; \quad (37)$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q_6} = \frac{((1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 \cdot ((1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3)}{\rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \rho_{м0}(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} ; \quad (38)$$

$$\frac{\partial V}{\partial b} = \frac{L_1 \cdot L_2 \cdot \rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3}{\rho_{ш0}(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \rho_{м0}(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^3} ; \quad (39)$$

$$\begin{aligned} & Q_6 - Q_T - \frac{\rho_{ш0}}{(1 + \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3} \cdot (b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4}) \cdot \\ & \cdot (\rho_{ш0} \cdot \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^2 - \rho_{м0} \cdot 3 \cdot \alpha_M \cdot (t - T_0))^2) - (\rho_{ш0} \cdot \alpha_{ш} \cdot (t - T_0))^3 - \\ & \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{-(\rho_{м0} \cdot \alpha_M \cdot (t - T_0))^3 \cdot \rho_{м0} \cdot (b \cdot L_1 \cdot L_2 + R \cdot L \cdot L_2 + L_2 \cdot L_2 \cdot \frac{\pi \cdot R^2}{4}) \cdot \alpha_M \cdot 3}{(1 + \alpha_M \cdot (t - T_0))^4} . \end{aligned} \quad (40)$$

$$\frac{\partial V}{\partial Q_6} = 0,172 \quad \frac{\partial V}{\partial b} = 1,12 \quad \frac{\partial V}{\partial t} = 0,45$$

Підставивши розраховані значення приватних похідних у рівняння (36), із урахуванням похибок $\Delta t = 16^\circ\text{C}$, $\Delta Q_6 = 0,9\text{т}$, $\Delta b = 0,015\text{м}$, отримуємо абсолютну похибку обчислення маси металу:

Металургія

$$\Delta V = 0,45 \cdot \Delta t + 0,172 \cdot \Delta Q_6 + 1,12 \cdot \Delta b$$

$$\Delta V = 0,45 \cdot 16 + 0,172 \cdot 0,9 + 1,12 \cdot 0,015 = 0,76. \quad (41)$$

Далі знайдемо масу, розраховану за моделлю, при тих же вхідних параметрах:

$$V_{\max} = L_2 \cdot L \cdot R + \frac{\pi \cdot R^2}{2} + b \cdot L_1 \cdot L_2 = 31,4 \text{ т} \quad (42)$$

отже, відносна похибка розрахунку становитиме:

$$\gamma_v = \frac{\Delta V}{V} \cdot 100\% = \frac{0,76}{31,4} \cdot 100\% = 2,42\% \quad (43)$$

Порівнюючи відносні похибки, отримані за формулами (35) і (43) – 2 % і 2,42 %, можна дійти висновку, що запропонована модель є досить точною для використання її в АСУ керування масою металу в промковші.

ВИСНОВКИ

Використання розробленої моделі в АСУ керування розливкою металу на МБЛЗ дозволить підвищити точність оцінки рівню і маси металу в проміжному ковші, межу між металом і шлаком, забезпечуючи оптимальне розділення фаз і запобігаючи потраплянню шлаку в кристалізатор. У свою чергу, це дозволить значно знизити кількість неметалевих включень у заготовці, що покращує її механічні властивості.

Список використаних джерел:

1. Огурцов, А. П. Безперервне лиття сталі / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Дніпро: Системні технології, 2002. – 675 с.
2. Смирнов, А. Н. Сучасні сортові МБЛЗ: перспективи розвитку технології та обладнання / А. Н. Смирнов, А. Л. Подкоритов // Технології. – 2009. – № 12. – С. 18-25.
3. Смирнов, А. Н. Оптимізація потоків сталі в промковші при розливці довгими серіями на багатострумкових сортових МБЛЗ / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. Л. Подкоритов // Збірник наукових праць конференції «50 років безперервній розливці сталі в Україні». – 2010. – С. 324-330.
4. Терехов, Д. А. Конструкції та аналіз роботи обладнання для подачі сталі у проміжний ківш 6-ти струмкового МБЛЗ / Д. А. Терехов, О. М. Стоянов, М. В. Галушкін та ін. // Теорія і практика металургії. – 2004. – № 1. – С. 28-33.
5. Чорний, А. А. Ефективне математичне моделювання у ливарному виробництві: Навчальний посібник / А. А. Чорний. – Донецьк: ПГУ, 2010. – 251 с.

Cherevko O., Lubkin B.

DETERMINATION OF THE LEVEL AND MASS OF METAL AND SLAG IN THE INTERMEDIATE BAILER OF THE CONTINUOUS CASTING MACHINE BY MATHEMATICAL MODELING

The article presents a mathematical model for determining the level and mass of metal and slag in the intermediate bailer of a continuous casting machine. Methods for measuring the level of the melt in the bailer are considered, including strain gauge, induction, and ultrasonic sensors. The

importance of controlling and regulating the ratio of metal and slag levels and the influence of these parameters on the quality of the output product are analyzed.

The model proposed in the article is based on the use of an induction sensor mounted in the bailer lining for continuous measurement of metal and slag levels by analyzing the electrical parameters of the measuring circuit. The current and inductance of the sensor circuit vary depending on the level of metal and slag, which allows for accurate determination of their ratio.

To calculate the mass of metal and slag, the model uses the dependence of their volumes on the height of the bailer filling, taking into account the temperature of the melt and changes in the density of metal and slag depending on the temperature, which allows for a high level of calculation accuracy.

The developed mathematical model is an effective tool for automatic control of the casting process at the continuous casting machine. Its use in the automated steel casting control system will allow for more accurate separation of the metal and slag phases, which in turn will reduce the risk of slag entering the mold and improve the quality of ingots and their mechanical properties. Maintaining a stable metal level in the intermediate bailer ensures a stable melt supply and guarantees uniform filling of the mold, which is important for uniform cooling and crystallization of the ingot. In addition, the model allows for increasing the efficiency of the continuous casting machine operation, preventing metal losses due to premature completion of casting. Thus, the use of the model will allow optimizing the technological process, reducing the number of defects in the blanks, improving product quality and reducing the risk of emergency situations associated with metal overflow.

Keywords: *Continuous casting machine, intermediate bailer, metal level, slag level, measurement, induction sensor, computer simulation, automatic control system.*

Стаття надійшла 10.10.2025р.

УДК 621.771

doi.org/10.31498/2522-9990302025347110

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

РОЗВИНЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ГНУТИХ ПРОФІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ З ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХОЛОДНОГНУТИХ ПРОФІЛІВ

Технологія виробництва металічних профілів має два напрямки: гаряча прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки на сортових станах; холодне пластичне згинання смуги на безперервних станах або листа на пресах.

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гарячекатаних профілів зазвичай не мають високої міцності. Питання з підвищенням показників міцності метала профілів мають високу актуальність.

Гнуті профілі виготовляють з низьковуглецевих сталей з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентованим за ДСТУ 2834-94.

У виробництві гнутих профілів виконують холодне пластичне деформування в місцях, наприклад для швелера, між полкою та стійками.

Холодногнуті профілі поступаються жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними. Для гнутих профілів використовують сталі, які можливо зварювати.

Металургія

В сучасному світі постійно ведеться робота по зниженню витрат на виробництво прокату. При цьому вимоги к якісним характеристикам метала постійно підвищуються. Застосування сталей з термомеханічної прокатки приводять до підвищення границі міцності металу, зниження погонної маси метра профілів та маси конструкцій з них.

В роботі запропонована розвинена технологія виготовлення холодногнутих профілів з підвищеною міцністю на основі застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей, що застосовують для виробництва зварних труб великих діаметрів.

У виробництві гнутих профілів пропонується, наприклад, використовувати низьковуглецевий прокат за стандартами API Spec 5L зі сталі X60 L415, де границя міцності досягає 760 Н/мм². При цьому досягається значне зменшення маси погонного метра профіля по зрівнянню з тими, що зараз виробляють. Це приводить до зниження ваги конструкцій. Важливо те, що швелери із таких сталей можливо зварювати.

Ключові слова. Профілі холодногнуті, зварюваність металу, сталі термомеханічно оброблені, підвищення міцності, зменшення маси сталевих конструкцій.

Постановка проблеми. Профілі це важливий вид металургійної продукції. Їх використовують для надання міцності та жорсткості конструкцій. Її особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин і сприймає поздовжні навантаження. Така форма збільшує міцність і зменшує масу металоконструкції.

Даний вид продукції буває двох типів: гарячекатаний та гнутий, які відрізняються за своїм способом виробництва, а також мають відмінність у механічних властивостях.

Сучасне виробництво гарячекатаних швелерів є досить енергоємним. Технологія має достатньо складний технологічний ланцюг. Складною є розробка системи калібрів. Значні витрати йдуть також на виготовлення та ремонт калібрів (переточки).

Гарячекатані профілі виробляють по технологіям гарячої прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки.

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

Гнуті профілі виробляють методом холодного згинання полос листового металу на профілезгинальних безперервних станах або на механічних пресах (рис. 1).



Рисунок 1 – Виробництво гнутих профілей

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

Візуально, від гарячекатаного швелера холодногнутий швелер відрізняється плавними округленими кутами вигину, однаковою товщиною всіх сторін, гладкою поверхнею (рис.2).

Така округленість кутів значно знижує жорсткість швелера.

Металургія



Рисунок 2 – Округленість між полкою та стійками в холодногнутому швелері

Встає проблема підвищення жорсткості гнутих профілів.

У виробництві зварних труб застосовують низьковуглецеві сталі з низьким легуванням. Також застосовують низьковуглецеві нелеговані сталі після так званої контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термомеханічна обробка, яка збільшує показники міцності сталі. Виробництво гнутих профілів також дозволяє застосовувати такі сталі, наприклад:

EN 1002 5-2 (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 площинні сталеві для використання під тиском. Нелеговані та леговані сталі з точно визначеними властивостями за підвищених температур);

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

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

Постає питання з використання для виробництва гнутих профілів низьковуглецевих нелегованих сталей після так званої контрольованої прокатки де виконується інтенсивна термомеханічна обробка. Це дає можливість випуску високоміцних гнутих профілів, які можливо зварювати.

Застосування таких профілів в виробництві зварних конструкцій сприятиме рішення проблеми зниження маси сталевих конструкцій. І це також підкреслює актуальність досліджень з цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія виробництва гарячекатаних фасонних профілів представлена в роботі [1].

Для виробництва швелерів, що відповідають перспективним та сучасним критеріям якості, конкурентоспроможності, експлуатаційної надійності в Україні за останній час введені такі стандарти:

-ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» [2];

- ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» [3];

- ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент». [4];

-ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови [5].

Гнуті профілі значно менше потребують енерговитрат.

Гнутий профіль завдяки округленим кутам має меншу жорсткість в порівнянні із гарячекатаним. Тому постає питання щодо підвищення жорсткості швелерів виготовлених методом згинання.

Для усунення округлення кутів пропонується холодногнутий швелер в останніх проходах на профілегібочних безперервних станах попередньо нагрівати локально в зонах кутів між полкою до температури 1250 та осаджувати полку в сторону кута і заповнювати кут в 90 градусів між полкою та стійкою металом полки [6, 7, 8]. При цьому, при рівній з

Металургія

гарячекатаними профілями жорсткості значно збільшаться об'єми застосування холодногнутих профілів.

Виробництво гнутих профілів значно простіше і в порівнянні з гарячекатаним процесом не потребує значних енергетичних витрат на нагрів.

В роботі [9] відмічено, що :

- боротьба за собівартість продукції прокату, потрібність в високих вимогах її по якості є основним чинником в конкуренції на ринку збуту;

- термомеханічний спосіб виробництва прокату (TMCP - Thermomechanical Controlled Process) має пріоритети для задоволення потреб ринку:

- методом TMCP виробляють дрібнозернисту сталь і це досягається сокупністю хімічного складу та режимів прокатки і термообробки.

В роботі [9] також відмічаються наступні переваги методу TMCP.

- нормальна зварюваність,;

- висока міцність у поєднанні з високою пластичністю;

- енергозбереження;

- більш високі споживчі властивості продукції:

Слід відмітити основні проблеми при холодному згинанні TMCP - сталей .

1. Висока пружинна віддача. Це найхарактерніша проблема. TMCP-сталі мають дуже високу межу плинності. Ця призводить до великого накопичення пружної енергії в матеріалі. Після зняття навантаження метал прагне прийняти вихідне положення.

Фактичний кут вигину виходить більше необхідного (менш гострим). Потребується значне перегинання (компенсація) і точний розрахунок вигинання для компенсації пружинної віддачі.

2. Підвищене сили вигинання. Висока міцність цих сталей вимагає набагато більшого зусилля від обладнання порівняно із звичайними сталями.

Необхідно використовувати більш потужне згинальне обладнання і більш міцний інструмент. Інструмент більш зношується, а це підвищує ризик пошкодження менш міцних деталей обладнання.

3. Ризик розтріскування та зниження пластичності. TMCP-сталей мають хорошу загальну пластичність, але при холодному формуванні вони більш чутливі до концентраторів напруги.

При надто малому радіусі згинання на зовнішній (розтягнутій) поверхні виробу є можливість виникнення мікротріщин або повного руйнування матеріалу. Потребується точне дотримання мінімально допустимого радіусагиба, який зазвичай більше для TMCP-сталей, ніж для звичайних.

4. Пошкодження поверхні. Високий тиск і сила тертя між інструментом та заготівлею часто приводить до дефектів поверхні виробу.

На поверхні можуть утворюватися подряпини або вм'ятини (сліди від інструменту). Ризик такого пошкодження збільшується при роботі з високоміцними сталями.

5. Складки та зморшки при згинанні металів – це дефекти, які проявляються у вигляді нерівних, хвилюподібних або зім'ятих ділянок матеріалу.

Вони найчастіше виявляються на внутрішній стороні вигину. Таке пошкодження є при роботі з сталями з зниженими показниками відносного подовження.

Мета дослідження. Метою статті є представлення розвинутої технології виробництва гнутих профілів з низьколегованих сталей термомеханічно оброблених з підвищеною міцністю.

Основний матеріал дослідження. Низьковуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гнутих профілів не мають високої міцності .

Металургія

Є сенс застосування марок сталей листового прокату, що виробляють для зварних труб великих діаметрів.

Марки сталей листового прокату, які використовують 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);
- EN 10028-5 (термомеханічна прокатка);
- API Spec 5L.

Високі якісні показники сталей обумовлені термомеханічною обробкою.

При стандартних методах гарячої прокатки кутиків та швелерів важко провести таку термічну обробку. Це обумовлено різною товщиною профілів по перетину, що веде за собою нерівномірність охолодження і різницю якісних показників. Також складна форма форсунок для обробки ускладнює використання таких методів підвищення якості метала.

При згинанні термомеханічно оброблених сталей, особливо високоміцних марок (наприклад, X60 L415), виникають специфічні проблеми, пов'язані з їх високою міцністю та особливим мікроструктурним станом.

Термомеханічна обробка створює унікальну дрібнозернисту мікроструктуру, що забезпечує високу міцність.

Пропонується наступна технологія виробництва холодногнутого профіля (рис. 2).

Наприклад, сталь X60 L415 - це сталь для трубопроводів яка складається із заліза 97-98%, марганцю до 1,2% і вуглецю до 0,26% з меншою кількістю кремнію, фосфору та сірки. Сталь X60 L415 має чудову в'язкість і високу міцність на стиск, границя міцності досягає 760 Н/мм².

Сталь X60 L415 також має гарну зварюваність і високу стійкість до корозії та розтріскування, використовується в основному при транспортуванні нафти та газу і яка використовуються при виробництві труб згідно стандартів США та Єврозони.

Є сенс в застосування марок сталей листового прокату, що створені для зварних труб великих діаметрів, що отримують методами пластичного вигинання в виробництві гнутих профілів, що також отримують пластичним вигинанням.

Зараз, наприклад, гнуті профілі виготовлені з низьковуглецевих сталей (сталь 20, Ст3сп), що мають границі міцності 370-410 Н/мм² регламентованими за ДСТУ 7809, ДСТУ 9218.

Приведемо застосування сталі для зварних труб великих діаметрів S355. У сталі S355 границя міцності досягає 470 Н/мм² по EN 10025-2:2022. Границя міцність цієї сталі на майже на 20 % біль ніж для сталі 20 чи Ст3сп.

А при використанні низьколегованого прокату за іноземними стандартами API Spec 5L сталей X60 L415 границя міцності досягає 760 Н/мм². І вона майже вдвічі більша ніж для сталі 20 чи Ст3сп.

Це відкриває можливість значного зменшення ваги погонного метра профіля при технічних вимогах по міцності та відповідно по супротиву вигину. І при виготовленні сталевих конструкцій дає змогу значно зменшити кінцеву масу всієї конструкції.

ВИСНОВКИ

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гнутих профілів не мають високої міцності через те, що потрібно забезпечувати можливість якісного зварювання.

В роботі запропонована розвинута технологія виготовлення холодногнутих профілів з підвищеною міцністю на основі застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей, що застосовують для виробництва зварних труб великих діаметрів.

Зараз, наприклад, гнуті профілі виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, Ст3сп,) з границями міцності 370-410 Н/мм² регламентованим за ДСТУ 2834-94.

Металургія

Виробництві гнутого профіля, наприклад, із сталі Х60 L415, що використовується для виробництва зварних труб великих діаметрів має границю міцності 760 Н/мм² за API Spec 5L.

При застосуванні сталі Х60 L415 замість СтЗсп досягається значне зменшення маси погонного метра холодногнутого швелера. При виготовленні сталевих конструкцій це дає змогу значно зменшити кінцеву масу всієї конструкції.

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. ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?d_doc=78666.
3. ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430.
4. ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент». https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63430.
5. ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови» <https://uscc.ua/dstu-88082018-profil-stalevi-gnuti-tehnicni-umovi>
6. Григоренко В.У., Заболотний О.М. (2024). Складові розвитку методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування». Вісник приазовського державного технічного університету вип. 48. 2024 р. с. 73-82 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>
7. Григоренко В.У., Заболотний 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_4lmPQFFj6YJa2G93905EL60NMdiCCVEv/view.
8. Григоренко В.У., Заболотний О.М. (2025). 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>
9. Курпе В.Г. Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей (2020). ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет. Докторська дисертаційна робота. 534 С. <http://www.dgma.donetsk.ua/docs/nauka/kurpe/Дисертація Курпе О.Г..pdf>.

Grigorenko V.U., Zabolotniy O.M.

**DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF BENT PROFILES
USING LOW-CARBON STEELS
INCREASED STRENGTH FROM THERMO-MECHANICAL TREATMENT IN THE
PRODUCTION OF COLD-DIE PROFILES**

The technology of production of metal profiles has two directions: hot rolling from a square or rectangular billet on section mills; cold plastic bending of a strip on continuous mills or a sheet on presses.

Low-carbon steels used in the production of hot-rolled profiles usually do not have high strength. Issues of increasing the strength of the metal of profiles are highly relevant.

Bent profiles are made of low-carbon steels with tensile strengths of 370-410 N/mm² regulated by DSTU 2834-94.

In the production of bent profiles, cold plastic deformation is performed in places, for example, for a channel, between the shelf and the racks.

Cold-bent profiles are inferior in rigidity to hot-rolled ones.

For bent profiles, steels that can be welded are used.

In the modern world, work is constantly being done to reduce the cost of rolling production. At the same time, the requirements for the quality characteristics of the metal are constantly increasing. The use of steels from thermomechanical rolling leads to an increase in the tensile strength of the metal, a decrease in the linear mass of the meter of profiles and the mass of structures made of them.

The work proposes a developed technology for manufacturing cold-bent profiles with increased strength based on the use of low-carbon thermomechanically treated steels used for the production of welded pipes of large diameters.

In the production of bent profiles, it is proposed, for example, to use low-carbon rolled products according to API Spec 5L standards from steel X60 L415, where the tensile strength reaches 760 N/mm². This achieves a significant reduction in the mass of a linear meter of the profile compared to those currently produced. This leads to a reduction in the weight of structures. It is important that channels made of such steels can be welded.

Keywords: *Cold-bent profiles, weldability of metal, thermomechanically treated steels, increased strength, reduced mass of steel structures.*

Стаття надійшла 27.11.2025р.

УДК 669.1:681.5

doi.org/10.31498/2522-9990302025347111

Щербаков С. В.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ПРОДУКТУ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ В СИСТЕМАХ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ

В умовах сучасного виробництва ефективне управління процесами та контроль технологічних параметрів набувають важливого значення для отримання якісного продукту. Впровадження інноваційних рішень є прямим шляхом до суттєвого підвищення якості виробництва, збільшення загальної ефективності, підвищення рівня промислової безпеки та оптимізації поточних витрат. З огляду на великий обсяг технологічних параметрів і необхідність швидкого прийняття рішень, якісне управління стає ключовим інструментом для досягнення даних цілей.

Процеси подрібнення і класифікації є критично важливими на початковому етапі технології збагачення руд. Рудний матеріал доводять до необхідної крупності, яка залежить від специфіки подальшої обробки. Оскільки перша стадія подрібнення визначає якісні показники кінцевого продукту, підвищення ефективності керування та модернізація обладнання (млинів, живильників, трубопроводів) є пріоритетним завданням. Це дозволяє гарантувати необхідну якість концентрату при одночасному зниженні його собівартості.

Наукові дослідження присвячені аналізу методів адаптивного керування замкнутим циклом подрібнення технологічних різновидів залізорудної сировини. Виконано огляд наукової та технічної літератури. Проведено критичний аналіз існуючих автоматичних систем керування процесом подрібнення та способів їх практичної реалізації. Розглянуто адаптивні системи керування та надано їх класифікацію. На основі проведеного аналізу сформульовано задачі та мету подальшого дослідження.

Зроблено аналіз функціонування системи керування подрібненням на основі стандартного ПІД-регулятора. Проведено дослідження показників якості регулювання системи в умовах зміни параметрів об'єкта управління. На основі отриманих результатів визначено вимоги до розробки ефективної системи, що базується на адаптивних методах керування.

Проведено експериментальне дослідження адаптивних регуляторів з оптимізаційними алгоритмами налаштування. Виконано аналіз динамічних показників якості адаптивної системи керування в умовах непостійності параметрів технологічного процесу.

Ключові слова: *Подрібнення руди, замкнений технологічний цикл, комп'ютерне моделювання, показники якості регулювання, адаптивний регулятор, мікропроцесорні засоби управління.*

Постановка проблеми. Узагальненим критерієм оцінки ефективності процесу подрібнення, як правило, слугує кількість подрібненого матеріалу цільового класу у зливні класифікатора, що функціонує в замкненому циклі з млином. Цей ключовий показник піддається постійним змінам через вплив багатьох чинників, таких як нестабільні характеристики сировини та варіативність режимних параметрів керування.

Одним із найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності процесу подрібнення є впровадження адаптивних методів керування. Оскільки кульовий млин потребує точного та узгодженого алгоритму подачі сировини для оптимального використання як самого обладнання, так і вихідного матеріалу, адаптивні системи є необхідними.

Адаптивні системи керування здатні коригувати регулюючі впливи, пристосовуючись до змін внутрішніх і зовнішніх параметрів системи (наприклад, до непостійності складу вхідної сировини). Вони забезпечують високу точність керування та, як наслідок, покращення якості кінцевого продукту шляхом врахування нових умов виробництва та динамічної зміни характеристик об'єкта. Впровадження таких систем на підприємствах є актуальною необхідністю. Створення досконалих адаптивних систем пов'язане з певними викликами, зокрема, із розробкою точних пристроїв автоматичного контролю для вимірювання показників ефективності та забезпечення стабільності характеристик кінцевого продукту. Найбільш досконалий і перспективний підхід полягає у синтезі оперативних даних про внутрішній стан об'єкта та інформації про закономірності подрібнення з сучасними алгоритмами адаптивної ідентифікації та управління. Враховуючи, що подрібнення і класифікація залізорудної сировини є фундаментальними підготовчими етапами перед її збагаченням, задачі розробки та застосування адаптивних систем, що базуються на структурних моделях об'єкта управління, здатних здійснювати параметричну ідентифікацію в реальному часі та використовувати складні алгоритми обробки інформації, є на сьогодні надзвичайно актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес подрібнення є складною багатопараметричною системою, яка включає як керовані, так і некеровані змінні. За умов змінних характеристик рудного матеріалу звичайні системи керування, що не мають механізмів компенсації цих змін, не здатні забезпечити необхідну точність і стабільну якість кінцевого продукту.

Адаптивні системи керування (АСК) створені для того, щоб пристосовуватися до змін:

- параметрів вхідної сировини;
- характеристик технологічного обладнання.

Параметричні та координатні збурення, які неминуче виникають під час роботи млина, класифікатора та приводних механізмів, погіршують умови функціонування традиційних регуляторів. Відтак, для ефективного керування технологічним комплексом подрібнення є доцільним використання АСК, які здатні адаптуватися до динамічних змін параметрів процесу.

Металургія

З огляду на специфіку процесу подрібнення, зокрема на його динамічні характеристики, клас самоналагоджувальних адаптивних систем найкраще відповідає вимогам керування процесом подрібнення руди.

Функціональні схеми АСК зазвичай включають два ключові контури:

- основний контур - реалізує стандартний принцип керування;
- контур адаптації - забезпечує пристосування системи до змін.

АСК розрізняють за типом контуру адаптації:

- системи з розімкненим контуром адаптації: швидше завершують процес адаптації, але мають нижчу точність;
- системи із замкненим контуром адаптації: забезпечують вищу точність.

Зважаючи на те, що технологічний процес подрібнення має значне запізнення, для керування ним доцільно застосовувати АСК з розімкненим контуром адаптації [1]. Така система містить пристрій адаптації, який обробляє інформацію про зовнішнє середовище (збурення, зовнішні дії) та коригує керуючу дію регулятора.

Самоналагоджувальні системи функціонують завдяки наявності контуру самоналаштування. Його завдання полягає в оцінюванні динамічних і статичних властивостей системи та формуванні таких керуючих дій, які б забезпечили наближення системи до заданого критерію якості функціонування [2].

Окрему категорію становлять адаптивні системи з еталонною моделлю (АСК-ЕМ). Розробка та особливості функціонування цих систем широко обговорюються в науковій літературі [3–4].

Метод адаптивного управління, відомий як правила Зіглера-Ніколса, був запропонований [5] і належить до емпіричних методів налаштування. Регулятори, параметри яких визначено цим методом, зазвичай забезпечують перерегулювання в діапазоні від 10% до 60%.

Налаштування регулюючого пристрою здійснюється на підставі експериментальних даних, отриманих від реального об'єкта або його моделі. Широке застосування отримали два основні варіанти цього методу: налаштування за межею стійкості та налаштування за перехідною характеристикою.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є оптимізація процесу регулювання циклу подрібнення залізорудної сировини шляхом дослідження та розробки системи керування, що ґрунтується на адаптивних алгоритмах.

Для досягнення поставленої мети та вирішення проблеми керування замкненим циклом подрібнення залізорудної сировини необхідно:

- проаналізувати системні взаємозв'язки між ключовими показниками технологічного процесу подрібнення та класифікації для різних типів залізорудної сировини з метою формалізації математичної моделі процесу подрібнення в замкненому циклі в умовах нестабільних технологічних параметрів;

- сформувати структуру адаптивної системи керування технологічним процесом подрібнення в замкненому циклі за умов нестабільності характеристик сировини та провести її дослідження на предмет здатності до адаптації при зміні параметрів технологічного об'єкта.

Для виконання поставлених задач застосовано наступні методи:

- аналіз вітчизняного та світового досвіду в галузі автоматизації процесів подрібнення;
- комп'ютерні, інформаційні та програмні технології;
- математичні методи теорії автоматичного керування;
- дослідження статистичних і динамічних характеристик процесу подрібнення в умовах нестабільності параметрів залізорудної сировини.

Основний матеріал дослідження. Процес подрібнення вважається одним із найбільш складних для регулювання технологічних процесів. Його ключовими характеристиками є

нелінійність та наявність великої кількості взаємопов'язаних параметрів керування. Оскільки контур подрібнення є чутливим до різноманітних збурень, ефективна компенсація їхнього негативного впливу потребує добре спроектованої та налаштованої системи керування. Великий вплив на показники якості регулювання мають транспортні затримки (запізнення), що виникають на різних ділянках технологічного процесу.

Традиційна система керування процесом реалізується за принципом відхилення поточного параметру від заданого значення з формуванням сигналу похибки. На підставі цього сигналу формується керуючий вплив за допомогою введення в систему регулятора, який працює за обраним типовим алгоритмом. В більшості сучасних систем використовується класичний регулятор, що працює за ПД (пропорційно-інтегрально-диференціальним) законом регулювання (рис. 1).

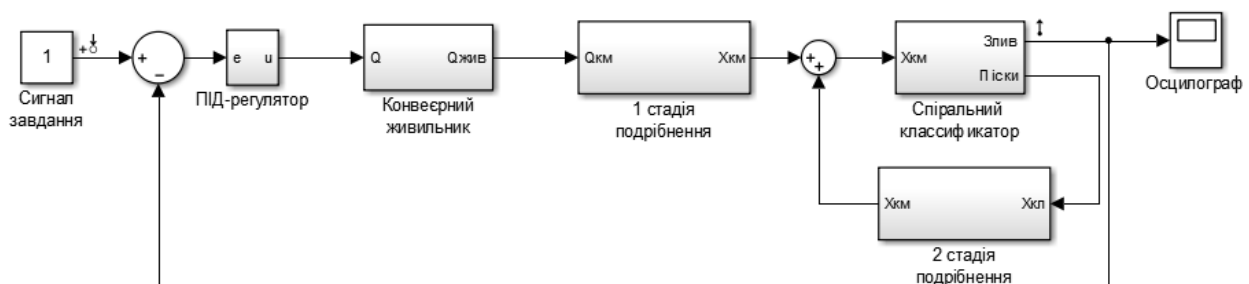


Рисунок 1 – Структура системи управління замкненим контуром подрібнення, що містить ПД-регулятор

Особливістю роботи таких систем є те, що налаштування регулятора не змінюються під час роботи системи. Однак система управління гранулометричним складом залізної руди є доволі динамічною та багатофакторною. Але ця динаміка ніяк не пов'язана з алгоритмом регулювання. За таких умов задовільних показників якості перехідного процесу можна досягти тільки у випадках, коли відсутні суттєві збурення, пов'язані зі зміною динамічних характеристик об'єкту або з наявністю завад по каналу зворотного зв'язку.

Одним із рішень розглянутої проблеми є інтеграція в контур регулювання ПД-регулятора з елементами адаптації його налаштувань (рис. 2). Процес адаптації може відбуватися шляхом застосування методів активного експерименту, під час якого в систему вводиться тестовий сигнал. Реакцією адаптивної моделі регулятора на такий сигнал буде зміна його параметрів, що призведе до виведення системи на межу стійкості.

Однак, методи активного експерименту не можна впроваджувати в умовах ведення безперервного технологічного процесу в реальному часі. В даному випадку, альтернативним варіантом є модифікація адаптивної складової регулятора шляхом введення рекурентної моделі оцінки вихідного значення (керуючого впливу), коли його поточне значення отримується на підставі попереднього. Тобто вводиться зворотній зв'язок по керуючому впливу.

Апробація подібної адаптивної системи відбувалась з використанням засобів моделювання середовища Simulink. В основі адаптивної складової моделі було використано алгоритм (контролер) Зіглера-Ніколса. Експеримент проводився шляхом внесення в систему регулювання комплексних координатних та параметричних збурень. Це означає, що під час роботи системи регулювання відбувалась зміна динамічних характеристик об'єкта та введення в канал зворотного зв'язку завад у вигляді «білого шуму» або випадкових значень, змодельованих за різними законами за допомогою блоків Random Number та Band-Limited White Noise середовища Simulink [6].

На рис. 2 представлена схема системи керування, яка використовує адаптивний ПІД-регулятор, налаштований за методом Зіглера-Ніколса. Ключовою особливістю цієї схеми є наявність фільтрації D-складової (диференціальної компоненти) в контурі управління. Фільтрація D-компоненти є необхідною для зменшення впливу високочастотного шуму (який особливо сильно впливає на диференціальну складову) та підвищення стійкості адаптивної системи керування. Контролер використовує три вхідні сигнали у дискретний момент часу k : $w(k)$ – сигнал еталонної моделі (або задане значення/уставка); $y(k)$ – сигнал на виході об'єкта керування; $U_{in}(k)$ – сигнал на вході об'єкта керування (керуючий вплив із попереднього кроку). На своєму виході контролер формує новий керуючий вплив для об'єкта керування, позначений як $u(k)$. Під час проведення досліджень будь-які параметри налаштування контролера можуть бути змінені у середовищі Simulink.

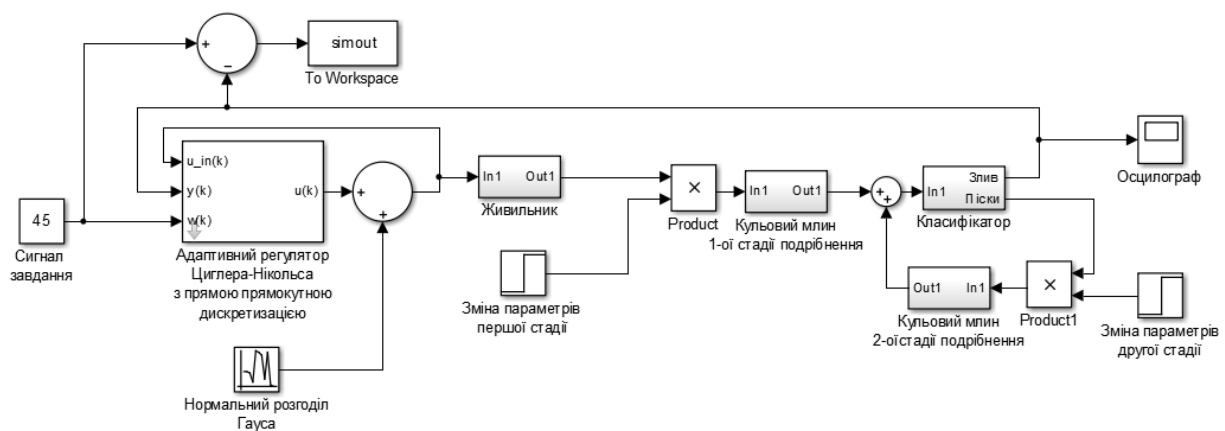
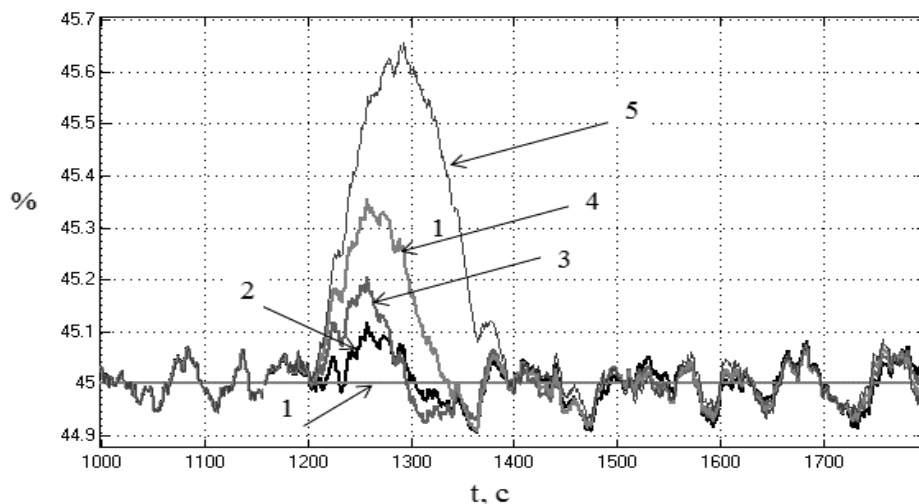


Рисунок 2 – Модель системи керування з адаптивним регулятором

Результати моделювання представлені на рис. 3. Графіки якісно відтворюють характер відхилення технологічного параметру від цільового (заданого) значення під час внесення комплексних збурень різної потужності. Аналіз показує, що амплітуда відхилення знаходиться в межах референтного інтервалу. Це підтверджує доцільність використання даної адаптивної моделі Зіглера-Ніколса в системах регулювання подібного класу.



1 – сигнал завдання; 2 – зміна параметрів на 10%, потужність шуму 0,2;
3 – на 20%, 0,4; 4 – на 30%, 0,6; 5 – на 40%, 0,8

Рисунок 3 – Апробація системи керування в умовах комплексних збурень

Металургія

Апробація запропонованого алгоритму управління не обмежувалась математичним моделюванням. Практичне дослідження забезпечувалося розробкою реальної системи автоматичного керування з використанням мікропроцесорних засобів.

Однією з задач роботи була розробка програмного забезпечення промислового контролера на базі PLC SIEMENS Simatic S 1500-H [7], який керує процесом подрібнення, а також конвеєрами фабрики.

Програма керуючого контролера була реалізована засобами мови програмування STEP7, що включає в себе головний організаційний блок OB1, функціональні блоки FB керування механізмами дробильної фабрики та блоки даних DB, в яких записані необхідні параметри керування двигунами, масляними станціями та іншим технологічним обладнанням.

ВИСНОВКИ

Аналіз наукових джерел, досліджень і практичних розробок у галузі збагачення залізорудної сировини підтверджує, що більшість чинних систем автоматизованого керування є застарілими. Вони не здатні адекватно враховувати багатовимірність об'єкта управління, його істотну нелінійність, нестационарність та постійну зміну технологічних параметрів у процесі експлуатації.

Системи автоматичного керування, в яких застосовано класичний ПІД-регулятор у контурі управління, демонструють задовільні показники якості керування лише за умови, що функціонують в усталеному стані, для якого було здійснено налаштування регулятора.

З огляду на цю ситуацію, провідним напрямом для розв'язання зазначеної проблеми є впровадження адаптивних систем керування. Ці системи забезпечують необхідне пристосування регулюючих впливів та налаштувань агрегатів до динамічних змін параметрів і характеристик як виробничого процесу, так і сировини, що переробляється.

Серед усіх досліджених алгоритмів адаптивного регулювання найкращі результати продемонстрував контролер Зіглера-Ніколса для процесів 3-го порядку з використанням апроксимації та фільтрації диференціальної складової.

Список використаних джерел

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. Підручник. - К.: Либідь, 1997. - 544 с.
2. Тютюнник, А. Г. Оптимальні і адаптивні системи автоматичного керування [Текст] : Навчальний посібник / А. Г. Тютюнник ; МОН України. – Житомир : ЖІТІ, 1998. – 512 с.
3. Morkun V., Tron V. Ecological and economic optimization of iron ore processing automated control, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No5, p.p. 8-11.
4. Morkun V., Tron V. Ore preparation multi-criteria energy-efficient automated control with considering the ecological and economic factors, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No5, p.p. 4-7.
5. Co, Tomas; Michigan Technological University (February 13, 2004). "Ziegler–Nichols Closed Loop Tuning" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://www.chem.mtu.edu/~tbco/cm416/zn.html>.
6. Self-Tuning Controllers Simulink Library [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/8381/versions/1/previews/help/html/zn2br.htm/>.
7. Офіційний сайт фірми Siemens [Електронний ресурс]. – Режим доступу URL: <https://www.cee.siemens.com/web/ua/ru/iadt/ia/sensors/instrumentation/batching-systems/milltronics/Pages/milltronics-1200-3600.aspx>.

OPTIMIZATION OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF IRON ORE GRINDING PRODUCT IN SYSTEMS WITH ADAPTIVE CONTROL

In a modern production environment, effective process management and control of process parameters are essential for producing a high-quality product. Implementing innovative solutions is a direct path to significantly improving production quality, increasing overall efficiency, enhancing industrial safety, and optimizing operating costs. Given the large volume of process parameters and the need for rapid decision-making, effective management is a key tool for achieving these goals.

The grinding and classification stage is a critical initial step in ore beneficiation technology. The ore material is refined to the required particle size, which depends on the specifics of subsequent processing. Since the first stage of grinding determines the quality of the final product, improving control efficiency and upgrading equipment (mills, feeders, pipelines) is a priority. This ensures the required concentrate quality while simultaneously reducing its cost.

This research is devoted to the analysis of adaptive closed-loop control methods for grinding various types of iron ore raw materials. A review of the scientific and technical literature is provided. A critical analysis of existing automatic grinding process control systems and methods for their practical implementation is conducted. Adaptive control systems are examined and their classification is presented. Based on the analysis, the objectives and goals of further research are formulated.

The performance of a grinding control system based on a standard PID controller is analyzed. The system's control performance indicators are studied under changing process parameters. Based on the obtained results, requirements for developing an effective system based on adaptive control methods are determined.

An experimental study of adaptive controllers based on optimization tuning methods is conducted. The dynamic performance indicators of the adaptive control system are analyzed under variable process parameters.

Keywords: *Ore crushing, closed technological cycle, computer modeling, control quality indicators, adaptive controller, microprocessor controls.*

Стаття надійшла 05.12.2025р.

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ НЕСУЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ АВТОНАВАНТАЖУВАЧІВ

Запобігання росту відмов, у тому числі аварійних, автонавантажувачів можливо шляхом визначення реального напружено-деформованого стану несучих елементів навантажувача та застосування відповідних заходів по його зменшенню.

Розроблено 3D моделі за допомогою програмного комплексу «T-FLEX CAD 3D 9.0», який реалізує метод кінцевих елементів для оцінювання рівня напружень, що дозволило встановити закономірності взаємодії рами автонавантажувача з вантажопідйомником при різних варіантах навантаження.

Було проведено оцінку рівня еквівалентних напруг, які надають достатню інформацію для оцінки надійності конструкції. На відміну від окремих компонентів напруги еквівалентна напруга не має напрямку, а повністю визначається величиною, вираженою в одиницях напруги. Для розрахунку коефіцієнтів запасу міцності в різних точках, використано критерій плинності, який точно визначає початок переходу матеріалу до стану плинності в якійсь точці, а еквівалентна напруга досягає межі плинності матеріалу.

Для більш детального аналізу навантаженого стану металоконструкцій вантажопідйомника розглянуто його окремі перерізи, на яких можна простежити розподіл напруг у прихованих ділянках – кронштейнах кріплення, ребрах жорсткості.

Результати дослідження напружено-деформованого стану вантажопідйомника підтвердили, що найбільшому впливу динамічних навантажень схильні як раз найбільш навантажені ділянки та ділянки, що мають мінімальні коефіцієнти запасу міцності, а саме – опори напрямних котків, напрямні ковзанки, бічний вертикальний лист рухомої рами вантажопідйомника та каретки.

Ключові слова: *Автонавантажувач, вантажопідйомник, 3D моделі, напружено-деформований стан.*

Постановка проблеми. У зв'язку зі зростанням маси вантажів у морських портах спостерігаються збільшення відмов (у тому числі аварійних) автонавантажувачів протягом незначного періоду експлуатації. Вирішення проблеми можливо за допомогою визначення реального напружено-деформованого стану несучих елементів автонавантажувача та застосування відповідних заходів по його зменшенню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз науково-технічної літератури показав, що відомі дослідження і розробки не повною мірою враховують існуючу несиметричність навантаження вантажопідйомника, а також рух автонавантажувача по нерівностям транспортних шляхів і, пов'язані з цим, додаткові динамічні навантаження на несучу систему. Тому завдання визначення реального напружено-деформованого стану несучих елементів навантажувачів є доцільним і актуальним [1-5].

Мета дослідження. Визначення напружено-деформованого стану несучих елементів навантажувачів за допомогою 3D моделей, які дозволять дослідити стан металевої конструкції вантажопідйомника та надати кількісну оцінку напружень у найбільш навантажених ділянках складових частин.

Основний матеріал дослідження. З метою проведення аналізу напружено-деформованого стану несучих елементів вантажопідйомника автонавантажувача

Ремонт та відновлення деталей машин

вантажопідйомністю 16 т і висотою підйому 8 м розроблено твердотільну модель, в масштабі 1:1.

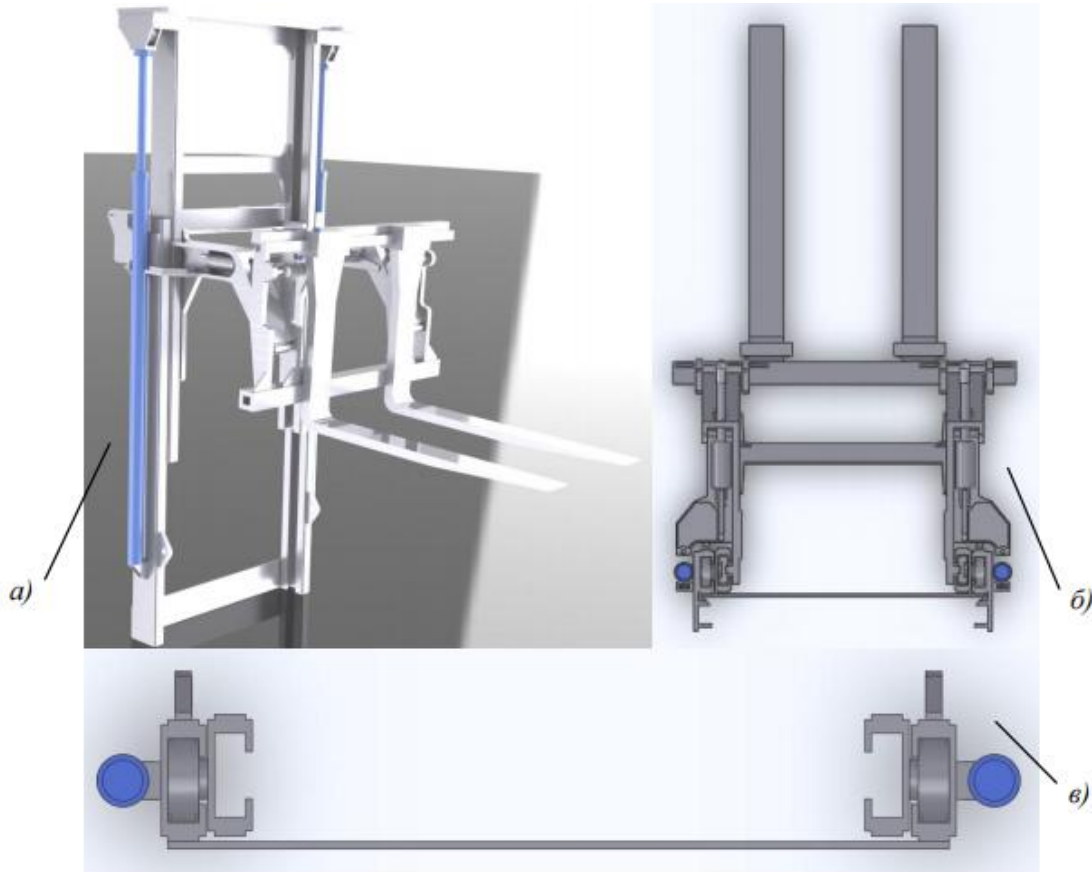


Рисунок 1 – Твердотільна модель вантажопідйомника

а) – загальний вигляд вантажопідйомника; б) – перетин рами на рівні вил вантажопідйомника; в) – перетин рами вантажопідйомника на рівні кронштейнів кріплення

Металоконструкції рухомої та нерухомої рам мають С-образний профіль. У моделі створено лише основні несучі металоконструкції (несучі балки, кронштейни кріплення балок та вантажних ланцюгів). Модель створена у середовищі TFLEX CAD 3D 9.0.

Засобами T-FLEX/Аналіз створена сітка (рис. 2): кількість елементів – 9920, кількість вузлів – 3125, призначений матеріал (якісна сталь 15Г2С).

В результаті отримано значення переміщень, зусиль реакцій, контактного тиску, навантажень та напруг у різних напрямках, а також створено епюри перерізів для визначення цих показників усередині моделі.

При моделюванні навантаження металоконструкції вантажопідйомника діючі зусилля прикладалися до каретки (рис.3), вантажопідйомник спирався на кронштейни кріплення (нерухомі верхній та нижній), закріплення здійснювалося за допомогою кронштейнів

Ремонт та відновлення деталей машин

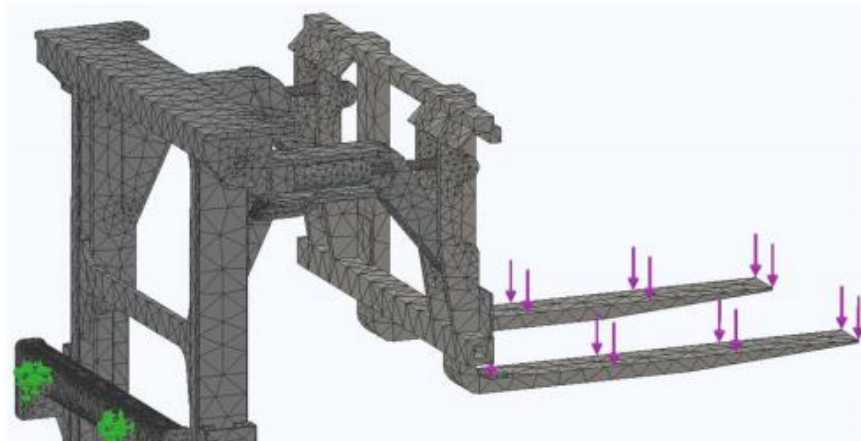


Рисунок 2 – Сітка на твердому тілі

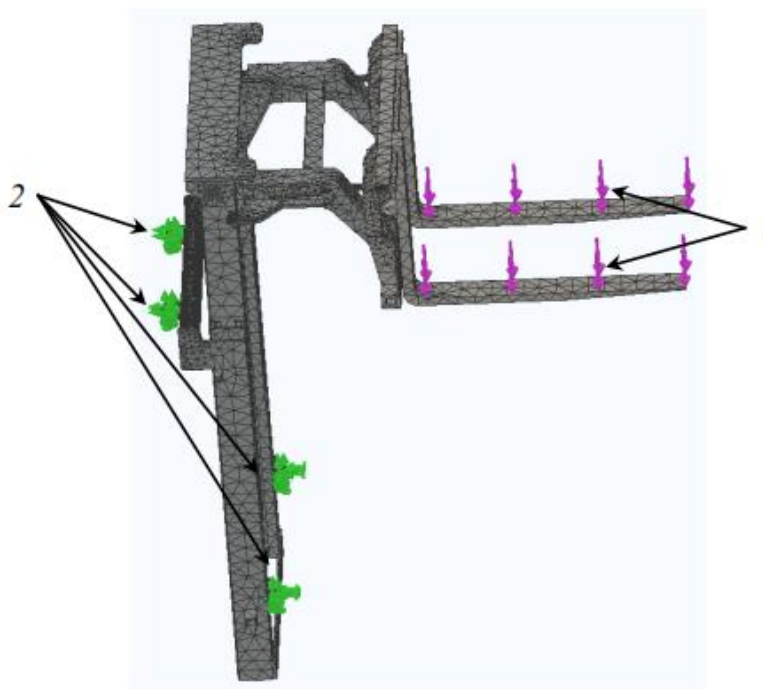


Рисунок 3 – Місця прикладання навантажень (1) та місця закріплення (2) моделі

Було проведено оцінку рівня еквівалентних напруг. Незважаючи на те, що еквівалентна напруга в якійсь точці не є однозначною для визначення стану напруги у цій точці, вона надає достатню інформацію для оцінки надійності конструкції. На відміну від окремих компонентів напруги еквівалентна напруга не має напрямку. Воно повністю визначається величиною, вираженою в одиницях напруги. Щоб розрахувати коефіцієнти запасу міцності в різних точках, T-FLEX/Аналіз використовує критерій плинності який точно визначає те, що матеріал починає переходити до стану плинності в якійсь точці, коли еквівалентна напруга досягає

Ремонт та відновлення деталей машин

межі плинності матеріалу. Використовуючи інструменти T-FLEX/Аналіз виконано аналіз розподілу напруг у моделі (рис. 4).

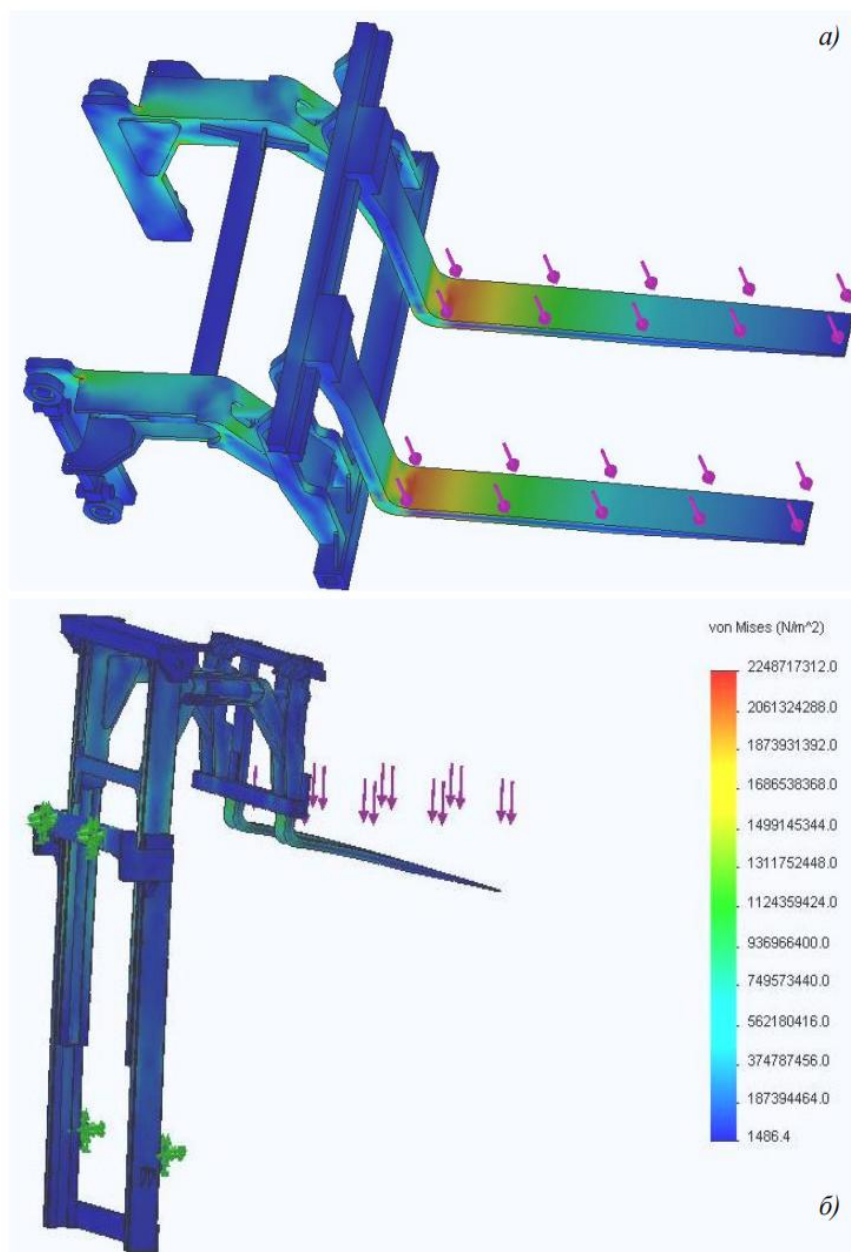


Рисунок 4 – Розподіл еквівалентних напруг у моделі:

а) каретка вантажопідійомника; б) рухома рама

Також для більш детального аналізу навантаженого стану металоконструкцій вантажопідійомника, були розглянуті окремі перерізи вантажопідійомника, на яких можна простежити розподіл напруг у прихованих ділянках – кронштейнах кріплення, ребрах жорсткості.

ВИСНОВКИ

Результати дослідження напружено-деформованого стану вантажопідійомника підтвердили, що найбільшому впливу динамічних навантажень схильні як раз найбільш навантажені ділянки та ділянки, що мають мінімальні коефіцієнти запасу міцності, а саме – опори напрямних котків, напрямні ковзанки, бічний вертикальний лист рухомої рами вантажопідійомника та каретки.

Список використаних джерел

1. Суглобов В.В. Исследование условий эксплуатации и причин выхода из строя фронтальных автопогрузчиков / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2005. – Вип. 15. – С. 101 – 104.
2. Суглобов В.В. Исследование причин отказов автопогрузчиков при эксплуатации в морских портах / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підійомно-транспортна техніка – Дніпропетровськ: ДІПТ, 2009. – № 3. – С. 103 – 108.
3. Нефёдов И.А. Разработка математической модели колебаний вилочного автопогрузчика / И.А. Нефёдов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: Сб. науч. трудов. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – Вып. 57. – С. 140 – 145.
4. Суглобов В.В. Разработка динамической модели автопогрузчика / В.В. Суглобов, В.П. Лаврик, И.А. Нефёдов // Підійомно-транспортна техніка. – Дніпропетровськ: ДІПТ, 2006. – № 3. – С. 32 – 41.
5. Карпенко Т.Н. Исследование движения автопогрузчика после фронтального наезда на препятствие / Т.Н. Карпенко, И.А. Нефёдов // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту. – Донецьк: «Рекламно-видавнича фірма «Молнія», – 2012. – № 4. – С. 67 – 77.

Nefyodov I.O., Lavryk V.P., Suglobov V.V.

RESEARCH OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF THE LOADER ELEMENTS

Preventing the growth of failures, including emergency, atonavanta-chewing is possible by determining the real stress-strain state of the load-bearing elements of the loader and applying appropriate measures to reduce it.

3D models were developed using the software package "T-FLEX CAD 3D 9.0", which implements the finite element method for assessing the stress level, which made it possible to establish the regularities of the interaction of the forklift frame with the forklift under different loading options.

An assessment of the level of equivalent stresses was carried out, which provide sufficient information for assessing the reliability of the structure. Unlike individual stress components, the equivalent stress has no direction, but is completely determined by the value expressed in units of stress. To calculate the safety factor at different points, the yield criterion was used, which accurately determines the beginning of the transition of the material to the yield state at some point, and the equivalent stress reaches the yield point of the material.

For a more detailed analysis of the loaded state of the metal structures of the forklift, its individual sections were considered, on which it is possible to trace the distribution of stresses in hidden areas - mounting brackets, stiffening ribs.

The results of the study of the stressed-deformed state of the forklift confirmed that the most loaded areas and areas with minimal safety factors are subject to the greatest influence of dynamic loads, namely - the supports of the guide rollers, guide skates, the lateral vertical sheet of the moving frame of the forklift and the carriage.

Keywords: Forklift, forklift, 3D models, stressed-deformed state.

Стаття надійшла 23.11.2025 р.

УДК 621.91

doi.org/10.31498/2522-9990302025347176

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

ЯКІСТЬ РІЗУ ПРОКАТУ ДИСКОВИМИ ПИЛАМИ

Одним з найбільш важливих показників, які визначають довговічність пильного диску, а отже, і простої пили при заміні ріжучого диску, є якість прокату після різу.

Якість порізки прокату на пилах визначається висотою заусенців на торцях прокату, неперпендикулярністю торця до повздовжньої вісі прокату, наявністю облою та кінцевої кривизни розкату.

Заусенці, які з'являються на торцях прокату після різання, служать основним критерієм затуплення зубців пильного диску. Утворення їх обумовлено двома процесами: тертям бокової поверхні диску пили о торець, що розрізається, внаслідок торцевого биття диска та вичавлюванням металу з-під закругленої ріжучої кромки.

Для окремих видів профілів, наприклад, рейок, стандартом передбачаються жорсткі обмеження по привізні кінців (не більше 0,5 мм на довжині 1 м). Однак забезпечити такі вимоги у виробничих умовах не завжди є можливим. Експериментальні дослідження, проведені на роторній пилі 1600, показали, що причиною такого явища, при невідповідності верхнього рівня роликів рольгангу та плитного настилу, може служити неправильно обране взаємне розташування пили та прокату під час різання. В результаті цього контакт зубців із заготовкою може виникати по максимальній дузі, тобто з найбільшими зусиллями, діючими на профіль.

Було визначено, що суттєвий вплив на роботу двигуна обертання диску оказує розклинювання пропилу. Як було визначено, при різному ступені затуплення під час різання рейок та рейкової підкладки струм електродвигуна обертання диску зменшується в середньому на 15-20 %. Таке зменшення не тільки економить електроенергію, але і суттєво покращує умови роботи ремінної передачі, подовжуючи строк її служби, оскільки защемлення диску в прорізі, яке супроводжується підвищеними навантаженнями на двигун, призводить до просковзування ременів та інтенсивного їх зносу разом зі шківками. Використання розклинюючого приладу знижує заусенці на торцях прокату, а також знижує інтенсивність зносу зубців.

За результатами відповідних досліджень можна зробити висновок про те, що порізка любого прокату, в тому числі рейок, з точки зору зменшення енергозатрат, підвищення якості різання, стійкості ріжучого інструменту та надійності механізмів пил, повинна виконуватись з розкриттям пропилу. Ігнорування цих вимог призводить до неоправданих виробничих втрат.

Ключові слова: Довговічність, пили, ріжучий диск, якість різання, порізка.

Постановка проблеми. До теперішнього часу залишалися невирішеними питання якості порізки прокату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Згідно існуючим дослідженням [1-3] можна зробити висновки, що порізка любого прокату, у тому числі і рейок, з точки зору зменшення енергозатрат, підвищення якості різання, стійкості ріжучого інструменту та надійності механізмів, має ряд факторів визначаючих якісні показники процесу різки.

Мета дослідження. Метою роботи є аналіз факторів визначаючих якісні показники процесу різки та визначення їх параметрів.

Основний матеріал дослідження. Одним з факторів, який визначає якість різання прокату, є висота заусенців. Заусенці, які з'являються на торцях прокату після різання, служать основним критерієм затуплення зубців пильного диску. Утворення їх обумовлено двома процесами: тертям бокової поверхні диску пили о торець, що розрізається, внаслідок торцевого биття диска та вичавлюванням металу з-під закругленої ріжучої кромки. Експерименти проведені на роторній пилі 1600 в рейкобалочному цеху показали, що при різанні балки № 24 на різних швидкостях подачі у діапазоні 0,2-0,8 м/с диском ϕ 1800 мм, товщиною 10 мм та кроком 19 мм з торцевим биттям 6,7 мм та середнім затуплення зубців 1,5 – 2 мм, що найгірша якість отримана у заготовок розрізаних з мінімальними подачами. Появу великих заусенців на малих подачах можна пояснити інтенсивними процесами тертя, виникаючими між заготовкою і диском пили із-за торцевого биття диска. Причому в більшій мірі це здійснюється при малих подачах, коли кожний міліметр подачі диска доводиться декілька його оборотів, внаслідок чого, торець прокату раз огрівається до високих температур.

Для окремих видів профілів, наприклад, рейок, стандартом передбачаються жорсткі обмеження по привізні кінців (не більше 0,5 мм на довжині 1 м). Однак забезпечити такі вимоги у виробничих умовах не завжди є можливим. Справа у тому, що рівень роликів рольгангу, як правило, дещо перевищує рівень плитного настилу та за збігом обставин можуть створюватись умови, які призводять до вигину кінця прокату під дією зусиль різання. Оскільки відстань між роликами рольгангу знаходиться у межах 1-2 м, то кінцева кривизна створюється на довжині 0,5-1 м. виправити такий дефект на існуючому правильному обладнанні складно та часто доводиться видаляти вигнуті кінці за допомогою пил холодної різки.

Експериментальні дослідження, проведені на роторній пилі 1600, показали, що причиною такого явища, при невідповідності верхнього рівня роликів рольгангу та плитного настилу, може служити неправильно обране взаємне розташування пили та прокату під час різання. В результаті цього контакт зубців із заготовкою може виникати по максимальній дузі, тобто з найбільшими зусиллями, діючими на профіль.

І цей фактор у поєднанні із впливом таких зусиль в напрямку найменшої жорсткості перерізу, що розрізається, призводить у підсумку к появі кінцевої кривизни рейки. Причому, зі зростанням затуплення диску така кривизна збільшується. Кінцева кривизна інших видів профілів не регламентована стандартами, однак її появлення суттєво ускладнює технологічний процес подальшої обробки прокату.

Існує ще одна проблема, яка виникає при появленні описаного вигину кінця полоси. Як правило, при вигині полоси виникає защемлення диску, що в свою чергу призводить до втрати швидкості диска, інтенсивному розігріву бокових граней зубців, що труться о торці прокату, та зниженню при цьому стійкості дисків.

Ремонт та відновлення деталей машин

Таблиця 1 – Результати замірів параметрів та якісних показників процесу різання рельсової підкладки Д65 на пилі №5

Кіль- кість різів, шт	Площа розріза- емого прокату, м ²	Струм двигуна, А	Середня по трьом замірам кривизна, мм	Середня по трьом замірам фаска зносу, мм	Середня по трьом замірам висота заусенців, мм	Середня по трьом замірам ширина заусенців, мм
			σ _{ср}	Δ _{ср}	h _{ср}	b _{ср}
Без розклинювання пропилу						
35	0,20	1008	0,5	0,5	1,9	2,3
75	0,45	1050	0,7	1,0	2,3	4,0
130	0,77	1059	1,0	1,6	2,6	4,2
180	1,07	1140	1,5	2,0	2,9	4,8
255	1,52	1200	2,0	3,2	3,4	5,6
336	2,00	1281	4,8	4,0	4,0	6,8
З розклинюванням пропилу						
50	0,29	820	0,53	0,53	1,76	1,96
100	0,59	840	0,63	0,86	2,10	2,50
160	0,95	895	0,70	1,46	2,26	2,96
200	1,19	945	1,26	1,83	2,40	3,46
260	1,55	987	1,73	2,20	2,60	3,76
336	2,00	1020	1,86	2,56	2,86	4,20

Для оцінки розклинювання пропилу на кінцеву кривизну рейок Р65 та Р50, а також рейкової підкладки Д65 на ПУ № 2 проведена спеціальна серія порівняльних випробувань по різці названих профілів без використання яких-небудь пристроїв із спеціальним механізмом розкриття пропилу, який дозволяв при піднятті в момент різі прокат над рівнем плитного настилу на 5-7 мм.

В процесі випробувань спеціальною лінійкою з п'ятьма індикаторами, розташованими на відстані 100 мм кінця (σ_5) та один від одного ($\sigma_4, \sigma_3, \sigma_2, \sigma_1$) помірявся вигиб кінця полоси. Під час різання виконувались заміри токових навантажень двигуна обертання диску, контролювався знос зубців диску шляхом заміру фаски зносу по задній грані лупою Брінелля та виконувались заміри висоти заусенців на торцях прокату. Результати цих випробувань представлені в табл. 1, а на рис. 1-4 представлені графічні залежності кінцевої кривизни, висоти заусенців, току двигуна від ступеня затуплення зубців для випадків порізки, що порівнюються.

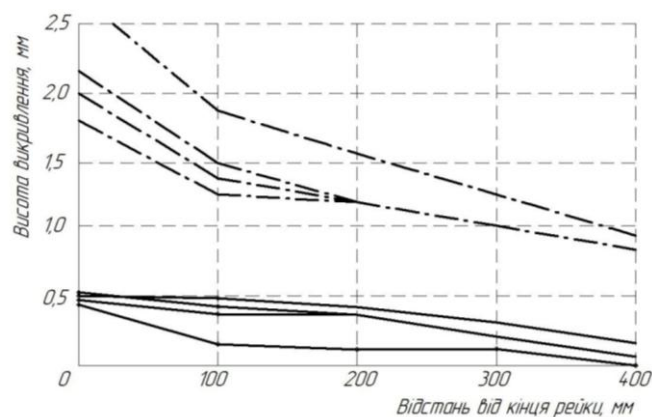


Рисунок 1 – Характер кінцевої кривизни рейок Р50 при прорізці на пилі № 5

Ремонт та відновлення деталей машин

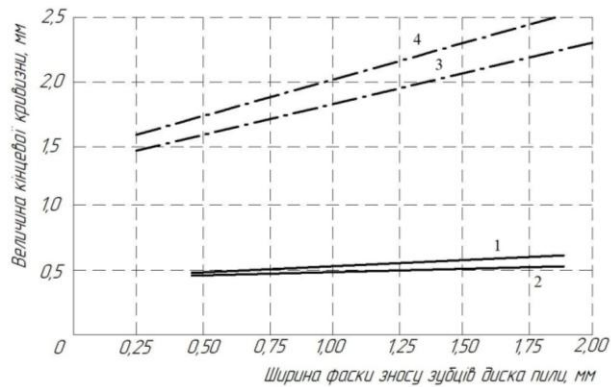


Рисунок 2 – Залежність кінцевої кривизни рейки від затуплення диска
де 1, 2 – порізка рейок P50 та P65 з пристроєм для розклінювання;
3,4 - порізка рейок P50 та P65 до встановлення пристрою для розклінювання.

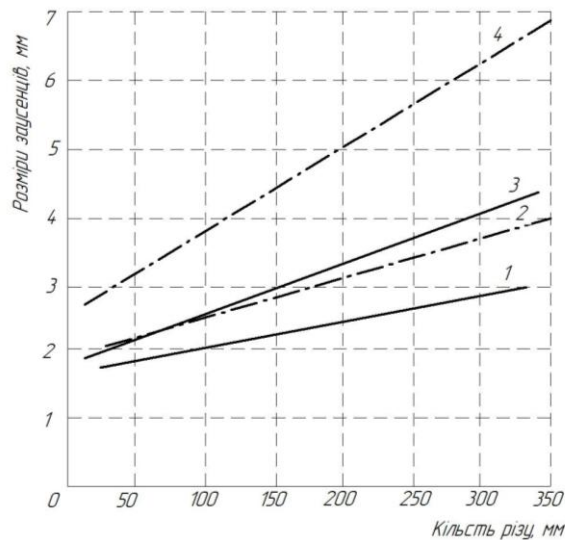


Рисунок 3 – Залежність висоти заусенців від кількості різів
де 1, 2 – порізка з пристроєм для розклінювання;
3,4 - порізка до встановлення пристрою для розклінювання

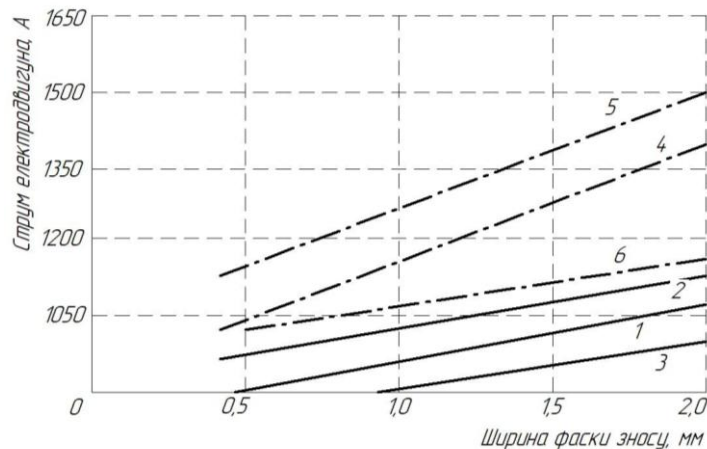


Рисунок 4 – Залежність току двигуна від ступеня затуплення зубців
при порізці рейок та рейкової підкладки
де 1, 2 – порізка з пристроєм для розклінювання;
3,4 - порізка до встановлення пристрою для розклінювання.

Ремонт та відновлення деталей машин

Аналіз отриманих результатів дозволяє, в першу чергу, відмітити ефективність використання розклинювання для суттєвого зменшення кінцевої кривизни рельєсів до величин, що допускаються стандартами (до 0,5 мм на 1 погонний метр). В той час як без його використання цей параметр досягав 1,7-3,0 мм, що призводило до необхідності відрізання цих кінців на пилах холодного різання та суттєвому зменшенню виходу годного прокату. Причому кінці, що відрізаються, як це видно на рис. 1, повинні бути 300-400 мм, щоб виключити кінцеву кривизну, яка перевищує ту, що допускається стандартом. Таким чином, при довжині рейки 25 м до 4 % готової продукції переходить в категорію негабаритної обрізі та йде на переплавку. Суттєвий вплив розклинювання пропилю оказує на роботу на роботу двигуна обертання диску. Як видно на рис. 4, при різному ступені затуплення під час різання рейок та рейкової підкладки струм електродвигуна обертання диску зменшується в середньому на 15-20 %. Таке зменшення не тільки економить електроенергію, але і суттєво покращує умови роботи ремінної передачі, подовжуючи строк її служби, оскільки защемлення диску в прорізі, яке супроводжується підвищеними навантаженнями на двигун, призводить до просковзування ременів та інтенсивного їх зносу разом зі шківками. Використання розклинюючого приладу знижує заусенці на торцях прокату (див. рис. 3), а також знижує інтенсивність зносу зубців.

Звертає на себе увагу той факт, що при різці рейок вихід за межі допускаємої кривизни кінців починається практично при різці гострими зубцями (див. рис. 2). Навіть при фасці зносу зубців, яка дорівнює 0,5 мм, що відповідає вихідній гостроті зуба, отриманій після фрезерування диску, привізна кінців рейок складає більше 1,5 мм.

Підводячи підсумок виконаним дослідженням, можна зробити висновок про те, що порізка любого прокату, в тому числі рейок, з точки зору зменшення енергозатрат, підвищення якості різання, стійкості ріжучого інструменту та надійності механізмів пил, повинна виконуватись з розкриттям пропилю. Ігнорування цих вимог призводить до неоправданих виробничих втрат.

Різання тонкостінних фасонних профілів та труб на підвищених швидкостях подачі пов'язане з можливим деформуванням перерізів, що розрізаються, і тому вибір режимів різання такого прокату повинен виконуватись з урахуванням характеристик жорсткості його профілю.

Визначення режимів різання, а точніше допустимої товщини зрізу, можна виконати прирівняв результуюче зусилля різання та максимальне зусилля, що сприймається елементами профілю без викривлення вихідної форми або з відхиленням, але в межах, що дозволені стандартом. При такому порівнянні повинні дотримуватись умови рівності кута дії результуючого зусилля різання та кута нахилу до горизонталі максимально допускаємого зусилля різання, що сприймається профілем без викривлення геометричної форми.

ВИСНОВКИ

За результатами відповідних досліджень можна зробити висновок про те, що порізка любого прокату, в тому числі рейок, з точки зору зменшення енергозатрат, підвищення якості різання, стійкості ріжучого інструменту та надійності механізмів пил, повинна виконуватись з розкриттям пропилю. Ігнорування цих вимог призводить до неоправданих виробничих втрат.

Різання тонкостінних фасонних профілів та труб на підвищених швидкостях подачі пов'язане з можливим деформуванням перерізів, що розрізаються, і тому вибір режимів різання такого прокату повинен виконуватись з урахуванням характеристик жорсткості його профілю.

Список використаних джерел:

1. *Іщенко А.О., Капустін С.В.* Аналіз способів розкрою 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.
2. *Іщенко А. О.* Ділянки різання прокату дисковими пилами. – К.: Вища школа, 1989,- 61 с.
3. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Частина 6. Ножиці и пили. Під ред. Ширяєва А.В. / *Ф.К. Іванченко, В.М. Гребеник, В.И. Ширяєв.* – Маріуполь, ПДТУ, 2012. - 84 с.

Ishchenko A.O., Bilodidenko S.V., Kapustin S.V., Kravchenko V.M.

QUALITY OF CUTTING ROLLED STEEL WITH CIRCULAR SAWS

One of the most important indicators that determine the durability of a saw blade, and therefore of a simple saw when replacing a cutting blade, is the quality of the rolled product after cutting.

The quality of cutting rolled products on saws is determined by the height of the burrs on the ends of the rolled product, the non-perpendicularity of the end to the longitudinal axis of the rolled product, the presence of burrs and the final curvature of the roll.

Burrs that appear on the ends of the rolled product after cutting serve as the main criterion for blunting the teeth of the saw blade. Their formation is due to two processes: friction of the side surface of the saw blade against the end being cut due to the end runout of the blade and squeezing metal from under the rounded cutting edge.

For other types of profiles, for example, slats, the standard requires tight edges at the ends (no more than 0.5 mm per 1 m). However, it will not be possible to ensure such benefits in the minds of manufacturers. Experimental studies carried out on a rotary saw 1600 showed that the cause of this phenomenon, when the upper level of the rollers of the roller conveyor and slab flooring is not consistent, can be caused by improperly reciprocating the saw and rolling. slaughter. As a result, the contact of the teeth with the workpiece can be driven by the maximum force, which results in the greatest forces acting on the profile.

It was determined that the wedging of the cut has a significant impact on the operation of the disk rotation motor. As it was determined, with different degrees of blunting during cutting rails and rail lining, the current of the disk rotation motor decreases by an average of 15-20%. Such a reduction not only saves electricity, but also significantly improves the operating conditions of the belt drive, extending its service life, since the jamming of the disk in the slot, which is accompanied by increased loads on the engine, leads to slipping of the belts and their intensive wear together with the pulleys. The use of a wedging device reduces burrs on the ends of the rolled steel, and also reduces the intensity of tooth wear.

According to the results of relevant studies, it can be concluded that cutting any rolled steel, including rails, in terms of reducing energy consumption, improving cutting quality, stability of the cutting tool and reliability of the saw mechanisms, should be performed with the opening of the cut. Ignoring these requirements leads to unjustified production losses.

Keywords: *Durability, saws, cutting blade, rolled product quality.*

Стаття надійшла 10.12.2025 р.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКРИТТЯ НІТРИДУ ТИТАНУ НА ВТОМНУ МІЦНІСТЬ КОМПРЕСОРНИХ ЛОПАТОК

Стаття присвячена актуальним проблемам поломок лопаток компресорів газотурбінних двигунів внаслідок втомного характеру руйнування, ініційований ерозійними пошкодженнями зваженими частинками пилу, піску, вулканічного попелу, що знаходяться в повітрі. Основну увагу приділено визначенню впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування. Випробування на втому проводилися на нових лопатках з покриттям і на лопатках з покриттям та без нього з ерозійним зносом пера, які пройшли випробування у складі двигуна із закиданням пилу в тракт. Закидання пилу в тракт двигуна здійснювалося під час його роботи на стенді протягом 7 циклів. Нанесення покриття нітриду титану здійснювалося методом вакуумної іонно-плазмової технології: у середовищі реактивного газу за допомогою катодної плями вакуумної дуги з подальшою конденсацією потоків газометалічної плазми на оброблювану поверхню. Випробування на втому проводилися на робочих лопатках різних ступенів компресора. Лопатки першої ступені компресора високого тиску з ерозійним зносом не випробовувалися. Випробування лопаток на втому проводилися за згинних коливань за основним тоном із симетричним циклом навантаження в умовах кімнатної температури за методом ступінчастої зміни напружень (метод «східців»). Базове число циклів навантаження становило 10^8 циклів та $2 \cdot 10^7$ циклів відповідно для титанових і лопаток із жароміцного сплаву на основі нікелю. Початковий рівень навантаження обирався для кожного ступеня окремо, виходячи з властивостей втоми. Наведено результати дослідження впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на властивості втоми робочих лопаток компресора. Визначено межі витривалості нових лопаток із покриттям та лопаток із ерозійним зносом від напрацювання, як з покриттям, так і без нього, для ймовірності неруйнування $P=0,9$.

Ключові слова: Випробування на втому, робоча лопатка компресора, покриття нітриду титану, ерозійний знос, напруження, межа витривалості.

Постановка проблеми. Газотурбінні двигуни (ГТД) під час роботи вертольота постійно зазнають впливу зважених частинок, таких як пил, пісок, вулканічний попіл, що знаходяться в повітрі та спричиняють ерозію. Цей вплив посилюється під час зльоту та посадки, особливо на непідготовлених майданчиках або під час роботи в пустелі. Потрапляння абразивних частинок у повітряний тракт спричиняє інтенсивне ерозійне зношування елементів проточної частини.

Ерозія є особливо шкідливою для компресора двигуна, оскільки це призводить до:

- зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) та помпажу;
- зменшення терміну служби;
- підвищення витрати палива;
- зниження показників надійності двигунів.

Аналіз відмов авіаційних двигунів показує, що ерозійне руйнування є однією з основних причин передчасного знімання двигунів з експлуатації [1]. Більше того, ерозійний знос є потужним концентратором напружень, що спричиняє зниження опору втомі. Згідно зі статистичними даними, до 60 % поломок лопаток компресорів ГТД мають саме втомний

характер, часто ініційований ерозійними пошкодженнями [2, 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Надійність у роботі лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) значною мірою залежить від того, наскільки їхня поверхня здатна витримувати дію високих температур у окисному середовищі [4, 5], адже саме поверхневі зони найчастіше стають осередком початку руйнування турбінних лопаток. Для захисту проточної частини та підвищення ресурсу лопаток широкого розповсюдження набули методи інженерії поверхні. Одним із головних способів підвищення їхньої стійкості до різновидів гарячої корозії є нанесення захисних покриттів, зокрема ерозійностійких [6]. Тому довговічність і надійні експлуатаційні властивості таких покриттів прямо впливають на тривалість служби елементів двигуна [7, 8].

Науковці Національного університету «Запорізька політехніка», зокрема разом із представниками АО «Мотор Січ» тривалий час працюють над створенням покриттів для лопаток ГТД. Так в роботах [9, 10] вивчено покриття, нанесені на лопатки турбін методом іонно-плазмового осадження з використанням трубних катодів сплаву Ni - Cr - Al - Y, виготовленні методами гранульної металургії та за допомогою електронно-променевого переплаву. В результаті [11] отримано патент на склад сплаву для нанесення покриття, що дозволяє одержувати рівноважну структуру та високі жароміцність та довговічність.

Серед матеріалів покриттів особливе місце займає нітрид титану (TiN), який розглядається як класичне «покриття першого покоління» для захисту від твердочастинкової ерозії. Численні дослідження підтверджують ефективність TiN покриттів, нанесених методами фізичного осадження з парової фази (PVD), зокрема вакуумно-дуговим методом. У роботі [12, 13] зазначено, що лопатки з покриттям TiN демонструють значно вищий опір ерозії порівняно з незахищеними титановими сплавами, особливо за малих кутів атаки абразивних частинок.

Авторами [14] досліджено елементний склад, механічні властивості та структуру Ti-Cr-N-покриттів, осаджених у широкому діапазоні тисків азоту з потоків нефільтрованої та фільтрованої вакуумно-дугової плазми сплавних катодів Ti-Cr, що містять 23 та 32 ваг.% Cr. Отримано наноструктурні Ti-Cr-N-покриття з високими механічними характеристиками ($H_m \sim 35$ ГПа), що містять ~ 20 ваг.% Cr, які можуть бути використані для захисту матеріалів.

В роботі [15] проведено огляд досліджень по впливу технологічних умов осадження та структурних особливостей вакуумно-дугових покриттів на основі TiN на їх стійкість до кавітаційної ерозії. Досліджено багатошарові покриття Ti-TiN з різною кількістю та співвідношенням товщини шарів, які можна використовувати для захисту титанового сплаву Ti-6Al-4V.

Однак впровадження твердих зносостійких покриттів пов'язане з ризиком зниження втомної міцності основного матеріалу. Як зазначається у дослідженнях [16], нанесення твердих покриттів може призводити до виникнення залишкових напружень розтягування на межі «покриття-основа» або ініціювати зародження втомних тріщин через крихкість самого покриття. Наприклад, експериментальні дані для титанового сплаву TC4 [17] показали, що нанесення TiN може незначно знижувати границю витривалості при випробуваннях на багатоциклову втому (з 530,5 МПа до 529,2 МПа), а використання багатошарових систем типу TiN/Ti може призвести до ще більшого падіння втомних характеристик.

Водночас інші джерела [18] вказують на можливість збереження або навіть підвищення втомної міцності за рахунок оптимізації технології нанесення, створення сприятливих напружень стиснення у поверхневому шарі та використання наноструктурних композицій. Українські вчені також активно розвивають цей напрям, пропонуючи багатошарові покриття (наприклад, системи «Авініт»), які поєднують високу твердість із тріщиностійкістю [19].

Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання сумісного впливу ерозійного зносу та наявності покриття TiN на втому лопаток залишається недостатньо вивченим. Більшість

Ремонт та відновлення деталей машин

праць зосереджені або окремо на ерозійній стійкості, або на втомній міцності нових лопаток без урахування їх деградації в процесі експлуатації.

З огляду на актуальність проблеми, метою цієї роботи є визначення впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування.

Мета досліджень. Метою цієї роботи є визначення впливу ерозійностійкого покриття нітриду титану на втомну міцність робочих лопаток компресора двигуна Д-136 як у вихідному стані, так і після ерозійного зношування.

Основний матеріал дослідження. Випробування на втому проводилися на нових лопатках з покриттям і на лопатках з покриттям та без нього з ерозійним зносом пера, які пройшли випробування у складі двигуна із закиданням пилу в тракт. Закидання пилу в тракт двигуна здійснювалося під час його роботи на стенді протягом 7 циклів. Загальна маса пилу склала 57,2 кг.

Нанесення покриття нітриду титану здійснювалося методом вакуумної іонно-плазмової технології: у середовищі реактивного газу за допомогою катодної плями вакуумної дуги з подальшою конденсацією потоків газометалічної плазми на оброблювану поверхню.

Випробування на втому проводилися на робочих лопатках різних ступенів компресора. Дані щодо робочих лопаток компресора низького тиску (КНТ) та компресора високого тиску (КВТ) наведено в таблиці 1. Лопатки 1-го ступеня КВТ з ерозійним зносом (з покриттям і без покриття) не випробовувалися.

Таблиця 1 – Матеріал лопаток досліджуваних ступенів компресора

Ступінь компресора	Матеріал лопатки	σ_{-1} , кгс/мм ²
6 ступінь КНТ	ВТЗ-1	≥40
1 та 5 ступені КВТ	ВТ8	
7 ступінь КВТ	ХН77ТЮР	≥31

Для контролю рівня динамічних напружень під час випробувань на втому лопатки препарували дрітряними тензорезисторами з базою 5 мм відповідно до схеми, наведеної на рисунку 1. Розміри розміщення контрольного тензорезистора наведено в таблиці 2.

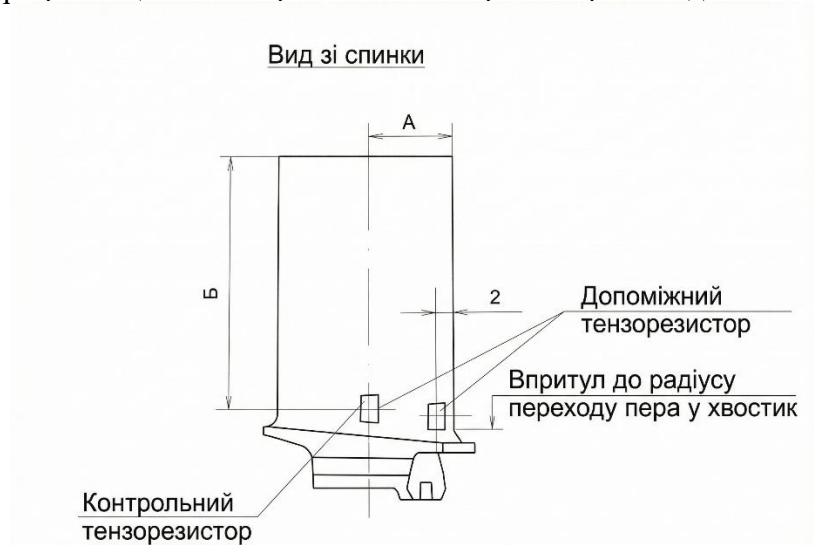


Рисунок 1 – Схема препарування лопаток для випробувань на втому

Таблиця 2 – Розміри для препарування контрольного тензорезистора

Ступінь компресора	А, мм	Б, мм
6 ступінь КНТ	9	41
1 ступінь КВТ	9	39,5
5 ступінь КВТ	7,5	19
7 ступінь КВТ	6,5	16

Випробування лопаток на втому проводилися за згинних коливань за основним тоном (перша згинна форма) із симетричним циклом навантаження в умовах кімнатної температури за методом ступінчастої зміни напружень (метод «східців»).

Базове число циклів навантаження становило:

– для титанових лопаток – $N = 10^8$ циклів;

– для лопаток із жароміцного сплаву на основі нікелю – $N = 2 \cdot 10^7$ циклів.

Початковий рівень навантаження обирався для кожного ступеня окремо, виходячи з властивостей втоми.

Обробку результатів випробувань та обчислення значень середньої межі витривалості $\bar{\sigma}_{-1}$ і її середньоквадратичного відхилення $S_{\sigma_{-1}}$ виконано за формулами:

$$\bar{\sigma}_{-1} = \sigma_0 + d \left(\frac{A}{R} - 0,5 \right), \quad (1)$$

$$S_{\sigma_{-1}} = 1,62 \cdot d \cdot \left(\frac{R \cdot B - A^2}{R^2} + 0,029 \right), \quad (2)$$

де σ_0 – нижній рівень навантаження на діаграмі втоми, на якому немає руйнувань;

R – загальна кількість руйнувань лопаток у партії $R = \sum_{i=0}^n r_i$;

$A = \sum_{i=0}^n r_i \cdot i$; $B = \sum_{i=0}^n r_i \cdot i^2$;

r_i – кількість руйнувань на i -му рівні навантаження;

i – номер рівня ($i = 0; 1; 2 \dots n$);

d – крок зміни напружень між рівнями навантаження.

Межі витривалості, отримані під час випробувань досліджуваних лопаток для ймовірності неруйнування $P = 0,5$, були перераховані на ймовірність неруйнування $P = 0,9$ за формулою:

$$\sigma_{-1(P=0,9)} = \bar{\sigma}_{-1(P=0,5)} - z_{P1} \cdot S_{\sigma_{-1}}, \quad (3)$$

де z_{P1} – квантиль нормального ймовірнісного розподілу для $P = 0,9$; $z_{P1} = 1,2815$.

Результати математичної обробки результатів цих випробувань для лопаток 6-го ступеня КНТ наведено на рисунку 2.

Ремонт та відновлення деталей машин

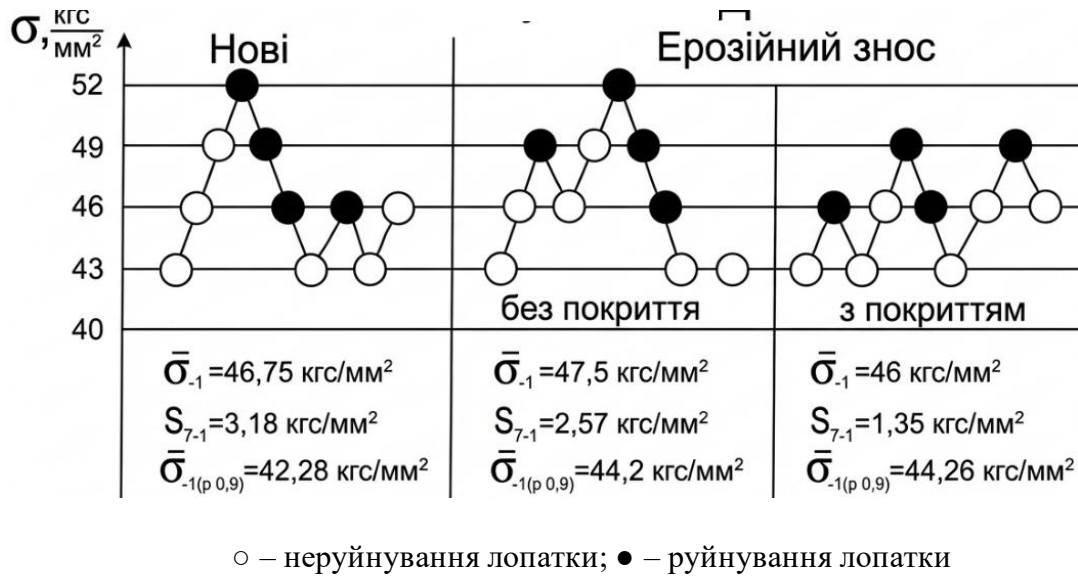


Рисунок 2 – Діаграми «східці» за результатами випробувань на втому лопаток 6-го ступеня КНТ

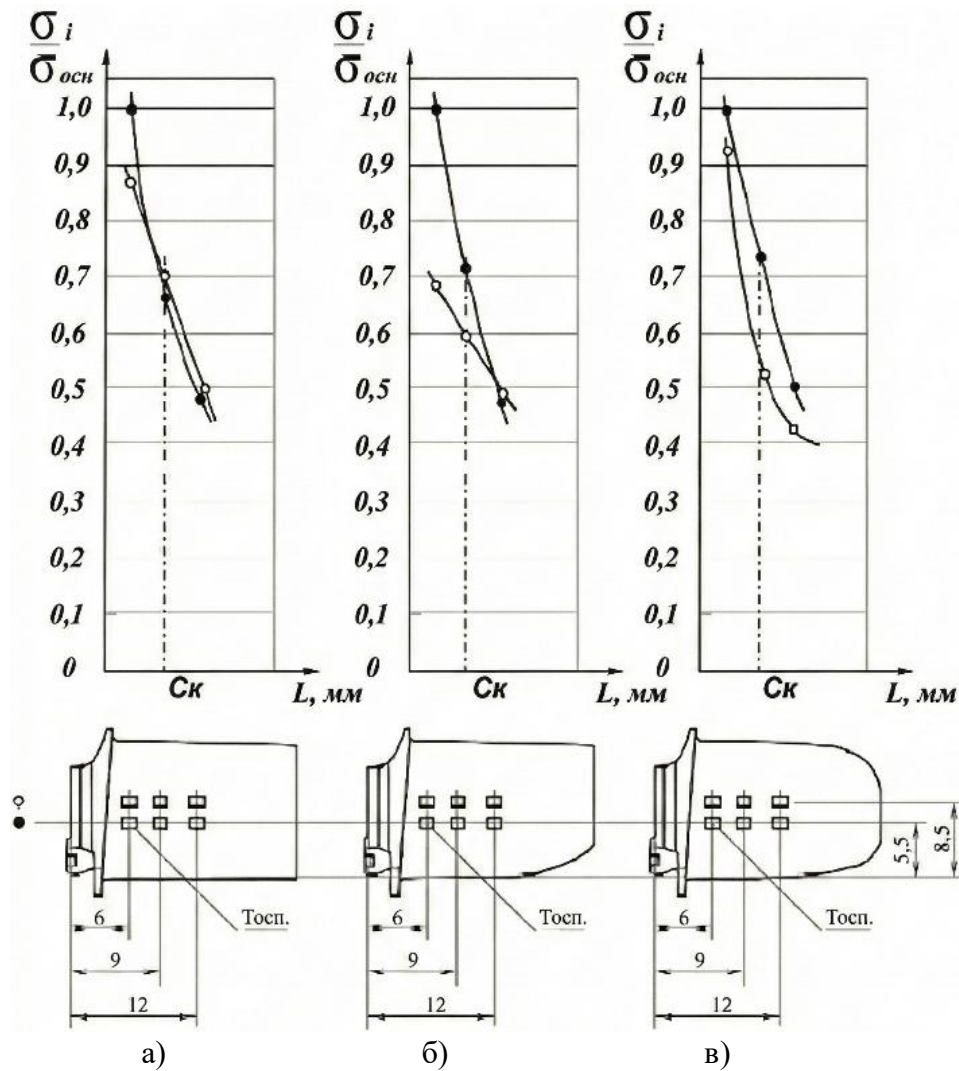
Аналіз результатів випробувань нових лопаток усіх досліджених ступенів показує, що нанесення даного покриття практично не впливає на їхні властивості втомі, оскільки отримані межі витривалості не нижчі за необхідні значення.

Значення меж витривалості нових лопаток із покриттям та лопаток із ерозійним зносом від напрацювання (з покриттям та без покриття) для ймовірності неруйнування $P = 0,9$ за результатами випробувань наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Межі витривалості досліджуваних лопаток

Ступінь компресора	Межі витривалості лопаток σ_{-1} , кгс/мм ²		
	нових з покриттям	з покриттям і ерозійним зносом від напрацювання	без покриття і ерозійним зносом від напрацювання
6 ступінь КНТ	42,28	44,26	44,2
1 ступінь КВТ	42,72	—	—
5 ступінь КВТ	41,26	42,28	42,9
7 ступінь КВТ	36,4	25,92	16,6

Ремонт та відновлення деталей машин



Т_{осп.} – основний тензорезистор;
С_к – переріз для контролю напружень під час випробування

Рисунок 3 – Розподіл напружень для лопаток 7-го ступені КВТ: а) – нових; б) – з напрацюванням та покриттям; в) – з напрацюванням без покриття

Аналіз результатів випробувань лопаток з ерозійним зносом показує, що дане покриття не знижує властивості втоми пера лопаток порівняно з лопатками без покриття.

Зниження властивостей втоми лопаток 7-го ступеня КВТ з ерозійним зносом нижче необхідних значень пояснюється значною чутливістю матеріалу лопаток до концентрації напружень (чутливість до надрізу), тобто є наслідком появи на пері лопаток внаслідок зносу від випробувань великої кількості рисок-концентраторів.

Визначення чутливості до надрізу, проведене на круглих штампованих зразках (гладких та з надрізом радіусом $r_n = 0,75$ мм), показало за бази випробувань $N = 2 \times 10^7$ циклів такі межі витривалості:

- σ_{-1} (гладких) = 34 кгс/мм²;
- σ_{-1} (надріз) = 20 кгс/мм².

При теоретичному коефіцієнті концентрації напружень $\alpha_\sigma = 1,89$ ефективний коефіцієнт концентрації напружень склав $K_\sigma = 1,7$, а коефіцієнт чутливості до надрізу

$q = 0,785$, що підтверджує високу чутливість матеріалу ХН77ТЮР (лопатки 7-го ступеня КВТ) до концентрації напружень [20].

Для виявлення можливого перерозподілу напружень (внаслідок зміни геометрії пера лопаток від ерозійного зносу) від місця, де вони задаються і контролюються, до місця руйнування лопаток (радіус переходу пера у хвостик), було проведено дослідження розподілу напружень на лопатках 7-го ступеня КВТ за допомогою тензорезисторів з базою 1 мм (рис. 3).

Дослідження розподілу напружень на нових лопатках та лопатках з ерозійним зносом не виявило перерозподілу напружень, здатного вплинути на точність задання напружень, що підтверджує зниження властивостей втоми внаслідок впливу концентрації напружень.

Загальний аналіз результатів випробувань показує, що нанесення на перо лопаток покриття нітриду титану не погіршує їхніх властивостей втоми, визначених під час випробування за першою згинною формою коливань.

ВИСНОВКИ

1. Нанесення ерозійностійкого покриття нітриду титану на перо лопаток 6-го ступеня КНТ, а також 1-го, 5-го та 7-го ступенів КВТ двигуна Д-136 не погіршує властивостей втоми нових лопаток. Межі витривалості лопаток зазначених ступенів, визначені під час випробувань за першою згинною формою коливань, відповідають вимогам.

2. Випробування на втому лопаток із покриттям нітриду титану та ерозійним зносом пера, отриманим внаслідок закидання пилу в тракт двигуна Д-136 під час його роботи на стенді, засвідчили захисну роль покриття.

Список використаних джерел

1. *Hamed A. Erosion and Deposition in Turbomachinery / A. Hamed, W. Tabakoff, R. Wenglarz // Journal of Propulsion and Power. – 2006. – Vol. 22, No. 2. – P. 350–360.*
2. Конструкція авіаційних двигунів : підручник / [В. В. Панін, Ю. М. Терещенко, І. О. Логвіненко та ін.] ; за ред. В. В. Паніна. – Київ : НАУ, 2012. – 420 с.
3. *Терещенко Ю.М. Теорія теплових двигунів. Двигуни силових установок безпілотних літальних апаратів / Ю.М. Терещенко, М.М. Мітрахович, В.О. Богуслаєв, І.Ф. Кравченко, Ю.Ю. // Навчальний посібник. — Запоріжжя: Мотор Січ, 2021. — 206 с.*
4. *Nicholls J.R. Advances in coating design for high performance gas turbines / J.R. Nicholls // MRS Bull. 2003. №28. P. 659-670.*
5. *Nicholls J.R. Designing oxidation-resistant coatings / J.R. Nicholls // JOM-J. Min. Met. Mat. S. 2000. №52. P. 28-35.*
6. *Alqallaf, J.; Ali, N.; Teixeira, J.A.; Addali, A. Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades—A Review. Processes 2020, 8, 984. <https://doi.org/10.3390/pr8080984>*
7. *Bose S. High Temperature Coatings / S. Bose // Butterworth-Heinemann, Oxford, 2007. - 299 p.*
8. *Reed R.C. The Superalloys Fundamentals and Applications / R.C. Reed // Cambridge, New York, 2006. 363 p.*
9. *Єфанов В. С. Вплив технології виготовлення випаровуваних катодів на якість іонно-плазмових покриттів лопаток турбін / В. С. Єфанов, О. О. Педаш, І. А. Петрик, В. В. Клочихин, Р. Ю. Фетісов, Г. М. Лантєва // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2021. - № 6. - С. 31–38. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2021_6_6*
10. *Yefanov V.S. Electrolyte-plasma processing of turbine blades for heat-resistant coating*

removal / V.S. Yefanov, A.V. Ovchinnikov, I.A. Petrik, A.A. Mylenko // Технологические системы. 2018. №2. С. 59-65.

11. Склад сплаву для нанесення покриття Пат. 124695 UA, МПК C22C 19/05, C23C 30/00, C23C 14/14 . / Овчинников О. В.; Єфанов В. С. Капустян О. Є. № u202005296; заявл. 17.08.2020; опубл. 27.10.2021, Бюл. № 43

12. Tabakoff W. Surface protection from erosion in turbomachinery / W. Tabakoff // Wear. – 1995. – Vol. 186-187, Part 1. – P. 224–229.

13. Alqallaf, J.; Teixeira, J.A. Quantifying the Economic Benefits of Using Erosion Protective Coatings in a Low-Pressure Compressor (Aero-Engine): A Case Study Evaluation. / J. Alqallaf; J.A. Teixeira // Processes 2022, 10, 385. <https://doi.org/10.3390/pr10020385>

14. Zadneprovskiy Yu A. Mechanical characteristics and structure of vacuum arc Ti-Cr-N coatings [Електронний ресурс] / Yu A. Zadneprovskiy, V.A. Bilous, V.S. Goltvyanytsya, E.N. Reshetnyak, A.A. Komar // Problems of Atomic Science and Technology. – 2025. – С. 114–121. – Режим доступу: <https://doi.org/10.46813/2025-156-114>.

15. Klimenko I. O. Cavitation erosion resistance of vacuum-arc coatings based on TiN / I. O. Klimenko, V. G. Marinin, V. A. Belous, N. A. Azarenkov, M. G. Ishchenko, V. S. Goltvyanytsya, A. S. Kuprin // Problems of Atomic Science and Technology 2023. – 147(5). – 126-136 DOI: 10.46813/2023-147-126

16. Baragetti S. Fatigue behavior and FEM modeling of thin-coated components/ S. Baragetti, G.M. La Vecchia, A. Terranova // International Journal of Fatigue. 2003. – Volume 25, Issues 9–11, – p. 1229-1238. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2003.08.009>

17. Cao Z. Effect of anti-erosion coatings on fatigue performance of titanium alloys in compressor blades / Z. Cao, Y. Chai, G. He, Z. Zhang, P. Li, X. Zha // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19): 429930. <https://doi.org/10.7527/S1000-6893.2024.29930>.

18. Соболев, О. В. The laws of structure formation in vacuum-arc deposition multilayer TiN-MoN nanostructured coatings / О. В. Соболев, А. А. Андреев, С. Н., Горбань, В. Ф., В. А. Столбовой, И. В. Сердюк, В. Е. Фильчиков // Eastern- Григорьев European Journal of Enterprise Technologies, 2012. - 6(5(54), 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2011.2270>.

19. Sagalovych O. Vacuum plasma erosion resistant 2D nanocomposite coating Avinit for compressor blades of gas turbine engines of aircraft engines / O. Sagalovych, V. Popov, O. Kononyhin, V. Sagalovych, S. Dudnik, and O. Prokopenko // Mech. Adv. Technol., 2023. - vol. 7, no. 1 (97), pp. 7–15. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.1.264788>

20. Попович В. В. Матеріалознавство : підручник / В. В. Попович. – Львів : Світ, 2018. – 592 с.

Babenko O. M., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TITANIUM NITRIDE COATING ON THE FATIGUE STRENGTH OF COMPRESSOR BLADES

The article is devoted to the current problems of failures of compressor blades of gas turbine engines due to the fatigue nature of the destruction, initiated by erosion damage by suspended particles of dust, sand, volcanic ash in the air. The main attention is paid to determining the influence of erosion-resistant titanium nitride coating on the fatigue strength of the working blades of the compressor of the D-136 engine both in the initial state and after erosion wear. Fatigue tests were carried out on new blades with a coating and on blades with and without a coating with erosion wear of the feather, which were tested as part of the engine with dust thrown into the tract. Dust was thrown into the engine tract during its operation on the stand for 7 cycles. The titanium nitride coating was applied by vacuum ion-plasma technology: in a reactive gas environment using a cathode spot of a

vacuum arc with subsequent condensation of gas-metal plasma flows on the treated surface. Fatigue tests were performed on the blades of different stages of the compressor. The blades of the first stage of the high-pressure compressor with erosive wear were not tested. Fatigue tests of the blades were performed under bending vibrations according to the fundamental tone with a symmetric loading cycle at room temperature using the step stress method (the “step” method). The basic number of loading cycles was 108 cycles and $2 \cdot 10^7$ cycles, respectively, for titanium and nickel-based heat-resistant alloy blades. The initial load level was selected for each stage separately, based on the fatigue properties. The results of the study of the influence of the erosion-resistant titanium nitride coating on the fatigue properties of the compressor blades are presented. The endurance limits of new blades with coating and blades with an erosive wear after operating with and without coating for probability of non-destruction $P = 0,9$ were determined.

Keywords: *Fatigue tests, compressor working blade, titanium nitride coating, erosive wear, tension, endurance limit.*

Стаття надійшла 11.12.2025 р.

ГРАДІЄНТИ ВЕКТОРІВ НАПРУЖЕНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОГО І МАГНІТНОГО ПОЛІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ ДИПОЛЯ ГЕРЦА НА КІНЦЕВІЙ ВІДСТАНІ

Стаття присвячена комплексному аналізу просторової структури електромагнітного поля, що випромінюється диполем Герца, який традиційно використовується як базова модель для дослідження природних і техногенних джерел електромагнітних хвиль у довгохвильовому діапазоні. Актуальність роботи визначається необхідністю глибшого розуміння процесів випромінювання у ближній та проміжній зонах, де електромагнітне поле має складну амплітудно-фазову структуру та відхиляється від асимптотичних закономірностей дальньої зони. На основі класичних виразів для компонент поля диполя Герца отримано аналітичні співвідношення для градієнтів амплітуд і фаз електричних та магнітних складових, нормованих до довжини хвилі. Показано, що всі характеристики поля — модулі компонент, різниця фаз, хвильовий опір, фазові швидкості та їх градієнти — визначаються лише відносною відстанню r/λ . Це дозволяє встановити універсальні закономірності зміни структури хвильового процесу в околі диполя. Проведено чисельне моделювання, яке дає змогу простежити поведінку поперечних компонент та їх градієнтів, а також градієнтів різниці фаз у перехідних зонах. Виявлено характерні межі ближньої, проміжної та дальньої зон, що узгоджуються з теоретичними результатами попередніх досліджень. Показано, що градієнти амплітуд у ближній зоні досягають максимальних значень, різко зменшуючись у напрямку дальньої зони, тоді як фазові характеристики демонструють складну нелінійну поведінку. Особливу увагу приділено аналізу фазових швидкостей ортогональних компонент поля. Встановлено, що фазова швидкість електричної компоненти досягає швидкості світла на певній відстані $r/\lambda \approx 0.15$, тоді як у ближчій області вона є меншою. Фазова швидкість магнітної компоненти зростає при наближенні до джерела. Отримані результати поглиблюють сучасне розуміння фізики електромагнітних хвиль у неасимптотичних зонах та можуть бути використані при моделюванні випромінювання блискавок, високовольтних комутаційних розрядів та інших імпульсних джерел.

Ключові слова: Електромагнітне поле, напруженість, ближня та проміжна області випромінювання

Постановка проблеми. Для вивчення фізичних процесів випромінювання електромагнітних хвиль природними джерелами, наприклад, грозових розрядів, розрядів у високовольтних лініях електропередачі, розрядів індустриального походження, наприклад, у процесі експлуатації електротранспорту та інше, в діапазонах довгих хвиль як математичну модель опису цих процесів застосовна теорія випромінювання диполя Герца. Характер хвильових процесів випромінювання диполя Герца в його ближній, проміжній та дальній зонах випромінювання добре вивчений [1-4]. У [5] розраховані зміни амплітуд і фаз компонент векторів напруженості електричного та магнітного полів залежно від відстані до точки спостереження, нормованого до довжини хвилі. Розглянуто також різницю фаз поперечних компонентів векторів напруженості електричного та магнітного полів. Ці дані можна використовувати для аналізу процесів випромінювання різних джерел електромагнітних полів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Диполь Герца [6] визначається як

електрично-коротка і нескінченно тонка пряма нитка струму, в якій щільність струму рівномірна по всій його довжині. Диполь Герца зазвичай використовується як «будівельний блок» для побудови фізично реалізованих розподілів струму, що демонструються такими пристроями, як дротяні антени [7-9]. Метод полягає в моделюванні цих відносно складних розподілів струму як суми диполів Герца, що зводить проблему до проблеми підсумовування внесків окремих диполів Герца, причому кожен диполь Герца має відповідне (тобто різне) положення, величину та фазу [10].

В роботі [11] методом векторного потенціалу у часовому просторі одержані уточнені вирази для усіх компонентів ближнього поля диполя Герца, що збуджується струмом із довільною часовою залежністю. Для випадку скачкоподібного збуджуючого струму побудовані часові залежності векторного потенціалу від координат точки спостереження поблизу випромінювача для класичних, уточнених і точних виразів у вигляді квадратур, що розраховані чисельно.

У дисертаційній роботі [12] розв'язано наукову задачу розвитку теорії електромагнітних хвиль та коливань у ближній і проміжній зонах випромінювачів, які збуджуються хвилею змінного струму. При цьому отримані наступні результати. Розв'язано нову фундаментальну задачу радіофізики визначення випромінювання криволінійного диполя Герца, який є елементом дуги кола довільного радіуса, в ближній, проміжній та дальній зонах спостереження.

Показано, що електромагнітна хвиля диполя Герца рухається зі швидкістю світла c лише на великих відстанях від джерела випромінювання, наближаючись до c асимптотично. Отримані результати проливають світло на фізичні процеси поблизу диполя Герца.

В роботах Найдено В. І. [13-15] шляхом аналізу руху каузальних і екстремальних поверхонь виконано аналіз швидкості вектору Пойнтінга і густини енергії електромагнітних хвиль, випромінених диполем Герца, збудженим імпульсом Гауса. Дослідження цих характеристик відкриває можливості визначення швидкості окремих частин імпульсів, наприклад, схилів, а не тільки каузальних поверхонь. Спираючись на відсутність передачі енергії через каузальну поверхню, сформульовано математично підтверджений погляд на звуження або розширення імпульсу, зміну його форми, співвідношення швидкості частин імпульсу зі швидкістю світла c . Показано, що електромагнітна хвиля диполя Герца рухається зі швидкістю світла c лише на великих відстанях від джерела випромінювання, наближаючись до c асимптотично. Це дослідження дає право говорити, що «швидкість світла c — є швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі на далеких відстанях від джерела випромінювання. Ця добавка «на далеких відстанях від джерела випромінювання» не важлива на світлових хвилях з довжиною хвилі в мікрометри, але є важливою з природної і понятійної точок зору і на радіохвилях. Отримані результати проливають світло на фізичні процеси поблизу диполя Герца, які не мали пояснення через відсутність інформації про напрями і швидкості вектора Пойнтінга і густини енергії електромагнітних хвиль поблизу диполя.

Мета дослідження. Метою цієї статті є вивчення градієнтів амплітуд та фаз компонентів електричного та магнітного полів випромінювання диполя Герца залежно від координат точок спостереження.

Виклад основного матеріалу. Класична теорія електромагнітного поля при розрахунку диполя Герца довжиною l , що збуджується ефективним струмом I , який змінюється за гармонічним законом $e^{i\omega t}$ визначає вектори поля в залежності від довжини хвилі λ , відстані від випромінювача r до точки спостереження і кутової сферичної координати Θ .

Комплексні амплітуди компонентів векторів напруженості електричного та магнітного полів випромінювання диполя Герца напишемо аналогічно [5] у вигляді:

Енергетичні системи та обладнання

$$\underline{H}_\varphi = \frac{I \cdot l}{\lambda^2} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2} \cdot \sin \Theta \cdot e^{-i\Psi_{H_\varphi}} ; \quad (1)$$

$$\underline{E}_\Theta = \frac{I \cdot l \cdot z_0}{\lambda^2} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot r^4 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \cdot r^3} \cdot \sin \Theta \cdot e^{-i\Psi_{E_\Theta}} ; \quad (2)$$

$$\underline{E}_r = \frac{I \cdot l \cdot z_0}{\lambda^2} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \cdot r^3} \cdot \cos \Theta \cdot e^{-i\Psi_{E_r}} ; \quad (3)$$

$$\text{де } \Psi_{H_\varphi} = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} - \tan^{-1} \left(\frac{2\pi \cdot r}{\lambda} \right) \quad (4)$$

$$\Psi_{E_\Theta} = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} - \tan^{-1} \left(\frac{2\pi \cdot r}{\lambda} - \frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \right) ; \quad (5)$$

$$\Psi_{E_r} = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda} + \tan^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \right) . \quad (6)$$

Закономірності зміни амплітуд та фаз цих компонентів залежно від відстані до точки спостереження, нормованого до довжини хвилі, детально проаналізовані в [5] у випадку, коли довжина хвилі включена до множників, що нормують:

$$E_{\Theta 0} = E_{r0} = \frac{I \cdot l \cdot z_0}{\lambda^2} ;$$

$$H_{\varphi 0} = \frac{I \cdot l}{\lambda^2} .$$

Нормовані до цих множників модулі компонентів поля можна записати у вигляді:

$$\frac{|\underline{H}_\varphi|}{H_{\varphi 0}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2} \cdot \sin \Theta ; \quad (7)$$

$$\frac{|\underline{E}_\Theta|}{E_{\Theta 0}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^4 \cdot r^4 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \cdot r^3} \cdot \sin \Theta ; \quad (8)$$

$$\frac{|\underline{E}_r|}{E_{r0}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot r^2 + 1}}{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^3 \cdot r^3} \cdot \cos \Theta . \quad (9)$$

Енергетичні системи та обладнання

Перейдемо до аналізу градієнтів амплітуд та фаз ортогональних компонентів електромагнітного поля випромінювання диполя Герца. Диференціювавши вирази (7)...(9) по змінній r/λ , отримаємо вирази для градієнтів модулів векторів поля:

$$\text{grad}_{(r/\lambda)} \left(\frac{|H_\varphi|}{H_{\varphi 0}} \right) = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 2}{4\pi \cdot \left(\frac{r}{\lambda} \right)^3 \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 1}} \sin \Theta ; \quad (10)$$

$$\text{grad}_{(r/\lambda)} \left(\frac{|E_\Theta|}{E_{\Theta 0}} \right) = \frac{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \cdot r^4 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 3}{8\pi^2 \cdot \left(\frac{r}{\lambda} \right)^4 \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \cdot r^4 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 1}} \sin \Theta ; \quad (11)$$

$$\text{grad}_{(r/\lambda)} \left(\frac{|E_r|}{E_{r0}} \right) = \frac{2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 3}{4\pi^2 \cdot \left(\frac{r}{\lambda} \right)^4 \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot r^2 + 1}} \cos \Theta ; \quad (12)$$

Різниця фаз ортогональних компонентів електричного та магнітного полів, як і межі ближньої та дальньої зони випромінювання диполя Герца, залежать тільки від відношення r/λ [12]:

$$\Psi_{E_\Theta} - \Psi_{H_\varphi} = \tan^{-1}(kr) - \tan^{-1} \left(kr - \frac{1}{kr} \right), \quad (13)$$

А градієнт цієї функції буде

$$\text{grad}_{(r/\lambda)} \left(\frac{|H_\varphi|}{H_{\varphi 0}} \right) = 2\pi \cdot \frac{3k^2 r^2}{k^6 r^6 + 1}, \quad (14)$$

де $k=2\pi/\lambda$ – хвильове число.

Відношення E_Θ/H_φ , що має фізичний зміст хвильового опору простору, визначається лише відносною відстанню r/λ .

Нормоване до хвильового опору вільного простору дальньої зони випромінювання це співвідношення набуває вигляду:

$$\frac{Z_B}{Z_0} = \frac{1}{120\pi} \cdot \frac{\sqrt{k^4 r^4 - k^2 r^2 + 1}}{kr \cdot \sqrt{k^2 r^2 + 1}}. \quad (15)$$

Градієнт цього відношення:

$$\text{grad}_{(r/\lambda)} \left(\frac{Z_B}{Z_0} \right) = \frac{2\pi}{120\pi} \cdot \frac{2k^4 r^4 - 2k^2 r^2 - 1}{k^2 r^2 \cdot (k^2 r^2 + 1) \cdot \sqrt{k^6 r^6 + 1}}. \quad (16)$$

Зміна фазових швидкостей електричних і магнітних компонентів поля, нормованих до швидкості світла, детально проаналізовано в [12]. Їхні градієнти по змінній r/λ :

$$\text{grad}_{\left(\frac{r}{\lambda}\right)} \left(\frac{V_{\varphi H\varphi}}{c} \right) = 2\pi \frac{kr - (k^2 r^2 + 1) \cdot \tan^{-1}(kr)}{(k^2 r^2 + 1) \cdot [kr - \tan^{-1}(kr)]^2}. \quad (17)$$

$$\text{grad}_{\left(\frac{r}{\lambda}\right)} \left(\frac{V_{\varphi E_{\theta}}}{c} \right) = 2\pi \frac{kr(k^2 r^2 + 1)^2 - (k^6 r^6 + 1) \cdot \tan^{-1} \left(kr - \frac{1}{kr} \right)}{(k^6 r^6 + 1) \cdot \left[kr - \tan^{-1} \left(kr - \frac{1}{kr} \right) \right]^2}. \quad (18)$$

Отримані співвідношення дозволяють досліджувати загальні закономірності зміни характеристик полів випромінювання та його градієнтів залежно від відстані від диполя до точки спостереження.

Для аналізу закономірностей зміни фізичних характеристик електромагнітного випромінювання диполя Герца – амплітуд, фаз, фазових швидкостей компонент поля – залежно від відстані, нормованої до довжини хвилі, було складено комп'ютерні програми та проведено відповідні розрахунки. На рис.1 наведено залежності відносних амплітуд поперечних компонент E і H і градієнтів цих величин залежно від відстані до точки спостереження. Розрахунки проведені для напрямку, що є перпендикулярним до диполю.

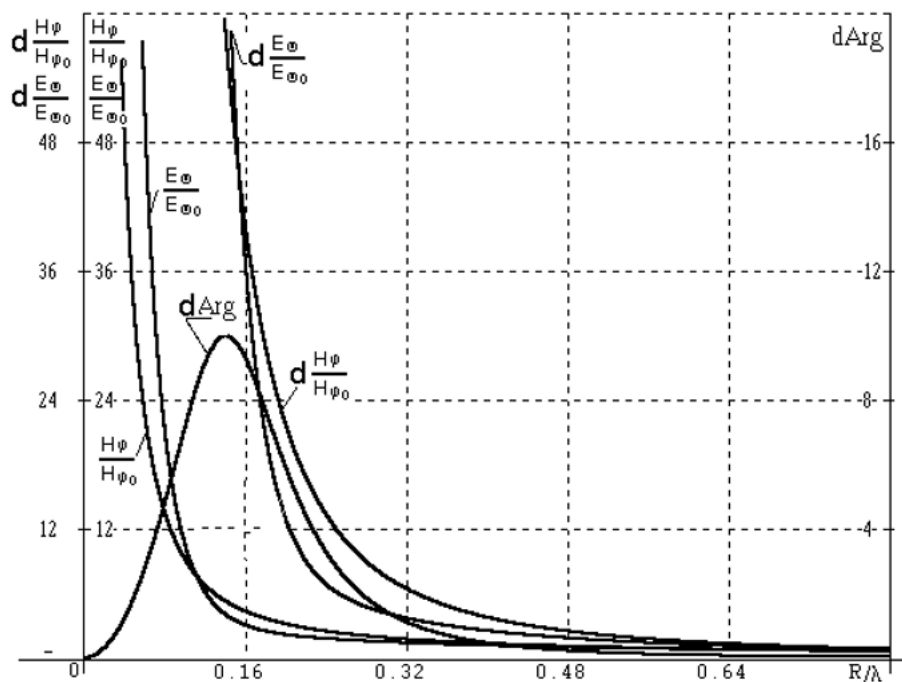


Рисунок 1 – Залежність відносних амплітуд поперечних компонентів ($E_{\theta} / E_{\theta 0}$, $H_{\varphi} / H_{\varphi 0}$), градієнта різниці фаз цих векторів ($d\text{Arg}$), їх градієнтів ($d(E_{\theta} / E_{\theta 0})$, $d(H_{\varphi} / H_{\varphi 0})$) від відношення r/λ

Також наведено градієнт різниці фаз ортогональних компонентів електричного і магнітного полів випромінювання диполя Герца в напрямку головного максимуму випромінювання залежно від відношення r/λ . Видно, що на відстані довжини хвилі $r/\lambda \approx 0.04$, що визначається у [12] як межа ближньої зони, градієнт різниці фаз становить ≈ 0.12 від свого максимального значення. Він досягає максимуму при $r/\lambda \approx 0.141$ і далі зменшується. При $r/\lambda \approx 0.62$, яка визначається у [12] як межа дальньої зони, градієнт різниці фаз зменшується до

≈ 0.008 свого максимуму.

Відносний модуль магнітної компоненти поля H_φ , нормований до $H_{\varphi 0}$ згідно (7), на межі ближньої та проміжної зон випромінювання становить ≈ 58.3 , а на межі проміжної та дальньої зон – ≈ 0.83 . У той самий час, градієнт нормованого модуля H_φ в цих же межах змінюється від 2488 до 1.43.

Модуль електричної компоненти поля E_θ , нормований до $E_{\theta 0}$ згідно з (8), на межі ближньої та проміжної зон випромінювання становить приблизно 192, а на межі проміжної та дальньої зон – приблизно 4.1. Градієнт нормованого модуля E_θ в цих же межах змінюється від $15 \cdot 10^3$ (при $r/\lambda \approx 0.04$) до 1.27 (при $r/\lambda \approx 0.62$).

На рис.2 наведено залежності фазових швидкостей та його градієнтів від відносної відстані до диполя. Фазова швидкість поперечної електричної компоненти при $r/\lambda \approx 0.15$ дорівнює швидкості світла, а при менших відстанях вона менша за швидкість світла. Градієнт цієї величини має два екстремуми: при $r/\lambda \approx 0.18$ і при $r/\lambda \approx 0.36$. Фазова швидкість магнітної компоненти та її градієнт зростають зі зменшення відстані до джерела.

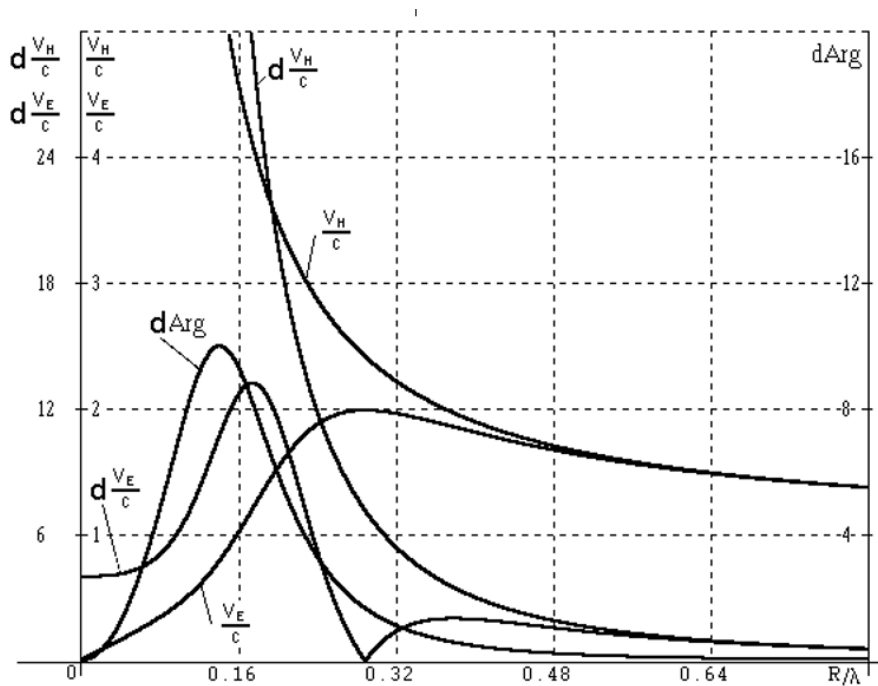


Рисунок 2 – Залежність фазових швидкостей магнітної (V_H/c) та електричної компоненти (V_E/c) та їх градієнти ($d(V_H/c)$, $d(V_E/c)$) у ближній та проміжній зонах випромінювання від відношення r/λ .

ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень показано, що відношення поперечних компонентів електричного і магнітного полів випромінювання диполя Герца, різниця їх фаз і фазових швидкостей, а також їх градієнтів, визначається тільки відношенням відстані від диполя до точки спостереження до довжини хвилі. Амплітуди компонентів, а також їх градієнти залежать не тільки від r/λ , але і від довжини хвилі, що увійшла до множника, що нормує. Відносна зміна градієнтів напруженостей поля у ближній та проміжній областях відбувається більш інтенсивною, ніж зміна амплітуд цих компонентів.

Список використаних джерел

1. Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле/ за ред. проф. Ю. О. Карпова – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2017. – 338 с. ISBN 978-966-289-006-8.
2. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. / J. C. Maxwell // Cambridge: Cambridge University Press, 2010, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511709333>.
3. Schantz H. G. The flow of electromagnetic energy around electric dipole / H. G. Schantz // *Am. J. Phys.*, vol. 63, no. 6, pp. 513–520, 1995.
4. Schantz H. G. “Electromagnetic energy around Hertzian dipoles / H. G. Schantz // *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 50–62, 2001, doi: <https://doi.org/10.1109/74.924604>.
5. Горобець М.М. Градієнти напруженості полів випромінювання / М.М. Горобець // Збірник наукових праць III Республіканської науково-технічної конференції "Методи і засоби вимірювань у галузі електромагнітної сумісності".– Вінниця: МНІП ТЕДЕМС ВПІ, 1991.– Вип.2.– С. 95 – 100.
6. Hertz H. *Of Finite Velocity of Propagation of Electromagnetic Action*. Sitzungsber: D. Berl. Akad. D. Wiss., 1888.
7. Balanis C. A. *Antenna Theory: Analysis and Design*. / C. A. Balanis // New Jersey: Wiley, 2016. – 1104 p. <https://www.wiley.com/en-us/Antenna+Theory%3A+Analysis+and+Design%2C+4th+Edition-p-9781118642061>.
8. Nepa P. Near-field-focused microwave antennas: Near-field shaping and implementation / P. Nepa, A. Buffi // *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2017, vol. 59, no. 3, pp. 42–53. doi: <https://doi.org/10.1109/MAP.2017.2686118>.
9. Manteghi M. Fundamental limits, bandwidth, and information rate of electrically small antennas: Increasing the throughput of an antenna without violating the thermodynamic Q-factor / M. Manteghi // *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2019, vol. 61, no. 3, pp. 14–26. doi: <https://doi.org/10.1109/MAP.2019.2907892>.
10. Ellingson, Steven W. *Electromagnetics*, Blacksburg, VA: Virginia Tech Publishing. -2020. - Vol. 2. - 228 p. <https://doi.org/10.21061/electromagnetics-vol-2>.
11. Думин А.Н. Близьке нестационарне поле диполя Герца / А.Н. Думин, В.А. Плахтий, Я.С. Вольвач, О.А. Думина // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2014. № 24. С. 29-34.
12. Тривайло О. В. Хвильові процеси у ближній зоні випромінюючих систем, які збуджуються хвилею струму, що біжить : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук : 01.04.03 – "Радіофізика" / О. В.Тривайло ; Харк. нац. ун-т радіоелектроніки. – Х., 2012. – 23 с.
13. Naidenko V. I. Evolution of electromagnetic waves radiated by a Hertzian dipole / V. I. Naidenko // *VIII International Conference on Antenna Theory and Techniques*, 2011, pp. 63–68, doi: <https://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170714>.
14. Naidenko V. Velocity of the fields radiated Hertz dipole excited by Gaussian pulse / V. I. Naidenko // *IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*, 2020, pp. 154–160, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252662>.
15. Найденко В. І. Швидкість енергетичних характеристик електромагнітних хвиль, випромінених диполем Герца, збудженим імпульсом Гауса / В. І. Найденко // Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. - 2021. - 64(7), С. 411–421. <https://doi.org/10.20535/S0021347021070025>

Gorobets N.N., Romanichenko H.N., Kapustian O.Ye.

GRADIENTS OF TENSION VECTORS OF ELECTRICAL AND MAGNETIC FIELDS OF RADIATING DIPOLAR HERTZ ON END DISTANCE

The article is devoted to a comprehensive analysis of the spatial structure of the electromagnetic field emitted by a Hertzian dipole, which is traditionally used as a basic model for the study of natural and man-made sources of electromagnetic waves in the long-wavelength range. The relevance of the work is determined by the need for a deeper understanding of the radiation processes in the near and intermediate zones, where the electromagnetic field has a complex amplitude-phase structure and deviates from the asymptotic regularities of the far zone. Based on the classical expressions for the components of the Hertzian dipole field, analytical relations for the gradients of the amplitudes and phases of the electric and magnetic components normalized to the wavelength were obtained. It is shown that all the characteristics of the field — the moduli of the components, the phase difference, the wave impedance, the phase velocities and their gradients — are determined only by the relative distance r/λ . This allows us to establish universal regularities of the change in the structure of the wave process in the vicinity of the dipole. Numerical simulations have been performed, which allow us to trace the behavior of transverse components and their gradients, as well as phase difference gradients in the transition zones. Characteristic boundaries of the near, intermediate, and far zones have been identified, which are consistent with the theoretical results of previous studies. It has been shown that the amplitude gradients in the near zone reach maximum values, sharply decreasing towards the far zone, while the phase characteristics demonstrate complex nonlinear behavior. Special attention has been paid to the analysis of the phase velocities of orthogonal field components. It has been established that the phase velocity of the electric component reaches the speed of light at a certain distance $r/\lambda \approx 0.15$, while in the near region it is lower. The phase velocity of the magnetic component increases as it approaches the source. The results obtained deepen the modern understanding of the physics of electromagnetic waves in non-asymptotic zones and can be used in modeling lightning radiation, high-voltage switching discharges, and other pulsed sources.

Keywords: Electromagnetic field, tension, near and intermediate area of radiation.

Стаття надійшла 10.12.2025 р.

УДК 621.314.69

doi.org/10.31498/2522-9990302025347198

Костенко В. О., Капустян О.Є.

ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ СИГНАЛІЗАЦІЇ ВІД ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

У статті показано, що одним із важливих напрямків розвитку електроенергетичної галузі в Україні є удосконалення та побудова електроенергетичних систем, що забезпечують надійне, енергоефективне та якісне енергопостачання. Однією із складових є система охорони повітряних ліній електропередач високої напруги. Це обумовлено тим, що пошкодження електричних мереж позначається на якості та надійності електропостачання споживачів. Тому важливою є задача швидкого і точного визначення місця пошкодження. Дослідження присвячено розробці системи одержання електроенергії в одиниці ват на кожній опорі лінії електропередачі та оцінці можливості реалізації

Енергетичні системи та обладнання

запропонованої системи електроживлення. Авторами запропоновано спосіб відбору потужності з лінії електропередачі на кожній опорі, який забезпечує виведення енергії з високопотенційної зони в низькопотенційну на рівні одиниць ват. Розроблена структурна схема малопотужного джерела живлення від високовольтної лінії електропередачі 750 кВ. Зроблено приблизний розрахунок запропонованої схеми на основі наявних у даний час матеріалів та елементів. Проведено зразковий розрахунок трансформатора струму з метою оцінки реальності реалізації. Конструктивна реалізація не перевищує 30 кг, малогабаритна і має невисоку вартість. Новизна полягає у вирішенні завдання отримання електроенергії в одиниці ват на кожній опорі лінії електропередачі новим поєднанням відомих елементів, зміною конструкцій ізоляторів та пропозицією промислового випуску нового виду продукції – сонячних батарей у вигляді вакуумних приладів – «аламп». Зроблений приблизний розрахунок дав оцінку реальності реалізації запропонованої системи електроживлення, придатної для встановлення на кожній опорі лінії електропередачі, та залишив можливість оптимізації кожного з елементів запропонованої системи.

Ключові слова: Лінії електропередач, надвисока напруга, опора, трансформатор струму, оптичний канал, ізолятор, фотоелектричний перетворювач, джерело живлення.

Постановка проблеми. Повітряні лінії електропередачі (ЛЕП) призначені для передачі та розподілу електроенергії по електричних дротах, протягнутих на певній висоті над землею. ЛЕП класифікуються за шкалою напруги від 0,4 до 1150 кВ та діляться на кілька груп. Лінії напругою вище 500 кВ використовуються для з'єднання кількох окремих енергосистем. Протяжність таких ЛЕП може становити 1200-2000 кілометрів. Опори ЛЕП служать основним конструктивним елементом лінії електропередач [1].

По телебаченню та в газетах періодично з'являються повідомлення про вандалські руйнування металевих опор високовольтних ЛЕП. Падіння опор ЛЕП 500, 750, 1500 кВ паралізує систему енергопостачання споживачів кількох областей та спричиняє значні економічні збитки на державному рівні [2, 3]. Забезпечення ефективного та безпечного функціонування електроенергетичного комплексу України значною мірою залежить від стабільності роботи його окремих компонентів, які об'єднані спільним режимом передавання електричної енергії [4]. ЛЕП є критично важливим елементом енергетичної інфраструктури, забезпечуючи транспортування електроенергії на великі відстані [5].

Пошкодження ЛЕП призводить до збою у роботі електроенергетичних мереж, що позначається на електропостачанні споживачів [6], тому охорона ЛЕП від пошкоджень є важливою державною справою. Забезпечення підвищення надійності електропостачання споживачів та ефективності відновлення електропостачання в умовах військового стану та повоєнного часу залежить від наявності засобів контролю фактичного технічного стану елементів розподільних електричних мереж ОЕС України [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експлуатація та охорона ЛЕП унормовані стандартами [8] та постановами уряду [9]. Для боротьби з пошкодженням може бути реалізована система моніторингу цілісності опор ЛЕП, яка має передбачити низку відомих будівельних та організаційно-технічних заходів.

По-перше, майданчики навколо опор можна захистити та повісити попереджувальні знаки.

По-друге, всередині кожного майданчика, що охороняється, на відстані 0,5 м від паркану по периметру можна встановити оптичну охоронну сигналізацію за допомогою лазерної указки і трьох прихованих дзеркал [10]. Сигнал про переривання променя надходитиме до блоку управління охоронної системи.

По-третє, нижні три яруси опори можуть бути обплетені волоконно-оптичним кабелем з металевими тросами, що армують на розтягнення. Для цього до металевих куточків опори

Енергетичні системи та обладнання

приварюються гайки через отвори яких пропускається світловод. Цілісність світловоду контролює той самий блок управління.

По-четверте, на кожній опорі на висоті 15-20 м може бути встановлений тепловий датчик із температурним порогом спрацьовування, наприклад, 500 °С. При підпалі газового пальника або використанні пристроїв абразивного різання металу (при різанні металу з'являться іскри) датчик видасть відповідний сигнал у блок управління.

По-п'яте, у корпусі блоку керування поруч із тепловим датчиком можна встановити відеокамеру недорогого охоронного пристрою.

Блок управління сигналом будь-якої із запропонованих систем контролю (периметра і температури) сповіщає центральний пульт охорони і передає зображення майданчика під опорою.

За допомогою відеокамер може бути організований самостійний канал контролю цілісності кожної опори ЛЕП шляхом періодичного моніторингу майданчиків, занесення їх зображень у пам'ять (базу даних), порівняння цих зображень в автоматичному режимі з інтервалом, наприклад, 15 хв. Критерієм для вироблення сигналу тривоги може бути зміна світлового потоку та ряд інших параметрів.

Передавання сигналу тривоги та зображення можна здійснити за допомогою стільникового зв'язку.

Постановка завдання. Однак вузьким місцем у реалізації подібної охоронної системи є проблема організації електроживлення електронної апаратури, яка, за сучасними технічними характеристиками, вимагає наявності на кожній опорі напруги порядку 5 В при струмі споживання в 750-850 мА, тобто, потужності ≈ 5 Вт.

Раніше питання про охорону ліній електропередач від пошкоджень, наприклад, літаками, вирішувалося досить просто: застосовувалося маркувальне забарвлення опор (працювало в денний час) та сигнальне освітлення (у нічний час) [11]. При цьому електропостачання сигнального освітлення проводилося місцевою електромережею. Якщо поблизу від огорожуваних опор не було джерела низької напруги, то для живлення світлової сигналізації використовувався ємнісний відбір потужності: паралельно проводам діючої лінії від опори до опори підвішувався провід-антена або в якості антени використовувався грозозахисний трос, який ізолювався від опор і забезпечувався іскровим проміжком.

Однак такий спосіб організації електроживлення вимагав застосування трансформаторів напруги типу НОМ-6 НОМ-10 або силових автоблокувальних трансформаторів типу ОМ-1,2/6 потужністю 12 кВт. А це дуже габаритні та важкі конструкції, які необхідно було піднімати краном та встановлювати на опорі лінії електропередач. У такий спосіб можна було забезпечити електроживленням апаратуру на одній або двох опорах, але не всієї лінії.

Інший спосіб отримання низької напруги від ЛЕП, який застосовується на віддалених електричних підстанціях, називається відбором конденсаторної потужності. Наприклад, на підстанціях напругою 500 кВ вага конденсаторів на одній опорі досягає 3 тонн, а висота колони, складеної з конденсаторів, перевищує 4,5 м. Опора ставиться на спеціальний фундамент [12]. Використовувати такий спосіб живлення для охоронної системи важко та економічно невигідно.

Ряд фірм пропонує обладнання для автономного живлення світлової сигналізації на сонячних батареях, придатне для встановлення на опорах ЛЕП. Так, ТОВ «НВФ «Промвітєх» (Україна) пропонує фотоелектричну систему живлення загороджувальних вогнів «СФЕ-24» [13]. Подібну продукцію пропонують і інші фірми [14-16]. Крім того, опубліковані патенти на автономні системи електроживлення за допомогою вітроелектрогенераторів [17] та/або інших відновлювальних джерел енергії [18]. У роботі [18] показано комплексну модель гібридної вітро-сонячної системи електропостачання окремого об'єкта, в якій використовуються два взаємодоповнюючі канали генерування електричної енергії від поновлюваних джерел енергії

Енергетичні системи та обладнання

вітру та сонця, що реалізуються за допомогою, відповідно, вітроелектроустановки з вертикальною віссю обертання та сонячної батареї, акумуляторну батарею та систему енергетичного менеджменту, реалізовану на контролері. Однак, подібні системи мають два істотні недоліки. По-перше, до їхнього складу обов'язково входить акумулятор, який погано переносить низькі температури. По-друге, поверхні таких систем досить швидко забруднюються внаслідок, відкладення пилу, пташиного посліду, сольових плям, **кїптяви**, обмерзання, що може значно погіршити ефективність сонячних фотоелектричних панелей [20, 21]. Це призводить до необхідності підніматися на опори для їх очищення, або застосовують системи крапельного поливу, дрони, що чистять і роботизовані рейкові платформи. Ці недоліки знижують привабливість таких систем електроживлення.

Близьке рішення до поставленої задачі можна побачити у технології вимірювання струмів у ЛЕП за допомогою оптоелектронних трансформаторів струму [22]. Тут інформація про величину струму лінії передається із зони високого потенціалу в зону низького потенціалу за допомогою світлового потоку по оптичному волокну. Але що заважає сформулювати світловий потік у тисячі разів потужніший і за його допомогою зробити відбір потужності від високовольтної лінії в одиниці ват.

Мета досліджень. Розробка системи одержання електроенергії в одиниці ват на кожній опорі ЛЕП та оцінка можливості реалізації запропонованої системи електроживлення.

Основний матеріал дослідження. Запропонована наступна схема малопотужного джерела живлення від високовольтної ЛЕП (рис. 1).

Зробимо приблизний розрахунок запропонованої схеми на основі наявних у даний час матеріалів та елементів, тобто перевіримо, наскільки реальною є така можливість.

Нехай для нормальної роботи апаратури охоронної системи необхідно забезпечити напругу $U = 5\text{В}$, струм $I = 1\text{А}$, тобто потужність $P = 5\text{Вт}$.

Якщо взяти монокристалічний модуль EuroSolar, який при площі поверхні $39,6 \times 28,9 = 1144,4\text{ см}^2$ забезпечує 10 Вт потужності, то на половинну потужність достатньо площі $20 \times 30\text{ см}^2$. Це за серійної технології, що забезпечує коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворення світлового потоку в електричну енергію в 14 %. Максимальний теоретичний ККД сонячного елемента становить 25,4 % [23]. Але навіть при ККД в 25 % площа поверхні, що сприймає, може скоротитися до кола радіусом 10 см.

При таких відносно невеликих габаритах може бути випущений спеціальний елемент перетворення світлового потоку в електричний струм у вигляді "антиламп" – аламп.

Така алампа є вакуумним приладом, який захищений від зовнішнього середовища і не вимагає періодичного очищення поверхні сонячних елементів від пилу, льоду або продуктів життєдіяльності птахів (рис. 2).

Щоб алампа забезпечувала задану напругу і струм на виході, її вхід повинен бути поданий світловий потік, відповідний стандарту АМ 1,5, тобто потік фотонів у спектральному діапазоні 0,28...2,5 мкм при рівні освітленості 1000 Вт/м^2 та температурі $25\text{ }^\circ\text{C}$ [24]. Площа фоточутливої плями в алампі складе 314 см^2 і вимагатиме потужності світлового потоку 31,4 Вт. Природно, вхідний отвір аламп не може бути радіусом 15 см, отже промінь світла повинен бути попередньо сфокусований. Геометричні параметри променя будуть визначені геометричними розмірами ізоляторів 4 та оптичного каналу 5 (рис. 1).

Енергетичні системи та обладнання

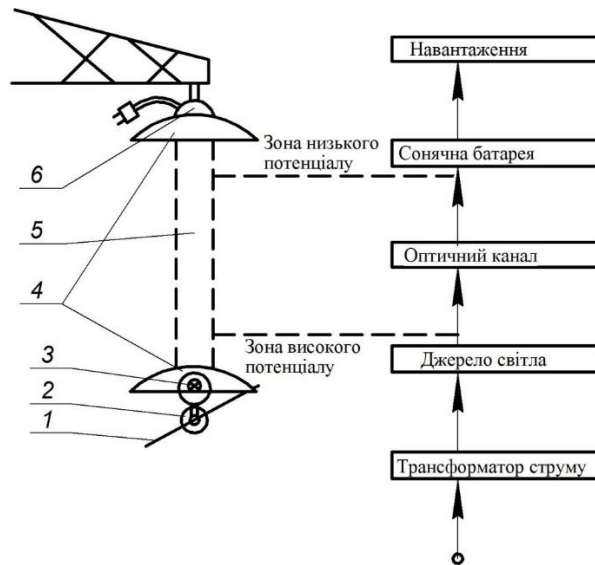


Рисунок 1 – Структурна схема малопотужного джерела живлення від високовольтної ЛЕП 750 кВ: 1 – лінійний струмопровідний провід ЛЕП; 2 – трансформатор струму; 3 – джерело світла; 4 – ізолятор; 5 – оптичний канал; 6 – перетворювач світлового потоку на електричний постійний струм (сонячна батарея)

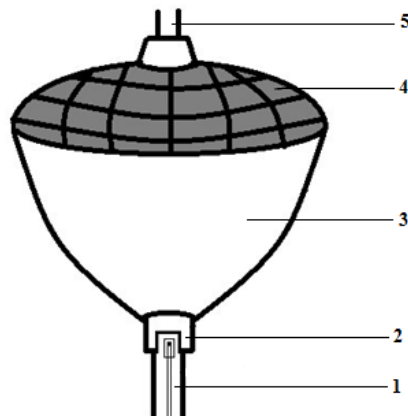


Рисунок 2 – Перетворювач світлового потоку на електричний струм (алампа): 1 – оптичний канал; 2 – фокусуюча система; 3 – скляна колба з вакуумним середовищем у середині; 4 – фотоелектричний перетворювач; 5 – електричний роз'єм для підключення навантаження

Для проходження світлового променя джерела світла до алампи може бути організований транспортний канал відкритого оптичного типу, довжина якого визначається довжиною гірлянди ізоляторів (для ЛЕП 750 кВ це 6 метрів). Найцікавіше пропустити такий оптичний канал усередині гірлянди фарфорових або скляних високовольтних ізоляторів (рис. 3). Оскільки гірлянда повинна зберегти свої діелектричні властивості і здатність згинатися під дією сильних вітрів, то можливі три варіанти. Для умов сильних морозів внутрішні поверхні центрального отвору можуть бути білими, покритими глазур'ю, як і весь ізолятор. В умовах середніх широт через центральні отвори може бути пропущена поліпропіленова труба, запаяна з двох сторін та заповнена осушеною азотно-повітряною сумішшю при нормальному атмосферному тиску [25].

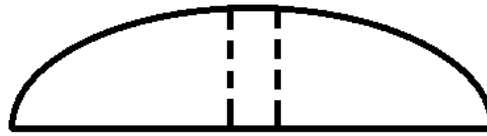


Рисунок 3 – Високовольтний ізолятор із центральним отвором для транспортного каналу відкритого оптичного типу.

Третій варіант – через всю гірлянду можна пропустити пучок світловодів, які мають широку смугу пропускання і низькі втрати. На жаль, світловоди з відповідними параметрами в даний час промисловість не випускає, а світловоди, що пропонуються для освітлення басейнів під водою, мають недостатній ККД.

Як джерело світла можна підібрати лампу-фару. Вибір досить широкий: за довговічністю, за конструкцією і т.д.

Може бути випущено спеціальну лампу-фару для систем охорони опор ЛЕП. Візьмемо, наприклад, лампу-фару OSRAM 41830 SSP PAR36, 6V, 36W [26], для якої можна підібрати оправу з дуже малим кутом розкриття променя (VNSP). Залишається подати на таку лампу-фару електроживлення: $E = 6 \text{ В}$, $I = 6 \text{ А}$.

Таким чином, відбулася розв'язка низькопотенційної області від високопотенційної. Тепер, перебуваючи в середині високопотенційної області, розв'яжемо задачу подачі живлення на електролампу за допомогою трансформатора струму (ТС) (рис. 4) [22, 27].

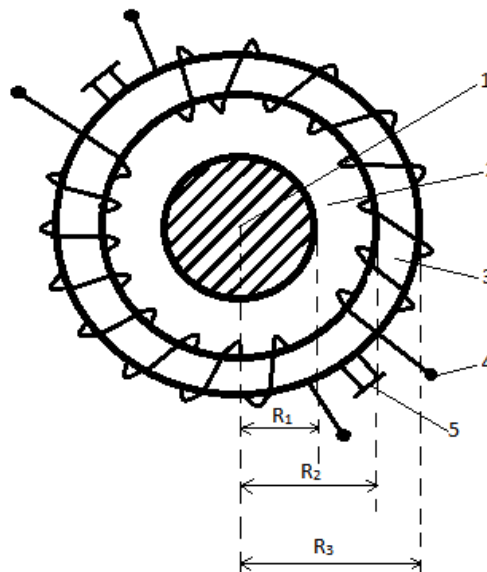


Рисунок 4 – Роз'ємний трансформатор струму (ТС): 1 – лінійний струмопровідний провід ЛЕП; 2 – прохідний ізолятор; 3 – магнітопровід із трансформаторної сталі 3411; 4 – вторинна обмотка; 5 – елементи кріплення двох половинок магнітопроводу

Зробимо зразковий розрахунок трансформатора струму з метою оцінки реальності реалізації. Лінійний провід ЛЕП марки АС діаметром 50 мм ($R_1 = 25 \text{ мм}$) 1 (рис. 4) є первинною обмоткою ТС ($W_1 = 1$ виток). Нехай вторинна обмотка 4 (рис. 4) намотана на магнітопровід 3 (рис. 4) з такими геометричними параметрами: радіус внутрішньої поверхні $R_2 = 45 \text{ мм}$, радіус зовнішньої поверхні $R_3 = 95 \text{ мм}$; товщиною сердечника поки що задаватися не будемо. За статистикою в ЛЕП 750 кВ лінійний номінальний струм $I_{1H} = 1300 \text{ А}$, але $I_{\max} = 3500 \text{ А}$, тому згідно з рекомендаціями [10] вибираємо $I_1 = 4000 \text{ А}$. Струм у вторинній обмотці дорівнює $I_2 = 6 \text{ А}$ при напрузі $E_2 = 6 \text{ В}$, "землі", тобто увесь

Енергетичні системи та обладнання

перебуває в зоні високого потенціалу, то вимоги до ізоляції між первинною та вторинною обмотками ТС не високі.

Коефіцієнт трансформації:

$$n = \frac{I_1}{I_2} = \frac{4000}{6} = 667.$$

Отже, вторинна обмотка містить $W_2 = 667$ витків.

Довжина середньої лінії магнітопроводу:

$$l_{\text{ср}} = 2\pi \left(R_2 + \frac{R_3 - R_2}{2} \right) = 0,44 \text{ м}.$$

Напруженість магнітного поля в середині осердя:

$$H = \frac{I_1 \cdot W_1}{l_{\text{ср}}} = \frac{4000 \cdot 1}{0,44} = 9091 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Це відповідає намагніченості (для сталі 3411 найгіршого сорту) $B = 1,6 \text{ Тл}$ [27].

При визначенні середньої лінії магнітопроводу 3 (рис. 4) використовували його ширину $(R_3 - R_2)$. А для визначення площі перерізу магнітопроводу скористаємося відомою формулою:

$$E_2 = 4,44 \cdot f \cdot S \cdot w_2 \cdot B_{\text{max}},$$

звідки:

$$S = \frac{E_2}{4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot B_{\text{max}}}.$$

Знайдемо площу поперечного перерізу магнітопроводу при $l_{\text{ср}} = 0,785 \text{ м}$, матеріал сердечника – сталі 3411 і описаних вище початкових умовах:

$$S = \frac{6}{4,44 \cdot 50 \cdot 667 \cdot 1,6} = 0,253 \text{ см}^2.$$

Якщо перетин магнітопроводу взяти квадратним, то сторона квадрата для зазначеного перерізу дорівнює $a = 0,5 \text{ см}$. Така мала величина говорить про те, що для магнітопроводу можна застосувати матеріал з нижчою магнітною проникністю, тоді перетин магнітопроводу буде більшим.

Зазор між лінійним проводом 1 та магнітопроводом 3 (рис. 4) складе

$$95 - 2,5 - 25 = 67,5 \text{ мм};$$

що дозволяє вільно розмістити як ізоляцію, так і провід вторинної обмотки.

Таким чином, ТС, який складається з 2-х половинок кільця сталі 3411 квадратного перерізу зі стороною в 5 мм радіусом в

$$45 + (95 - 45)/2 = 95 \text{ мм}$$

Енергетичні системи та обладнання

і вторинною обмоткою з 667 витками мідного дроту діаметром 2,2 мм [12], буде відбирати від ЛЕП потужність

$$1,25 \times 36 = 45 \text{ Вт}$$

та забезпечувати нормальну роботу лампи-фари, потужністю 36 Вт. Визначимо масу ТС. Маса трансформаторного заліза складе

$$0,785 \cdot 10^2 \text{ см} \times 0,253 \text{ см}^2 \times 7,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 156,9 \text{ г} \approx 200 \text{ г.}$$

Визначимо масу міді дроту. Якщо довжина сторони квадратного перерізу магнітопроводу дорівнює 0,5 см, то периметр дорівнює 2 см. Тоді довжина середнього витка багатопроводової вторинної обмотки ТТ становитиме приблизно 5 см. Отже, маса міді вторинної обмотки ТТ становитиме:

$$3,14 \cdot 0,11^2 \text{ см}^2 \cdot (5 \text{ см} \times 667) \cdot 8,96 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 1135 \text{ г.}$$

З урахуванням ізоляції та кріплення двох половинок магнітопроводу маса ТС не перевищить 3 кг.

Отримані масогабаритні параметри ТС можна порівняти з параметрами найближчого аналога - стандартного вимірювального ТС марки Т-0,66 [28], який при первинному номінальному струмі 1000 А і вторинному номінальному струмі 5 А має масу не більше 1,3 кг. Очевидно, що вторинна обмотка цього вимірювального трансформатора виконана тоншим мідним дротом.

Сумарна маса всіх елементів запропонованої системи електроживлення виявиться 20÷30 кг.

ВИСНОВКИ

Зроблений приблизний розрахунок дав оцінку реальності реалізації запропонованої системи електроживлення, придатної для встановлення на кожній опорі ЛЕП, та залишив можливість оптимізації кожного з елементів запропонованої системи. Відбираючи від ЛЕП потужність 45 Вт, можна отримати 5 Вт на навантаженні, тобто, забезпечити електроживлення охоронної сигналізації кожної опори ЛЕП. При цьому досягається суттєве зниження ваги системи живлення щодо системи ємнісного відбору потужності, а в порівнянні з відкритою сонячною системою живлення дана пропозиція вигідно відрізняється відсутністю акумуляторів, незалежністю від погоди, чистоти поверхні сонячних елементів та їх орієнтації щодо сонця.

Список використаних джерел

1. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи. Підручник. / М. С. Сегеда — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. — 488 с.
2. Падіння опор ЛЕП призвело до відімкнення українських атомних станцій. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: «Укренерго» <https://zaxid.net/news/> https://zaxid.net/padinnya_opor_lep_prizvelo_do_vidimknennya_ukrayinskih_atomnih_stantsiy_u

krenergo_n1373872 (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

3. Подрыв опор ЛЭП привел к аварийной разгрузке двух АЭС [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://ghall.com.ua/2015/11/23/podryiv-opor-lep-pryvel-k-avaryjno-j-razhruzke-dvuh-aes-vyde0/> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

4. *Зайцев Є.О.* Засіб ідентифікації пошкодження лінії електропередавання в розподільчих електричних мережах / *Є.О. Зайцев І.В. Блінов В.О. Березниченко А.С. Закусило* // Proceedings of XVI International Conference Measurement and Control in Complex System (MCCS-2022) - Збірник наукових праць 16-ої міжнародної конференції КУСС-2022 (Вінниця, 15-17 листопада 2022 року). <https://doi.org/10.31649/mccs2022.21>

5. *Штуць А.* Аналіз факторів ризику аварій ліній електропередач обумовлених кліматичними умовами / *А. Штуць, І. Зозуляк, Н. Григоренко* // Вісник Хмельницького національного університету, №3, Т1, 2024 (335). С. 314-325. DOI 10.31891/2307-5732-2024-335-3-42

6. *Поліщук О.Ю.* Визначення аварійних ділянок ліній електропередачі з використанням індикаторів пошкоджень / *О.Ю. Поліщук* // Енергетика: економіка, технології, екологія Спецвипуск – 2014. С. 71-77. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/2d78be45-0d76-4ac6-95a6-4b292e15f76f/content>

7. *Зайцев Є. О.* Засоби ідентифікації аварійних станів в розподільчих мережах ОЕС України / *Є. О. Зайцев, Березниченко В. О. Березниченко, А.П. Щербань* // XXI Міжнародна науково-технічна конференція “ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи”, 17-18 травня 2022 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна С. 265-267. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/db48d325-bd4d-4cbb-bd1f-8118988084a4/content>

8. СОУ-Н ЕЕ 20.502:2007 Повітряні лінії електропередавання напругою 35 кВ і вище. Інструкція з експлуатації [На заміну ГКД 34.20.502-97; чинний від 2007-10-09]. — Вид. офіц. — Київ : Міністерство палива та енергетики України Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики», 2007.

9. Про затвердження правил охорони електричних мереж: Постанова кабінету Міністрів України від 27 грудня 2022 р. № 1455 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1455-2022-%D0%BF#Text> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

10. *Бородай В.Д.* Устройство оптической охранной сигнализации. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://radiostorage.net/?area=news/458>. (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

11. *Марфин Н.И.* Охрана линий электропередачи / *Н.И. Марфин* – М.: Энергия, 1968. – 72 с.

12. *Звенигородский И.С.* Конденсаторы связи и отбора мощности / *И.С. Звенигородский* – М.: Энергия, 1969. – 64с.

13. Фотоелектрична система живлення загороджувальних огнів– «СФЕ-24». [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://promvitech.com.ua/catalog/sfe/> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

14. Шафа управління та моніторингу загороджувальними вогнями. Модифікація: "ШУ СОМ з АКБ". [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zom.com.ua/ru/produkcija/shchit-upravleniya-ssi.html> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

15. Загороджувальні вогні Муссо з сонячними панелями [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.svaltera.ua/catalog/zagorodzhuvalni_vogni/ (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

16. ШУ СОМ з АКБ, Шафа управління та моніторингу загороджувальними вогнями без моніторингу [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://surl.lu/tocwih> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

17. Вітросонячна електростанція: Патент на корисну модель: МПК F03D 3/00, F03D 11/00, H01L 31/042. / *І.З. Щур, В.І. Климко*; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». – № u201413997, заявл. 26.12.2014; опубл. 06.08.2015.
18. *Герасімов Є. Г.* Використання відновлювальних джерел енергії : навч. посіб. / *Є. Г. Герасімов, Г. Г. Герасимов*. [Електронне видання]. Рівне : НУВГП, 2023. 467 с.
19. *Щур І. З.* Техніко-економічне обґрунтування параметрів гібридної вітро-сонячної системи для електропостачання окремого об'єкта / *І. З. Щур, В. І. Климко* // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2014. - Вип. 2. - С. 92-100. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/emezs_2014_2_14
20. *El-Shobokshy M. S.* Effect of the dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells. / *M. S. El-Shobokshy* // Solar Energy, 1993. - 51(6), 505–511.
21. *Kazem H.A.* Effect of Dust Deposition on the Performance of MultiCrystalline Photovoltaic Modules Based on Experimental Measurements. / *H.A. Kazem, T. Khatib, K. Sopian, F. Buttinger, W. Elmenreich & A.S. Albusaidi* // International Journal of renewable Energy 2013. - Vol.3, No.4, - pp. 850-853. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v3i4.876.g6214>
22. *Дудюк Д. Л.* Електричні вимірювання [Текст] : навч. посіб. / *Д. Л. Дудюк, В.М. Максимів, Р.Я. Оріховський* ; М-во освіти і науки України, Наук.- метод. центр вищ. освіти, Укр. держ. лісотехн. ун-т. 2-е вид., випр. - Львів : Афіша, 2003. - 265 с.
23. Шляхи збільшення ККД сонячних елементів на основі мультикристалічного кремнію [Електронний ресурс] / *Е. Алієв, О. Яновський* // Вісник Львівського університету. Серія фізична. - 2010. - Вип. 45. - С. 187-191. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VLNU_Phiz_2010_45_26
24. Тестер сонячних установок Solar PV150 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://electrovymir.com.ua/ua/p664373109-tester-solnechnyh-ustanovok.html> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.
25. *Кубарев В.В.* Фурье-спектроскопия водяных паров в 40-метровом оптическом транспортном канале Новосибирского ЛСЭ / *В.В. Кубарев, Н.А. Винокуров, Е.И. Колобанов и др.* // – Научный вестник Новосибирского государственного технического университета, 2012. – № 4. – С. 72-75.
26. Лампа OSRAM 41830 SSP 35 W 6V G53 111мм [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://komlight.com.ua/ua/p195268010-lampa-osram-41830.html> (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.
27. *Соловьёв Д.Б.* Моделирование трансформатора тока с магнитным сердечником/ *Д.Б. Соловьёв* // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. - №1. - С. 52 – 58.
28. Трансформатор Т-0.66 1000/5. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.aviokon.lviv.ua/prylady-obliku-kontrolyu-ta-vymiryuvan/vymiryuval-ni-transformatory/>. (дата звернення: 02.12.2025). — Назва з екрана.

Kostenko V. O., Kapustian O.Ye.

POWER SUPPLY OF SIGNALLING FROM OVERHEAD POWER LINES OF EXTRA HIGH VOLTAGE

The article shows that one of the important directions of development of the electric power industry in Ukraine is improvement and construction of electric power systems that provide reliable, energy-efficient and high-quality power supply. One of the components is the protection system of overhead high-voltage power lines. This is due to the fact that damage to electrical networks affects the quality and reliability of power supply to consumers. Therefore, the task of quickly and accurately determining the location of the damage is important. The research is devoted to the development of

a system for obtaining electricity in units of watts on each support of the power transmission line and assessing the feasibility of implementing the proposed power supply system. The authors proposed a method of power selection from the power transmission line on each support, which ensures the removal of energy from the high-potential zone to the low-potential zone at the level of units of watts. A structural diagram of a low-power power source from a 750 kV high-voltage power transmission line has been developed. An approximate calculation of the proposed scheme has been made based on currently available materials and elements. A sample calculation of a current transformer has been carried out in order to assess the reality of implementation. The constructive implementation does not exceed 30 kg, is small in size and has a low cost. The novelty lies in solving the problem of obtaining electricity in units of watts on each power transmission line support by a new combination of known elements, changing the designs of insulators and proposing the industrial production of a new type of product - solar cells in the form of vacuum devices - "alamps". The approximate calculation made gave an assessment of the reality of implementing the proposed power supply system, suitable for installation on each power transmission line support, and left the possibility of optimizing each of the elements of the proposed system.

Keywords: Power line, ultrahigh voltage, ecology, support, current transformer, optical channel, insulator, power source.

Стаття надійшла 10.12.2025р.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО УПРАВЛІННЯ МІЖНАРОДНИМИ АВТОМОБІЛЬНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ

У статті розглянуто напрями підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень за рахунок удосконалення технологій автоматизованих навігаційних систем диспетчерського управління (АНСДУ). Основний акцент зроблено на створенні інтегрованих інформаційно-аналітичних платформ для управління транспортними потоками, що забезпечують цифрову взаємодію між перевізниками, митними органами та логістичними операторами.

Проаналізовано сучасні підходи до організації диспетчерського управління автомобільним транспортом, які включають використання супутникових систем позиціонування (таких як GPS та Galileo), телематичних інструментів моніторингу, хмарних сервісів і алгоритмів штучного інтелекту. Виявлені основні недоліки чинних систем, серед яких фрагментарність інформаційних потоків, обмежена точність геопозиціонування, відсутність уніфікованих протоколів обміну даними та недостатня адаптивність до змін дорожньої ситуації.

У роботі запропоновано підхід до оптимізації автоматизованих навігаційних систем шляхом впровадження хмарних технологій, адаптивних алгоритмів маршрутизації та інструментів машинного навчання для точнішого прогнозування часу прибуття (ETA) і оцінки ризиків затримок. Розроблено концептуальну модель цифрового диспетчерського центру, яка дає змогу здійснювати централізований моніторинг транспортних потоків, надавати аналітичну підтримку для ухвалення управлінських рішень та оперативно реагувати на дорожні інциденти.

Результати моделювання дозволили встановити, що застосування розробленої технології сприяє скороченню часу доставки вантажів на 10–15 %, знижує споживання пального на 8–12 % та забезпечує високий рівень точності прогнозування очікуваного часу прибуття (ETA), який становить 96–97 %. Практична реалізація цієї системи сприяє підвищенню ефективності міжнародних перевезень, зниженню екологічного впливу транспорту та інтеграції України в європейську транспортну мережу TEN-T.

Ключові слова: Автоматизовані навігаційні системи, міжнародні автомобільні перевезення, диспетчерське управління, GPS-моніторинг, телематика, логістика, інтелектуальні транспортні системи.

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку глобальної економіки міжнародні автомобільні перевезення займають ключову позицію серед різних видів транспортної діяльності. Це обумовлено їх важливою роллю в забезпеченні мобільності товарних потоків, сприянні інтеграції національних ринків і створенні фундаменту для глобалізації виробничих процесів. У контексті інтеграції України в європейський транспортний простір виникає необхідність підвищення ефективності функціонування транспортно-логістичних систем, що відповідають міжнародним стандартам управління, безпеки та цифровізації процесів.

Сучасна транспортна інфраструктура характеризується збільшенням обсягів перевезень, ускладненням маршрутних мереж, а також необхідністю забезпечення постійного моніторингу технічного стану автотранспортних засобів, дотримання графіків доставки, екологічних норм і митних вимог. У таких умовах традиційні методи управління

перевезеннями, засновані на людському факторі та ручній обробці інформації, втрачають свою ефективність. Це зумовлює потребу в розробці та впровадженні автоматизованих систем диспетчерського управління, які об'єднують навігаційні, телематичні, аналітичні та інформаційні технології в єдину інтегровану платформу [1].

Досліджувана проблема полягає в удосконаленні технології забезпечення автоматизованих навігаційних систем диспетчерського управління міжнародними автомобільними перевезеннями, які повинні забезпечувати комплексне управління транспортними потоками в режимі реального часу [2].

Подібна система повинна здійснювати наступні операції:

- Моніторинг місцезнаходження транспортних засобів із максимальною точністю [3].
- Прогнозування часу прибуття (ETA) та аналіз можливих відхилень.
- Швидке реагування на зміни дорожньої ситуації, погодні умови та технічні несправності.

- Забезпечення ефективної інформаційної взаємодії між перевізниками, митними органами, логістичними центрами та клієнтами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В основу створення системи захисту інформації можуть бути покладені такі теорії: теорії ймовірностей і випадкових процесів; теорії графів, автоматів та мереж Петрі; теорія нечітких множин; теорії ігор та конфліктів; теорія катастроф; еволюційне моделювання; формально-евристичний підхід; ентропійний підхід тощо. Також перспективним напрямом є використання методів моделювання, заснованих на неформальній теорії систем, таких як методи структурування, методи оцінювання та методи пошуку оптимальних рішень [1].

Згідно з джерелом [2] система захисту інформації може бути представлена у вигляді орієнтованого графа, де вершинам відповідають компоненти інформаційної системи, а ребрам – інформаційні потоки між ними. При цьому використовують опис трактів проходження, де послідовно вказується джерело інформації, проміжна апаратура і одержувач інформації, а також вид переданої інформації. Побудова матриць суміжності та інцидентності дозволяє визначити компоненти інформаційної системи, які обробляють інформацію різних рівнів конфіденційності з метою подальшого посилення захисту від потенційних загроз інформаційній безпеці.

Аналіз літературних джерел показав, що для формального опису системи захисту інформації зручно використовувати модель з повним перекриттям, яка базується на теорії графів і розглядає системи інформаційної безпеки як взаємодію множини загроз, множини об'єктів захисту та множини механізмів захисту [3].

Для моделювання системи захисту інформації з точки зору поточного опису процесів доцільно використовувати методології IDEF [4] – технологію опису бізнес-процесів в цілому як множини взаємозалежних дій або функцій. Такий підхід дозволяє провести глибоке передпроектне дослідження процесів системи з необхідним рівнем деталізації для подальшого виявлення «вузьких» місць і розробки заходів для реінжинірингу відповідних процесів.

Проблема стає особливо актуальною через необхідність інтеграції національних транспортних систем України в мережу TEN-T (Транс'європейська транспортна мережа), де автоматизація диспетчерського управління міжнародними перевезеннями відіграє ключову роль.

Сучасні GPS-системи моніторингу, які використовуються на даний момент, не можуть повністю забезпечити необхідний набір функцій для ефективного управління міжнародними перевезеннями, оскільки: функціонують автономно, без централізованої обробки даних; не забезпечують адаптивної маршрутизації з урахуванням змін зовнішніх умов; відсутні уніфіковані протоколи обміну інформацією між перевізниками різних держав; не мають інтеграції з аналітичними сервісами для прогнозування ризиків і затримок.

Транспортні технології



Рисунок 1 – Функціональні можливості системи диспетчерського управління: GPS-моніторинг, ETA, реагування, інформаційна взаємодія

Розв'язання цього завдання є надзвичайно важливим з практичної точки зору, оскільки сприятиме: зростанню ефективності міжнародних автомобільних перевезень; скороченню експлуатаційних витрат транспортних підприємств; покращенню екологічних показників через оптимізацію маршрутів; підвищенню безпеки дорожнього руху та забезпеченню прозорості логістики.

Таким чином, актуальність цієї теми визначається нагальною потребою створення інноваційної технології автоматизованого управління транспортними потоками. При цьому вона має відповідати вимогам Європейського Союзу щодо цифрової трансформації транспортного сектору, стандартам безпеки ISO 39001 і принципам концепції «розумної логістики» (Smart Logistics).

Протягом останніх двадцяти років тема автоматизованих навігаційних систем і диспетчерського управління стала предметом значного інтересу серед науковців та практиків у сферах транспорту й логістики. Аналіз наукових праць, монографій, технічних звітів і прикладних досліджень дозволяє виділити кілька основних напрямів та підходів, які формують сучасний науково-технічний ландшафт цієї проблематики.

1. Архітектури інтегрованих навігаційних систем та платформ диспетчерського управління. У ряді досліджень розглядаються багаторівневі архітектури, які об'єднують обладнання, встановлене на транспортних засобах, телекомунікаційні шлюзи та центральні аналітичні центри [4, с.45; 5, с.12].

Традиційний підхід передбачає «три-шарову» структуру з розподілом завдань між рівнями збору даних, їх передавання, зберігання та аналізу.

У роботах зазначається, що використання масштабованих хмарних платформ забезпечує ефективний інструментарій для централізованого моніторингу та оперативної обробки великих потоків телематичних даних.

2. Методи оптимізації маршрутів та адаптивної маршрутизації є актуальними напрямками досліджень у галузі транспортної логістики. Теоретичні розробки зосереджуються на використанні алгоритмів із теорії графів, таких як модифіковані алгоритми Дейкстри, методи A* та евристичні підходи, а також на застосуванні методів оптимізації, зокрема лінійного програмування та комбінаторних евристик.

Ці підходи спрямовані на мінімізацію загальних витрат часу та споживання палива [6, с.88; 7, с.101]. Новітні дослідження в цій сфері активно впроваджують стохастичні

компоненти, що враховують імовірність утворення заторів чи випадкових затримок, наприклад, на митниці.

Проте на практиці, особливо у випадках транскордонних перевезень, ефективна реалізація цих моделей ускладнюються через високий рівень невизначеності, пов'язаний із митними процедурами, специфічними локальними обмеженнями та нестабільністю інформації про дорожній рух у прикордонних регіонах.

3. Використання штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування й прийняття рішень знаходить усе ширше застосування. Останні дослідження показують ефективність алгоритмів машинного навчання у передбаченні заторів, часу проходження митного контролю, а також ймовірності виникнення несправностей та виявлення аномалій у телематичних даних [8, с.147; 9, с.210].

Застосовуються зокрема рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) для роботи з часовими рядами, ансамблеві методи для класифікації ризикових подій і методики підсилювального навчання для динамічної корекції маршрутів у режимі реального часу.

4. Телематика, IoT та сенсорні мережі на транспортних засобах. Результати практичних досліджень акцентують увагу на важливості мультисенсорного підходу, який поєднує використання GPS/GNSS із даними CAN-шини транспортного засобу, датчиками споживання пального, температурними й вібраційними сенсорами.

Це дозволяє проводити оцінку технічного стану як автомобіля, так і вантажу в режимі реального часу [10, с.63; 11, с.34]. Застосування такого підходу не лише забезпечує контроль за місцезнаходженням транспортного засобу, але й дає можливість прогнозувати потенційні відмови, що є надзвичайно важливим у сфері міжнародної логістики.

5. Проблеми обміну даними на міждержавному рівні та нормативно-правове забезпечення. Проблематика обміну інформацією на міждержавному рівні та її нормативно-правове регулювання є актуальним напрямом дослідження, що охоплює як правові, так і організаційні аспекти.

У міжнародних дослідженнях наголошується на необхідності уніфікації протоколів обміну (включаючи й питання API, форматів даних та вимог до метаданих) для забезпечення безшовної взаємодії між перевізниками, митницями та логістичними провайдерами [12, с.9; 13, с.203].

6. Моделювання систем масового обслуговування (СМО) для диспетчерських центрів.

Моделювання систем масового обслуговування (СМО) для диспетчерських центрів є важливим інструментом для аналізу і оптимізації навантаження на їхні платформи та сервери, які відповідають за обробку телематичних повідомлень.

Теорія СМО широко використовується для розрахунків і планування ресурсів, зокрема для визначення оптимальної кількості каналів обробки, оцінки ймовірності виникнення відмов у періоди пікових навантажень [14, с.99; 15, с.264]., а також прогнозування часу відповіді системи. Класичні методики, засновані на формулах Ерланга і марковських моделях, демонструють високу ефективність у цьому контексті.

Мета дослідження. Теоретичне обґрунтування та розроблення технології підтримки автоматизованих навігаційних систем диспетчерського управління для міжнародних автомобільних перевезень, а також практичне оцінювання її ефективності.

Основний матеріал дослідження. Виявлені прогалини та ключові питання створюють основу для окреслення перспектив подальших досліджень у цій галузі. На основі аналізу наявних напрацювань були сформульовані наступні основні проблеми:

1. Уніфікація протоколів обміну телематичними даними між країнами та приватними операторами. Відсутність стандартизованого формату значно ускладнює обмін і синхронізацію даних у реальному часі, що впливає на ефективність прийняття рішень.

Необхідно розробити практичні рекомендації щодо стандартизації метаданих, безпеки передаваної інформації та автентифікації.

2. Розробка алгоритмів машинного навчання, адаптованих для роботи з неповними або зашумленими даними. Дані, отримані з телематичних систем, часто відзначаються пропущеними значеннями, артефактами чи нерівномірністю оновлення, що створює потребу в стійких методах обробки та відповідних алгоритмах.

3. Забезпечення інтерпретованості та підвищення довіри до рішень систем штучного інтелекту в диспетчерській роботі. Для того, щоб оператори могли ефективно використовувати рекомендації таких систем, необхідно вдосконалити пояснювальні моделі й розробити інтуїтивно зрозумілі інтерфейси, які демонструють причинно-наслідкові зв'язки між подіями та розробленими маршрутами.

4. Моделювання впливу митних і адміністративних факторів як стохастичних перешкод. Оскільки міжнародні перевезення часто стикаються з адміністративними затримками, ці фактори з їхньою випадковою природою мають бути коректно інтегровані в математичні моделі оптимізації.

5. Забезпечення надійності та безпеки системи в умовах підвищеного навантаження та можливих кібератак. Захист каналів передачі даних, автентифікація обладнання і розробка резервних сценаріїв функціонування є критично важливими аспектами, які потребують подальшого дослідження і деталізації.

Сучасна література надає можливість систематизувати підходи та виділити інтегровану стратегію вдосконалення технологій, що спирається на поєднання хмарних сервісів для масштабованої обробки даних, AI-алгоритмів для прогнозування та прийняття рішень, а також стандартних протоколів обміну, які забезпечують міждержавну сумісність.

Ці завдання включають наступне:

1. Проведення детального аналізу сучасного стану та визначення тенденцій розвитку систем диспетчерського управління для міжнародних автомобільних перевезень.

2. Формулювання функціональних вимог до автоматизованої навігаційної системи нового покоління. Ця система повинна забезпечувати високоточний та стабільний обмін телематичними даними, їх оперативну трансформацію, передачу й аналітичну обробку в режимі реального часу.

3. Розроблення структурної та функціональної моделі інтегрованої автоматизованої системи диспетчерського управління, яка охоплює всі рівні функціонування — від сенсорних елементів, розташованих на борту транспортного засобу, до хмарного аналітичного центру і зручних користувацьких інтерфейсів.

4. Створення математичної моделі оптимізації транспортних маршрутів із врахуванням часових, економічних, технічних і ризикових параметрів перевезень. Аналіз передбачає застосування методів теорії графів, систем масового обслуговування (СМО) та стохастичного програмування [14, 6].

5. Розроблення методології прогнозування ключових показників ефективності перевезень, таких як оцінка часу прибуття (ЕТА), витрати пального та час простою. Основою цього процесу виступатимуть машинні алгоритми навчання та технології штучного інтелекту.

6. Проведення оцінки запропонованої технології шляхом використання імітаційного моделювання й експериментальних досліджень на базі реальних даних від міжнародних автоперевізників. Отримані результати будуть порівняні з традиційними GPS-системами моніторингу [15, 10].

Для вирішення перелічених завдань запропонована концепція автоматизованої навігаційної системи диспетчерського управління (АНСДУ), яка побудована на використанні принципів інтелектуальних транспортних систем, інтеграції кіберфізичних підходів і впровадженні хмарних технологій для збору, опрацювання та аналізу даних.

Транспортні технології



Рисунок 2 – Трирівнева архітектура автоматизованої системи диспетчерського управління

Система складається з трьох функціональних рівнів (рис. 2):

1. Польовий рівень включає навігаційні модулі, встановлені на транспортних засобах, які збирають телематичні дані, такі як координати, швидкість руху, витрата пального, стан технічних вузлів автомобіля та температуру вантажу.

2. Інформаційно-комунікаційний рівень охоплює канали зв'язку GSM/4G/5G, супутникові системи та шлюзи для обміну даними, що забезпечують передачу інформації в режимі реального часу.

3. Аналітично-диспетчерський рівень складається з серверів для обробки даних, аналітичних модулів, алгоритмів штучного інтелекту для прогнозів і диспетчерських інтерфейсів.

На рисунку 3 надан алгоритмічний цикл роботи АНСДУ, який складається з п'яти основних етапів:

1. Етап збору даних: Дані про транспортний засіб отримуються за допомогою сучасних технологій, зокрема GPS/GNSS-модулів, CAN-шин автомобіля, температурних сенсорів, датчиків палива та телематичних терміналів.

2. Попередня обробка даних: На цьому етапі здійснюється перевірка достовірності даних, фільтрація стороннього шуму, ліквідація пропусків та розробка уніфікованої структури даних для їх подальшого аналізу. Для досягнення високої точності обробки застосовується фільтр Калмана, що дозволяє зменшити похибки визначення місцеперебування транспортного засобу до 1,5–2 метрів.

3. Аналітичний модуль: Цей компонент системи інтегрує алгоритми штучного інтелекту для виконання наступних завдань: - прогнозування часу прибуття (ETA); - аналіз та оцінка ризиків можливих затримок; - класифікація аномалій, включаючи зміну маршруту, перевищення швидкості та перевантаження; - визначення оптимального маршруту з урахуванням змін у дорожній ситуації.

4. Процес прийняття рішень і управління: На основі результатів аналітичного модуля система автоматично генерує рекомендації для диспетчерів чи водіїв. На даному етапі застосовується принцип адаптивного управління з використанням зворотного зв'язку, що забезпечує узгодженість між прогнозами системи та реальними умовами.

5. Візуалізація результатів: Результати аналізу представляються у вигляді інтерактивних карт, що демонструють оптимальні маршрути, зони затримок, передбачувані часи прибуття (ETA), графіки споживання палива та інформацію про технічний стан транспортних засобів.



Рисунок 3 – Схема алгоритмічного циклу роботи АНСДУ.

Далі була розглянута математична модель оптимізації маршрутів міжнародних перевезень для підтвердження ефективності системи, яка оптимізує наданий маршрут перевезень.

Припустимо, що транспортна мережа задана у вигляді орієнтованого графіка (рис.4.)

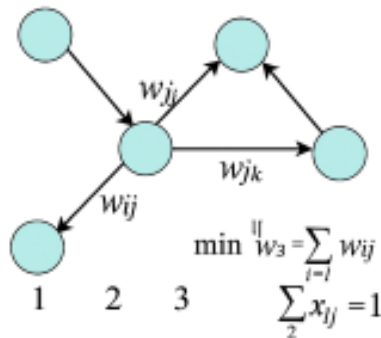


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд транспортної мережі.

$$G = (V, E) \quad (1)$$

Де - $V = \{\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_n\}$ - множина транспортних вузлів;

$E = \{e_{ij}\}$ - множина шляхів між вузлами

Функціонал цільової оптимізації:

$$\min F = \sum_{(i,j) \in E} (\alpha \cdot t_{ij} + \beta \cdot f_{ij} + \gamma \cdot r_{ij}) x_{ij}, \quad (2)$$

Де - t_{ij} – час у дорозі;

f_{ij} – витрати палива;

r_{ij} – ризиковий коефіцієнт маршруту (погодні, митні, інфраструктурні затримки);

α, β, γ – вагові коефіцієнти (визначають пріоритет часу, вартості або безпеки);

x_{ij} – бінарна змінна (1 – маршрут використовується, 0 - ні).

Додаткові обмеження:

$$\sum_{(i,j) \in E} t_{ij} x_{ij} \leq T_{max}, \sum_{(i,j) \in E} f_{ij} x_{ij} \leq F_{max}, \quad (3)$$

Рішення задачі реалізували за допомогою модифікованого алгоритму Дейкстри, що враховує актуальні дані про дорожній рух, отримані через API Google Maps і OpenStreetMap. Для адаптації маршруту в режимі реального часу був використаний метод динамічної маршрутизації, який коригує вагові коефіцієнти відповідно до поточної ситуації на дорогах.

Наступним етапом розглядалась модель диспетчерського управління як системи масового обслуговування. Центр диспетчеризації, що займається опрацюванням навігаційних запитів, можна розглядати як багатоканальну систему масового обслуговування М/М/п.

Параметри моделі: λ — кількість вхідних запитів (повідомлень, що надходять від транспортних засобів); μ — інтенсивність обробки запитів одним сервером; n — кількість каналів обслуговування.

Ймовірність відмови системи внаслідок перевантаження розраховується за допомогою формули Ерланга:

$$P_{\text{відм}} = \frac{\frac{(\lambda/\mu)^n}{n!}}{\sum_{k=0}^n \frac{(\lambda/\mu)^k}{k!}} \quad (4)$$

Пропускна здатність системи:

$$Q = \lambda(1 - P_{\text{відм}}), \quad (5)$$

А середній час очікування запиту:

$$T_{\text{оч}} = \frac{1}{\mu - \lambda/n} \quad (6)$$

Для оптимальної роботи системи умова стабільності:

$$\lambda < n \cdot \mu$$

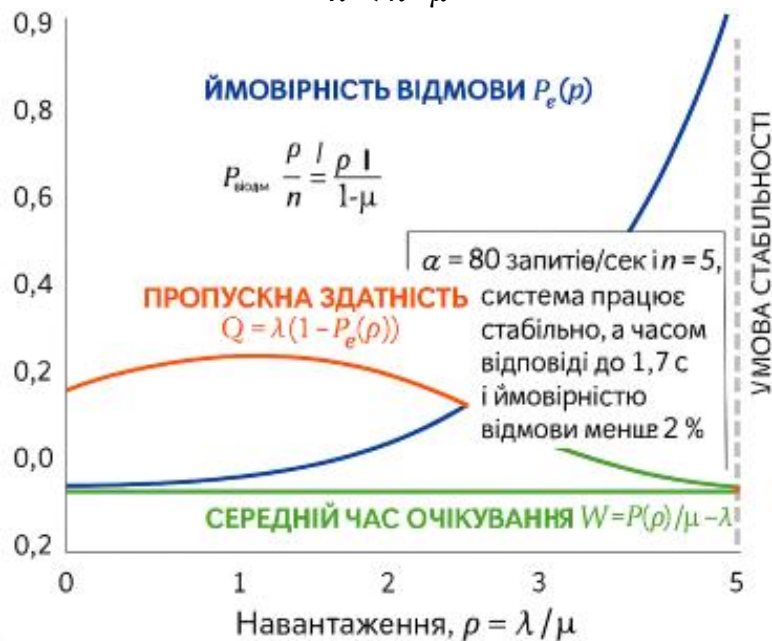


Рисунок 5 – Ключові показники ефективності системи обробки запитів.

Моделювання показало, що при кількості каналів (5) і середній інтенсивності $\lambda=80$ запитів/сек, середній час відповіді системи не перевищує 1,7 секунди, що відповідає вимогам режиму реального часу.

Ймовірність відмови $P_{\text{відм}}$ - лише 0,012, тобто менше 2 %.

Далі було розглянуто аналітичний модуль прогнозування ЕТА для покращення точності прогнозування часу прибуття (ЕТА). Розроблена модель на базі нейронних мереж LSTM (Long Short-Term Memory) представлена на рисунку 6. [8, 9]

Транспортні технології

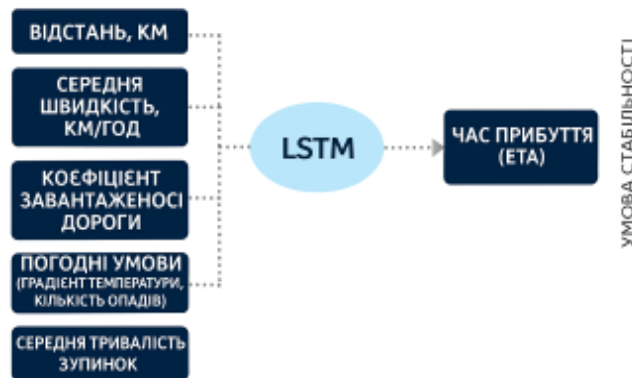


Рисунок 6 – STM-модель прогнозування часу прибуття (ETA) з багатofакторним входом.

Вхідними параметрами для моделі запропоновані: відстань, (км); середня швидкість, (км/год); коефіцієнт завантаженості дороги; погодні умови (градієнт температури, кількість опадів); середня тривалість зупинок.

Функціональна залежність:

$$ETA = f(d, v, C_t, W, S), \quad (8)$$

Де - d - відстань;

v - швидкість;

C_t - завантаженість;

W - погодний фактор;

S - кількість зупинок.

Точність прогнозу оцінювали за допомогою середньоквадратичної помилки (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ETA_i - ETA_i^*)^2} \quad (9)$$

Результати моделювання показали, що середня похибка прогнозування часу прибуття (ETA) становить не більше 3,4 %, у той час як для звичайних GPS-систем цей показник коливається в межах 9–12 %.

З метою оцінки ефективності системи було проведено експеримент, що охоплював п'ять міжнародних логістичних компаній України, які здійснюють діяльність у напрямках Польщі, Німеччини та Чехії. До моделювання залучили 100 транспортних одиниць, оснащених телематичними модулями GPS і датчиками CAN-шини.

Таблиця 1 – Система функціонувала у тестовому режимі протягом 30 днів.

Показник	До впровадження	Після впровадження	Покращення
Середній час доставки (год)	38,5	33,1	–14 %
Витрати пального (л/100 км)	27,8	24,9	–10,4 %
Кількість затримок >30 хв	16 %	8,7 %	–45 %
Точність ETA	89,3 %	96,6 %	+8,1 %
Час реакції диспетчерської системи	3,1 сек	1,7 сек	–45 %

ВИСНОВКИ

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої технології, яка дозволяє:

- скоротити час доставки вантажів у середньому на 10–15 %;
- підвищити енергоефективність транспортного процесу на 8–12 %;
- покращити точність прогнозування часу прибуття (ETA) до 96–97 %;
- знизити ризик перевантаження серверів диспетчерського центру під час пікових навантажень.

Практичне впровадження даної системи сприяє цифровій інтеграції міжнародних транспортних операторів, забезпечує більшу прозорість логістичних процесів, покращує оперативність прийняття рішень та підтримує екологічну стійкість автомобільного транспорту.

У рамках роботи було розроблено концепцію, математичну модель і практичний підхід до створення інтегрованої системи, яка забезпечує високий рівень автоматизації, точність і швидкість обробки даних, а саме:

- створено структурно-функціональну модель із трирівневою архітектурою, яка включає сенсорний, комунікаційний та аналітичний рівні;
- розроблено модель оптимізації маршрутів на основі теорії графів і нейронних мереж LSTM, що дозволило знизити похибку прогнозування часу прибуття (ETA) до 3,4%;
- ефективність системи підтверджена: час доставки скорочується на 10–15%, а витрати пального знижуються на 8–12%.

Практичне впровадження цієї системи сприяє підвищенню ефективності управління перевезеннями, поліпшенню безпеки та екологічності, а також інтеграції українських перевізників у загальноєвропейську транспортну мережу TEN-T.

Подальші перспективи досліджень полягають у створенні національних стандартів для обміну навігаційними даними, застосуванні передових технологій штучного інтелекту, впровадженні блокчейн-рішень та розробці цифрових двійників транспортних систем.

Оновлена система дозволить зменшити собівартість перевезень, підвищити конкурентоспроможність логістичних операторів і сприяти цифровій інтеграції транспортної галузі України в європейський простір.

Список використаних джерел

1. Фомін О. В., Ловська А. О. Інтелектуальні транспортні системи : монографія. — Київ : Логос, 2021. — 256 с.
2. Герзель В. М., Марчук М. М. Організація автомобільних перевезень : навч. посіб. — Рівне : НУВГП, 2008. — 200 с.
3. Любий Є. В., Каніус С. В. Системи GPS-моніторингу у транспортній логістиці. — Харків : ХНАДУ, 2022. — 184 с.
4. Regulation (EU) No 1315/2013 on Union guidelines for the development of the Trans-European Transport Network (TEN-T). — Official Journal of the European Union, 2013.
5. ISO 39001:2012. Road traffic safety (RTS) management systems — Requirements with guidance for use. — Geneva : International Organization for Standardization, 2012.
6. Chen W., et al. Artificial Intelligence in Logistics Optimization with Sustainability Considerations // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 21. — DOI: 10.3390/su16219145.
7. Roess R. P., Prassas E. S. Traffic Engineering. — New York : Pearson Education, 2020. — 720 p.

8. Duan Y., Lv Y. Travel Time Prediction with LSTM Neural Network // IEEE ITSC Proceedings. — 2016. — DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795686.
9. Jang J., et al. Travel Time Prediction Using Machine Learning Algorithms: Comparison of k-NN, LSTM and Transformer Models // Open Transportation Journal. — 2024.
10. Rejeb A., Rejeb K., Simske S., Keogh J. Blockchain Technologies in Logistics and Supply Chain Management: A Bibliometric Review // Logistics. — 2021. — DOI: 10.3390/logistics5040072.
11. Koh L., Dolgui A., Sarkis J. Blockchain in Transport and Logistics: State of the Art and Future Perspectives // Int. J. of Logistics Research and Applications. — 2020. — DOI: 10.1080/00207543.2020.1736428.
12. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council (General Data Protection Regulation — GDPR). — OJ L 119, 04.05.2016.
13. AnyLogic. Process Modeling and Road Traffic Libraries. — URL: <https://www.anylogic.com>.
14. Erlang A. K. The Theory of Probabilities and Telephone Conversations // Nyt Tidsskrift for Matematik B. — 1909. — Vol. 20. — P. 33–39.
15. MathWorks. MATLAB R2023b Documentation. — URL: <https://www.mathworks.com>.

Baranov I. O., Matviienko M. S., Kiritseva O. V.

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY FOR AUTOMATED NAVIGATION SYSTEMS FOR DISPATCH CONTROL OF INTERNATIONAL ROAD TRANSPORTATION

The article discusses ways to improve the efficiency of international road transport by improving the technologies of automated navigation systems for dispatch control (ANS). The main focus is on the creation of integrated information and analytical platforms for transport flow management that ensure digital interaction between carriers, customs authorities, and logistics operators.

It analyzes modern approaches to organizing dispatch control of road transport, which include the use of satellite positioning systems (such as GPS and Galileo), telematic monitoring tools, cloud services, and artificial intelligence algorithms. The main shortcomings of existing systems are identified, including fragmented information flows, limited geolocation accuracy, lack of unified data exchange protocols, and insufficient adaptability to changes in road conditions.

The paper proposes an approach to optimizing automated navigation systems by introducing cloud technologies, adaptive routing algorithms, and machine learning tools for more accurate arrival time (ETA) prediction and delay risk assessment. A conceptual model of a digital dispatch center has been developed, which enables centralized monitoring of traffic flows, provides analytical support for management decisions, and responds quickly to road incidents.

The results of the modeling showed that the use of the developed technology reduces delivery times by 10–15%, lowers fuel consumption by 8–12%, and ensures a high level of accuracy in predicting the estimated time of arrival (ETA), which is 96–97%. The practical implementation of this system contributes to improving the efficiency of international transport, reducing the environmental impact of transport, and integrating Ukraine into the European TEN-T transport network.

Keywords: *Automated navigation systems, international road transport, dispatch control, GPS monitoring, telematics, logistics, intelligent transport systems.*

Стаття надійшла 15.11.2025р.

ОБРАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ЗАВАНТАЖЕННЯ М'ЯКИХ КОНТЕЙНЕРІВ, ЩО МАЮТЬ ФОРМУ ЦИЛІНДРУ, У ВАНТАЖНІ ПРИМІЩЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У роботі розглянуто питання, що пов'язані з контейнеризацією перевезень вантажів. Контейнери різних конструкцій сьогодні широко застосовуються в технологічних процесах перевезення великої кількості вантажів. Вони становлять окремий вид транспортного обладнання з усталеними технічними характеристиками та оснащенням для механізованого виконання перевантажувальних операцій. Використання контейнерів підвищує ефективність як транспортного процесу, так і вантажно-складських робіт. Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій доставки сипких матеріалів є впровадження у логістичні схеми постачання продукції різноманітних м'яких контейнерів. Застосування такого обладнання є технічно й економічно доцільним, особливо за умов тимчасового зберігання та перевезення значних партій сипкого вантажу. Розглянуто особливості використання м'яких контейнерів як перспективного виду транспортного обладнання у технологіях доставки сипких і навалювальних вантажів. Проаналізовано переваги застосування такого транспортного обладнання. Особливу увагу приділено необхідності врахування при обранні раціональних схем розташування циліндричних м'яких контейнерів у вантажних приміщеннях можливої поперечної деформації стінок контейнерів. Величина цих деформацій визначається сукупністю чинників, серед яких ключовими є властивості вантажу, геометричні параметри контейнера та характеристики матеріалу оболонки. Найсуттєвіший вплив справляють розміри контейнера та щільність сипкого матеріалу в ньому. Суттєво впливають також коефіцієнт тертя між вантажем і стінками контейнера та співвідношення горизонтального й вертикального тиску, що визначають величину бічного навантаження. Важливим є також вплив властивостей матеріалу оболонки контейнера: його міцності, жорсткості, товщини, структури волокон, стану тканини. З урахуванням цього запропоновано підходи до уточнення розрахункових залежностей, що застосовуються під час розроблення схем розміщення у вантажних приміщеннях транспортних засобів м'яких контейнерів, які мають форму циліндру.

Ключові слова: Вантаж сипкий, транспортування, технологія, м'який контейнер, параметри, деформація, вантажне приміщення, схема вантаження.

Постановка проблеми. Застосування сучасних техніко-технологічних рішень у сфері вантажних перевезень забезпечує швидшу та ефективнішу доставку продукції кінцевим споживачам, одночасно сприяючи збереженню вантажів і підвищенню безпеки транспортних операцій. Одним із таких рішень, що довело свою ефективність, є контейнеризація, масове впровадження якої з середини ХХ століття істотно вплинуло на розвиток міжнародної торгівлі [1].

Суттєву частку глобального вантажообігу становлять насипні та навалювальні вантажі, до транспортування яких висуваються дедалі суворіші вимоги щодо безпеки, збереження якості, вибору раціональних технологій перевезення та контролю технічного стану рухомого складу. Традиційні схеми перевезення таких вантажів базуються на використанні універсальних або спеціалізованих транспортних засобів різних видів транспорту. Однак на практиці часто виникає дефіцит спеціалізованого рухомого складу, що стимулює впровадження нових, більш ефективних технологічних рішень для транспортування сипких

матеріалів. Це дозволяє підвищити ефективність усього транспортного процесу та задовольнити потреби всіх його учасників.

У цьому контексті важливого значення набуває науково обґрунтований вибір транспортної тари та обладнання. Від цих рішень залежать оптимізація розміщення вантажів як на складах, так і у вантажних приміщеннях транспортних засобів, а також рівень механізації вантажних та складських операцій.

Сьогодні контейнери різних конструкцій широко застосовуються в технологічних процесах перевезення великої кількості вантажів. Вони становлять окремий вид транспортного обладнання з усталеними технічними характеристиками та оснащенням для механізованого виконання перевантажувальних операцій. Використання контейнерів підвищує ефективність як транспортного процесу, так і вантажно-складських робіт.

Одним із перспективних напрямів удосконалення технологій доставки сипких матеріалів є впровадження м'яких контейнерів (FIBC, Big-Bag або МК) у логістичні схеми постачання. Застосування такого обладнання є технічно та економічно доцільним, особливо за умов тимчасового зберігання та перевезення значних партій вантажу. М'які контейнери вирізняються надійністю, простотою конструкції та виготовлення. Найчастіше вони виробляються з поліпропілену та мають форму паралелепіпеда або циліндра. Завдяки універсальності МК можуть бути адаптовані для роботи з різними видами вантажно-підйомної техніки, що робить їх ефективним елементом транспортного обладнання [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Впровадження м'яких контейнерів дозволило суттєво підвищити ефективність вирішення технологічних завдань, пов'язаних із транспортуванням вантажів. Зокрема, стало можливим скоротити втрати продукції на всіх етапах її обігу та зменшити витрати на проведення вантажних операцій.

Під час аналізу науково-технічних джерел, присвячених технологіям застосування м'яких контейнерів для транспортування вантажів, вдалося визначити низку переваг таких рішень порівняно з традиційними [3], [4]. Серед них:

- значне скорочення втрат вантажу в процесі перевезення;
- зменшення потреби у використанні окремих видів спеціалізованих транспортних засобів, які часто є дефіцитними;
- кращі умови збереження чистоти та якості продукції;
- підвищений рівень захисту довкілля та транспортних засобів від можливого шкідливого впливу вантажів;
- відсутність необхідності очищення транспортного засобу після транспортування;
- виконання вантажних операцій з МК за допомогою простих технічних засобів;
- створення умов для тимчасового зберігання окремих видів вантажів у МК просто неба, що дозволяє зменшити витрати на будівництво складських приміщень.

Сучасні технології дозволяють виготовляти м'які контейнери практично будь-якої геометричної форми. Найпоширенішими є моделі МК, що у заповненому стані мають форму паралелепіпеда або циліндра, причому циліндричні варіанти простіші у виробництві.

Для підвищення ефективності транспортування вантажів у МК важливо забезпечити максимально повне використання вантажного простору та вантажопідйомності транспортних засобів, що досягається шляхом оптимального планування схем завантаження.

Під час організації перевезень важливо добирати параметри м'яких контейнерів з урахуванням властивостей конкретного вантажу. Обрані схеми розміщення МК та характеристики завантажених матеріалів безпосередньо впливають на рівень використання об'єму та вантажопідйомності транспортних засобів. Проте нині цьому аспекту приділяється недостатньо уваги. На ефективність завантаження вантажних приміщень також впливають

різні чинники, зокрема деформація оболонки МК під дією завантаженого матеріалу, що може істотно змінювати його початкову форму.

М'які контейнери у формі циліндрів широко використовуються для транспортування сипких матеріалів. Теоретично такий контейнер можна розглядати як ідеальний циліндр із радіусом R_0 та висотою H . Однак, у реальних умовах під дією маси сипкого вантажу МК деформується, відхиляючись від своєї початкової геометрії. Найпоширенішим є утворення бочкоподібної форми, коли середня частина оболонки розширюється. Для оцінювання таких деформацій, зокрема втрати правильної геометричної форми, використовують підходи механіки суцільного середовища, що описують поведінку м'яких оболонок із обмеженою здатністю до розтягування. У цих моделях враховують дію тиску сипкого матеріалу на стінки контейнера. Питанням механічних властивостей деформованих оболонок присвячено значну кількість праць. Наприклад, у роботі [5] подано результати досліджень компресійної міцності гнучких оболонок, у [6] проведено FEA-аналіз деформації мішків, заповнених вантажем. Проєкт [7] спрямований на вивчення внутрішніх напружень у гнучких контейнерах на основі експериментальних і чисельних методів. Динамічні аспекти роботи еластичних оболонок розглянуто в роботі [8], а у [9] наведено результати моделювання поведінки волокнистих пакувальних матеріалів під тривісним стисканням. У цій роботі висвітлено питання жорсткості, деформації та ущільнення, що має важливе значення для розуміння механічної поведінки стінок МК та тиску сипкого вантажу всередині контейнера.

Мета дослідження. Метою роботи є уточнення розрахункових залежностей, що застосовуються для вибору схем розміщення м'яких контейнерів циліндричної форми у вантажних приміщеннях транспортних засобів.

Основний матеріал дослідження. Завдання детального аналізу складних закономірностей деформування оболонок м'яких контейнерів, у цій роботі не ставиться. На наш погляд, найбільш доречно для опису цих процесів використовувати підхід, запропонований у теорії Янссена [10]. Ця теорія дає змогу визначати розподіл вертикального тиску сипкого матеріалу в силосах, контейнерах та інших подібних ємностях. На відміну від рідин, у сипких матеріалах тиск не зростає безперервно з глибиною, а досягає певного насичення. Це пояснюється тим, що частина навантаження передається на стінки за рахунок сил тертя. Для оцінювання цих ефектів може застосовуватися класична формула Янссена, яка дає змогу визначити вертикальний тиск у заповненому контейнері:

$$p(z) = \frac{\gamma R}{2\mu k} \left(1 - e^{\frac{-2\mu k z}{R}}\right),$$

де:

$p(z)$ - тиск в середині м'якого контейнера на глибині z ;

γ - питома вага сипкого вантажу, Н/м³;

R - характерний розмір контейнера (радіус);

μ - коефіцієнт тертя вантажу по стінці МК;

k - коефіцієнт бокового тиску (вираховується у вигляді відношення горизонтального та вертикального напружень).

На рис. 1 для прикладу приведений графік розподілу тиску в середині м'якого контейнера циліндричної форми, який заповнений пшеницею для наступних параметрів: $H = 1.5$ м, $R = 0.45$ м, $\rho \approx 800$ кг/м³, $\mu = 0.40$, $k = 0.45$.

На графіку рис. 1 видно типове насичення тиску. Тиск на дні контейнера за Янссеном становить $\approx 6,86$ кПа (лінія 2), тоді як гідростатичний тиск – 11,77 кПа (лінія 1).

Тобто частина ваги вантажу «підхоплюється» стінками МК через тертя, що й викликає його бочкоподібний розпір. Це дає можливість зробити висновок, що тиск в контейнері не зростає лінійно, а виходить на плато (насичується). При використанні високих контейнерів це

означає, що верхні шари вантажу «висять» на стінках через тертя. Для гнучких оболонок МК це призводить до бочкоподібної деформації: внутрішній тиск найбільше розпирає середні ділянки стінок контейнера.

Приклад вигляду бочкоподібної деформації циліндричного МК показано на рис.2.

Зміну діаметру контейнера на кожному рівні його висоти у першому наближенні можна описати функцією

$$D(z) = 2R(z) = R_0 + 2\delta \cdot \sin^2\left(\frac{\pi z}{H}\right)$$

де 2δ – можлива максимальна поперечна деформація контейнера.

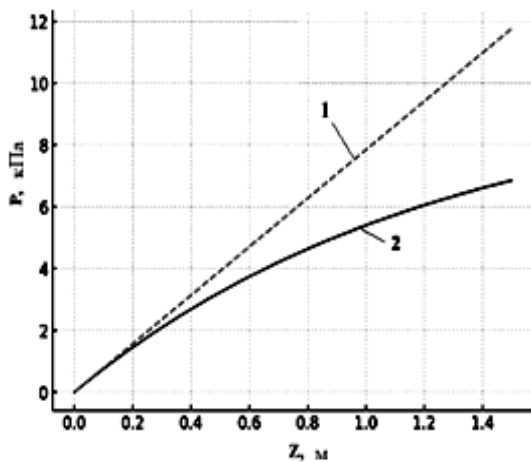


Рисунок 1 – Графік розподілу тиску в середині МК циліндричної форми

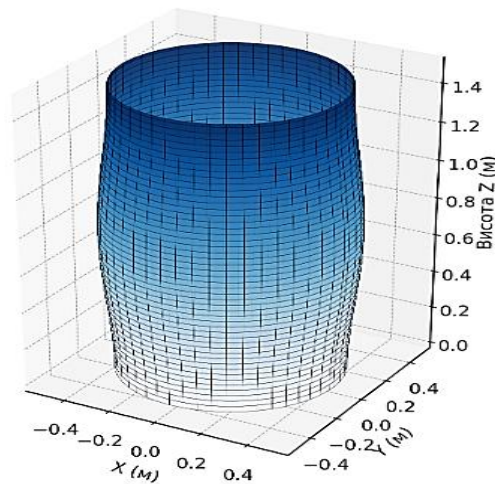


Рисунок 2 – Вигляд деформованого циліндричного м'якого контейнера

Величина 2δ визначається сукупністю чинників, серед яких ключовими є властивості вантажу, геометричні параметри контейнера та характеристики матеріалу оболонки. Найсуттєвіший вплив справляють розміри МК: зі збільшенням його діаметра бічне розширення стає інтенсивнішим. Значну роль відіграє й щільність сипкого матеріалу, оскільки важчий вантаж створює більший внутрішній тиск. На формування деформації впливають також коефіцієнт тертя між вантажем і стінками МК та співвідношення горизонтального й вертикального тиску, що визначають величину бічного навантаження.

Помітним є також внесок властивостей матеріалу оболонки: його міцності, жорсткості, товщини, структури волокон, а також наявності підсилювальних елементів. Стан тканини змінюється під дією експлуатаційних чинників - вологості, температури, тривалої роботи (повзучості). Додатково на форму контейнера впливають і зовнішні умови: щільність розміщення МК у кузові, тиск від сусідніх контейнерів та динамічні навантаження під час руху транспортного засобу.

Як вже зазначалося, метою статті є розроблення підходів до уточнення розрахункових залежностей, що застосовуються для вибору схем розміщення циліндричних МК у вантажних відсіках транспортних засобів. Тому детальний аналіз фізичних механізмів деформації контейнерів у роботі не проводився - у розрахунках використовується лише певне фіксоване максимальне значення можливої поперечної деформації.

Раніше виконаний аналіз варіантів укладання циліндричних вантажних одиниць у транспортні кузова при їх установці на торець показав [4], що кількість раціональних схем є

обмеженою (див. рис. 3). Тут L та B - відповідно довжина і ширина вантажного приміщення.

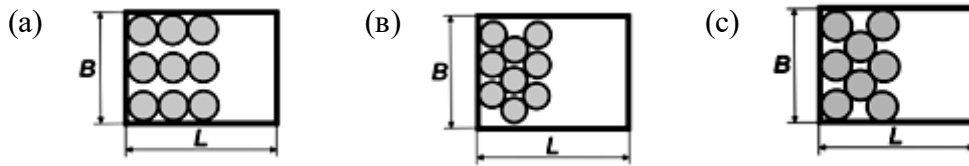


Рисунок 3 – Типові схеми розміщення циліндричних вантажів у вантажних приміщеннях

Щоб якнайповніше використовувати можливості транспортних засобів, треба визначити максимальну кількість м'яких контейнерів G (що мають циліндричну форму), яку можна розмістити у вантажному приміщенні транспортного засобу в залежності від параметрів цього приміщення та характеристик МК.

Для розглянутих схем завантаження, з урахуванням потенційних можливостей деформації м'яких контейнерів, можна записати такі розрахункові залежності:

Для схеми вантаження (а):

$$G_a = N_a \cdot M_a = \left[\frac{H}{h} \right] \cdot \left[\frac{B}{2(R+\delta)} \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R+\delta)} \right],$$

Для схеми вантаження (б):

$$G_b = N_b \cdot M_b = \left[\frac{H}{h} \right] \cdot \left[\frac{B}{2(R+\delta)} \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R+\delta)-S} \right].$$

де S - глибина «сідловини», яка утворюється двома розташованими поруч МК при установці у вантажному приміщенні другого та наступних рядів вантажу.

Параметр S залежить від діаметру МК ($D = 2R$) та величин зазорів Z , які мають місце між м'якими контейнерами в поперечному ряду (див. рис. 4).

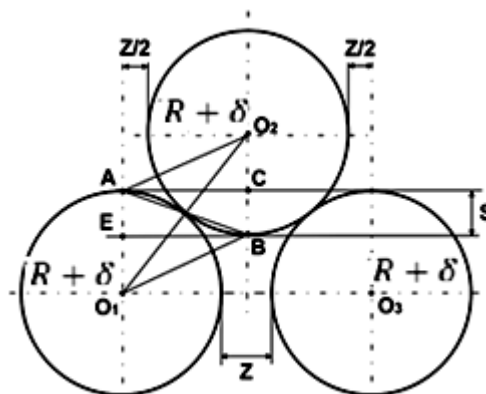


Рисунок 4 – Розрахункова схема

З аналізу геометричних співвідношень (рис.4) можна визначити згідно з [11], що

$$S = 2(R + \delta) - \sqrt{4(R + \delta)^2 - (R + \delta) + Z/2)^2}.$$

Схема вантаження (c) може бути реалізована у двох варіантах: 1 - парна та 2 - непарна загальна кількість рядів м'яких контейнерів у подовжньому напрямку.

- для схеми (c_1):

$$G_{c1} = N_{c1}^n \cdot M_{c1}^n + N_{c1}^m \cdot M_{c1}^m = \left[\frac{H}{h} \right] \cdot \left[\frac{B}{2(R + \delta)} \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R + \delta) - S} \right] / 2 + \left[\left[\frac{B}{2(R + \delta)} \right] - 1 \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R + \delta) - S} \right] / 2,$$

- для схеми (c_2):

$$G_{c2} = N_{c2}^n \cdot M_{c2}^n + N_{c2}^m \cdot M_{c2}^m = \left[\frac{H}{h} \right] \cdot \left[\frac{B}{2(R + \delta)} \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R + \delta) - S} \right] / 2 + 1 + \left[\left[\frac{B}{2(R + \delta)} \right] - 1 \right] \cdot \left[\frac{L}{2(R + \delta) - S} \right] / 2,$$

де N_i - число МК, які розташовані по ширині вантажного приміщення в одному ряду (для обраної схеми завантаження);

M_i - кількість поперечних рядів встановлення МК у вантажному приміщенні транспортного засобу при обраній схемі завантаження;

L, H, B - відповідно довжина, висота та ширина вантажного приміщення;

$2R$ - номінальний діаметр м'якого контейнера;

2δ - величина максимальної деформації МК по діаметру;

h - висота одного МК;

Квадратними дужками [...] позначені округлені у менший бік до цілого числа значення відповідних виразів.

Схема розміщення та закріплення вантажів у різних транспортних засобах залежить від характеристик вантажу та транспортного засобу. Окрім іншого, наприклад, для автомобілів схема розміщення залежить від характеристик міцності переднього та заднього борту, а також бічних стінок кузова автомобіля.

Запропоновані аналітичні залежності дозволяють обґрунтовувати вибір оптимальних схем завантаження м'яких контейнерів при відомих характеристиках вантажного приміщення транспортного засобу та визначених масо-габаритних показниках МК.

На основі цих залежностей проведені розрахунки для різних схем завантаження МК із різними радіусами у вантажне приміщення транспортного засобу, яке має параметри кузова автомобільного напівпричепу (ширина 2,4 м, довжина 13,6 м. Висота одного контейнера $h = 1$ м. Завантаження здійснювалося в один ярус. На рис.5 для прикладу показані розрахункові графіки залежності $G_i = f(R, Z)$ для схеми (b) при урахуванні деформації МК (лінія 1 для величини максимальної деформації МК по діаметру $2\delta = 0,1$ м) та без урахування деформації МК (лінія 2). Аналіз цих графіків свідчить, що, наприклад, для м'якого контейнера з радіусом $R = 0,3$ м, різниця розрахункової кількості МК, яку можна розмістити в обраному вантажному приміщенні, з урахуванням заданої величини деформації м'яких контейнерів 2δ може бути на 50 одиниць менше, ніж для тієї ж розрахункової схеми без урахування величини 2δ .

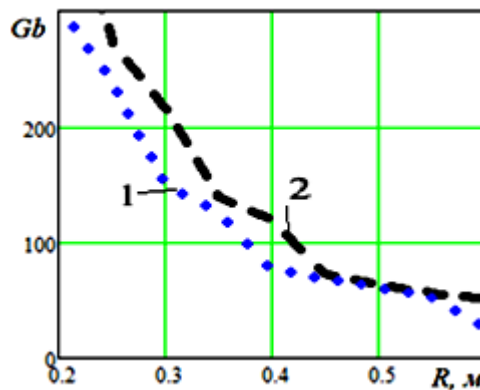
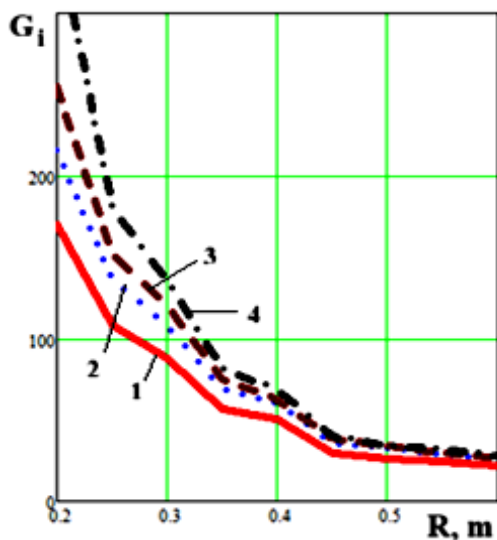


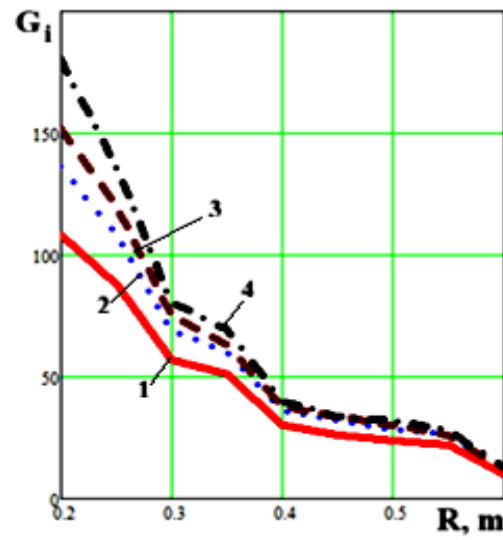
Рисунок 5 – Графіки залежності $G_i = f(R, Z)$ для схеми вантаження (b) при $2\delta = 0.1$ м (1 – з урахуванням деформації МК, 2 – без урахування деформації МК)

Деякі результати розрахунків, що ілюструють графіки залежності $G_i = f(R, Z)$ для схем вантаження (a) та (б), приведені рис.6.

Проаналізувавши графіки на рис.6 можна побачити, що ефективність обраної схеми вантаження суттєво залежить від величини 2δ поперечної деформації м'яких контейнерів. Розрахункова кількість м'яких контейнерів, яку можна розмістити у обраному вантажному приміщенні, при врахуванні деформації стінок МК є меншою, ніж без урахування цього фактору. Ця залежність особливо помітна для МК з невеликими радіусами $R = 0.2 \dots 0.3$ м та великими поперечними зазорами Z між ними при укладанні в кузов транспортного засобу



а) без урахування деформації МК



б) з урахуванням деформації МК ($2\delta = 0.1$ м)

Рисунок 6 – Графіки залежностей $G_i = f(R, Z)$:

- 1 - схема вантаження (a); 2 - схема вантаження (б), $Z = 0.1$ м;
- 3 - схема вантаження (б), $Z = 0.2$ м; 4 - схема вантаження (b), $Z = 0.3$ м

Наприклад, при $R = 0.3$ м та $Z = 0.3$ м це зменшення складає 42 %. При $R = 0.4$ м та $Z = 0.2$ м зменшення також складає близько 40 %.

На рис.7 показані графіки залежностей $G_i = f(R, Z)$ для схеми вантаження (c1) з

урахуванням деформації МК (поверхня 1) та без урахування деформації МК (поверхня 2).

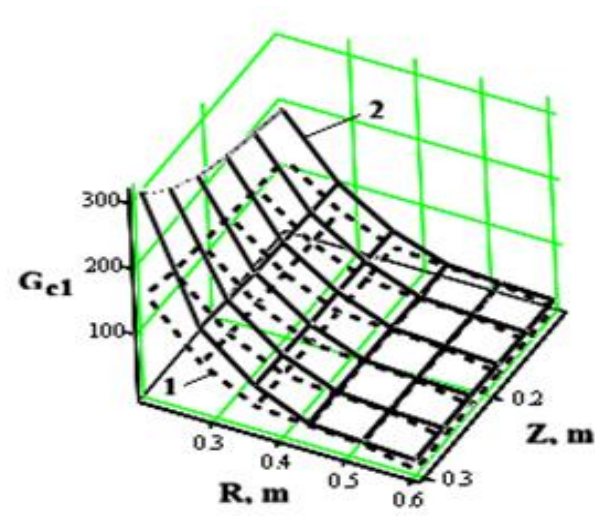


Рисунок 7 – Графіки залежностей $G_i = f(R, Z)$:

1 - схема вантаження (c_1), $2\delta = 0,1\text{м}$; 2 - схема вантаження (c_1), $2\delta = 0$.

Добре видно, що (особливо для м'яких контейнерів з невеликими радіусами $R = 0,2 \dots 0,3\text{м}$) поперечна деформація МК суттєво впливає на ефективність обраної схеми вантаження. Розрахункова кількість МК, що розміщуються у вантажному приміщенні з обраними геометричними параметрами, в залежності від радіусу м'якого контейнера та величини Z поперечних зазорів між ними при укладанні в кузов, при врахуванні поперечної деформації МК може бути меншою до 40 %.

Таким чином, використовуючи запропоновані розрахункові залежності, можна обрати раціональну схему вантаження МК та підібрати параметри м'яких циліндричних контейнерів, при яких можливо максимально ефективно використовувати вантажопідйомність транспортного засобу. Значення величини 2δ максимальних деформацій МК при їх завантаженні може бути обране на основі проведення експериментів, або при проведенні спеціальних розрахунків.

ВИСНОВКИ

Використання м'яких контейнерів у технологічних процесах транспортування сипких та навалювальних вантажів є одним із перспективних напрямів їх удосконалення. Найчастіше застосовують м'які контейнери, які у заповненому стані набувають циліндричної форми. Їх популярність пояснюється простотою конструкції та виготовлення. Під дією навантаження сипкого матеріалу такі контейнери зазвичай деформуються, відхиляючись від ідеальної геометрії. Типовою є бочкоподібна деформація, під час якої стінки МК розширюються в середній частині його висоти. Розмір максимальної поперечної деформації МК визначається поєднанням властивостей завантаженого матеріалу, параметрів контейнера та характеристик тканини, з якої виготовлена оболонка.

Щоб забезпечити повніше використання вантажних приміщень транспортних засобів при перевезенні сипких матеріалів у таких контейнерах, були запропоновані аналітичні залежності, які дають змогу обґрунтувати оптимальний спосіб розміщення циліндричних МК у кузові з урахуванням їх геометрії та параметрів вантажного відсіку.

Установлено, що поперечна деформація суттєво впливає на ефективність обраної схеми розміщення. Найпомітнішим цей вплив є для контейнерів із малим початковим радіусом. За наявності такої деформації фактична кількість МК, яку можливо розташувати у вантажному відсіку з заданими розмірами, може зменшуватися до 40 %.

Застосування запропонованих розрахункових залежностей дає можливість визначити найбільш доцільну схему розміщення при обраних розмірах м'яких циліндричних контейнерів для забезпечення максимального використання вантажного приміщення з урахуванням деформування МК. Оцінити величину максимальної деформації можна експериментально або шляхом спеціальних інженерних розрахунків.

Рациональний підбір параметрів м'яких контейнерів і продумане обрання схеми їх вантаження дозволять значно зменшити логістичні витрати під час транспортування сипких вантажів.

Список використаних джерел

1. *Helga Pavlić Skender, Petra Adelajda Zaninović, Elena Srića.* (2019) Review of Modern Transportation Technologies with focus on Containerization. *Pomorski zbornik*, 57, 2019, 111-121.
2. *Mihajlov E.V.* (2018) Tehnologii perevezennja vantazhiv u m'jakih kontejnerah. Beu Bassin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018. 168 s. ISBN: 978-613-9-57815-3.
3. *Stanislav Semenov, Evgeny Mikhailov, Oleksandr Kravchenko, Jan Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk.* (2023) Improvement of the soft containers use in transportation of the bulk cargo. *Communications*, 4/2023 vol.25, B278 - B284. – Режим доступу: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.064>
4. *Evgeny Mikhailov, Stanislav Semenov, Maxim Kovtanets, Jan Dižo, Miroslav Blatnický, Vadym Ishchuk* (2023). Increasing the efficiency of transportation of cargoes with a cylindrical shape. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina* 2023, 25(4): B294-B300. – Режим доступу: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.067>
5. *Frontiers in Robotics and AI.* (2025) Vision-based manipulation of transparent plastic bags in industrial setups. *Frontiers in Robotics and AI*. <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1506290>
6. *Centrifuge & FEA study (offshore mold bags)* (2019) Simulation and Analysis of Deformation Characteristics of Moulded Bag Solidified Soil Embankment. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 242(6):062023. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/6/062023>
7. *Ooi, J. Y., & Rotter, J. M.* (2021) Measurement and modelling of powder flow in flexible containers. The University of Edinburgh MKhool of Engineering Report. – Режим доступу: <https://old.eng.ed.ac.uk/research/projects/measurement-and-modelling-powder-%EF%AC%82ow-%EF%AC%82exible-containers>
8. *Soft granular materials group (Phys. Rev. X).* (2015) Fluid-Driven Deformation of a Soft Granular Material. *Physical Review X*. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.5.011020>
9. *Guo, Y., Li, Y., Liu, Q., Jin, H., Xu, D., Wassgren, C., & Curtis, J.* (2019) Yielding and hardening of flexible fiber packings during triaxial compression. *arXiv preprint, arXiv:1904.05013*. – Режим доступу: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05013>
10. *Dyck, G., Rogers, A., & Paliwal, J.* (2024) A review of analytical methods for calculating static pressures in bulk solids storage structures. *KONA: Powder and Particle Journal*, 41, 108–122. – Режим доступу: <https://doi.org/10.14356/kona.2024013>
11. *Vygodsky M.* *Mathematical Handbook Elementary Mathematics.* – Режим доступу: https://www.amazon.com/Mathematical-Handbook-Elementary-Mathematics-Vygodsky/dp/8123903103?ref=ast_author_dp

SELECTION OF RATIONAL SCHEMES FOR LOADING SOFT CYLINDER-SHAPED CONTAINERS INTO CARGO COMPARTMENTS OF VEHICLES

The paper considers issues related to containerization of cargo transportation. Containers of various designs are widely used today in technological processes of transporting large quantities of cargo. They constitute a separate type of transport equipment with established technical characteristics and equipment for mechanized performance of reloading operations. The use of containers increases the efficiency of both the transport process and cargo and warehouse operations. One of the promising areas for improving technologies for delivering bulk materials is the introduction of various soft containers into logistics schemes for supplying products. Such packaging is economically feasible, especially in conditions of temporary storage and transportation of large batches of bulk cargo. The features of using soft containers as a promising type of transport equipment in technologies for delivering bulk and bulk cargo are considered. The advantages of using such transport equipment in transport and logistics technologies are analyzed. Special attention is paid to the need to take into account the possible transverse deformation of the container walls when choosing rational schemes for placing cylindrical soft containers in cargo spaces. The magnitude of these deformations is determined by a set of factors, among which the key ones are the properties of the cargo, the geometric parameters of the container and the characteristics of the shell material. The most significant influence is exerted by the dimensions of the container and the density of the bulk material. The coefficient of friction between the cargo and the container walls and the ratio of horizontal and vertical pressure, which determine the magnitude of the lateral load, also have a significant impact. The contribution of the properties of the container shell material is also noticeable: its strength, stiffness, thickness, fiber structure, fabric condition, and the presence of reinforcing elements. Taking this into account, approaches are proposed to clarify the calculation dependencies used when developing schemes for placing soft containers that have the shape of a cylinder in the cargo spaces of vehicles.

Keywords: Bulk cargo, transportation, technology, soft container, parameters, deformation, cargo space, loading scheme.

Стаття надійшла 02.12.2025р.

УДК 629.4.01

doi.org/10.31498/2522-9990302025347240

Карашук В.О.

ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ДЛЯ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У роботі проведено огляд гібридного залізничного рухомого складу з метою впровадження для пасажирських перевезень. Визначено, що основним видом транспорту для пасажирських перевезень в Україні є автомобільний транспорт (автобусні перевезення), яким щорічно перевозиться 41,8% пасажирів, а доля залізничного транспорту складає лише 3,3%. Аналіз перевезень пасажирів за видами сполучення дозволив встановити, що на залізничний транспорт припадає 25,9% пасажирських перевезень у міжміському сполученні та 23,9% у приміському, при цьому у міському сполученні він взагалі не задіяний. Встановлено,

що автобусні пасажирські перевезення мають ряд проблемних місць таких як, застарілість парку рухомого складу, низька енергоефективність та екологічність транспортних засобів, велике шумове забруднення (особливо в містах), висока завантаженість автомобільних доріг особливо в години пік, низький рівень безпеки на дорозі. З урахуванням сучасних вимог щодо використання джерел енергії з низьким вмістом вуглецю в тому числі для транспорту пропонується збільшення частки залізничного транспорту у перевезеннях вантажів та пасажирів (з метою заміни/скорочення перевезень автомобільним транспортом). Це потребує нових підходів до організації перевезень, вибору транспортних засобів, що характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю, використанні альтернативних палив та збільшення частки відновлювальних джерел енергії для тягового приводу залізничного рухомого складу. Одним з підходів є використання гібридного приводу для пасажирського моторвагонного рухомого складу. Автором виконано аналіз гібридних поїздів за гібридними технологіями (в тому числі на основі відновлювальних нетрадиційних джерел енергії), техніко-експлуатаційними показниками та сферою застосування на основі технічної літератури, а також звітах розробників залізничних гібридних тягових засобів. Також визначені обмеження використання гібридного МВРС за компоновкою модулів у коротко- та середньо терміновій перспективі розвитку гібридних залізничних технологій для пасажирських перевезень.

Ключові слова: Пасажирські перевезення, залізничний транспорт, гібридні технології, гібридний поїзд, залізничний рухомий склад.

Вступ. Основними викликами для транспортної галузі в Україні є подорожчання вартості пального та електроенергії, дефіцит енергоресурсів в умовах постійних ворожих атак на енергетичну інфраструктуру країни, посилення екологічних стандартів, вимоги прийнятого «Зеленого курсу» щодо декарбонізації транспорту, вимоги щодо підвищення енергоефективності та екологічності транспортних засобів зумовлені стратегічними цілями розвитку залізничного транспорту. Подолання цих викликів потребує нових ініціатив, що дозволять скоротити витрати енергоресурсів та покращити екологічні показники транспорту при одночасному підвищенні мобільності та сталості розвитку.

Постановка проблеми. Збільшення частки залізничного транспорту для вантажних та пасажирських перевезень за умови зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище потребує аналізу технологій підвищення його енергоефективності та енергозбереження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі багато науковців в Україні та світі займаються питанням розробки та впровадження гібридних технологій для залізничного транспорту. Авторами роботи [1] розглянуто методи та моделі визначення техніко-економічних показників локомотивів із гібридним приводом. У роботах [2-3] визначено техніко-економічні показники гібридних транспортних засобів з урахуванням умов експлуатації та досліджено вплив типу експлуатації на параметри маневрового тепловоза з гібридною силовою установкою. Наукова праця авторів [4] присвячена удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних маневрових тепловозів. В роботі [5] автор виконав огляд гібридних залізничних технологій, що охоплює гібридні конфігурації та пристрої накопичення енергії. Дослідження які виконані у наукових працях присвячені впровадженню і використанню гібридних технологій для тягового рухомого складу задіяного в маневровій роботі, огляд гібридних технологій не охоплює питань використання відновлювальних джерел енергії для гібридного транспорту, специфіку та стан перевезень пасажирів в Україні.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є аналіз технологій гібридного залізничного рухомого складу з метою обґрунтування його використання для галузі.

Транспортні технології

Основний матеріал дослідження. Основними видами транспорту для пасажирських перевезень в Україні є: автомобільний, залізничний та міський електротранспорт до складу якого входять тролейбусні, трамвайні та перевезення метрополітеном. Майже не задіяні у перевезенні пасажирів морський, внутрішній водний та авіаційний транспорт.

За даними статистичної служби України (за період 2018-2023 р.р.) щорічно лідером перевезень пасажирів є міський електротранспорт яким перевозиться – 1606,2 млн. пас. (54,9% всіх пасажирських перевезень), автомобільний (автобусні перевезення) – 1225,2 млн. пас. (41,8% всіх пасажирських перевезень) та залізничний транспорт – 96,7 млн. пас. (3,3% всіх пасажирських перевезень). Динаміка перевезень пасажирів за видами транспорту наведено на рис.1.

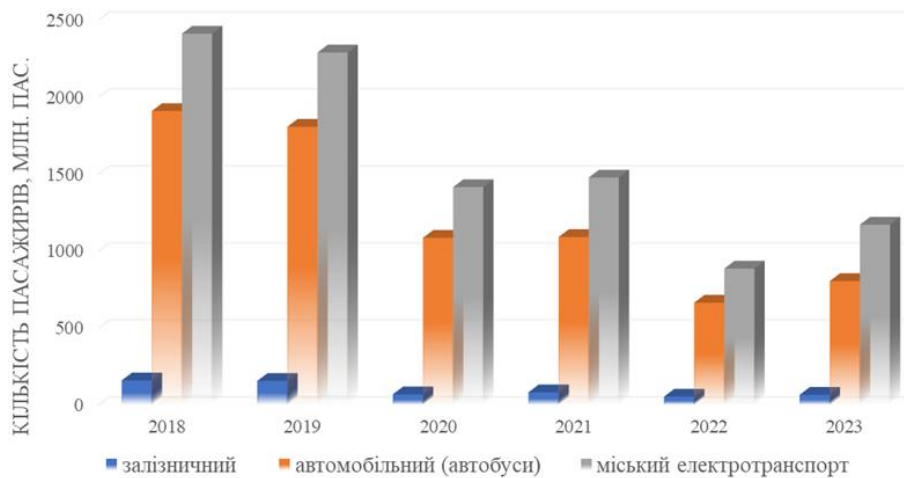


Рисунок 1 – Динаміка перевезень пасажирів за видами транспорту в Україні за період 2018-2023 р.р. (побудовано автором за даними джерела [6])

З рис.1. можна спостерігати скорочення кількості перевезень пасажирів за всіма видами транспорту, що пов'язано у 2020-2021 р.р. з пандемією Covid-19 та повномасштабним вторгненням росії до території України у 2022 році та масовою міграцією населення викликаного ним.

За видами сполучення, пасажирські перевезення (за аналогічний період), розподілилися наступним чином:

- міжміське сполучення:
 - автомобільний (автобуси) – 77 млн. пас. щорічно;
 - залізничний – 29,3 млн. пас. щорічно;
 - авіаційний – 7 млн. пас. щорічно;
- приміське сполучення:
 - автомобільний (автобуси) – 215 млн. пас. щорічно;
 - залізничний – 67,5 млн. пас. щорічно;
 - внутрішній водний – 0,3 млн. пас. щорічно;
- міське сполучення:
 - міський електротранспорт – 1606,2 млн. пас. щорічно;
 - автомобільний (автобуси) – 933,2 млн. пас. щорічно.

Відсотковий розподіл кількості перевезених пасажирів за видами транспорту та сполучення наведені на рис. 2.

Транспортні технології



Рисунок 2 – Відсотковий розподіл кількості перевезених пасажирів за видами транспорту та сполучення в Україні за період 2018-2023 р.р. (побудовано автором за даними джерела [6])

Як встановлено дослідженнями, щорічні викиди забруднюючих речовин від пересувних джерел у атмосферне повітря в Україні сягають 1578194,32 т [7].

За даними енергетичного балансу України встановлено, що основним споживачем нафтопродуктів є автомобільний транспорт. Таким чином на сьогоднішній день автобусні перевезення характеризуються такими слабкими місцями, як:

- висока собівартість перевезень;
- великі витрати на паливо (бензин та дизельне паливо);
- застарілість парку рухомого складу;
- низька енергоефективність та екологічність транспортних засобів;
- велике шумове забруднення (особливо в містах);
- висока завантаженість автомобільних доріг особливо в години пік;
- низький рівень безпеки на дорозі.

Для вирішення проблем споживання традиційних енергоресурсів всіма галузями виробництва, в тому числі і в транспортній галузі та використання джерел енергії з низьким вмістом вуглецю в Європейському Союзі розроблено план для досягнення кліматично нейтральної Європи до 2050 року, так званий Європейський зелений курс (далі ЄЗК). Правове та політичне підґрунтя цього процесу в Європейському Союзі становлять: Європейська зелена угода; Комюніке «Європейський зелений курс»; Воднева стратегія ЄС; Стратегія ЄС з адаптації до зміни клімату.

Серед пріоритетних сфер для України у рамках Європейської зеленої угоди розглядається екологізація транспорту та передбачає: скорочення викидів парникових газів у секторі на 90%; збільшення частки сталих видів транспорту, таких як залізничний і внутрішній

водний; жорсткі стандарти викидів забруднюючих речовин для транспортних засобів із двигунами внутрішнього згорання; розвиток інфраструктури для електромобілів та водневих транспортних засобів [8].

В свою чергу в Україні розроблена «Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року», що передбачає перехід до енергосистеми з використанням джерел енергії з низьким вмістом вуглецю, розбудову джерел чистої електричної та теплової енергії, стимулювання використання альтернативних нафтопродуктам моторних палив і перехід вантажних та пасажирських перевезень на більш екологічні чисті види транспорту, такі як внутрішній водний транспорт та залізничний транспорт [9].

З урахуванням вищезазначеного, збільшення частки залізничного транспорту у перевезеннях вантажів та пасажирів (з метою заміни/скорочення перевезень автомобільним транспортом) потребує нових підходів до організації перевезень, вибору транспортних засобів, що характеризуються високою енергоефективністю та екологічністю, використанні альтернативних палив та збільшення частки відновлювальних джерел енергії для тягового приводу залізничного рухомого складу.

Наразі залізничні пасажирські перевезення у міжміському сполученні здійснюються електровозами серій ЧС2, ЧС7, ЧС4, ЧС8, ДС3, ВЛ40, ВЛ10 та тепловозами серій ТЕП70, ТЕП150 у складі пасажирських поїздів та високошвидкісними поїздами Hyundai Rotem. У приміському сполученні задіяні електропоїди серій ЕР9Е, ЕР9Т, ЕР9М, ЕПЛ9Т, ЕД9М та дизель-поїди серій ДР1А, рейкові автобуси PESA 620М, 630М. В якості міської кільцевої електрички м. Києва задіяні електропоїди серій ЕР9Е.

За даними Міністерства розвитку громад та територій України середній вік парку локомотивів складає 46 років, а зношеність понад 96% [10]. Оновлення парку ТРС відбувається повільними темпами в основному шляхом модернізації існуючих локомотивів та МВРС на власних ремонтних потужностях Укрзалізниці. На даний час модернізація не вирішує основних проблем локомотивної тяги в контексті підвищення енергоефективності тягового рухомого складу, екологічності та використання альтернативних джерел енергії для тягового приводу.

Одним з підходів щодо скорочення витрат енергії та палива на тягу поїздів, зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, використання відновлювальних джерел енергії для тягового приводу локомотивів та МВРС є використання гібридних технологій тягового приводу. Використання гібридних поїздів у секторі пасажирських перевезень дозволить досягти основні цілі стратегій розвитку транспорту в Україні.

За матеріалами джерела [11] обсяг ринку гібридних поїздів у 2022 році оцінювався у 16,4 млрд доларів США, і, за прогнозами, він зростатиме із середньорічним темпом зростання понад 5% у період з 2023 по 2032 рік. Розвиток гібридних поїздів нерозривно пов'язаний зі зростаючим споживанням нафтопродуктів в якості палива для транспортних засобів та гострим питанням скорочення викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел. Виробники гібридного залізничного транспорту пропонують екологічну альтернативу, що призводить до зниження шкідливих викидів при експлуатації та підвищення паливної ефективності. Цей підхід перебуває у контексті глобальної боротьби зі зміною клімату та скорочення вуглецевого сліду транспортного сектора, що робить гібридні локомотиви та моторвагонний рухомий склад привабливим рішенням для стійкого залізничного транспорту.

Провідні будівельні компанії залізничного рухомого складу пропонують різні концепції гібридного тягового приводу. Характеристики гібридного моторвагонного рухомого складу для пасажирських перевезень наведено у табл. 1.

Транспортні технології

Таблиця 1 – Характеристики гібридного моторвагонного рухомого складу для пасажирських перевезень

Гібридна технологія	Назва поїзда (серії), виробник	Швидкість, км/год	Запас ходу, км	Сфера застосування
Акумуляторний-електропоїзд (Battery Electric Multiple Unit)	Mireo Plus B (Siemens Mobility) [12]	160	80-120	Частка залізничної мережі з електрифікованими та неелектрифікованими ділянками (змішані залізничні мережі); використання гібридних беземісійних поїздів для міського та приміського сполучення в якості заміни автомобільного транспорту для пасажирських перевезень; використання гібридних поїздів для міського та приміського сполучення
	B 82500 (Alstom) [13]	160	80-160	
	Flirt Akku (Stadler) [14]	140	150	
	RegioPanter (BEMU) (Škoda Group) [15]	160 120 від АБ	80	
Дизель-електричний поїзд (Diesel Electric Multiple Unit)	SNCF B 81500 (Bombardier) [16]	160	-	Не електрифіковані ділянки залізничної мережі, що обслуговуються дизельними поїздами; частка залізничної мережі з електрифікованими та неелектрифікованими ділянками (змішані залізничні мережі); використання гібридних беземісійних поїздів для міського та приміського сполучення в якості заміни автомобільного транспорту для пасажирських перевезень; використання гібридних поїздів для регіонального та заміського сполучення
	Plus 227M (FPS) [17]	120; 160	-	
Воднево-акумуляторний поїзд (Hydrogen Battery Multiple Unit)	Mireo Plus H (Siemens Mobility) [18]	160	600-1000	
	Coradia iLint (Alstom) [19]	140	1000	
Акумуляторний електро-дизель-поїзд (Battery Electric Diesel Multiple Unit)	Régiolis (SNCF, Alstom, CAF) [20]	160; 200	1000	
	Škoda 27Ev BEDMU (Škoda Group, RegioJet) [21]	160; 120 від АБ	-	
Сонячно-акумуляторний електро/дизель-поїзд (Solar Battery Electric/Diesel Multiple Unit)	Eco 4 (Bombardier) [22]	-	-	Для збільшення додаткового запасу ходу електротранспорту; живлення допоміжних ланцюгів (освітлення, кондиціонування, привід допоміжних агрегатів, подача живлення для зарядки пристроїв пасажирів і т.ін.); автономне джерело енергії для руху транспортних засобів у внутрішньо міському режимі з невеликим завантаженням з підзарядкою на проміжних станціях; як заміна трамваїв
	Byron Solar Train (Byron Bay) [23]	-	3	

Розробник Siemens Mobility пропонує альтернативні системи приводу на поїздах Mireo Plus B та Mireo Plus H для приміського та регіонального сполучення на гібридній платформі. Технічні характеристики Mireo Plus B (рис.3):

- змішаний режим роботи: пантограф + акумулятор;
- 2- та 3-вагонні одиниці;
- кількість місць: 120 - 160;
- швидкість: до 160 км/год;
- запас ходу: від 80 до 120 км.

Транспортні технології



Рисунок 3 – Гібридний поїзд Mireo Plus B [12]

На поїзді застосовані акумуляторні батареї, в яких анодний матеріал використовується титанат літію, що має значні переваги з точки зору надійності. Вони також старіють повільніше, ніж батареї, що використовуються у звичайних електромобілях, в яких як анодний матеріал використовується графіт. Але зараз розробляються елементи батарей, у яких використовується новий анодний матеріал – батареї з оксиду титану і ніобію. Вони займають стільки ж місця, але мають вдвічі більшу ємність і заряджаються набагато швидше [12]. Особливостями застосування електро-акумуляторного гібридного поїзда є висока його енергоефективність, оскільки акумулятор заряджається за допомогою рекуперативного гальмування, також його можна заряджати через пантограф під час руху та на стоянці, через силовий кабель у депо; відсутність локальних викидів CO₂; гнучкість у зарядці та експлуатації; відсутність додаткової інфраструктури для екіпірування дизельним паливом; обмеження у відстані - до 130 км без контактної мережі.

У Mireo Plus H (див. рис. 4) використана гібридна технологія приводу, що складається з паливного елемента та акумулятора. Замість пантографа джерелом живлення є паливний елемент, який живиться воднем з баків на даху. Він має акумулятор, який забезпечує тягову потужність та використовує рекуперативне гальмування.



Рисунок 4 – Гібридний поїзд Mireo Plus H [18]

Колеса поїзда приводяться у рух безпосередньо - тобто без карданних валів - індукційними генераторами з живленням від перетворювача. Живлення подається від тягової батареї, що призначена для рекуперативного гальмування. Тягова батарея живить процеси прискорення Mireo Plus H, воднева система заряджає батарею і підтримує бортове живлення під час нормальної роботи на постійній швидкості [18].

Технічні характеристики Mireo Plus H:

Транспортні технології

- режим роботи: паливні елементи + акумулятор;
- 2- та 3-вагонні одиниці;
- кількість місць: 120 - 160;
- швидкість: до 160 км/год;
- запас ходу: від 600 до 1000 км.

Особливостями застосування воднево-акумуляторного гібридного поїзда є висока його енергоефективність, низький рівень шуму; робота без викидів CO₂ при використанні водню, отриманого внаслідок електролізу; використання надлишкової електроенергії в мережі з використанням водню як середовища зберігання.

Поряд із поїздами на акумуляторних батареях та водневими поїздами гібридний електро-дизель-акумуляторний поїзд є однією з трьох технологій декарбонізації, які група SNCF розробляє спільно зі своїми партнерами Alstom, CAF та французькими регіонами для пасажирських перевезень на неелектрифікованих (або частково електрифікованих) регіональних лініях (рис. 5).



Рисунок 5 – Гібридний поїзда Régional [24]

Гібридизація поїзної групи Régional включала заміну половини теплових двигунів на системи зберігання енергії, що складаються з літій-іонних акумуляторів. Коефіцієнт рекуперації енергії гальмування, що використовується для заряджання акумуляторів, дуже високий і становить більше 90%, що дозволяє заощаджувати до 20% енергії в залежності від маршруту без використання двигунів внутрішнього згоряння, що може бути корисно для низьковуглецевих поїздок у населених пунктах. На неелектрифікованих лініях гібридний регіональний потяг зберігає запас ходу вихідної моделі до 1000 км [14].

Гібридний дизель-електричний поїзд, розроблений заводом FPS із Познані (рис. 6) - двовагонний Plus 227M вміщує до 229 пасажирів, 84 з яких можуть сидіти. Електротяга дозволяє поїзду розвивати швидкість до 160 км/год, а дизельний режим – до 120 км/год [17].

Škoda Group та RegioJet підписали контракт на постачання 34 гібридних багатоцільових установок типу BEDMU (Battery Electric Diesel Multiple Unit) (рис.7). Гібридні поїзди розраховані на роботу в двох системах (3 кВ постійного та 25 кВ змінного струму) і включатимуть блоки акумуляторів і дизельну силову установку. Дизель-генератор служить лише генератором для безперервної зарядки акумуляторної батареї та може працювати на гідроочищеній рослинній олії [21].

Транспортні технології



Рисунок 6 – Гібридний поїзд Plus 227M [17]



Рисунок 7 – Гібридний поїзд Škoda 27Ev [21]

У виробника Bombardier розроблено лінійку енергозберігаючих потягів Есо 4. Поїзд працює на сонячній енергії, виготовлений з легких матеріалів та використовує технологію MagLev, що передбачає використання технології магнітної левітації для пересування на високій швидкості з низьким енергоспоживанням. Панелі сонячних батарей (рис.8.), розташовані на верхній частині поїзда, призначені для його живлення, а також освітлення салону і забезпечення енергією зарядних станцій для пасажирів [22].

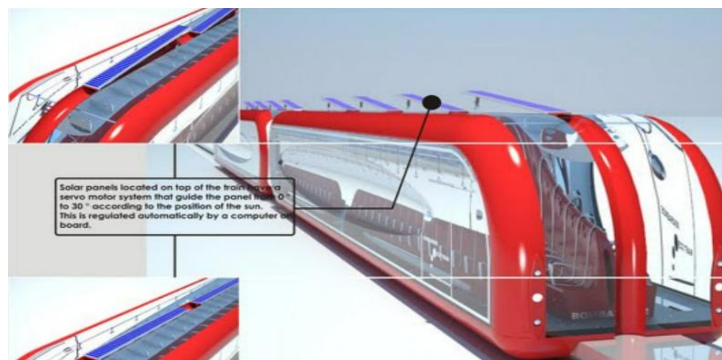


Рисунок 8 – Схема розташування сонячних панелей на потязі виробництва Bombardier [22]

Транспортні технології

За результатами представленого матеріалу для визначення перспектив впровадження гібридного моторвагонного рухомого складу потрібно визначити обмеження їх використання за модулями. Результати аналізу наведено у табл.2.

Таблиця 2 – Обмеження та перспективи впровадження гібридного МВРС за компоновкою модулів

За компоновкою модулів	Обмеження для впровадження	Перспективи впровадження в Україні
Акумуляторний - електропоїзд (BEMU)	Обмежений запас ходу при роботі від акумуляторів; середній термін служби АБ - 6-7 років; наявність електрифікованих ділянок та залізничної інфраструктури	Можливе використання в режимі міської кільцевої електрички з метою економії електроенергії за рахунок рекуперації та наступного використання для тяги поїзда; для приміського та регіонального руху на електрифікованих та неелектрифікованих мережах; можливість заміни міського пасажирського автотранспорту при наявності електрифікованих ділянок та залізничної інфраструктури з метою скорочення шкідливих викидів та шумового забруднення міст
Дизель - електричний поїзд (DEMU)	Наявність стикування електрифікованих ділянок з неелектрифікованими; необхідність електрифікації ділянок	Можливе використання для міжміського, приміського та регіонального руху на електрифікованих та неелектрифікованих мережах; можливість заміни міського пасажирського автотранспорту при наявності електрифікованих ділянок з метою скорочення шкідливих викидів та шумового забруднення міст
Воднево - акумуляторний поїзд (HBMU)	Наявність палива для водневого паливного елементу; вартість 1 кг водню; великі капітальні витрати для розбудови інфраструктури екіпування воднем; середній термін служби АБ - 6-7 років	Можливе використання гібридних беземісійних поїздів для міжміського, регіонального, приміського сполучення в якості заміни дизель-поїздів та пасажирських тепловозів при розвитку в Україні виробництва водню в якості палива для гібридного транспорту та розбудови інфраструктури для екіпування
Акумуляторний електро-дизель - поїзд (BEDMU)	Обмежений запас ходу при роботі від акумуляторів; середній термін служби АБ - 6-7 років	Можливе використання для міжміського, регіонального, приміського, міського сполучення на електрифікованих та неелектрифікованих мережах в якості заміни дизель-поїздів та пасажирських тепловозів, зменшення шкідливих викидів від відпрацьованих газів тепловозних ДВЗ, зменшення шумового забруднення, зменшення витрат електроенергії за рахунок використання енергії рекуперації від АБ
Сонячно - акумуляторний електро/дизель-поїзд (SBE/DMU)	Недостатня потужність сонячних панелей для використання в якості основного джерела живлення для тяги поїзду; обмежена габаритом рухомого складу корисна площа для розташування сонячних панелей; нестабільність джерела енергії та залежність від погодних умов	Можливість використання для міського руху, в якості заміни трамваїв та автотранспортних засобів при наявності залізничної інфраструктури; інтеграція в міську систему пасажирського транспорту з отриманням енергії від стаціонарних сонячних електростанцій (на зупиночних пунктах, будівлях прилеглої території, підзарядці в депо) шляхом організації руху гібридних транспортних засобів з можливістю заміни транспортного засобу для підзарядки; як додаткове джерело енергії для залізничних транспортних засобів.

ВИСНОВКИ

Поява і розвиток гібридних технологій, тобто використання більше одного джерела в силовій установці, наприклад дизель-генераторної установки та накопичувачів енергії дозволить використовувати двигун внутрішнього згоряння меншої потужності, відповідно менших габаритів, шляхом використання енергії від накопичувачів при пікових навантаженнях, поліпшити ефективність його роботи за рахунок роботи при високих навантаженнях, що характеризуються меншими питомими витратами палива, підвищити ККД. Одночасно використання менш потужної силової установки дозволить зменшити обсяги споживання дизельного палива, що в свою чергу відобразиться на обсягах шкідливих викидів з відпрацьованими газами дизелів. До того ж використання гібридного моторвагонного рухомого складу у міському та приміському сполученні дозволить знизити рівень шумового забруднення та покращити екологічні показники у містах, що в основному пов'язані з використанням автомобільних транспортних засобів.

Подальший підхід до розвитку гібридного моторвагонного рухомого складу на основі «модульної системи» шляхом вибору модулів джерел енергії відповідно до видів сполучення, протяжності електрифікованих ділянок та неелектрифікованих, можливості організації інфраструктури для використання відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії, пасажиротоку, методів організації експлуатації дозволить гнучко та ефективно використовувати гібридний моторвагонний рухомий склад та забезпечити мобільність населення.

Список використаних джерел

1. Фалендиш, А.П. Вдосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників локомотивів із гібридним приводом / А.П. Фалендиш, М.В. Володарець // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля / Науковий журнал. – Луганськ, вид. СХУ, 2014. – №3 (210). – С. 272-276.

2. Володарець М.В. Щодо питання визначення техніко-економічних показників гібридних транспортних засобів з урахуванням умов експлуатації / М.В. Володарець, О.В. Клецька // Міжнародна науково-технічна конференція. «Університетська наука – 2021». – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2021. – Т.3. – С.181.

3. Falendysh, A. The impact of the type of operation on the parameters of a shunting diesel locomotive with hybrid power plant / A. Falendysh, M. Volodarets, V. Hatchenko, O. Kletska // BulTrans-2017 – 9th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies – MATEC Web of Conferences 133, 03003 (2017) DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713303003>.

4. Проектування, випробовування та експлуатація тягового рухомого складу залізниць. Частина 1. Удосконалення методів та моделей визначення техніко-економічних показників гібридних маневрових тепловозів: кол. моногр./ А.П. Фалендиш, М.В. Володарець, О.В. Клецька, Д.А. Іванченко, В.О. Карашук, О.В. Джус – Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2023. – 240 с.

5. Fábio C. Barbosa. Hybrid rail technology review: an intermediate pathway for electrifying the freight and commuter rail sector - a technical and operational assessment/Fábio C. Barbosa// FCB Research and Consulting Brasília, Distrito Federal, Brazil, JRC2021-58271, DOI: 10.1115/JRC2021-58271 https://www.researchgate.net/publication/352237556_Hybrid_Rail_Technology_Review_an_Intermediate_Pathway_For_Electrifying_the_Freight_and_Commuter_Rail_Sector_-_a_Technical_and_Operational_Assessment

6. Транспорт України 2023 – Статистичний збірник, Київ, 2024. Електронний ресурс: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення 30.11.2025 р.)
7. *Каращук В.О., Помазков М.В., Клецька О.В., Джус О.В., Катунов І.В.* Стан та перспективи підвищення екологічності та енергоефективності транспорту/ *В.О. Каращук, М.В. Помазков, О.В. Клецька, О.В. Джус, І.В. Катунов* // Наука та виробництво. – Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2023. – №26 – С. 70-78.
8. Реалізація Європейського зеленого курсу в транспорті та формування сталої мобільності. Електронний ресурс: <https://www.slideshare.net/slideshow/ss-252598252/252598252#1> (дата звернення 30.11.2025).
9. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. Веб-сайт Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. Електронний ресурс: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf (дата звернення 30.11.2025).
10. Угода з Alstom на 55 локомотивів, профінансована міжнародними партнерами, дозволить УЗ модернізувати вкрай застарілий парк та втримати обсяги вантажних перевезень. Веб-сайт Міністерства розвитку громад та територій України. Електронний ресурс: <https://mindev.gov.ua/news/uhoda-z-alstom-na-55-lokomotyviv-profinansovana-mizhnarodnymy-partneramy-dozvolyt-uz-modernizuvaty-vkrai-zastariyli-park-ta-vtrymaty-obsiahy-vantazhnykh-perevezen> (дата звернення 05.12.2025).
11. Ринок гібридних поїздів. Електронний ресурс: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/hybrid-train-market> (дата звернення 20.11.2024 р.)
12. Mireo Plus B – A pioneering step into the future. Електронний ресурс: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/rolling-stock/commuter-and-regional-trains/mireo/mireo-plus-b.html> (дата звернення 30.11.2025 р.)
13. SNCF and Bombardier convert diesel to battery trains. Електронний ресурс: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/sncf-and-bombardier-convert-diesel-to-battery-trains/> (дата звернення 30.11.2025 р.)
14. FLIRT Akku: continues where the overhead line ends. Електронний ресурс: <https://www.stadlerrail.com/en/solutions/rolling-stock/mainline-flirt-akku> (дата звернення 30.11.2025 р.)
15. BEMU for České dráhy. Електронний ресурс: <https://www.skodagroup.com/reference/regiopanter-battery-un> (дата звернення 05.12.2025 р.)
16. SNCF Класс В 81500. Електронний ресурс: https://en.wikipedia.org/wiki/SNCF_Class_B_81500 (дата звернення 05.12.2025 р.)
17. First Hybrid Train from FPS Begins Operations in Poland. Електронний ресурс: <https://www.railway.supply/uk/pershij-gibridnij-po%20d1%97zd-fps-u-polshhi-ekologichnij-proriv/> (дата звернення 30.11.2025 р.)
18. The way is paved for Mireo Plus H. Електронний ресурс: <https://www.mobility.siemens.com/global/en/company/stories/alternative-drives-the-way-is-paved-for-mireo-plus-h.html> (дата звернення 30.11.2025 р.)
19. Alstom Coradia iLint – the world's 1st hydrogen powered passenger train. Електронний ресурс: <https://www.alstom.com/solutions/rolling-stock/alstom-coradia-ilint-worlds-1st-hydrogen-powered-passenger-train> (дата звернення 30.11.2025 р.)
20. SNCF Voyageurs et Alstom présentent le premier train hybride français pour les Régions Occitanie, Grand-Est, Nouvelle-Aquitaine et Centre-Val-de-Loire. Електронний ресурс: <https://www.alstom.com/fr/press-releases-news/2022/2/sncf-voyageurs-et-alstom-presentent-le-premier-train-hybride-francais> (дата звернення 30.11.2025 р.)
21. RegioJet orders battery-electric-diesel trains as the best option for partly-electrified routes. Traction and rolling stock Електронний ресурс: <https://www.railwaygazette.com/traction-and->

rolling-stock/regiojet-orders-battery-electric-diesel-trains-as-the-best-option-for-partly-electrified-routes/69615.article (дата звернення 30.11.2025 р.)

22. Solar-Powered MagLev Concept Train is Sleek Alternative Transportation. Електронний ресурс: <https://inhabitat.com/solar-powered-maglev-concept-train-for-bombardier/> (дата звернення 30.11.2025)

23. Byron Solar Train. Електронний ресурс: <https://byronbaytrain.com.au/sustainability/> (дата звернення 30.11.2025)

24. Hybrid train successfully tested in France. Електронний ресурс: <https://www.railwaypro.com/wp/electric-diesel-battery-train-successfully-tested-in-france/> (дата звернення 30.11.2025 р.)

Karashchuk V. O.

PROSPECTS FOR THE IMPLEMENTATION OF HYBRID RAILWAY ROLLING STOCK FOR PASSENGER TRANSPORTATION

The article reviews hybrid railway rolling stock for passenger transportation. It was determined that the main mode of transport for passenger transportation in Ukraine is road transport (bus transportation), which annually carries 41.8% of passengers, and the share of railway transport is only 3.3%. Analysis of passenger transportation by mode of transport allowed us to establish that railway transport accounts for 25.9% of passenger transportation in intercity traffic and 23.9% in suburban traffic, while it is not involved in urban traffic at all. It was established that bus passenger transportation has a number of problem areas such as the obsolescence of the rolling stock fleet, low energy efficiency and environmental friendliness of vehicles, high noise pollution (especially in cities), high traffic congestion on highways, especially during rush hour, and low level of road safety. Taking into account modern requirements for the use of low-carbon energy sources, including for transport, it is proposed to increase the share of rail transport in freight and passenger transportation (in order to replace/reduce road transport). This requires new approaches to the organization of transportation, the selection of vehicles characterized by high energy efficiency and environmental friendliness, the use of alternative fuels and an increase in the share of renewable energy sources for the traction drive of railway rolling stock. One of the approaches is the use of a hybrid drive for passenger railcar rolling stock. The author has analyzed hybrid trains using hybrid technologies (including those based on renewable non-traditional energy sources), technical and operational indicators and scope of application based on technical literature, as well as reports by developers of railway hybrid traction vehicles. Limitations on the use of hybrid MVRs by module layout in the short- and medium-term perspective of the development of hybrid railway technologies for passenger transportation are also identified.

Keywords: Passenger transportation, rail transport, hybrid technologies, hybrid train, railway rolling stock.

Стаття надійшла 09.12.2025 р.

ОЦІНКА РИЗИКІВ АВТОПЕРЕВЕЗЕНЬ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВАНТАЖІВ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ: МАРШРУТИЗАЦІЯ ТА СПЕЦІАЛЬНІ РЕЖИМИ СУПРОВОДУ

Стаття присвячена розробці інтегрованої методики оцінки ризиків автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану в Україні. Обґрунтовано, що традиційні підходи до управління ризиками перевезень, базовані на вимогах ADR, Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» та класичній схемі визначення ризиків, є недостатніми за наявності додаткових воєнних загроз – ракетно-дронових ударів, артилерійських обстрілів, мінування, руйнування дорожньо-транспортної та енергетичної інфраструктури. Запропоновано розширити структуру імовірнісної складової шляхом виокремлення воєнного коефіцієнта загрози W_{war} , який враховує інтенсивність атак, близькість маршруту до лінії фронту, наявність критичних об'єктів і зафіксованих інцидентів уздовж транспортного коридору. Для оцінювання наслідків сформовано багатокритеріальний індекс, що поєднує втрати для життя і здоров'я населення, довкілля та економіки.

Методика інтегрує модифіковану матрицю Хеддона, адаптовану до трьох фаз транспортного процесу (до події, під час, після події) з урахуванням воєнного впливу на людину, транспортний засіб, навколишнє середовище та критичну транспортну інфраструктуру. На її основі поставлено задачу багатокритеріальної маршрутизації, у якій мінімізуються сумарні логістичні витрати та інтегральний ризик маршруту з урахуванням регуляторних обмежень воєнного стану й можливостей супроводу. Окремо запропоновано класифікацію спеціальних режимів руху (базовий, посилений, критичний) залежно від класу небезпеки вантажу, просторово-часового профілю загроз і чутливості територій. Наукова новизна полягає у формалізованому поєднанні модифікованої матриці Хеддона з інтегральною моделлю ризику та багатокритеріальною маршрутизацією з урахуванням воєнних загроз, що дає змогу оцінювати й порівнювати альтернативні маршрути і режими руху небезпечних вантажів у динамічних умовах воєнного стану. Практична цінність роботи полягає у створенні формалізованого інструментарію для органів державної влади, перевізників та експедиторів, який забезпечує обґрунтований вибір маршрутів і режимів супроводу небезпечних вантажів в умовах триваючих бойових дій і під час планування післявоєнного відновлення транспортної системи.

Ключові слова: Автоперевезення небезпечних вантажів; воєнний стан; оцінка ризику; воєнні загрози (W_{war}); маршрутизація перевезень небезпечних вантажів; матриця Хеддона; спеціальні режими супроводу; критична транспортна інфраструктура.

Постановка проблеми. Повномасштабна агресія проти України радикально змінила умови автоперевезень небезпечних вантажів: до традиційних ризиків (стан рухомого складу, дороги, людський фактор) додалися ракетно-дронові удари, обстріли, мінування, руйнування інфраструктури та вимушені об'їзні маршрути. Чинні норми ADR [1], Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» [2] та стандарти ISO 31000 [3], ISO 28000 [4] не містять формалізованого урахування воєнних загроз у розрахунку ризику й виборі маршруту та режиму супроводу. Це створює науково-практичну проблему розроблення інтегрованої методики оцінки ризику автоперевезень небезпечних вантажів з урахуванням специфіки воєнного стану в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класичним підходом до кількісної оцінки ризику перевезень небезпечних матеріалів вважається каркас E. Erkut та V. Verter [5], у якому ризик описується моделлю $R=W \cdot M$ з урахуванням просторового розподілу населення й сценаріїв наслідків, що став базою для подальших робіт з маршрутизації НВ. Узагальнений огляд Jian Guo та Cheng Luo [6] систематизує тридцятирічний розвиток моделей ризику для різних видів транспорту, виділяючи ймовірнісні, експозиційні та багатокритеріальні підходи й підкреслюючи потребу в інтегрованій оптимізації маршрутів доставки НВ.

Сучасні дослідження зосереджені на підвищенні точності моделей і роботі з невизначеністю. Н. Ху та співавт. [7] застосовують комбіновану cloud-model для оцінки ризику ДТП із небезпечними хімічними речовинами, що дозволяє формалізувати нечіткі експертні судження. S. Yu [8] та ін. пропонують модель оцінювання ризику автоперевезень НВ у реальному часі із застосуванням машинного навчання, тоді як S. Wang та співавт. [9] поєднують Bow-tie аналіз з ймовірнісним моделюванням для різних типів аварій під час дорожнього транспортування небезпечних хімікатів. Огляд C. Chen та ін. [10] показує, що основна маса робіт фокусується на витоках, пожежах і вибухах у логістичних та промислових сценаріях переважно мирного часу.

В українському та європейському просторі суттєвий внесок зроблено у напрямі організації автоперевезень НВ і побудови критеріїв безпечності маршрутів (аварійність, щільність населення, екочутливість територій), однак із фіксацією умов, близьких до вимог ADR [11] без воєнних загроз. Комплексні моделі оцінки безпеки перевезень в інтегрованих транспортних системах розроблено на рівні дисертаційних досліджень [12], але вони не виокремлюють специфіку небезпечних вантажів у зоні збройного конфлікту. Методичні матеріали з розрахунку ризику НС при транспортуванні зріджених газів залізничним транспортом формують важливу базу (сценарії пожежі, вибуху, модель $R = W \cdot M$), придатну для адаптації до автомобільних перевезень НВ [13].

У нещодавніх українських роботах щодо автоперевезень рідких небезпечних вантажів застосовано матрицю Хеддона для структуризації впливу факторів «людина – транспортний засіб – середовище» та акцентовано пріоритет збереження життя людини при виборі маршруту. Публікації про організацію вантажних перевезень в умовах воєнного стану аналізують руйнування інфраструктури, обмеження руху й дефіцит ресурсів, але питання саме небезпечних вантажів і їх формалізованої ризик-орієнтованої маршрутизації охоплюється лише фрагментарно.

Отже, існує виразна наукова прогалина: бракує моделей, які інтегрують воєнні загрози (обстріли, мінування, руйнування інфраструктури, вимушені об'їзди) у структуру ризику автоперевезень небезпечних вантажів в Україні та поєднують їх з вимогами ADR, національного законодавства й стандартів управління ризиками та безпекою ланцюгів постачання.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення інтегрованої методики кількісно-якісної оцінки ризику автоперевезень небезпечних вантажів в Україні в умовах воєнного стану з формалізованим урахуванням додаткових воєнних загроз (ракетно-дронові удари, артилерійські обстріли, мінування, руйнування доріг і мостів, відключення енергопостачання), специфіки вимушених об'їзних маршрутів і коридорів безпеки, а також застосування спеціальних режимів маршрутизації та супроводу (конвої, часові «вікна», взаємодія з військовими та підрозділами поліції).

Основний матеріал дослідження. Українські дослідження перебудови логістики в умовах повномасштабної війни демонструють суттєвий зсув вантажопотоків до дунайських портів (Ізмаїл, Рені, Кілія), перенавантаження автомобільних і залізничних прикордонних переходів із країнами ЄС, руйнування портової та дорожньої інфраструктури, різке збільшення часу доставки й логістичних витрат, зокрема через багатоденні черги вантажівок

на кордоні та обмежену пропускну здатність пунктів пропуску [14; 15; 16]. Паралельно міжнародні й національні звіти (ОНЧНР, Світовий банк, профільні аналітичні центри) та оперативні повідомлення інформаційних агентств фіксують системні удари РФ по енергетичній та транспортній інфраструктурі України – енергоблоках, підстанціях, залізничних вузлах, нафтобазах, портових об'єктах і депо Укрзалізниці, що безпосередньо впливають на надійність, безпеку руху та доступність окремих маршрутів [17].

З урахуванням цих даних ключова методологічна помилка, якої легко припуститися, полягає в тому, щоб розглядати ризик автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період як «звичайний» транспортний ризик, лише скоригований на складні умови руху (погіршення стану доріг, дефіцит палива, зростання інтенсивності руху). Насправді ж ризик формує суперпозиція двох принципово різних, але взаємопов'язаних блоків:

– базових транспортних ризиків, пов'язаних із дотриманням ПДР, технічним станом автотранспортних засобів і цистерн, кваліфікацією та психофізіологічним станом водія, особливостями дорожньо-кліматичних умов тощо;

– воєнно-інфраструктурних загроз, до яких належать ракетно-дронові та артилерійські удари по транспортних і енергетичних об'єктах, руйнування й тимчасова непридатність доріг та мостів, мінування місцевості, кібератаки на системи управління інфраструктурою, масштабні відключення електроенергії, що порушують роботу світлофорів, залізничної автоматики, засобів зв'язку та навігації [18].

1. Отже, доцільно прямо ідентифікувати структуру сукупного ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період у вигляді:

$$R = R_{tr} + R_{war}, \quad (1)$$

де R_{tr} – інтегральний компонент «звичайних» транспортних ризиків, пов'язаних із технічним станом автотранспортних засобів і цистерн, дотриманням ПДР, людським фактором, дорожньо-кліматичними умовами тощо, як це прийнято в довоєнних дослідженнях;

R_{war} – додатковий компонент воєнно-інфраструктурних загроз, зумовлений ракетно-дроновими ударами, артилерійськими обстрілами, мінуванням, руйнуванням інфраструктури, кібератаками та іншими наслідками війни, відображений у змінах логістичних маршрутів і доступності окремих ділянок мережі.

У подальшому R розглядається як агрегований результат оцінки ризику окремих маршрутів k , для яких пропонується використовувати інтегральний показник ризику:

$$R_k = W_k \cdot M_k, \quad (2)$$

де W_k – інтегральна ймовірність реалізації небезпечної події (ДТП, розгерметизація, пожежа, вибух, воєнне враження) на маршруті k ;

M_k – відносні наслідки (гуманітарні, екологічні, економічні) для маршруту k .

Загальний ризик системи або регіону може бути представлений як сума маршрутних ризиків:

$$R = \sum k \cdot R_k = \sum k \cdot (W_k \cdot M_k). \quad (3)$$

Для узгодження співвідношень (1) і (3) доцільно декомпонувати інтегральні показники W_k та M_k на транспортну та воєнну складові; на рівні ймовірності це реалізується через урахування чотирьох груп факторів:

$$W_k = a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k} + a_4 \cdot W_{war,k}, \quad (4)$$

де $W_{tech,k}$ – ймовірність відмови/несправності автотранспортного засобу, автоцистерни або обладнання на маршруті k ;

$W_{human,k}$ – ймовірність помилок водія/екіпажу (порушення ПДР, втома, стрес тощо);

$W_{env,k}$ – вплив дорожньо-кліматичних умов, щільності забудови, наявності екочутливих об'єктів;

$W_{war,k}$ – воєнно-інфраструктурний компонент, що відображає інтенсивність обстрілів, наявність мінування, близькість до лінії фронту, частоту атак на об'єкти інфраструктури вздовж маршруту k за заданий період

a_1, a_2, a_3, a_4 – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість відповідних груп факторів.

Коефіцієнти a_1, a_2, a_3, a_4 є нормованими вагами важливості відповідних груп факторів (технічних, людських, середовищних, воєнних), для яких прийнято умову $a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1$, $a_i \geq 0$. Їхні значення визначаються за процедурою аналізу ієрархій (АНР) на основі парних порівнянь, проведених з групою експертів (представники перевізників, експедиторів, аварійно-рятувальних служб, органів державної влади, наукової спільноти), з подальшою перевіркою узгодженості суджень. Вибір ваг також узгоджено з нормативними пріоритетами державної політики безпеки (пріоритет збереження життя і здоров'я людей, захист довкілля, мінімізація економічних втрат).

У такій інтерпретації частина $W_{tr,k} = a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k}$ репрезентує внесок «звичайних» транспортних небезпек, тоді як $a_4 \cdot W_{war,k}$ – власне воєнний внесок у ймовірність події; їхній спільний вплив на R_k формує маршрутний аналог R_{tr} і R_{war} . Сумуючи R_k за всіма маршрутами, одержуємо:

$$R_{tr} = \sum k (W_{tr,k} \cdot M_k) = \sum k ((a_1 \cdot W_{tech,k} + a_2 \cdot W_{human,k} + a_3 \cdot W_{env,k}) \cdot M_k) \quad (5)$$

$$R_{war} = \sum k (W_{war,k} \cdot M_k) = \sum k (a_4 \cdot W_{war,k} \cdot M_k) \quad (6)$$

Відповідно, R_{war} на макрорівні є агрегованим ефектом $W_{war,k}$ для всіх розглянутих маршрутів.

2. Узгодимо систему показників. Показники ймовірності W . Для кожної ділянки і маршруту k визначаються часткові показники, на основі яких формуються компоненти $W_{tech,k}, W_{human,k}, W_{env,k}, W_{war,k}$. Структура компонентів формується за такими складовими:

– I_1 (аварійність з НВ) – середній рівень ДТП з участю небезпечних вантажів на ділянці і (якщо статистика доступна, або використання репрезентативних коефіцієнтів, напрацьованих у роботах з оцінки ризику транспортування НВ, наприклад, Erkut [5], Guo [6] та ін.);

– I_2 (стан дороги) – індекс технічного стану дорожнього полотна (наявність вирв, тимчасових переправ, обмеження швидкості через руйнування тощо);

– I_3 (інтенсивність руху) – показник транспортного потоку, що визначає ймовірність багатотранспортних зіткнень;

– I_4 (людський фактор) – індикатор, що враховує рівень підготовки водіїв ADR, дотримання режимів праці та відпочинку, а також підвищене психологічне навантаження, характерне для зон, наближених до фронту;

– I_5 (воєнний індекс загрози) – інтегральний показник воєнної небезпеки на ділянці і, який включає частоту сигналів повітряної тривоги, зафіксовані випадки ракетно-дронових атак або артилерійських обстрілів транспорту чи транспортної/енергетичної інфраструктури, а також наявність мінування.

На основі цих показників формується зважена сума або мультиплікативний індекс W_k ; конкретні вагові коефіцієнти доцільно визначати з використанням методу аналізу ієрархій та погоджувати з експертами, представниками органів державної влади й операторів ринку.

3. Показник M_k доцільно представити у вигляді агрегованого індексу:

$$M_k = \alpha \cdot H_k + \beta \cdot E_k \cdot \gamma \cdot C_k, \quad (7)$$

де H_k – очікувані гуманітарні наслідки (число потенційно уражених осіб у разі аварії або влучання боєприпасу у транспортний засіб із НВ);

E_k – потенційний екологічний збиток (чутливість території: близькість до водозаборів, заповідних зон, сільськогосподарських угідь, рівень ґрунтових вод тощо);

C_k – економічний збиток (вартість вантажу й транспортного засобу, витрати на відновлення інфраструктури, непрямі втрати ланцюга постачання).

Коефіцієнти α , β , γ задаються політикою безпеки на державному та корпоративному рівнях і відображають пріоритети: як правило, найбільше значення надається збереженню життя й здоров'я людей (α), що узгоджується з положеннями українського законодавства та рекомендаціями стандартів ISO 28000:2022 [3] та ISO 31000:2018 [4] щодо ризик-орієнтованого управління.

4. Адаптація матриці Хеддона до умов воєнного стану. Класична матриця Хеддона використовується як логічний каркас для систематизації факторів ризику за трьома фазами розвитку події («до події – під час події – після події») і трьома основними групами елементів системи («людина – транспортний засіб – середовище»). У контексті автоперевезень небезпечних вантажів в умовах воєнного стану така структура виявляється недостатньою, оскільки не відображає специфічного, просторово-часово варіативного впливу воєнних загроз.

Тому пропонується модифікувати матрицю Хеддона шляхом введення додаткового виміру «воєнний вплив», який пронизує кожен етап фази й кожен елемент системи. Фактично формується чотиривимірна логічна структура, у якій кожна клітинка описує конкретну комбінацію: «фаза події – елемент системи – воєнний вплив – тип заходу». Це дозволяє чітко розмежувати, які ризики відносяться до «класичних» транспортних (R_{tr}), а які генерує воєнне середовище (R_{war}), і, відповідно, до яких компонентів W_k та M_k вони належать.

а) Воєнний вплив у фазі «до події». На етапі до виникнення інциденту воєнний вимір включає:

- ризик потрапляння маршруту в зону обстрілу чи мінування;
- блокування або різке обмеження пропускної здатності ключових ділянок (мости, вузли, об'їзди);
- цілеспрямовані удари по об'єктах критичної інфраструктури (нафтобази, зернові термінали, залізничні вузли), що змушують змінювати маршрут або часові вікна руху.

На рівні W_k ці фактори, через індекс $W_{war,k}$, збільшують інтегральну ймовірність реалізації події, тоді як на рівні M_k (особливо H_k та E_k) визначають потенційний масштаб наслідків у разі, якщо подія відбудеться саме в зоні високої воєнної активності.

б) Воєнний вплив у фазі «під час події». У фазі безпосередньої події (ДТП, розгерметизація, пожежа, вибух, влучання боєприпасу) воєнний вимір охоплює:

- ризик ураження колони або окремого автотранспортного засобу ракетним, дронним чи артилерійським ударом;
- руйнування мостів і шляхопроводів у момент проходження колони або окремого автотранспортного засобу;
- втрату керованості чи помилки водія через паніку, відсутність зв'язку, навмисне чи ненавмисне втручання у навігаційні системи;
- вторинні аварії на вже пошкоджених ділянках, де дорожні умови раптово погіршуються.

На цьому етапі $W_{war,k}$ прямо модифікує компонент W_k , пов'язаний із фазою «під час події», тоді як M_k фіксує перерозподіл наслідків (наприклад, збільшення H_k через масовану присутність цивільного населення або E_k через розташування колони поблизу водозаборів чи заповідних територій).

в) Воєнний вплив у фазі «після події». Після настання інциденту воєнний вимір проявляється через:

- ускладнення доступу аварійно-рятувальних служб до місця події (зруйновані мости, заблоковані дороги, активні бойові дії в районі);
- ризик повторних обстрілів місця аварії або маршрутів підходу рятувальників;
- локальну відсутність медичного забезпечення, пожежної техніки, засобів локалізації викиду НВ через пошкодження баз і складів;
- затримки з евакуацією населення та дегазацією/деконтамінацією територій.

У цій фазі $W_{war,k}$ та M_k взаємодіють таким чином, що, навіть якщо первинна подія має помірну ймовірність, сукупні наслідки можуть істотно зростати через воєнні обмеження на реагування й відновлення, що напряду впливає на компонент R_{war} .

г) «Матриця заходів» як місток між R_{tr} , R_{war} і R_k . Розширена матриця Хеддона дає можливість побудувати «матрицю заходів» для кожного елемента ризику – від профілактики до реагування та відновлення. Для кожної клітинки (фаза – елемент – воєнний вплив) формуються конкретні організаційні та технічні заходи, які:

- або зменшують відповідний компонент ймовірності ($W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$, $W_{war,k}$);
- або обмежують масштаб наслідків (H_k , E_k , C_k у складі M_k).

До профілактичних заходів належать, зокрема:

- раціональний вибір маршруту з мінімізацією сумарного $W_{war,k}$ та $W_{env,k}$ (уникнення густонаселених і найбільш уражуваних ділянок);
- посилена підготовка водіїв (ADR + тренінги з дій в умовах обстрілів та втрати зв'язку);
- організація супроводу (поліція, військові підрозділи, використання броньованих ТЗ для найбільш небезпечних ділянок);
- попереднє погодження коридорів руху, часових «вікон» та обмежень швидкості з військовими адміністраціями й ДСНС.

До заходів реагування та відновлення належать:

- детально відпрацьовані плани евакуації населення й персоналу на випадок аварії чи воєнного враження ТЗ з НВ;
- резервні схеми зв'язку й оповіщення (супутниковий зв'язок, дублюючі канали), які зменшують час реакції;
- алгоритми узгоджених дій між перевізником, експедитором, ДСНС, Нацполіцією, військовими адміністраціями та медичними закладами;
- створення локальних резервів засобів локалізації викиду НВ і техніки для ліквідації наслідків в зонах підвищеного $W_{war,k}$.

Транспортні технології

У термінах моделі це означає, що кожен захід можна явно «прив'язати» до конкретного елемента структури W_k (через зменшення відповідного індексу I_1-I_5) або M_k (через зниження H_k , E_k чи C_k). Відповідно, матриця Хеддона виконує роль концептуального «містка» між макрорівневою структурою ризику (R_{tr} , R_{war}) та маршрутним показником R_k , допомагаючи прозоро показати, які саме управлінські рішення знижують який компонент ризику.

Приклад адаптації матриці Хеддона наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Матриця Хеддона з урахуванням умов воєнного стану

Фаза події	Елемент системи	Воєнний вплив / ризик	Вплив на модель (W_k , M_k , R_{tr} , R_{war})	Приклади заходів (профілактика, реагування, відновлення)
До події	Людина (водій, персонал)	Часті повітряні тривоги на маршруті, ризик обстрілів поблизу траси	Підвищення $W_{human,k}$ та $W_{war,k}$ через стрес, втому, ризик помилок під час руху в умовах тривоги; зростання внеску в R_{war}	Поглиблена підготовка водіїв (ADR + тренінги дій під час обстрілів), скорочення тривалості змін, відбір водіїв зі стійкістю до стресу, чіткі інструкції щодо зупинки/укриття АТЗ
До події	Транспортний засіб (ТЗ, цистерна, обладнання)	Можливість цілеспрямованих ударів по колонах, стоянках, базах	Зростання $W_{tech,k}$ та $W_{war,k}$ (ризик ураження стоянки/бази, необхідність посиленого контролю технічного стану та захисту ТЗ); вплив на R_{war}	Розміщення ТЗ та цистерн поза зонами підвищеного $W_{war,k}$, посилений техогляд перед виїздом, використання додаткового захисту (екрани, бронепанелі) на найризикованіших ділянках
До події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Потрапляння маршруту в зони обстрілів, мінування, руйнування мостів/доріг	Підвищення $W_{env,k}$ та $W_{war,k}$; у M_k зростають H_k та E_k (густонаселені райони, чутливі екосистеми); збільшується внесок у R_{war}	Оптимізація маршруту з мінімізацією $W_{war,k}$ та $W_{env,k}$ (обхід зон активних боїв, великих міст), заздалегідь погоджені коридори руху, часові «вікна» з військовими адміністраціями
Під час події	Людина	Паніка водія під час обстрілу, втрата орієнтації через відсутність зв'язку/навігації	Різке зростання $W_{human,k}$ у момент події; збільшення ймовірності ДТП, неправильних дій; опосередковане збільшення W_k і, відповідно, R_k (здебільшого R_{war})	Тренінги дій під обстрілом, чіткі алгоритми «зупинка – укриття – відхід», дублюючі канали зв'язку, інструкції щодо роботи без GPS/мобільного зв'язку
Під час події	Транспортний засіб (ТЗ, цистерна, обладнання)	Влучання босприпасу в автоцистерну або колону, руйнування мосту в момент проходу	Зростання $W_{war,k}$ у фазі події; M_k зростає через можливість одночасного ураження кількох ТЗ (H_k , E_k , C_k); суттєвий внесок у R_{war}	Формування менших колон з інтервалами між ТЗ, обмеження швидкості на критичних ділянках, використання більш захищених ТЗ на ділянках з максимальним $W_{war,k}$, оперативний моніторинг обстановки
Під час події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Вторинні аварії на пошкоджених ділянках (воронки, завали), пошкоджені об'їзди	Підвищення $W_{env,k}$ (небезпечні дорожні умови); M_k зростає через ризик залучення додаткових учасників ДТП; вплив на R_{tr} і R_{war}	Оперативне оновлення карт небезпечних ділянок, заборона руху через щойно уражені об'єкти, постійна координація з дорожніми службами та військовими
Після події	Людина / населення	Ускладнена евакуація через обстріли, блокування доріг	Значне зростання H_k (більша кількість потенційно уражених осіб, довший час перебування в зоні ураження); внесок у M_k , переважно R_{war}	Плани евакуації з альтернативними маршрутами, попереднє інформування населення, залучення місцевих органів влади й волонтерів до системи оповіщення
Після події	Середовище (маршрут, інфраструктура, забудова)	Повторні обстріли місця аварії, руйнування мостів/доріг, відсутність доступу служби ДСНС	Зростання E_k (довготривале забруднення, неможливість швидкої локалізації викиду НВ), додатковий внесок у R_{war} ; можливий ріст C_k через більш витрати на відновлення	Створення резервних баз техніки та сорбентів поза зоною високого $W_{war,k}$, планування альтернативних шляхів доступу до потенційних місць аварій, попереднє розміщення аварійно-рятувальних підрозділів
Після події	Служби реагування (ДСНС, медики, поліція, військові)	Неможливість або затримка прибуття через бойові дії, зруйновані мости, мінування	Через $W_{war,k}$ збільшується час реагування; у M_k зростають H_k та C_k (більше жертв, більш економічні втрати); посилення R_{war}	Детально відпрацьовані міжвідомчі алгоритми дій, резервні схеми зв'язку та оповіщення, попереднє узгодження збройного прикриття для рятувальних операцій, тренування спільних дій служб

5. Спеціальні режими маршрутизації автоперевезень НВ у воєнний період

Умови воєнного стану трансформують задачу вибору маршрутів перевезення небезпечних вантажів із «класичної» задачі безпеки та ефективності в задачу управління

ризиком для системи подвійного призначення (цивільної й оборонної логістики). Запропонований підхід виходить із того, що спеціальні режими маршрутизації повинні одночасно:

1. відповідати базовим вимогам ADR і національного законодавства;
 2. інтегрувати додаткові воєнні критерії на рівні моделі ризику R_k ;
 3. бути формалізованими в оптимізаційній постановці (мінімізація Z з урахуванням λ).
- 5.1. Класичні критерії вибору маршруту

У мирний час основою для формування маршрутів автоперевезень НВ є вимоги Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ADR) [1] та Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» № 1644-III [2], які визначають загальні принципи безпеки, організаційні та технічні вимоги до учасників перевезення і транспортних засобів. На основі цих документів, а також на підставі наказу МВС України № 656 [19], що затвердив, зокрема, Правила дорожнього перевезення небезпечних вантажів і Порядку погодження маршруту руху, формуються такі ключові критерії:

–Мінімізація контакту з густонаселеними та екологічно чутливими районами. Цей критерій впливає з загальної мети мінімізувати ризик для населення, майна й довкілля, закладеної як у ADR, так і в європейських керівництвах із перевезення небезпечних вантажів [1; 20].

–Обмеження руху через об'єкти підвищеного ризику (тунелі, мости, гідротехнічні споруди). ADR передбачає спеціальні категорії тунелів і пов'язані з ними обмеження для певних класів небезпечних вантажів; національні НПА деталізують вимоги щодо руху через мости, гідротехнічні споруди та інші критичні об'єкти [20].

–Обов'язкове погодження маршруту з Національною поліцією. Наказ МВС № 656 визначає Порядок погодження маршруту руху транспортного засобу під час дорожнього перевезення небезпечних вантажів (у т.ч. із урахуванням ADR 1.9.3), що є обов'язковим для суб'єктів господарювання, за винятком Збройних Сил України [19].

–Темпоральні та експлуатаційні обмеження. До класичних критеріїв належать: заборона або обмеження руху в певні години (нічний час, години «пік»), вимоги до швидкісного режиму, обмеження руху за несприятливих погодних умов, а також виконання спеціальних вимог щодо зупинок і стоянок НВ, передбачених національними правилами та Законом № 1644-III.

Ці критерії задають «базову огорожувальну рамку» безпеки й формують транспортний компонент ризику R_{tr} у структурі $R = R_{tr} + R_{war}$.

5.2. Воєнно-специфічні критерії

Повномасштабна агресія РФ проти України принципово змінює умови функціонування транспортної системи. Масовані ракетно-дронові удари по енергетичній й транспортній інфраструктурі (газотранспортні об'єкти, залізничні вузли, порти, мости, депо) регулярно фіксуються в офіційних звітах і міжнародних інформаційних повідомленнях [21]. Це означає, що «звичайні» критерії маршрутизації є необхідною, але недостатньою умовою безпеки.

Додатково вводяться воєнно-специфічні критерії, які формують $W_{war,k}$ та частково модифікують M_k :

- Відстань від лінії фронту та основних векторів ураження. Маршрути повинні проектуватися з урахуванням просторової конфігурації фронту, дальності дії артилерії та ракетних систем, а також типових напрямків ударів по транспортній інфраструктурі. Віддалення маршруту від лінії зіткнення й зон регулярних обстрілів знижує $W_{war,k}$;

- Частота повітряних тривог та історія атак уздовж маршруту. Дані про повітряні тривоги та задокументовані атаки по залізничних вузлах, нафтобазах, логістичних хабах, мостах та

інших об'єктах уздовж маршруту (у т.ч. за відкритими джерелами) використовуються для побудови індексу воєнної загрози $W_{war,k}$ [22];

- Наявність альтернативних об'їзних шляхів. Маршрут вважається прийнятним лише за наявності заздалегідь визначених і технічно придатних об'їзних варіантів на випадок раптового перекриття основної траси внаслідок обстрілу, руйнування мосту, мінування тощо. Це вимога не тільки безпекова, але й прямо пов'язана з гарантуванням доставки вантажу (балансові обмеження моделі);

- Можливість супроводу та наявність безпечних точок зупинки. Критично важливою є можливість залучення підрозділів Нацполіції, військової комендатури, конвоювання на окремих ділянках, а також наявність безпечних майданчиків для екстреної зупинки й укриття НВ (на відстані від житлової забудови, з можливістю маневру й укриття ТЗ). Ці фактори безпосередньо впливають як на $W_{war,k}$ (зменшуючи ймовірність успішного ураження), так і на M_k (зменшуючи потенційні наслідки).

У сукупності воєнно-специфічні критерії формують основу спеціальних режимів маршрутизації (базовий / посилений / критичний), де перехід до більш жорсткого режиму означає підвищення вимог до супроводу, обмежень часу руху та рівня узгодження з військовими адміністраціями, а також зміщення λ у бік більшої чутливості до ризику (див. нижче).

5.3. Математична постановка задачі маршрутизації

Для формалізації задачі вибору маршрутів пропонується модель типу «вартість + ризик», у якій мінімізується узагальнений показник:

$$Z = \sum k(C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum k(R_k \cdot x_k) \rightarrow \min, \quad (8)$$

за умов:

- виконання балансових обмежень (доставка заданих обсягів НВ до пунктів призначення);

- дотримання обмежень пропускної здатності ділянок (максимальний потік НВ через кожну дугу транспортної мережі);

- виконання регламентаційних обмежень АDR і національних нормативно-правових актів (заборонені ділянки, тунелі/мости певних категорій, заборона руху в задані інтервали часу, обмеження руху в темний час доби, погодження маршрутів з Нацполіцією згідно з наказом № 656).

де: C_k – приведені логістичні витрати на маршруті k (пальне, час у дорозі, плата за проїзд, витрати на супровід тощо);

R_k – інтегральний ризик маршруту k , який у попередніх розділах подано як $R_k = W_k \cdot M_k$, з урахуванням $W_{war,k}$ у структурі W_k ;

x_k – змінна вибору маршруту (бінарна – «маршрут k використовується / не використовується» або, в задачах потокового типу, неперервна – частка потоку на маршруті k);

λ – коефіцієнт «вартісної чутливості до ризику», що відображає пріоритет безпеки відносно економії витрат і задається політикою держави чи компанії (для критичних перевезень НВ у зоні підвищеного $W_{war,k}$ коефіцієнт «вартісної чутливості до ризику» може бути значно більшим, ніж для тилових ділянок).

У такій постановці:

- перший доданок $\sum k(C_k \cdot x_k)$ представляє класичну транспортну задачу мінімізації витрат;

– другий доданок $\lambda \cdot \sum k(R_k \cdot x_k)$ вводить ризик як квазі-вартісний компонент, що дозволяє чисельно «штрафувати» маршрути з високим значенням R_k , особливо за умов високого $W_{war,k}$.

Приклад інтерпретації λ :

– $\lambda = 0$ відповідає суто економічному критерію (мінімум вартості, ігноруючи ризик) – у воєнний період такий режим практично неприйнятний для НВ;

– середні значення λ відображають компроміс між економією та безпекою (наприклад, для тилових маршрутів з низьким $W_{war,k}$);

– великі значення λ характерні для «критичних» режимів, коли навіть помірна економія витрат на тлі підвищеного ризику R_k вважається неприйнятною (перевезення НВ поблизу лінії фронту, через вузли, що часто зазнають ударів).

Вбудування класичних і воєнно-специфічних критеріїв у зазначену модель дозволяє:

1. формально відобразити вимоги ADR і національного законодавства через систему обмежень;

2. віднести воєнні фактори до структури R_k (через $W_{war,k}$ та компоненти M_k), тим самим виділяючи R_{war} в агрегованому ризику;

3. керувати «жорсткістю» спеціального режиму маршрутизації через параметр λ та набір дозволених (або заборонених) маршрутів.

6. Спеціальні режими супроводу та організації руху

1. Концептуальна основа спеціальних режимів супроводу

Міжнародні стандарти та політики задають рамку, в межах якої доцільно формалізувати рівні супроводу:

–ISO 28000:2022 [2] визначає вимоги до системи управління безпекою ланцюга постачання (SeMS), включно з транспортною складовою, як безперервний цикл «планування – впровадження – перевірка – вдосконалення» для безпекових ризиків.

–ISO 31000:2018 [3] задає принципи ризик-орієнтованого управління (ідентифікація, аналіз, оцінювання, оброблення та моніторинг ризиків), де вибір режиму супроводу є конкретним інструментом «оброблення ризику» (risk treatment).

–ADR 2023 [1], частина 1.10, вводить поняття «security provisions» для перевезень небезпечних вантажів, включно з посиленими заходами охорони для high consequence dangerous goods і вимогами до планів безпеки.

–Звіт спільної робочої групи ЄС–НАТО з питань стійкості критичної інфраструктури за 2023 рік [23] підкреслює необхідність поетапного посилення заходів безпеки й стійкості в енергетичному, транспортному, цифровому та космічному секторах.

У статті ці положення інтерпретуються як теоретична основа для побудови трирівневої системи режимів супроводу (базовий – посилений – критичний), прив'язаних до інтегрального ризику маршруту $R_k = W_k \cdot M_k$ та поділу $R = R_{tr} + R_{war}$.

2. Режими супроводу як інструмент управління інтегральним ризиком маршруту

а) Базовий режим. Зміст цього режиму узгоджується з ADR і національним законодавством:

–одиначний рух АТЗ з НВ за погодженим маршрутом відповідно до ADR [1] та Закону України «Про перевезення небезпечних вантажів» [2];

–виконання вимог до погодження маршруту з Національною поліцією згідно Наказу МВС № 656 [19] і до дорожніх обмежень;

–постійний супутниковий моніторинг, зв'язок із диспетчером і черговими органами.

Базовий режим застосовується тоді, коли воєнний компонент ризику $W_{war,k}$ є низьким, а інтегральний ризик маршруту R_k разом із наслідковою складовою M_k не перевищують базовий

граничний рівень $R_{crit(1)}$, під яким у роботі розуміється нормативно чи політично встановлене порогове значення R_k , за якого транспортний компонент R_{tr} домінує над воєнним R_{war} і достатнім вважається застосування стандартних (довоєнних) заходів безпеки..

б) Посилений режим. Зміст режиму узгоджений із підвищеними вимогами до безпеки у ADR 1.10 і рекомендаціями галузевих керівництв:

- рух у складі конвою кількох ТЗ з НВ, із включенням 1–2 порожніх ТЗ як «екранів» для рознесення ризику та/або формування захисної конфігурації;
- супровід патрулями Національної поліції та/або військової комендатури;
- заборона зупинок поза завчасно погодженими безпечними майданчиками, достатньо віддаленими від густонаселених районів та екочутливих об'єктів;
- письмовий план дій при оголошенні тривоги, а саме алгоритм переходу на укриту ділянку, припинення вантажних операцій, віддалення від об'єктів критичної інфраструктури.

Посилений режим у моделі застосовується, коли інтегральний ризик маршруту R_k потрапляє до проміжного інтервалу $R_{crit(1)} \leq R_k < R_{crit(2)}$ внаслідок зростання $W_{war,k}$ (часті повітряні тривоги, епізодичні удари по інфраструктурі) та/або M_k (підвищена щільність забудови). Запроваджені заходи супроводу спрямовані на зниження $W_{war,k}$ (зменшення ймовірності успішної атаки чи втручання) і частково $W_{human,k}$ (ризик помилок водія в стресових умовах), а також на обмеження M_k через використання контрольованих, заздалегідь погоджених місць зупинки.

в) Критичний режим. Зміст режиму для високонебезпечних вантажів і маршрутів, що проходять через критичні зони:

- застосовується до вантажів високого класу небезпеки (наприклад, деякі вибухові речовини або токсичні інгаляційно небезпечні хімікати), а також до маршрутів через/поруч із ключовими об'єктами критичної інфраструктури (енергетика, великі транспортні вузли), відповідно підходів ЄС/НАТО [23] до стійкості критичної інфраструктури.
- рух лише у заздалегідь узгоджені «тихі вікна» мінімальної воєнної активності;
- попередня перевірка/«очищення» маршруту (обмеження/заборона руху інших НВ, контрольна оцінка стану мостів, шляхопроводів, ключових ділянок);
- включення перевезення до планів цивільного захисту відповідного регіону, заздалегідь визначені сили й засоби ДСНС, медичних служб, поліції, військових адміністрацій.

У моделі критичний режим відповідає випадкам, коли інтегральний ризик маршруту $R_k \geq R_{crit(2)}$ чи коли навіть помірні значення W_k поєднуються з дуже високими M_k (насамперед H_k та E_k) для густонаселених або екочутливих територій, а на рівні цільової функції $Z = \sum k(C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum k(R_k \cdot x_k)$ це відображається встановленням високого значення λ (максимальна чутливість до ризику) та запровадженням суворих обмежень щодо допустимих маршрутів.

г) Цифрова підтримка спеціальних режимів має бути проведена за допомогою:

– Системи моніторингу й підтримки рішень. Tomasoni та співавт. [24] описують ІКТ-систему, що в реальному часі:

- ідентифікує ТЗ з НВ на дорогах;
- відстежує їх рух;
- будує потенційні зони ураження у разі ДТП, з урахуванням конкретного продукту.

Подібні рішення можуть бути адаптовані до українських умов для:

- онлайн-обчислення W_k та R_k для кожного активного маршруту;
- автоматичного сповіщення диспетчерів про зміну $W_{war,k}$ (наприклад, нові удари по інфраструктурі, які фіксують міжнародні інформаційні агентства і національні органи);
- рекомендацій щодо переходу з базового на посилений/критичний режим супроводу.

– Інтеграція даних про воєнні загрози. Дані, що використовуються для оцінки $W_{war,k}$, можуть включати:

- офіційні аналітичні матеріали щодо стійкості критичної інфраструктури (CER Directive [25], аналітичні записки НІСД [26]), які класифікують об'єкти та регіони за рівнем загроз;
- інформацію про атаки на енергетичну й транспортну інфраструктуру (портова, залізнична, енергетична) з перевірених джерел.

Ці набори даних можуть бути інтегровані в ГІС-модуль системи маршрутизації НВ, що дозволяє просторово-часову оцінку $W_{war,k}$ для кожної дуги транспортної мережі.

– Узгодження корпоративних SeMS із державними системами. Корпоративні системи управління безпекою за ISO 28000 (SeMS) логічно інтегруються з:

- загальною рамкою управління ризиками за ISO 31000 (на рівні політики компанії);
- державною системою захисту критичної інфраструктури України, де стійкість визначається як здатність протистояти й відновлюватися після навмисних атак, техногенних аварій і природних загроз.

Дана методика може бути застосована як на мікро- так і на макрорівні.

Концептуальний приклад застосування методики. Для ілюстрації практичного застосування запропонованої методики розглянемо узагальнений, концептуальний сценарій маршрутизації автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період.

Розглядається перевезення рідкого небезпечного вантажу класу 3 (паливо) з нафтобази у відносно безпечному (тиловому) західному регіоні до енергетичного об'єкта в прифронтовій області. На етапі планування формуються щонайменше два альтернативні маршрути:

- Маршрут M_1 : короткий за протяжністю, проходить поблизу кількох об'єктів енергетичної та транспортної інфраструктури, які в минулому вже піддавалися ракетно-дроновим ударам;
- Маршрут M_2 : довший, з кращими дорожніми умовами та меншою щільністю населення, але з окремими ділянками потенційного мінування, віддаленими від великих населених пунктів.

На першому кроці для кожного маршруту k визначаються часткові індекси $W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$ на основі технічного стану АТЗ і дороги, режимів праці та підготовки водіїв, характеристик забудови й екочутливості території вздовж маршруту. Далі, з урахуванням наявної інформації про воєнні загрози (частота повітряних тривог, історія атак на інфраструктуру, характер загроз для об'єктів уздовж траси), формується інтервальна або експертна оцінка $W_{war,k}$. На основі даних щодо чисельності населення в прифронтових громадах, розташування водозаборів, сільськогосподарських земель, об'єктів енергетики та вартості вантажу визначається індекс наслідків M_k , який агрегує гуманітарні (H_k), екологічні (E_k) та економічні (C_k) компоненти.

На другому кроці для кожного маршруту обчислюється інтегральний показник ризику $R_k = W_k \cdot M_k$, де W_k побудовано як агрегований індикатор із урахуванням транспортних ($W_{tech,k}$, $W_{human,k}$, $W_{env,k}$) та воєнного ($W_{war,k}$) компонентів. Для M_1 , як правило, виявляються вищі значення $W_{war,1}$ та M_k через більшу насиченість об'єктами критичної інфраструктури та вищу щільність населення поблизу потенційно уражуваних вузлів; для M_2 – нижчі значення $W_{war,2}$ та/або M_k , хоча логістичні витрати C_2 є більшими.

На третьому кроці в рамках оптимізаційної моделі $Z = \sum_k (C_k \cdot x_k) + \lambda \cdot \sum_k (R_k \cdot x_k)$ проводиться порівняльний аналіз альтернатив: за фіксованого рівня «чутливості до ризику» λ (визначеного політикою держави або компанії) обирається маршрут, що мінімізує Z . При достатньо великому λ (пріоритет безпеки над мінімізацією витрат) модель віддає перевагу M_2 , незважаючи на більшу довжину та вартість, оскільки внесок $\lambda \cdot R_1$ для M_1 виявляється неприйнятно великим.

На четвертому кроці для обраного маршруту (наприклад, M_2) встановлюється відповідний спеціальний режим супроводу. Якщо розрахований R_2 лежить у проміжному інтервалі $R_{crit(1)} \leq R_2 < R_{crit(2)}$, рішенням може бути посилений режим (конвой, супровід

поліції/військової комендатури, контрольовані місця зупинок, план дій при тривозі). Якщо ж навіть для M_2 значення R_2 наближається до/або перевищує $R_{crit(2)}$, перевезення організовується в критичному режимі (рух лише у «тихих вікна», попереднє «очищення» маршруту, інтеграція в плани цивільного захисту), а M_1 може бути взагалі виключений як неприйнятний.

Таким чином, наведений концептуальний приклад демонструє послідовність кроків: від побудови W_k та M_k і розрахунку R_k для альтернативних маршрутів – до вибору економічно та безпечно прийнятного маршруту з урахуванням λ , а також до обґрунтування необхідного режиму супроводу (базового, посиленого чи критичного) як інструменту цілеспрямованого зниження ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнний період.

Важливо, що через обмежену доступність деталізованих військових даних величини $W_{war,k}$ доцільно задавати як інтервали або експертні оцінки; це узгоджується з ISO 31000, яка допускає роботу з неповною інформацією за умови прозорого опису припущень.

ВИСНОВКИ

У дослідженні системно обґрунтовано інтегровану методику оцінювання ризику автоперевезень небезпечних вантажів у воєнних умовах, яка поєднує модифіковану матрицю Хеддона, декомпозицію загального ризику на транспортну й воєнно-інфраструктурну складові та багатокритеріальну модель маршрутизації типу «вартість + ризик». Показано, що явне введення воєнного компонента у структуру ймовірності та поділ спеціальних режимів руху на базовий, посилений, критичний забезпечують коректніший вибір маршрутів і режимів супроводу порівняно з довоєнними підходами, які розглядали воєнні загрози лише імпліцитно або взагалі ігнорували їх. Запропонована формалізація критеріїв маршрутизації з урахуванням відстані до лінії фронту, історії атак на інфраструктуру, можливостей об'їзду й супроводу, а також використання інтегрального показника ризику створює основу для узгодженого прийняття рішень перевізниками, експедиторами та органами державної влади. Практична цінність роботи полягає в тому, що методика може бути інтегрована у системи управління безпекою ланцюгів постачання та державні плани захисту критичної інфраструктури, слугуючи інструментом для оновлення нормативних вимог до перевезень НВ у воєнний та післявоєнний періоди. Отримані результати доцільно використати як методичну основу для подальших кількісних досліджень, калібрування граничних рівнів $R_{crit(1)}$, $R_{crit(2)}$ та розроблення цифрових платформ підтримки рішень щодо безпечної маршрутизації перевезень небезпечних вантажів.

Список використаних джерел

1. *ADR 2023 – European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*. 2023 edition. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). URL: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage>
2. *Про перевезення небезпечних вантажів*: Закон України від 06.04.2000 № 1644-III (редакція станом на 2024 рік). Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1644-14>
3. *ISO 28000:2022. Security and resilience – Security management systems – Requirements*. Geneva: ISO, 2022. 34 p.
4. *ISO 31000:2018. Risk management – Guidelines*. Geneva: ISO, 2018. 16 p.
5. *Erkut E. A Framework for Hazardous Materials Transport Risk Assessment / E. Erkut, V. Verter // Risk Analysis*. 1995. Vol. 15, № 5. P. 589–601. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1539-6924.1995.tb00755.x>

6. *Guo J.* Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years / *J. Guo, C. Luo* // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004>
7. *Xu H.* Risk Evaluation of Hazardous Chemical Road Transportation Accidents Based on a Combined Empowerment-Cloud Model / *H. Xu, W. Zhang, X. Liu, R. Zhao* // *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 4. P. 1813. URL: DOI: <https://doi.org/10.3390/app15041813>
8. *Yu S.* Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials / *S. Yu, L. Wang, Z. Chen* // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 21. P. 11130. URL: <https://doi.org/10.3390/app122111130>
9. *Wang S.* A possibility evaluation model for road transportation of hazardous chemicals accidents / *S. Wang, F. Li, Y. Zhang* // *Environmental Monitoring and Safety*. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.maxapress.com/article/doi/10.54517/emst.2025.02.0009>
10. *Chen C.* A systematic review of safety risk assessment methods for hazardous materials / *C. Chen, D. Zhang, M. Liu* // *Journal of Safety Science and Resilience*. 2025. [Електронний ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2024.100067>
11. *Войтов В. А.* Організація перевезень небезпечних вантажів автомобільним транспортом / *В. А. Войтов, В. В. Вернигора* // *Напрями розвитку технологічних систем і логістики : матеріали конференції*. Харків: Державний біотехнологічний університет, 2024. С. 66–69.
12. *Чередніченко К. В.* Комплексна оцінка безпеки перевезень вантажів в інтегрованих транспортних системах: дисертація на здобуття ступеня доктора філософії. Київ : Національний авіаційний університет, 2024. 287 с.
13. *Розрахунок ризику НС і рекомендації щодо його зниження при транспортуванні зрідженого газу залізничним транспортом : методичні матеріали*. Львів, 2020. 45 с.
14. *Логістика під час війни та проблеми з якими зіштовхнулися підприємства* // *Economic Development*. 2024. № 3. URL: <https://econdevelopment.in.ua>
15. *Russia's major air attack damages Ukrainian energy infrastructure in 5 regions* // *Reuters*. 01.06.2024. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/ukrainian-energy-workers-endless-race-repair-damage-russian-strikes-2025-11-14/>
16. *How the Russia-Ukraine War Has Impacted on Logistics Routes and Supply Chains* // *GMK Center*. URL: <https://gmk.center/en/posts/how-the-russia-ukraine-war-has-impacted-on-logistics-routes-and-supply-chains/>
17. *Attacks on Ukraine's Energy Infrastructure: Harm to the Civilian Population* // *Office of the High Commissioner for Human Rights (OHCHR)*. URL: <https://ukraine.ohchr.org/en/Attacks-on-Ukraines-Energy-Infrastructure-Harm-to-the-Civilian-Population>
18. *Полюх А.* *Transport Infrastructure Amid Protracted War* // *Київська школа економіки (KSE)*. 2025. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/08/Transport-Infrastructure-Amid-Protracted-War_Poliukh-Artem.pdf
19. *Про затвердження Правил перевезення небезпечних вантажів залізничним транспортом* : Наказ Міністерства інфраструктури України від 11.12.2018 № 1041. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1041-18#Text>
20. *2024 Report on the Guidelines on Transport of dangerous goods* // *Transport Community*. 2024. URL: <https://www.transport-community.org/wp-content/uploads/2024/12/2024-Report-on-the-Guidelines-on-Transport-of-dangerous-goods.pdf>
21. *Russian drones, missiles hit railway hub near Ukraine's capital, railway says* // *Reuters*. 06.12.2025. URL: <https://www.reuters.com/world/europe/russian-drones-missiles-hit-railway-hub-near-ukraines-capital-railway-says-2025-12-06/>
22. *Повітряна тривога в Україні: карта повітряних тривог* // *Alerts.in.ua*. URL: <https://alerts.in.ua/en>

23. *Final Assessment Report on the Resilience of Critical Infrastructure* / NATO–EU Task Force. June 2023. 124 p.

24. Tomasoni A. M. ICT based system to monitor hazmat road transportation and a rapid mapping technique for accident scenarios / A. M. Tomasoni, R. Gubiani, P. S. Garbolino // *Chemical Engineering Transactions*. 2022. Vol. 91. P. 175–180. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2291030>

25. Суходоля О. Нова директива ЄС щодо стійкості критичної інфраструктури (CER DIRECTIVE): аналітична записка / О. Суходоля // Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД). 12.04.2023. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2023-04/az_eu-cer_12042023.pdf

26. Соціальний захист населення в Україні: стан та перспективи розвитку // Національний інститут стратегічних досліджень (НІСД). 2013. URL: https://niss.gov.ua/sites/default/files/2013-02/Sots_zahust-86178.pdf

Selivanova N.Y.

RISK ASSESSMENT OF ROAD TRANSPORTATION OF DANGEROUS GOODS UNDER MARTIAL LAW IN UKRAINE: ROUTING AND SPECIAL ESCORT REGIMES

The article is concerned with the development of a comprehensive methodology for assessing the risks of road transportation of dangerous goods under martial law in Ukraine. It is argued that traditional approaches to transport risk management based on the requirements of ADR, the Law of Ukraine “On the Transportation of Dangerous Goods” and the classic risk assessment scheme, are insufficient in the presence of additional military threats – missile and drone strikes, artillery shelling, mining, and destruction of road transport and energy infrastructure. It is proposed to expand the structure of the probability component by identifying the military threat coefficient W_{war} , which takes into account the intensity of attacks, the proximity of the route to the front line, the presence of critical objects, and recorded incidents along the transport corridor. To assess the consequences, a multi-criteria index has been developed that combines losses to life and health of the population, the environment, and the economy.

The methodology integrates a modified Heddon matrix, adapted to the three phases of the transport process (before, during, and after the event), taking into account the military impact on people, vehicles, the environment, and critical transport infrastructure. Based on this, a multi-criteria routing task is set, in which the total logistics costs and the integral risk of the route are minimized, taking into account the regulatory restrictions of martial law and escort capabilities. Separately, a classification of special traffic modes (basic, enhanced, critical) is proposed depending on the cargo hazard class, the spatial-temporal profile of threats, and the sensitivity of territories. The scientific novelty lies in the formalized combination of the modified Heddon matrix with an integral risk model and multi-criteria routing, taking into account military threats, which makes it possible to evaluate and compare alternative routes and modes of transport for dangerous goods in the dynamic conditions of martial law. The practical value of the work lies in the creation of a formalized toolkit for government authorities, carriers, and freight forwarders, which ensures a reasonable choice of routes and modes of transport for dangerous goods in conditions of ongoing hostilities and during the planning of post-war restoration of the transport system.

Keywords: Road transportation of dangerous goods; martial law; risk assessment; military threats; routing of dangerous goods transportation; Heddon matrix; special escort modes; critical transport infrastructure.

Стаття надійшла 25.11.2025р

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ДЕРЕВИНИ АВТОМОБІЛЬНИМ ТРАНСПОРТОМ

У статті розглянуто аналіз сучасних методів покращення ефективності міжнародних автомобільних перевезень продукції з деревини, зокрема дерев'яних палет, які експортуються з України до країн Європейського Союзу. Актуальність теми обґрунтовано постійним зростанням обсягів експорту, підвищенням вимог до екологічності пакувальної продукції, а також необхідністю забезпечення стабільності логістичних ланцюгів в умовах підвищеного навантаження на прикордонну інфраструктуру. Особливий акцент зроблено на вивченні факторів, які визначають тривалість транспортного циклу, зокрема часу очікування у чергах на митних пунктах пропуску, рівня цифровізації процесів оформлення вантажів та документообігу.

У дослідженні запропоновано комплексний підхід до вирішення зазначених проблем, який базується на застосуванні математичних моделей черг типу "Mathematical Modeling and Computing" або "ММС" для оцінки пропускної спроможності пунктів перетину кордону, використанні методології мережевого планування PERT (Program Evaluation and Review Technique) та CPM (Critical Path Method) для ідентифікації критичного шляху доставки, а також аналізу життєвого циклу доставки (LCC), що враховує часові втрати та витрати на транспортування. Значна увага приділена впровадженню цифрових технологій, таких як GPS-моніторинг і адаптивна маршрутизація, які сприяють підвищенню передбачуваності та гнучкості перевізних процесів.

На основі імітаційного моделювання доведено, що оптимізація прикордонних процедур, впровадження електронного декларування, автоматизація контролю та розширення кількості сервісних каналів можуть зменшити загальний час простою транспортних засобів на 35–50 %, знизити витрати на паливе на 8–12 % та забезпечити вищий рівень стабільності і надійності міжнародних перевезень деревини.

Отримані результати мають значний практичний потенціал, зокрема для проектування логістичних маршрутів, модернізації митних пунктів пропуску та розробки цифрових рішень для потреб транспортних компаній.

Ключові слова: Міжнародні автомобільні перевезення, деревина, дерев'яні палети, оптимізація логістики, митний контроль, моделі масового обслуговування, імітаційне моделювання, GPS-моніторинг, цифровізація, пропускна спроможність.

Постановка проблеми. Міжнародні автомобільні перевезення деревини, зокрема дерев'яних палет і пиломатеріалів, є ключовим елементом експортного потенціалу України та складають значну частину логістичних поставок до країн Європейського Союзу.[1].

У країнах ЄС дерев'яні палети широко використовуються в складських процесах, автоматизованих логістичних центрах, промисловості й торгівлі. [2]. Зростаючий попит на екологічну пакувальну продукцію підвищує вимоги до швидкості, надійності та передбачуваності доставки українських товарів. Однак сучасна система міжнародних перевезень стикається з низкою суттєвих проблем.

Однією з основних проблем є перевантаження прикордонних пунктів пропуску, де час очікування в чергах нерідко перевищує 8–12 годин. Через це значна частина транспортного циклу витрачається на проходження контрольних процедур, а не на фактичне перевезення вантажу, що значно знижує ефективність логістичних операцій.

Серед інших проблем можна зазначити такі:

- різницю в митних процедурах і нормативно-правових вимогах між Україною та ЄС;
- низький рівень цифровізації документообігу та повільне впровадження електронної CMR;
- нестабільність логістичних циклів і значні коливання в термінах доставки;
- стрімке зростання витрат на пальне й супутні операційні витрати;
- обмеження щодо вагових і габаритних параметрів транспортних засобів;
- нерівномірне завантаження пунктів пропуску, що призводить до формування неоптимальних маршрутів.

Ці чинники збільшують час доставки, підвищують експлуатаційні витрати, створюють ризики зриву контрактних строків і знижують конкурентоспроможність українських експортерів деревини на ринку ЄС [3].

У світлі цих викликів виникає необхідність комплексного вдосконалення міжнародного автомобільного перевезення деревини. Це можливо за допомогою впровадження сучасних математичних моделей, цифрових логістичних технологій, інструментів GPS-моніторингу та заходів із оптимізації пропускну здатності митних пунктів.

Використання таких підходів дозволить зменшити час простою, підвищити надійність транспортування та забезпечити стабільність логістичних ланцюгів.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій. Проблема вдосконалення міжнародних автомобільних перевезень деревини та підвищення ефективності прикордонної інфраструктури залишається об'єктом активного вивчення як серед українських, так і європейських науковців. Більшість досліджень акцентує увагу на тому, що головним фактором, який обмежує розвиток транспортування вантажів у напрямку Європейського Союзу, є переповненість пунктів пропуску. Це пояснюється недостатньою пропускну спроможністю, асинхронністю процедур та технічними обмеженнями. [4].

Українські наукові дослідження вказують, що прикордонна інфраструктура часто не відповідає сучасним вимогам інтенсивного міжнародного руху. Більшість діючих контрольно-пропускних пунктів проектувалися для набагато менших обсягів вантажних транспортних потоків. Дослідники підкреслюють, що черги виникають через непропорційну швидкість здійснення контрольних операцій, дефіцит персоналу та застарілі системи перевірки документів. [5].

Європейські аналітичні звіти висвітлюють важливість гармонізації митних і фітосанітарних процедур, а також адаптації української продукції до міжнародних стандартів, таких як ISPM 15 для дерев'яної тари та EPAL для європіддонів. Окремо зазначається, що перехід на цифровізовані процеси, зокрема впровадження е-CMR та електронної передачі митної інформації, сприяє значному скороченню часу на оформлення вантажів, знижує ризик помилок і забезпечує прозорість усіх етапів логістики. [6].

У роботах із транспортної логістики важливу роль відіграє застосування математичних моделей для аналізу роботи пунктів пропуску. Найбільш розповсюджені підходи базуються на системах масового обслуговування, зокрема моделях типу "Mathematical Modeling and Computing" або "MMC". Вони дають змогу визначати ймовірнісну структуру черг, оцінювати пропускну здатність і оптимальну кількість обслуговуючих каналів. [7].

Дослідження показують, що навіть незначне збільшення кількості обслуговуючих каналів або зменшення середнього часу проведення процедур здатне суттєво скоротити загальний час очікування транспортних засобів. Методи мережевого планування PERT (Program Evaluation and Review Technique) та CPM (Critical Path Method) розглядаються як універсальний інструмент аналізу часової структури транспортного процесу. Вони дають змогу визначити критичний шлях доставки, виявити часові резерви та оцінити вплив потенційних затримок на загальний логістичний цикл. [8].

Дослідження підкреслюють особливу ефективність цих методів в умовах нестабільності перетину кордону, коли логістичний процес супроводжується високою невизначеністю та значною варіативністю. [9].

Також у науковій літературі значну увагу приділено впровадженню GPS-, телематичних та ITS-систем. Ці технології забезпечують безперервний моніторинг руху транспортних засобів, аналіз завантаженості маршрутів, прогнозування заторів і оперативне коригування маршрутів у відповідь на зміну дорожньої ситуації. [10].

Дослідження показують, що інтеграція GPS-моніторингу з автоматизованими системами контролю та електронного документообігу дозволяє підвищити точність доставки на 10–20 % і зменшити непродуктивні затримки. Міжнародні організації, зокрема UNECE та IRU, наголошують на важливості переходу до інтелектуальних транспортних систем (ITS). Ці системи об'єднують автоматизовані засоби контролю, алгоритми прогнозування навантажень і механізми управління чергами в режимі реального часу. [11].

Основною очікуваною перевагою впровадження ITS є підвищення пропускної спроможності пунктів пропуску без необхідності значних інвестицій у розширення інфраструктури. Окремий інтерес у дослідників викликає використання імітаційного моделювання, яке дозволяє детально відтворити функціонування прикордонного пункту пропуску з урахуванням реальних параметрів потоку, черг, часу обслуговування та випадкових факторів. Такий підхід забезпечує точний прогноз впливу змін в інфраструктурі або процедурах на ефективність роботи пункту пропуску. [12].

Аналіз дослідницьких матеріалів свідчить, що питання оптимізації міжнародних автомобільних перевезень деревини є складним і багатограним, тому потребує інтегрованого підходу. Найдієвішими інструментами в цьому контексті є цифровізація документообігу, впровадження електронних систем міждержавної взаємодії, використання математичних моделей черг, застосування імітаційного моделювання та телематичних систем управління перевезеннями.

Мета дослідження. Створення комплексної науково-методичної системи, спрямованої на підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень дерев'яних палет, що експортуються з України до країн Європейського Союзу.

Дослідження охоплює оптимізацію логістичних процесів, скорочення часу виконання митних процедур, мінімізацію простоїв, а також удосконалення цифрового документообігу й управління транспортними операціями.

Особливий акцент робиться на математичному аналізі функціонування митних пунктів пропуску та впровадженні передових аналітичних інструментів для поліпшення організації перевезень.

Основний матеріал дослідження. Для реалізації поставленої мети необхідно виконати такі наукові й практичні завдання:

1. Провести детальний аналіз чинної системи міжнародних автомобільних перевезень деревини, виявити її основні проблемні аспекти, обмеження, а також фактори, що впливають на час доставки та стабільність логістичних процесів.

2. Побудувати процесну схему логістичного ланцюга транспортування палет від виробника до отримувача в країні ЄС. Виділити ключові етапи, описати інформаційні й матеріальні потоки та визначити часові характеристики кожного складового елемента системи.

3. Створити математичну модель черг на основі теорії масового обслуговування типу ММС для оцінки пропускної здатності митного пункту пропуску, а також розрахунку ймовірнісних показників його функціонування.

4. Дослідити вплив кількості каналів обслуговування(c) на середній час очікування (W_q) та визначити оптимальні параметри роботи митного пункту в умовах різної інтенсивності транспортних потоків.

5. Розробити часово-вартісну функцію логістичного процесу, яка враховує витрати на транспортування, затримки, варіативність часу доставки та наслідки простоїв у чергах.

6. Провести імітаційне моделювання роботи митного пункту пропуску. Це дозволить відтворити реальні умови функціонування системи та оцінити ефективність потенційних управлінських рішень, таких як збільшення кількості каналів, цифровізація процесів чи зміна режиму роботи.

7. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень, спрямовані на скорочення часу проходження кордону, забезпечення стабільності поставок та зниження логістичних витрат.

Основою проведеного дослідження виступає системний підхід до аналізу міжнародних автомобільних перевезень деревини. У роботі поєднано методи логістичного моделювання, математичний апарат теорії масового обслуговування, технології мережевого планування, телематичні інструменти та імітаційне моделювання.

Такий комплексний підхід дозволяє забезпечити точну оцінку продуктивності роботи митних пунктів пропуску, виявити слабкі місця у логістичному ланцюгу та розробити практичні рекомендації для його вдосконалення.

При використанні системного підходу до міжнародних перевезень дерев'яних палет, аналіз транспортного процесу розглядається як багаторівневий. Він складається з виконання транспортних операцій (переміщення автомобіля, завантаження та розвантаження вантажу), проходження митних і фітосанітарних процедур, здійснення адміністративного документообігу, контролю та обробці інформаційних потоків, використанню інструментів моніторингу і контролю.

Для дослідження цієї системи застосовуються різні підходи. Процесний підхід - розроблення схеми логістичного ланцюга. Параметричний підхід - аналіз часових і вартісних характеристик. Моделювання потоків - ідентифікація ключових обмежень та визначення "вузьких місць".

Далі запропонована математична модель черг, яка представлена у вигляді системи масового обслуговування типу ММС. Для моделювання процесу проходження митних процедур використовується підхід СМО, зокрема модель ММС, яка базується на наступних параметрах:

- потік заявок (вантажних автомобілів) описується пуассонівським розподілом;
- час обслуговування має експоненційний розподіл;
- черга не має обмежень за довжиною;
- дисципліна обслуговування визначається принципом FIFO (перший прийшов — перший обслужений).

Для кращого опису моделі, у таблиці № 1 надані параметри та значення даних, які нижченаведені у базових формулах.

Таблиця 1 – Значення та параметри опису моделі

№ з/п	Параметр	Значення	Одиниця виміру
1	Інтенсивність, λ	6 заяв	год
2	Швидкість обслуговування, μ	2 заяв	год
3	Кількість каналів, c	5	-
4	Час доставки	18–28	год
5	Час завантаження	1,2	год

Транспортні технології

Коефіцієнт завантаження системи:

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (1)$$

Ймовірність простою системи:

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{c-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^c}{c!(1-\rho)} \right]^{-1} \quad (2)$$

Ймовірність утворення черги:

$$P_{\text{черги}} = \frac{(\lambda/\mu)^c}{c!(1-\rho)} P_0 \quad (3)$$

Середній час очікування в черзі:

$$W_q = \frac{P_{\text{черги}}}{c\mu - \lambda} \quad (4)$$

Середній час перебування автомобіля в системі:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu} \quad (5)$$

Використання цієї моделі дає змогу проаналізувати вплив: інтенсивності прибуття автомобілів (λ), швидкості обслуговування (μ), кількості каналів (c) на характеристики черги та загальну тривалість проходження митного контролю. Графічно це відображено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Графік залежності W_q від кількості каналів

Наступним кроком зроблено аналіз часової структури логістичного процесу. Для цього були використані методи PERT/CPM, які дали змогу побудувати мережевий графік транспортного циклу, визначити критичний шлях, оцінити потенційні затримки, виявити резерви часу, провести аналіз варіативності постачань.

Кожна операція характеризується трьома видами оцінок: оптимістична (t_o), найбільш ймовірна (t_m), песимістична (t_p).

Середній час виконання кожної операції визначається наступним чином:

$$t = \frac{t_o + 4t_m + t_p}{6} \quad (6)$$

Дисперсія операції:

$$\sigma^2 = \left(\frac{t_p - t_o}{6} \right)^2 \quad (7)$$

Транспортні технології

Для оцінки економічної ефективності застосовано інтегральну функцію:

$$C = \alpha C_{\text{тр}} + \beta \sigma_T + \gamma W_q \quad (8)$$

Де $C_{\text{тр}}$ - транспортні витрати;

σ_T - варіація часу доставки;

W_q - час очікування в черзі;

α, β, γ - вагові коефіцієнти.

Функція дозволяє визначити вплив: невизначеності часу доставки, простоїв на митниці, експлуатаційних витрат, на загальну економічну ефективність перевезень. На рисунку 2 надана структура витрат у відсотках.



Рисунок 2 – Структура витрат у відсотках

Для аналізу функціонування митного пункту пропуску у наближених до реальних умовах застосовано імітаційне моделювання. Такий підхід забезпечує можливість врахування наступних факторів: випадковий характер прибуття транспортних засобів; нерівномірний розподіл інтенсивності потоку; пікові навантаження на інфраструктуру; затримки, спричинені часовими параметрами процесів; варіативну кількість обслуговуючих каналів; вплив технічних та організаційних умов на функціонування пункту пропуску. На рисунку 3 наведені фактори, що впливають на ефективність логістики.

Фактори, що впливають на ефективність логістики



Рисунок 3 – Фактори, що впливають на ефективність логістики

Розроблена модель забезпечує можливість аналізу впливу таких змін, як:

- збільшення числа робочих місць персоналу,
- автоматизація перевірочних процедур,
- запровадження електронного документообігу,
- перегляд режиму роботи пункту пропуску.

У результаті моделювання оцінюються зміни у загальному часі очікування на оформлення та пропускній спроможності митного пункту.

Також у дослідженні були застосовані дані GPS й принципи телематичних систем таких як GPS-моніторинг, телематики, інтелектуальних транспортних систем (ITS).

Це надало змогу ефективно створювати оптимальні маршрути, прогнозувати можливі затримки, контролювати ситуацію в реальному часі, зменшувати непродуктивні простої, гнучко адаптувати розклад руху.

Для оцінки результативності транспортних операцій було використано мультикритеріальний аналіз. Такий підхід дає можливість здійснити порівняння двох станів системи, це - початкового (до проведення оптимізаційних заходів) та оптимізованого (після впровадження відповідних рішень).

Оцінювання проводилося на основі таких критеріїв, як:

- тривалість доставки вантажу;
- час очікування на прикордонному контролі;
- витрати паливних ресурсів;
- стабільність і передбачуваність маршруту;
- відповідність виконання строків запланованому графіку.

Цей аналіз дозволяє визначити ефективність впроваджених змін та оцінити практичну доцільність. (рис. 4)

Процес експорту палет



Рисунок 4 – Схема процесу експорту палет

Були отримані наступні результати моделювання: при збільшенні кількості каналів з 2 до 5, час очікування скорочується з 4,1 до 1,2 годин. Розширення понад 5 каналів не дає суттєвого ефекту через обмеження інфраструктури.

Отримані результати представлені у таблиці 2.

Таблиця 2 – Зведені результати моделювання після впроваджених заходів

№ з/п	Показник	До	Після	Зміна
	Середній час очікування	4,1 год	1,2 год	–70 %
	Витрати пального	100 %	88–92 %	–8–12 %
	Точність доставки	82 %	93 %	+11 %
	Затримки > 30 хв	23 %	11 %	–52 %

Практична складова проведеного дослідження була спрямована на аналіз ефективності впровадження запропонованих організаційно-технологічних інструментів у сфері здійснення міжнародних автомобільних перевезень дерев'яних палет з України до країн Європейського Союзу. Для досягнення поставленої мети було використано метод імітаційного моделювання роботи митного пункту пропуску, здійснено оцінювання часових параметрів доставки вантажів, оптимізовано маршрути перевезення та проведено аналіз екологічних і економічних показників зазначених процесів.

Результати моделювання продемонстрували, що збільшення кількості активних каналів митного обслуговування з двох-трьох до п'яти дозволяє значно скоротити середній час очікування транспорту. При роботі двох каналів середній час очікування становив 4,1 години. При функціонуванні п'яти каналів цей показник скоротилося до 1,2 години.

Таким чином, перехід до п'яти каналів дав змогу скоротити час очікування більш ніж у 3,4 рази. Проте подальше нарощування кількості каналів не виявило суттєвих переваг через інфраструктурні обмеження пропускної здатності митного вузла.

Імплементация електронних декларацій (e-CMR, e-Invoice) дозволила знизити середній час митного оформлення на 8–14 %. Це стало можливим завдяки виконанню частини процедур до фактичного прибуття вантажного автомобіля на пункт контролю.

Таке нововведення сприяло зменшенню навантаження на митний персонал та стабілізації часу проходження митного контролю.

Алгоритм адаптивної маршрутизації, що враховує рівень завантаженості пунктів пропуску, забезпечив скорочення середньої тривалості рейсів на 1,5–2 години.

Це було досягнуто завдяки:

- автоматизованому вибору менш завантажених пунктів пропуску;
- перенесенню частини перевезень на нічний час доби;
- гнучкому регулюванню швидкості руху залежно від прогнозованого рівня затримок на чергах.

Впровадження електронної системи обліку палет (QR-коди, маркування EPAL), дозволило зменшити кількість помилок при перевірці вантажних партій на 10–12 %, спростити процедуру звіряння даних та мінімізувати кількість конфліктних ситуацій з європейськими партнерами.

Оптимізація витрат пального та екологічний ефект досягнуто за рахунок скорочення простою транспорту на 2 години для одного автомобіля. Це забезпечує економію 10–12 літрів пального, зменшення викидів CO₂ на 26–32 кг, збільшення оборотності транспортних засобів на 6–9 %.

У масштабі автопарку зі 100 автомобілів це означає економію понад 1000 літрів пального щодня під час пікових завантажень.

Реалізація комплексного підходу до оптимізації митної інфраструктури, цифровізації документообігу та впровадження маршрутної аналітики забезпечила такі результати:

- скорочення середнього логістичного циклу на 12–18 %;
- зниження ризиків непередбачуваних затримок на 30–40 %;

Транспортні технології

- підвищення точності виконання графіка поставок із 82 % до 93–95 %;
- зменшення витрат автопарку на обслуговування на 6–9 %;
- збільшення пропускної здатності митних пунктів на 35–50 %.

Зменшення витрат, стабільні строки постачання та мінімізація простоїв дають підприємствам можливість забезпечувати регулярність поставок, створювати прогнозовані графіки для європейських партнерів, розширювати напрямки експорту, покращувати рентабельність логістичних процесів.

У підсумку, практичний досвід демонструє, що використання вдосконалених логістичних технологій, електронного документообігу, адаптивної маршрутизації та сучасних методів моделювання значно підвищує ефективність міжнародних автомобільних перевезень дерев'яних палет між Україною та країнами Європейського Союзу.

ВИСНОВКИ

Висновки проведеного дослідження комплексно підтвердили, що підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень дерев'яних палет можливе лише за умов одночасного вдосконалення транспортно-логістичних, організаційних, технічних та цифрових компонентів. Використання математичних моделей черг типу ММС, інструментів мережевого планування PERT/CPM, розробка часово-вартісної функції логістичного процесу та застосування імітаційного моделювання дозволили об'єктивно оцінити реальний стан пропускної здатності митних пунктів і виявити критичні обмеження, що призводять до надмірних затримок при перетині кордону.

Результати дослідження доводять, що оптимізація кількості митних каналів, автоматизація процедур контролю та цифровізація документообігу мають вирішальне значення для скорочення черг і стабілізації логістичного процесу. Збільшення кількості каналів до п'яти дозволяє скоротити час очікування більш ніж на 70 %, а впровадження електронного декларування зменшує тривалість митних процедур на 8–14 %. Це забезпечує значний економічний ефект у вигляді зниження витрат палива, скорочення простоїв і підвищення обіговості автотранспорту.

Імітаційне моделювання підтвердило, що комплексний підхід до модернізації прикордонної інфраструктури сприяє збільшенню пропускної спроможності на 35–50 %, зниженню ризику затримок на третину та підвищенню точності виконання графіків до 93–95 %. Одночасне застосування телематичних систем, GPS-моніторингу й інтелектуальних алгоритмів маршрутизації створює основу для оперативного прийняття рішень і оптимізації маршрутів залежно від поточної завантаженості пунктів пропуску.

Покращення організації міжнародних перевезень деревини не лише дозволяє зменшити логістичні витрати, а й посилює конкурентні позиції українських експортерів на ринку ЄС. Зниження часу доставки, підвищення передбачуваності поставок і мінімізація ризику зриву контрактів забезпечують створення позитивного іміджу українських виробників і стабільність експортних ланцюгів.

Таким чином, дослідження підтверджує, що впровадження сучасних математичних, цифрових і логістичних підходів є критично важливим для підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень дерев'яних палет. Запропоновані методичні рекомендації та представлені аналітичні дані можуть слугувати основою для подальшого вдосконалення транспортної інфраструктури, розвитку міжнародного співробітництва та створення більш стійких і адаптивних логістичних систем між Україною та ЄС.

Список використаних джерел

1. Державна митна служба України. Аналітичні матеріали щодо функціонування пунктів пропуску та пропускної спроможності. – Київ, 2023.
2. European Pallet Association (EPAL). Official Standards and Technical Requirements for Wooden Pallets. – Düsseldorf, 2022.
3. Міністерство інфраструктури України. Звіт про стан міжнародних автомобільних перевезень та логістичних потоків. – Київ, 2023.
4. European Commission. EU Border Crossing Operations and Bottleneck Analysis. – Brussels, 2022.
5. Губа В. М., Соколенко Т. В. Організація та управління міжнародними вантажними автомобільними перевезеннями. – Київ: КНУТД, 2021.
6. UNECE. Electronic CMR Protocol (e-CMR). Implementation Guide. – 2021.
7. Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris C. Fundamentals of Queueing Theory. 5th ed. – Wiley, 2018.
8. Kerzner H. Project Management: Planning, Scheduling, and Controlling with PERT/CPM. – New York: Wiley, 2020.
9. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson, 2021.
10. Ascher U., Telematics in Transport Logistics: Real-Time Tracking and ITS Infrastructure. – Springer, 2020.
11. International Road Transport Union (IRU). Intelligent Transport Systems for International Freight Operations. – Geneva, 2022.
12. Banks J., Carson J. Discrete-Event System Simulation. – Prentice Hall, 2019.

Baranov I. O., Homyak A.E., Kiritseva O. V.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERNATIONAL TIMBER TRANSPORT BY ROAD

The article analyzes modern methods for improving the efficiency of international road transport of wood products, in particular wooden pallets, exported from Ukraine to European Union countries. The relevance of the topic is justified by the constant growth in export volumes, increased requirements for the environmental friendliness of packaging products, and the need to ensure the stability of logistics chains in conditions of increased load on border infrastructure. Particular emphasis is placed on studying the factors that determine the duration of the transport cycle, in particular, waiting times in queues at customs checkpoints, the level of digitization of cargo clearance processes, and document flow.

The study proposes a comprehensive approach to solving these problems, based on the use of MMC queueing models to assess the throughput capacity of border crossing points, the use of PERT/CPM network planning methodologies to identify critical delivery paths, and delivery life cycle analysis (LCC), which takes into account time losses and transportation costs. Significant attention is paid to the implementation of digital technologies, such as GPS monitoring and adaptive routing, which contribute to the predictability and flexibility of transportation processes.

Simulation modeling has shown that optimizing border procedures, introducing electronic declarations, automating controls, and expanding the number of service channels can reduce overall

vehicle downtime by 35–50%, lower fuel costs by 8–12%, and ensure greater stability and reliability in international timber transport.

The results obtained have significant practical potential, in particular for the design of logistics routes, the modernization of customs checkpoints, and the development of digital solutions for the needs of transport companies.

Keywords: International road transport, timber, wooden pallets, logistics optimization, customs control, queuing models, simulation modeling, GPS monitoring, digitalization, throughput capacity.

Стаття надійшла 02.12.2025р.

УДК 656:004

doi.org/10.31498/2522-9990302025347253

Процик О. П., Хмельов І. В., Бутенко Г. М., Данєвський М. О., Красулін О.С.

СУЧАСНІ ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ ПРОЦЕСАМИ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ У МІЖНАРОДНОМУ СПОЛУЧЕННІ

У роботі розглянуто сучасні цифрові технології управління транспортними процесами автомобільного транспорту в міжнародному сполученні як один із ключових чинників підвищення ефективності, надійності та безпеки перевезень в умовах глобалізації та цифрової трансформації транспортної галузі. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів міжнародних автомобільних перевезень, ускладненням логістичних ланцюгів постачання, підвищенням вимог до якості транспортних послуг та необхідністю оперативного прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності зовнішнього середовища. Також проаналізовано основні напрями цифровізації управління транспортними процесами, зокрема використання транспортних інформаційних систем (TMS), телематичних і супутникових навігаційних систем, технологій великих даних (Big Data), хмарних сервісів, цифрових платформ координації перевізників і вантажовласників, а також елементів штучного інтелекту для прогнозування, оптимізації маршрутів та управління ризиками у міжнародних автомобільних перевезеннях. Особливу увагу приділено інтеграції цифрових технологій у процеси планування, диспетчеризації, моніторингу та контролю виконання перевезень з урахуванням вимог міжнародного законодавства та стандартів.

Визначено основні переваги впровадження цифрових технологій, серед яких скорочення простой рухомого складу, зниження витрат на перевезення, підвищення прозорості транспортних процесів, покращення якості логістичного сервісу та зменшення впливу людського фактору на прийняття управлінських рішень. Разом з тим, окреслено проблемні аспекти цифровізації, пов'язані з інформаційною безпекою, сумісністю інформаційних систем, підготовкою персоналу та необхідністю адаптації організаційно-управлінських структур транспортних підприємств.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному підході до узагальнення та структуризації сучасних цифрових технологій управління транспортними процесами автомобільного транспорту в міжнародному сполученні з позицій системної ефективності транспортно-технологічних рішень. Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробленні та впровадженні цифрових рішень у діяльності автотранспортних підприємств, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців з транспортних технологій і логістики.

Ключові слова: *Автомобільний транспорт, міжнародні перевезення, транспортні процеси, цифрові технології, управління, транспортні інформаційні системи, Блокчейн, Інтернет речей, platooning, AI, smart contracts.*

Постановка проблеми. Сучасні міжнародні автомобільні перевезення функціонують в умовах зростання складності логістичних ланцюгів, інтенсифікації інформаційних потоків та підвищених вимог до ефективності й безпеки транспортних процесів. Традиційні підходи до управління перевезеннями не забезпечують необхідного рівня прозорості та оперативності прийняття рішень. Впровадження цифрових технологій, зокрема блокчейну, Інтернету речей (IoT), інтелектуальних систем управління та технології платонінгу, створює суттєвий потенціал підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень. Водночас застосування зазначених технологій має переважно фрагментарний характер і супроводжується значними інвестиційними витратами, проблемами інтеграції інформаційних систем, нормативно-правового регулювання та кібербезпеки. Недостатньо дослідженим залишається питання їх комплексного використання в єдиній системі управління транспортними процесами. Це зумовлює актуальність наукового обґрунтування доцільності та умов цифрової трансформації управління автомобільним транспортом у міжнародному сполученні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження з управління транспортними процесами автомобільного транспорту в міжнародному сполученні приділяють увагу впровадженню цифрових технологій, таких як блокчейн, Інтернет речей (IoT), інтелектуальні системи управління та платонінг. Водночас більшість досліджень мають фрагментарний характер, акцентуючи увагу на технічних або описових аспектах, без системного аналізу комплексного впливу цих технологій на ефективність і економічну доцільність міжнародних перевезень. Це визначає наукову прогалину та обґрунтовує необхідність подальших досліджень у напрямі інтегрованого використання цифрових технологій для управління транспортними процесами.

В роботі [1] зазначено, що інтенсивний розвиток технологій збирання, обробки й передачі інформації дозволив багатьом організаціям на макрорівні проводити різноманітні дослідження у масштабах світової економіки, використовуючи міжнародні та національні бази статистичних даних, які охоплюють практично всі аспекти глобального розвитку та включають показники, що характеризують процеси цифровізації національних економік та окремих її сфер.

Відповідно до джерела [2] проаналізовано напрямки та перспективи цифровізації транспортних систем за умов переходу до нового технологічного укладу, оскільки глобальні науково-технологічні тренди останніх десятиліть суттєво посилили роль транспортних систем у соціально-економічному розвитку держав.

В дослідженні [3] розроблено практичні рекомендації щодо удосконалення управління транспортом підприємств матеріальної сфери при обслуговуванні торгових точок із реалізації продукції. Запропоновано критерії для вибору оптимального програмного забезпечення автоматизації транспортно-логістичних процесів обслуговування торгових точок.

В роботі [4] розглянуто роль та можливості використання сучасних технологій, а саме штучного інтелекту, в управлінні транспортною логістикою. Дослідження зосереджується на тому, як штучний інтелект може впливати на ефективність та оптимізацію процесів управління транспортними ресурсами, маршрутизацію, контроль якості доставки та складське управління.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження та систематизація сучасних цифрових технологій управління транспортними процесами автомобільного транспорту в міжнародному

сполученні, а також обґрунтування доцільності їх комплексного застосування для підвищення ефективності, безпеки та прозорості функціонування транспортно-логістичних систем.

Основний матеріал дослідження. В роботі розглянуто сучасні цифрові технології управління транспортними процесами автомобільного транспорту у міжнародному сполученні. Блокчейн розглядається як засіб підвищення прозорості, безпеки та простежуваності ланцюгів постачання, IoT — для моніторингу транспортних засобів і оптимізації маршрутів, а платонінг та інтелектуальні системи — для підвищення безпеки та ефективності перевезень.

Технологія блокчейн — це децентралізований цифровий реєстр, який фіксує транзакції на декількох комп'ютерах. Це забезпечує прозоре та безпечне управління даними, що робить її надзвичайно важливою в логістичній галузі. Блокчейн складається з блоків транзакцій. Кожен блок пов'язаний з попереднім, утворюючи ланцюг. Цей ланцюг розподілений по мережі блокчейну, і кожен вузол має доступ до всього блокчейну. Така децентралізація підвищує прозорість логістики. Майнери перевіряють транзакції та додають нові блоки, вирішуючи складні задачі. Це забезпечує легітимність і безпеку кожного запису в реєстрі блокчейну. Також слід зауважити що інвестиції в блокчейн технології є значними тому слід звернути увагу на рентабельність інвестицій.

Логістичні компанії використовують блокчейн для створення прозорих, незмінних записів про діяльність ланцюга поставок, забезпечуючи перевірюваність і безпеку кожного етапу.

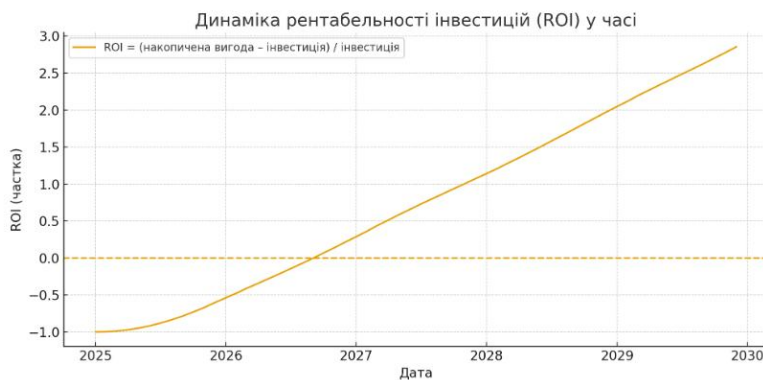


Рисунок 1 – Динаміка рентабельності інвестицій у часі

Крім того, блокчейн підтримує смарт-контракти — самовиконуючі контракти з умовами, записаними в коді, що спрощує процес оплати. Технологія блокчейн трансформує логістичну галузь, покращуючи простежуваність, вдосконалюючи процеси перевезення вантажів і зменшуючи кількість шахрайства.



Рисунок 2 – Щомісячні витрати при використанні блокчейну

Транспортні технології

Використовуючи базу даних блокчейну, компанії можуть відстежувати товари по всьому ланцюгу поставок, покращуючи безпеку харчових продуктів у ланцюгах поставок харчових продуктів. Судноплавні компанії використовують рішення блокчейну для скорочення часу митного оформлення та зменшення термінів доставки. Розумні контракти автоматизують фінансові транзакції, оптимізуючи процес оплати.

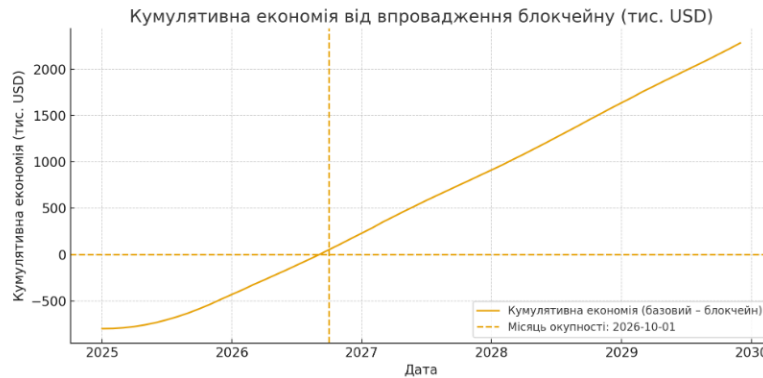


Рисунок 4 – Кумулятивна економія від впровадження блокчейну

При повному впровадженні блокчейн-технологій спостерігається значний значне скорочення ключових показників



Рисунок 5 – Скорочення ключових показників при впровадженні блокчейну

IoT в логістиці, скорочення витрат від «Інтернет речей», представляє собою інтеграцію фізичних пристроїв у мережу логістичної та транспортної галузі, які спілкуються та обмінюються даними без втручання людини. Також IoT дозволяє зменшити щомісячні загальні витрати.

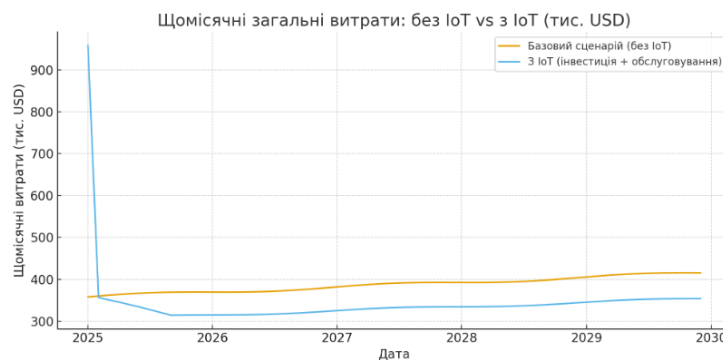


Рисунок 6 – Щомісячні витрати при використанні IoT

По суті, IoT дозволяє пристроям, таким як датчики, транспортні засоби та обладнання, підключатися та синхронізуватися через Інтернет, створюючи більш динамічне, чутливе та взаємопов'язане логістичне середовище. Пристрій IoT відіграє важливу роль у цій екосистемі, контролюючи умови, підвищуючи безпеку даних та керуючи величезними обсягами генерованих даних.

Основні компоненти IoT:

- ✓ датчики: це очі та вуха пристроїв IoT, які збирають дані, такі як місцезнаходження, температура або швидкість, з логістичного середовища;
- ✓ зв'язок: пристрої IoT не можуть спілкуватися без надійного з'єднання. Зв'язок може варіюватися від стільникових мереж до Wi-Fi, що дозволяє обмінюватися даними в режимі реального часу між віддаленими локаціями і навіть по всьому світу;
- ✓ аналітика даних: дані, зібрані пристроями IoT, є величезними. Ці дані перетворюються на практичні висновки за допомогою систем прогнозової аналітики та штучного інтелекту, що допомагає оптимізувати маршрути та прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні.

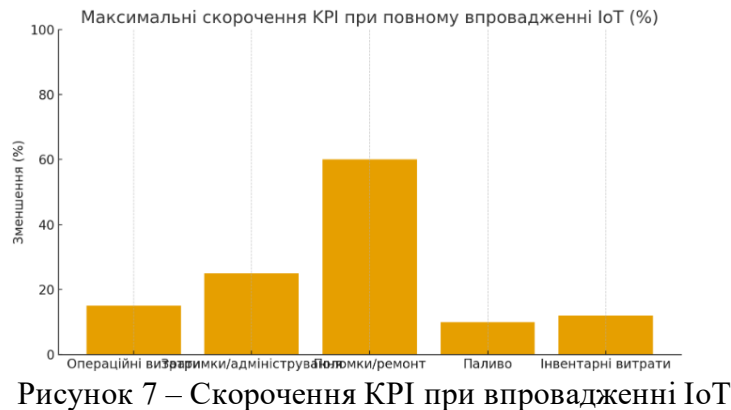
IoT в логістиці працює шляхом підключення пристроїв, датчиків та інших технологій до Інтернету, що полегшує збір та аналіз даних у режимі реального часу. Ці пристрої IoT можуть бути стратегічно розміщені на транспортних засобах, контейнерах та пакунках, забезпечуючи безперервне відстеження та моніторинг вантажів.

Наприклад, датчики IoT можуть контролювати умови навколишнього середовища, такі як температура та вологість, забезпечуючи безпечне транспортування чутливих товарів. Дані, зібрані з цих датчиків, потім аналізуються для отримання інформації про роботу ланцюга поставок. Це дозволяє логістичним компаніям виявляти області, що потребують поліпшення, оптимізувати свої процеси та підвищити загальну ефективність. Використовуючи аналітику даних IoT, логістичні компанії можуть приймати обґрунтовані рішення, що сприяють операційній досконалості.

Інтернет речей (IoT) продовжує розвиватися, приносячи трансформаційні зміни в логістичну галузь. Якщо поглянути в майбутнє, то кілька нових технологій та інновацій, ймовірно, визначатимуть траєкторію розвитку IoT в логістиці:

- 5G та мережі з низькою затримкою – очікується, що впровадження технології 5G значно покращить функціональність IoT в логістиці, забезпечивши швидше та надійніше підключення до Інтернету. Це дозволить ефективніше передавати дані в режимі реального часу;
- доповнена реальність (AR) – AR відіграватиме ключову роль у логістичному секторі, надаючи працівникам інформацію в режимі реального часу під час роботи за допомогою окулярів AR або мобільних пристроїв;
- автономні транспортні засоби та дрони – розвиток IoT сприяє зростанню використання дронів та автономних транспортних засобів для доставки. Ці технології оптимізують процеси доставки, особливо в міських районах, зменшуючи витрати та покращуючи терміни доставки;
- технологія блокчейн – інтеграція блокчейну з IoT може революціонізувати управління даними в логістиці, створивши більш прозорий і безпечний реєстр для транзакцій і відстеження;
- розумні склади – очікується, що IoT буде все частіше використовуватися в розробці розумних складів, які використовують дані з датчиків IoT для автоматизації та оптимізації операцій, від розміщення запасів до управління енергією.

Транспортні технології



Платонінг – це форма скоординованого руху, при якій кілька вантажівок рухаються в колоні з невеликим інтервалом між ними. Завдяки сучасним системам зв'язку та управління (V2V – Vehicle to Vehicle) і технологіям допомоги водієві (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems, AI – Artificial Intelligence, радар і LIDAR – Light Detection and Ranging sensors) транспортні засоби можуть синхронізувати свої рухи в режимі реального часу. Це дозволяє їм підтримувати зменшену відстань між транспортними засобами без шкоди для безпеки.

Основні переваги впровадження:

- ✓ зменшення споживання палива та викидів: коли вантажівки рухаються в щільній колоні, транспортний засіб, що їде попереду, зменшує опір повітря для тих, що їдуть позаду, створюючи ефект «тяги». Дослідження та польові випробування показують, що залежно від довжини та швидкості колони економія палива може досягати 10%;

- ✓ більша логістична ефективність: колона дозволяє більш точно координувати маршрут, мінімізуючи час простою та покращуючи пунктуальність доставки. Крім того, втомлюваність водія зменшується завдяки системам допомоги водієві, які підтримують дистанцію та положення на смузі руху;

- ✓ підвищення безпеки дорожнього руху: Сучасні датчики та системи зв'язку постійно контролюють відстань між вантажівками та навколишнім середовищем. У критичних ситуаціях колона реагує синхронно та надзвичайно швидко – будь-яке гальмування або уповільнення провідної машини миттєво відбивається на наступних, що зменшує ризик ланцюгових зіткнень.

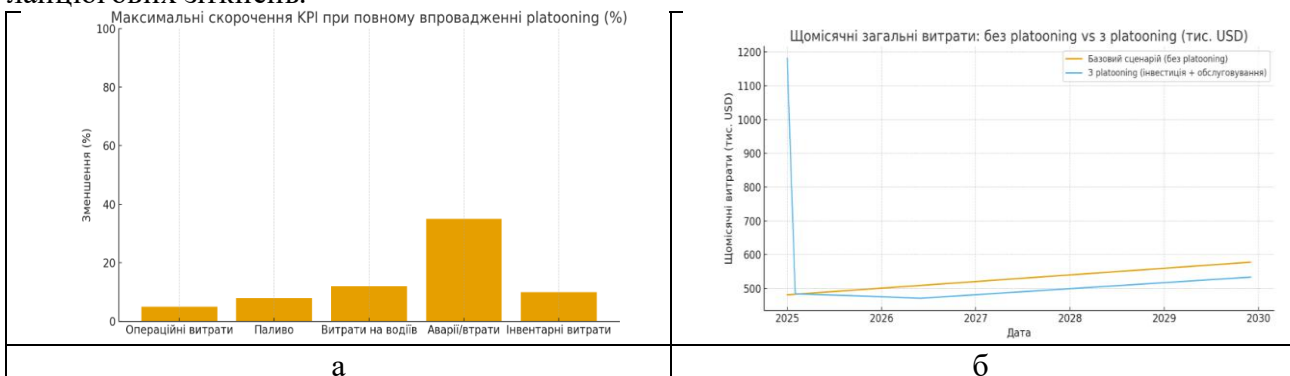


Рисунок 8 – Скорочення KPI при впровадженні платонінгу (а) та витрати при його використанні (б)

Хоча платонінг має великі перспективи, кілька перешкод все ще заважають його широкому впровадженню. Перш за все, це відсутність стандартизованих нормативних актів як на національному, так і на міжнародному рівнях. В Європі все ще точаться дискусії щодо

Транспортні технології

безпечної дистанції між автомобілями, вимог до кваліфікації водіїв та допустимого рівня автоматизації транспортних засобів. Також необхідна надійна цифрова інфраструктура, що базується на високошвидкісному з'єднанні V2V (часто 5G). Дороги повинні забезпечувати надійне покриття, а вантажівки повинні бути оснащені сучасним обладнанням та програмним забезпеченням, що для багатьох операторів може бути дорогим вкладенням.

Ще однією важливою проблемою є кібербезпека. Постійний обмін даними між транспортними засобами вимагає високих стандартів захисту для запобігання фальсифікаціям або кібератакам, які можуть поставити під загрозу безпеку людей і вантажів. Крім того, багато компаній вагаються інвестувати в автопарки, здатні до платонування, через невизначеність щодо реальної окупності інвестицій.

Також в роботі зроблено порівняння цифрових технологій, що розглядаються та наведено на рисунках 9 – 11.



Рисунок 9 – Порівняння щомісячних витрат при впровадженні запропонованих технологій

Кумулятивна економія – це сукупний (накопичений) економічний ефект, який отримується за певний період часу внаслідок впровадження заходів, рішень або технологій. Тобто, це інтегральний показник ефективності, що характеризує накопичений обсяг зниження витрат або зростання прибутку за період експлуатації інноваційного або організаційно-технічного рішення.

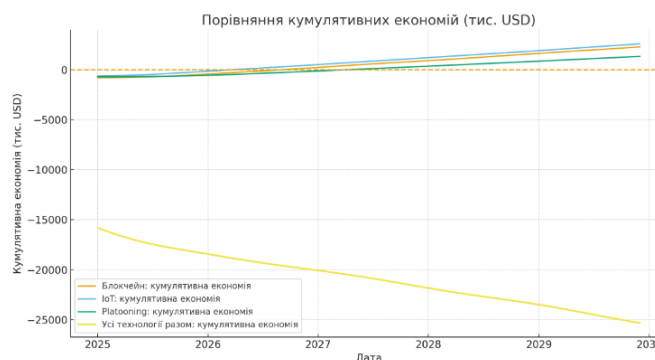


Рисунок 10 – Порівняння сукупного економічного ефекту при впровадженні запропонованих технологій

ROI (Return on Investment) цифрових технологій у логістиці та міжнародних автомобільних перевезеннях — це узагальнений показник економічної ефективності, що відображає співвідношення сукупного (кумулятивного) економічного ефекту, отриманого внаслідок впровадження IoT, блокчейн-технологій та платонінгу, до обсягу інвестицій у

Транспортні технології

цифрову інфраструктуру, програмне забезпечення та модернізацію рухомого складу за певний період експлуатації.

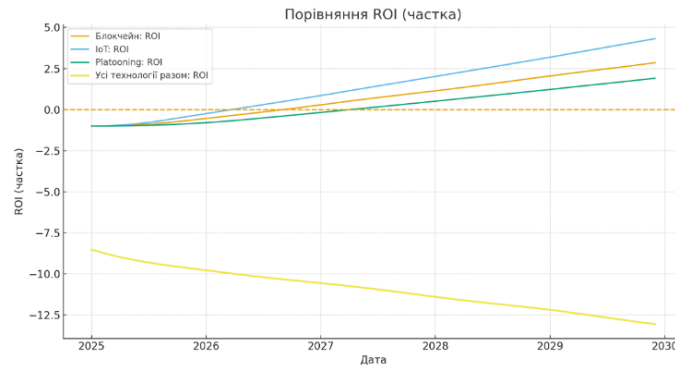


Рисунок 11 – Співвідношення сукупного (кумулятивного) економічного ефекту, отриманого внаслідок впровадження розглянутих технологій

Сучасні умови функціонування міжнародних автомобільних перевезень характеризуються зростанням складності логістичних ланцюгів, обсягів інформаційних потоків та вимог до ефективності, безпеки й прозорості транспортних процесів. Традиційні методи управління дедалі частіше виявляються недостатніми для оперативного прийняття рішень і координації взаємодії учасників міжнародних перевезень.

Активне впровадження цифрових технологій, зокрема блокчейну, Інтернету речей (IoT), інтелектуальних систем управління та технології платонінгу, створює значний потенціал підвищення ефективності автомобільного транспорту в міжнародному сполученні. Водночас їх використання має фрагментарний характер, супроводжується значними інвестиційними витратами, проблемами інформаційної та кібербезпеки, інтеграції інформаційних систем і нормативно-правового забезпечення.

ВИСНОВКИ

Сучасні цифрові технології, зокрема блокчейн, IoT, інтелектуальні системи управління та платонінг, здатні значно підвищити ефективність, безпеку та прозорість міжнародних автомобільних перевезень. Блокчейн забезпечує прозорість і надійність даних, IoT дозволяє моніторинг у реальному часі, а платонінг і інтелектуальні системи — оптимізацію маршрутів та зменшення витрат палива. Водночас фрагментарне впровадження технологій, високі інвестиційні витрати та відсутність стандартів обмежують їх ефективність. Комплексне інтегроване застосування цифрових рішень потребує системного підходу, оцінки економічної доцільності та нормативного забезпечення. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методичних підходів до інтегрованого впровадження цифрових технологій, оцінку їх впливу на ключові показники ефективності та економічну доцільність у міжнародних перевезеннях.

Список використаних джерел

1. Никифоров О. І., Стасюк О. М., Чмирьова Л. Ю., Федяй Н. О. Цифровізація в транспортному секторі: тенденції та індикатори розвитку. Частина 2 // Статистика України. 2019. № 4. С. 48–64. Doi: 10.31767/su. 4(87)2019.04.06.

2. Рибчук А. В., Пазюк Р. І., Ю. М. Пантук Ю. М. Цифрова трансформація транспортних систем в інформаційній економіці // Інвестиції: практика та досвід. Економічна наука. 2024. № 6. С. 51–57. DOI: 10.32702/2306-6814.2024.6.51.

3. Сумець, О. (2024). Інформаційно-цифрові технології забезпечення автоматизації транспортно-логістичних процесів обслуговування торгових точок. *Journal of Innovations and Sustainability*, 8(1), 06. <https://doi.org/10.51599/is.2024.08.01.06>.

4. Головіна Олена. Сучасні технології в управлінні транспортною логістикою. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. Vol. 2, No. 3, 2023, pp. 35-42. doi: 10.46299/j.isjmf.20230203.04.

Procyk O. P., Khmelyov I. V., Butenko G. M., Danevsky M. O., Krasulin A. S.

MODERN DIGITAL TECHNOLOGIES FOR MANAGEMENT OF TRANSPORT PROCESSES OF ROAD TRANSPORT IN INTERNATIONAL CONNECTION

The paper examines modern digital technologies for management of transport processes of road transport in international communication as one of the key factors for increasing the efficiency, reliability and safety of transportation in the context of globalization and digital transformation of the transport industry. The relevance of the study is due to the growth in the volume of international road transportation, the complexity of logistics supply chains, increased requirements for the quality of transport services and the need for prompt decision-making in the context of uncertainty in the external environment. The main directions of digitalization of transport process management were also analyzed, in particular the use of transport information systems (TMS), telematics and satellite navigation systems, big data technologies (Big Data), cloud services, digital platforms for coordination of carriers and cargo owners, as well as elements of artificial intelligence for forecasting, route optimization and risk management in international road transportation. Particular attention was paid to the integration of digital technologies into the processes of planning, dispatching, monitoring and control of transportation performance, taking into account the requirements of international legislation and standards.

The main advantages of implementing digital technologies were identified, including reducing rolling stock downtime, reducing transportation costs, increasing the transparency of transport processes, improving the quality of logistics services and reducing the influence of the human factor on managerial decision-making. At the same time, problematic aspects of digitalization related to information security, compatibility of information systems, personnel training and the need to adapt the organizational and management structures of transport enterprises were outlined.

The scientific novelty of the research lies in the comprehensive approach to the generalization and structuring of modern digital technologies for managing transport processes in international road transport from the standpoint of the systemic efficiency of transport and technological solutions. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of their use in the development and implementation of digital solutions in the activities of road transport enterprises, as well as in the educational process during the training of specialists in transport technologies and logistics.

Keywords: Road transport, international transportation, transport processes, digital technologies, management, transport information systems, Blockchain, Internet of Things, platooning, AI, smart contracts.

Стаття надійшла 12.11.2025

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ СПУСКУ І ПІДЙОМАХ

Стаття присвячена актуальним проблемам вдосконалення двигунів внутрішнього згоряння на основі аналітичних розрахунків у сучасних умовах зростання вимог до їх ефективності, екологічності та надійності. Попри активний розвиток електромобільності та альтернативних джерел енергії, двигуни внутрішнього згоряння продовжують відігравати провідну роль у транспортній галузі, що зумовлює необхідність їх подальшого вдосконалення. Основну увагу приділено аналізу причин низького ККД сучасних двигунів, серед яких теплові втрати, механічне тертя та неповне згоряння палива, а також екологічним аспектам їх роботи. Показано, що двигуни внутрішнього згоряння є значним джерелом токсичних викидів — NO_x , CO , вуглеводнів, альдегідів та твердих частинок, які становлять небезпеку для здоров'я людини та довкілля. Проаналізовано сучасні наукові підходи до підвищення ефективності та екологічної безпеки двигунів внутрішнього згоряння, включаючи цифрову діагностику, використання вейвлет-аналізу, створення цифрових двійників, а також розвиток багатотактних і гібридних силових установок. Наведено порівняльні норми викидів для дизельних двигунів відповідно до різних стандартів Євро, що демонструють поступове посилення екологічних вимог. Основна увага приділена підвищенню енергетичної ефективності, зниженню шкідливих викидів та аналізу руху транспортних засобів при різних умовах експлуатації. Основним напрямком дослідження є аналіз роботи двигуна при русі транспортного засобу з гори та під гору. Показано, що аналіз руху транспортного засобу під ухилом і на підйом дає можливість краще усвідомити його динаміку в різних умовах, оптимізувати роботу та підвищити загальну ефективність. Отримані результати можуть бути корисними для створення нових моделей транспортних засобів, удосконалення й модернізації вже наявних конструкцій, а також для підготовки операторів.

Ключові слова: Двигун внутрішнього згоряння, ефективність, економічність, аналітичні розрахунки, зниження шкідливих викидів.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток автомобільної промисловості та транспорту супроводжується зростанням вимог до ефективності, екологічності та надійності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Незважаючи на активний розвиток альтернативних джерел енергії, таких як електромобілі та водневі паливні елементи, ДВЗ продовжують залишатися основним джерелом енергії для транспортних засобів. Однак їх експлуатація супроводжується низкою проблем, пов'язаних із енергетичною ефективністю, екологічним впливом та технічним станом. Це обумовлює необхідність постійного вдосконалення конструкції, робочих процесів та методів діагностики ДВЗ [1].

Однією з ключових проблем сучасних ДВЗ є низький коефіцієнт корисної дії (ККД), який обмежений термодинамічними законами. Значна частина енергії, що виділяється при згорянні палива, втрачається через теплові втрати, механічне тертя та неповне згоряння палива [2]. Це призводить до зниження економічності двигунів та збільшення витрат на паливо. Крім того, ДВЗ є основним джерелом шкідливих викидів, таких як оксиди азоту (NO_x), вуглекислий газ (CO_2), вуглеводні (СН) та тверді частинки (сажа) [3]. Ці викиди негативно впливають на навколишнє середовище та здоров'я людей, що обумовлює необхідність розробки нових методів зниження токсичності вихлопних газів.

Іншою важливою проблемою є забезпечення надійності та довговічності ДВЗ. З часом технічний стан двигунів погіршується через знос деталей, накопичення відкладень у системах

живлення та згоряння, а також через неправильну експлуатацію. Це призводить до зниження продуктивності, збільшення витрат на обслуговування та ризику раптових відмов [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні методи діагностики, такі як візуальний огляд та вимірювання основних параметрів, часто є недостатньо точними та не дозволяють виявити проблеми на ранніх стадіях. Тому актуальним є розробка нових методів діагностики, зокрема з використанням цифрових технологій, таких як цифрові двійники та вейвлет-аналіз [4, 6]. Сучасні дослідження спрямовані на розробку нових конструкцій ДВЗ, таких як п'яти- та шеститактні двигуни, які мають потенціал для підвищення ефективності за рахунок додаткових тактів роботи [7-9]. Також активно розвиваються гібридні технології, де ДВЗ працює в парі з електродвигуном, що дозволяє знизити викиди та підвищити паливну економічність [10]. Однак впровадження таких технологій вимагає значних інвестицій та додаткових досліджень для оптимізації їх роботи.

Важливим аспектом є оптимізація теплового балансу ДВЗ, який визначає розподіл енергії між корисними роботами та втратами. Значна частина теплоти втрачається через вихлопні гази, охолодження та механічне тертя [2]. Для підвищення ефективності необхідно розробляти нові методи рекуперації тепла, такі як використання термоелектричних генераторів або систем рекуперації енергії з вихлопних газів [3]. Крім того, важливим є впровадження легких матеріалів, таких як алюміній та композити, що дозволяє знизити масу двигуна та покращити його енергоефективність. Зростання обсягів автомобілізації призводить до збільшення викидів шкідливих речовин, що становить серйозну загрозу для навколишнього середовища. Згідно з сучасними стандартами, такими як Євро-6, вимоги до екологічності ДВЗ постійно зростають [3]. Це вимагає розробки нових методів очищення вихлопних газів, таких як каталітичні нейтралізатори, сажові фільтри та системи селективного каталітичного відновлення (SCR). Однак їх впровадження супроводжується збільшенням вартості двигунів та складністю їх обслуговування. Окрім викидів, ДВЗ є джерелом шумового забруднення, яке негативно впливає на здоров'я людей та комфорт у міських умовах. Рівень шуму двигунів залежить від їх конструкції, режимів роботи та стану [3]. Для зниження шуму необхідно впроваджувати нові методи звукоізоляції, такі як використання спеціальних матеріалів та конструкцій глушників.

Досягнення науки і техніки ХХІ століття значно розширили можливості людини впливати на навколишнє середовище. Інтенсивний розвиток автомобілізації у всьому світі спричинив значне забруднення повітря вихлопними газами, особливо небезпечне в міських і промислових районах, а також уздовж транспортних магістралей. Це стало причиною виникнення нової науки – екології. Автомобільні поршневі двигуни внутрішнього згоряння порушують екологічну рівновагу в природі через викиди шкідливих речовин та акустичне випромінювання (шум) під час роботи. Основні складові викидів: вихлопні гази (ВГ), що містять продукти згоряння пального, картерні гази та паливні випаровування. При цьому 95...99 % шкідливих викидів сучасних автомобільних двигунів припадає на ВГ. Загалом у складі ВГ виявлено понад 280 компонентів. До групи нетоксичних речовин належать азот, кисень, водень, водяна пара, вуглекислий газ. Токсичними називають речовини, що негативно впливають на організм людини та навколишнє середовище. До групи токсичних речовин входять: оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO_x), вуглеводні (C_nH_m), альдегіди (R•CHO), сажа, діоксид сірки (SO₂), сірководень (H₂S), токсичні сполуки свинцю, канцерогенні вуглеводні (наприклад, бензапірен, як один із найактивніших). Оксид вуглецю (CO, чадний газ) – прозорий, без запаху, легший за повітря, нерозчинний у воді. Його поглинальна здатність у 240 разів вища, ніж у кисню. Вступаючи в реакцію з гемоглобіном крові, CO блокує його здатність транспортувати кисень, що може призвести до смертельного отруєння. Оксиди азоту (NO, NO₂) – газ червоно-бурого кольору, добре розчиняється у воді з утворенням кислот. Небезпека впливу оксидів азоту полягає в тому, що отруєння організму проявляється

поступово, і специфічних засобів нейтралізації не існує. Сажа – тверді частинки вуглецевих сполук із вмістом чистого вуглецю до 99 %. Вона є механічним забруднювачем легень людини, але ще небезпечніша як адсорбент канцерогенних речовин (наприклад, бензапірену), що може спричинити рак легень. Альдегіди ($R \cdot CHO$) мають різкий неприємний запах, уражають печінку, нирки, слизові оболонки. Особливо небезпечні вони у викидах транспорту в підземних виробках. З метою обмеження негативного впливу автомобільних викидів на навколишнє середовище національні стандарти регламентують їх гранично допустимі концентрації (ГДК) у робочій зоні та атмосфері, а також допустимі масові викиди. Технології та вимоги до екологічної безпеки постійно розвиваються, і старі стандарти як наприклад ГОСТ Р 51206–98 перестають відповідати сучасним реаліям. Таким чином, основним завданням сучасних досліджень у галузі ДВЗ є підвищення їх ефективності, зниження екологічного впливу та забезпечення надійності. Для цього необхідно розробляти нові методи діагностики, оптимізувати тепловий баланс, впроваджувати інноваційні конструкції та технології, а також забезпечувати дотримання сучасних екологічних стандартів. Вирішення цих проблем дозволить не лише покращити експлуатаційні характеристики ДВЗ, але й забезпечити їх конкурентоспроможність в умовах переходу до альтернативних джерел енергії.

Викиди для автомобільних дизелів, показані в таблиці 1. Дані для стандарту Євро VII наразі ще остаточно не встановлені, оскільки цей стандарт перебуває на стадії розробки. Зверніть увагу, що з кожним новим стандартом Євро вимоги до викидів шкідливих речовин стають суворішими, що сприяє зменшенню негативного впливу автомобілів на довкілля. Норми димності відпрацьованих газів для автомобільних дизелів встановлюються стандартом. Димність відпрацьованих газів вимірюють на режимах зовнішньої швидкісної характеристики двигуна та на режимі вільного прискорення. Проблема зниження токсичності та димності ВГ ускладнюється тим, що зазвичай необхідно зменшити викид кількох токсичних компонентів. Однак багато методів, що знижують викид продуктів неповного згоряння вуглецю, пов'язані з інтенсифікацією процесу згоряння, що спричиняє збільшення концентрації NO_x . Реалізація низки способів зменшення викидів NO_x призводить до погіршення паливної економічності двигуна.

Таблиця 1 – Нормування шкідливих викидів автомобілів із дизельними двигунами
[**Ошибка! Закладка не определена.**]

Норми токсичності	Викиди, г/(кВт • год) (визначено по 13ступінчастому циклу)			
	NO_x	CO	CH	Частинки
Євро I	8,0	4,5	1,1	0,34
Євро II	7,0	4,0	1,1	0,15
Євро III	5,0	2,1	0,66	0,10
Євро IV	3,5	1,5	0,46	0,02
Євро V	2,0	1,5	0,46	0,02
Євро VI	0,4	1,5	0,13	0,01
Євро VII	0,23	1,5	0,13	0,01

Мета статті полягає у дослідженні і аналізі роботи двигуна при русі транспортного засобу з гори та під гору.

Основний матеріал дослідження. Останнім часом, коли дизельні та бензинові палива сильно піднялися в ціні, а це істотно впливає на вартість вирощеної продукції або матеріалу, що перевозиться, транспортні та сільськогосподарські підприємства почали дуже сильно економити паливо, мастильні матеріали та моторесурс сільськогосподарської техніки. Другий закон Ньютона, який свідчить, що:

Транспортні технології

$$F = ma \quad (1),$$

де F – сила, МПа;

m — маса динамічного транспортного засобу із заправкою та водієм, кг;

a – прискорення під час руху, м/с^2 .

F , m , a залежить від швидкості руху V , тобто. $F(V)$, $m(V)$, $a(V)$.

Для переходу до диференціального рівняння руху транспортного засобу (по полю – трактор, по дорозі – автомобіль), необхідно врахувати всі основні сили, що діють на транспортний засіб, такі як сила тяги $F_{\text{тяги}}$, сила опору руху $F_{\text{оп}}$, сила тертя та інші можливі фактори.

$$F = F_{\text{тяги}} - F_{\text{оп}} = ma \quad (2)$$

$$F_{\text{оп}} = kV,$$

$$a = \frac{dV}{dt}.$$

де k – коефіцієнт опору, параметр залежить від умов руху (типу ґрунту, опору коченню тощо), кг/с ;

t – час, с;

V – швидкість, м/с .

Розглянемо спрощену модель руху транспортного засобу. Відповідно до наших припущень рівняння (1), тоді рівняння в диференціальній формі набуде вигляду:

$$F_{\text{тяги}} = kV + m \frac{dV}{dt}; V(0) = 0. \quad (2')$$

Отриману задачу Коші (2') можна вирішувати аналітично, використовуючи інтегрування та вирішуючи просте лінійне диференціальне рівняння 1-го порядку.

Сили опору коченню та аеродинамічний опір при невеликій швидкості трактора незначні тому ними можна знехтувати.

Тоді загальне рішення неоднорідного рівняння запишеться як

$$V(t) = e^{-\int \frac{k}{m} dt} \cdot \left[\int \frac{F_{\text{тяги}}}{m} e^{\int \frac{k}{m} dt} dt + C \right]. \quad (3)$$

Розкриємо інтеграли

$$\begin{aligned} e^{-\int \frac{k}{m} dt} &= e^{-\frac{k}{m} \int dt} = e^{-\frac{k}{m} t}; \\ \int \frac{F_{\text{тяги}}}{m} e^{\int \frac{k}{m} dt} dt &= \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\int \frac{k}{m} dt} dt = \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\frac{k}{m} t} dt = \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \int e^{\frac{k}{m} t} d\left(\frac{k}{m} t\right) \left(\frac{m}{k}\right) = \\ &= \frac{F_{\text{тяги}}}{m} \left(\frac{m}{k}\right) \int e^{\frac{k}{m} t} d\left(\frac{k}{m} t\right) = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m} t} + C. \end{aligned}$$

Тоді загальне рішення диференціального рівняння руху набуває вигляду:

$$V(t) = e^{-\frac{k}{m} t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m} t} + C \right].$$

Задовольняючи початкові умови отримаємо приватне рішення завдання Коші, тобто. математичну модель руху транспортного засобу – автомобіля чи трактора. Підставимо до рішення (3) початкову умову $V(0) = 0$, тобто

$$0 = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m}t} + C \right] = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} + C \text{ звідки } C = -\frac{F_{\text{тяги}}}{k}.$$

Тоді приватне рішення нашого математичного завдання набуде вигляду

$$V(t) = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \left[\frac{F_{\text{тяги}}}{k} e^{\frac{k}{m}t} - \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \right] = e^{-\frac{k}{m}t} \cdot \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right].$$

Остаточне вирішення завдання Коші набуде вигляду

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}}}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right]. \quad (4)$$

Тобто, швидкість руху транспортного засобу залежить від часу t , опору ґрунту k і тяги транспортного засобу. Дане рівняння описує рух транспортного засобу рівною стандартною поверхнею поля або дороги.

Якщо трактор рухається по пухкому полю, тоді ми підбираємо коефіцієнт опору $k_{\text{п}}$. та отримуємо залежність:

$$V_{\text{п}}(t) = \frac{F_{\text{тяги п.}}}{k_{\text{п}}} \cdot e^{-\frac{k_{\text{п}}}{m}t} \left[e^{\frac{k_{\text{п}}}{m}t} - 1 \right]. \quad (4')$$

При русі трактора по пухкому ґрунту збільшується сила опору руху до $k_{\text{п}}$, сила тяги може зменшуватися через пробуксовування провідних коліс. Якщо $k_{\text{п}} > k$, то збільшується коефіцієнт опору для пухкого ґрунту, якщо навпаки $k_{\text{п}} < k$ зменшується коефіцієнт опору для пухкого ґрунту, тим самим зменшується навантаження на тягу. Зміниться і швидкість руху. Крім руху транспортного засобу по пухкому ґрунту велике значення відіграє навантаження на двигун при русі транспортного засобу на підйом (у гору) та аналогічно рух під ухил (з гори).

Під час руху транспортного засобу з гори та у гору виникає сила гравітації, яка дорівнює

$$F_g = \pm m g \sin\theta,$$

де $\pm$ – вказує на те, що транспортний засіб рухається з гори (+) та (–) – у гору.

Тоді рівняння руху (4) при русі з гори набуває вигляду:

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}} + m \cdot g \cdot \sin\theta}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right], \quad (5)$$

а при русі під гірку набуде наступного вигляду:

$$V(t) = \frac{F_{\text{тяги}} - m \cdot g \cdot \sin\theta}{k} \cdot e^{-\frac{k}{m}t} \left[e^{\frac{k}{m}t} - 1 \right]. \quad (6)$$

Отримані рівняння (5), (6) описують рух транспортних засобів з гори та під гору. Рух транспортних засобів з гори та під гору відрізнятиметься на певну величину від руху транспортного засобу горизонтальною площиною (рис. 1). Знаючи основні параметри транспортного засобу, їх можна використовувати до прив'язки до трактора МТЗ-80, де $m = 4000$ кг, включаючи паливо, оператора та обладнання; $k = 100$ кг/с; $F_{\text{тяги}}$ – максимальна сила тяги на гаку становить приблизно 14кН.

Транспортні технології

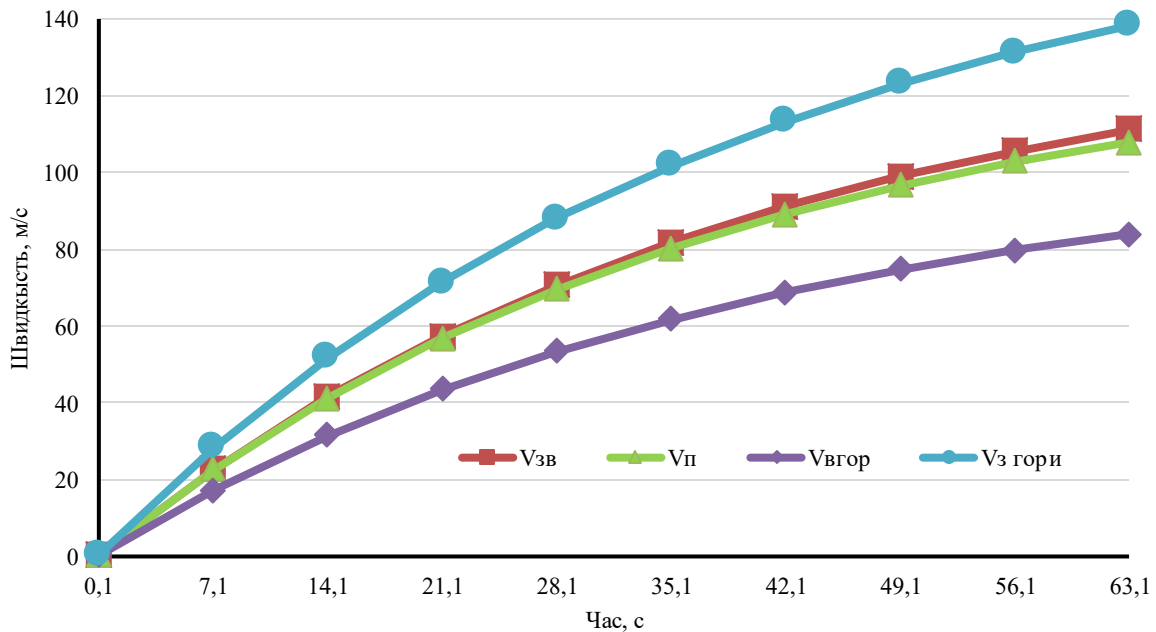


Рисунок 1 – Характер зміни швидкості під час руху транспортного засобу з гори і в гору

Як видно з рисунку 1 при однакових витратах пального під час руху транспортного засобу з гори швидкість до 1,3 рази більша ніж при русі по пухкому ґрунту та 1,7 більша ніж при русі в гору.

ВИСНОВКИ

Аналіз руху транспортного засобу з гори та в гору дозволяє глибше зрозуміти динаміку руху транспортного засобу у різних умовах, оптимізувати роботу транспортного засобу та підвищити його ефективність. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових моделей транспортних засобів, покращення та модернізації існуючих конструкцій та навчання операторів.

Список використаних джерел

1. Артюх О. Методи вдосконалення ДВЗ на основі аналітичних розрахунків та експериментальних даних / О. Артюх, Ольга Дударенко, Дмитро Рубан, Олександр Тарасенко, Павло Цокотун // Наука і техніка сьогодні № 3(44) (2025): С. 947-975. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3\(44\)-947-975](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-3(44)-947-975)
2. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у 6 т. Т. 1 : Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин : підручник / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов ; ред.: А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. – Харків : Прапор, 2004. – 384 с.
3. Conklin J.C. A highly efficient six stroke internal combustion engine cycle with water injection for in-cylinder exhaust heat recovery / J.C. Conklin, J.P. Szybist // Energy, 2010. - vol. 35, no. 4, pp. 1658–1664. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.12.012>
4. Мінчев Д. С. Методи діагностики технічного стану двигунів внутрішнього згоряння з використанням цифрових двійників [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра техн. наук : спец.

05.05.03 : галузь знань 14 / Дмитро Степанович Мінчев ; Одес. нац. морськ. ун-т ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Одеса, 2023. – 385 с. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/5aa34bae-0971-48d6-9f0f-b6db1f00d5cc>

5. Анісімов В.Ф. Випробування автотракторних дизельних двигунів внутрішнього згорання / В.Ф. Анісімов, А.А. П'ясецький. – Вінниця: РВВ ВНАУ, 2010. - 41 с.

6. Тиманюк К. С. Розробка методики експрес-діагностики двигунів внутрішнього згорання на основі вейвлет-аналізу / К. С. Тиманюк, В. Л. Костенко, А. А. Николенько, А. М. Тепличук, Д. О. Адаменко // Technology Audit and Production Reserves, 2016. - 4(3(30)), 47–52. – DOI: 10.15587/2312-8372.2016.75842

7. Newman, L.G. Five stroke internal combustion engine, U.S. Pat. 6,776,144. 2004

8. Schmitz, G. Five-stroke internal combustion engine, U.S. Pat. 6,553,977. 2003

9. Makheeja, D. A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine / D. Makheeja // Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2015. - vol. 12, no. 4, pp. 7–11.

10. Osborne R. The 2/4 sight project – development of a multi-cylinder two-stroke/four-stroke switching gasoline engine / R. Osborne, J. Stokes, D. Ceccarini, N. Jackson, T. Lake, M. Joyce, S. Visser, N. Miche, S. Begg, M. Heikal, N. Kalkan, H. Zhao, T. Ma // Proceedings JSAE Annual Congress, 2008. - no. 79-08, pp. 11–16.

Tsokotun P.V., Kapustian O.Ye.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF VEHICLE MOTION DURING DESCENTS AND CLIMBS

The article is devoted to the current problems of improving internal combustion engines based on analytical calculations in modern conditions of increasing requirements for their efficiency, environmental friendliness and reliability. Despite the active development of electromobility and alternative energy sources, internal combustion engines continue to play a leading role in the transport industry, which necessitates their further improvement. The main attention is paid to the analysis of the reasons for the low efficiency of modern engines, including heat losses, mechanical friction and incomplete combustion of fuel, as well as to the environmental aspects of their operation. It is shown that internal combustion engines are a significant source of toxic emissions - NO_x, CO, hydrocarbons, aldehydes and particulate matter, which pose a danger to human health and the environment. Modern scientific approaches to improving the efficiency and environmental safety of internal combustion engines are analyzed, including digital diagnostics, the use of wavelet analysis, the creation of digital twins, as well as the development of multi-stroke and hybrid power plants. Comparative emission standards for diesel engines according to various Euro standards are presented, demonstrating the gradual strengthening of environmental requirements. The main attention is paid to increasing energy efficiency, reducing harmful emissions, and analyzing the movement of vehicles under various operating conditions. The main direction of the research is the analysis of engine operation when a vehicle is moving uphill and downhill. It is shown that the analysis of vehicle movement on a slope and uphill makes it possible to better understand its dynamics in different conditions, optimize operation, and increase overall efficiency. The results obtained can be useful for creating new vehicle models, improving and modernizing existing designs, and also for training operators.

Keywords: Internal combustion engine, efficiency, economy, analytical calculations, reduction of harmful emissions.

Стаття надійшла 10.12.2025р.

КЛІЄНТООРІЄНТОВАНІСТЬ В ТРАНСПОРТНО-ЕКСПЕДИТОРСЬКІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

У роботі визначено поняття клієнтоорієнтованості, як інструменту формування лояльності споживачів; конкурентних переваг, що спрямовані на отримання стійкого прибутку в довготривалій перспективі, а також розглянуто елементи клієнтоорієнтованості компанії. У дослідженні також виокремлено вигоди, котрі отримує і споживач, і компанія від клієнтоорієнтованого підходу. Визначена необхідність впровадження в діяльність компанії концепції індивідуалізації клієнта, тобто пропонування йому товарів та послуг, що будуть відповідати його потребам, надавання відповідного індивідуального сервісу та обслуговування тощо. Проаналізований процес побудови клієнтоорієнтованої компанії через упровадження клієнтоорієнтованої бізнес-стратегії. Цей процес складається з відповідних етапів, де враховано важливість та актуальність CRM-системи, що передбачає технологізацію цього процесу та відображає управлінську модель клієнтоорієнтованості. Визначено, що високий рівень клієнтоорієнтованості проявляється в ефективному обслуговуванні клієнтів і є стратегічною конкурентною перевагою компанії. При аналізі виявлено, що в сучасних ринкових умовах клієнти за визначеними ними критеріями, такими як: швидкість доставки вантажів, безпека, мінімальні витрати тощо, бажають отримати якісну транспортно-експедиторську послугу. Визначено інтегрований показник, який враховує кілька критеріїв. Для задоволення потреб клієнтів доцільно застосовувати такі альтернативні методи організації МАППВ: термінальний по заводу і розвозу, термінальний по заводу, термінальний по розвозу, термінально-розвізний, збірно-термінальний, збірно-розвізний, збірний, розвізний, наскрізний. Зроблено висновок, що саме орієнтованість на клієнта і його лояльність є основою успіху, підвищення конкурентоспроможності, а також отримання прибутків.

Ключові слова: Клієнтоорієнтованість, транспортно-експедиторська діяльність, підхід, бізнес-стратегія, споживач, технологізація, CRM-система, клієнтоорієнтований метод організації міжнародних автомобільних перевезень вантажів.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення сучасним підприємствам для досягнення довготривалого ринкового успіху і перемоги у конкурентній боротьбі недостатньо використовувати досвід та ресурси своїх ділових партнерів та постачальників. Доведено, що ринкового успіху досягають лише ті з підприємств, які у своїй діяльності максимально орієнтуються на вивчення та використання споживацького досвіду.

Для отримання стійкого прибутку та для того, щоб бути успішним у довгостроковому періоді, сучасні українські компанії повинні використовувати клієнтоорієнтований підхід до своєї діяльності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливостям формування клієнтоорієнтованої компанії приділяли значну увагу С. Апелбаум, М. Бітнер, Н. Вудкок, П. Гембл, Р. Гласер, Р. Голубовський, В. Зейтамль, Р. Йен, Д. Лінг, С. Лосєв, І. Манн, А. Парватіяр, Д. Пеппер, Б. Пратт, Е. Рейчелд, М. Роджерс, Н. Рябоконт, М. Стоун, Л. Стрій, К. Харський, Д. Шет та ін.

Однак ця сфера є дуже динамічною, відбувається постійний розвиток клієнтоорієнтованого підходу, у тому числі й на основі сучасних інформаційних технологій, тому необхідним є дослідження методичних рекомендацій та практичних інструментів для

побудови максимально ефективних клієнтоорієнтованих компаній, в т.ч. і в транспортно-експедиторській діяльності.

Мета дослідження. Метою роботи є створення системи ефективного обслуговування клієнтів (висока клієнтоорієнтованість) в компанії, яка дозволить підвищити конкурентоспроможність, лояльність клієнтів, імідж компанії та прибуток за рахунок збільшення продажів і припливу клієнтів.

Основний матеріал дослідження. Клієнтоорієнтованість — це підхід, який використовують, щоб задовольняти потреби та очікування клієнтів, надавати їм якісні послуги та продукти й будувати довгострокові відносини зі споживачами. Це цілеспрямовані та структуровані бізнес-процеси з фокусом на клієнта.

Цей підхід може застосовуватися в усіх сферах бізнесу та вимагає спільних зусиль від усіх працівників компанії, оскільки клієнтоорієнтованість є цілою філософією в культурі та процесах організації.

Переваги від клієнтоорієнтованості:

- підвищення рівня задоволеності клієнтів;
- покращена лояльність клієнтів;
- конкурентна перевага;
- формування репутації бренду;
- зменшення ризиків.

Тож, успішний клієнтський досвід — ключ до прибутків бізнесу.

Виходячи із цього, клієнтоорієнтованість слід визначати як знаряддя партнерських взаємовідносин компанії та цільових споживачів для задоволення їхніх потреб, що спрямоване на одержання постійного довготривалого прибутку через певні ключові компетенції компанії.

Споживачі стають вимогливішими до компаній та продуктів. І при неналежному обслуговуванні однієї організації можуть легко обрати іншу. Тому визначення справжніх потреб і вподобань клієнтів є одним з головних елементів клієнтоорієнтованості. Не варто спиратися на власні припущення та гіпотези. Сьогодні бізнес має доступ до інструментів аналізу великих даних, які дозволяють зрозуміти, чого потребує аудиторія.

Елементи, що формують клієнтоорієнтованість компанії, у своєму сутнісному взаємозв'язку відображено на рис. 1.



Рисунок 1 – Взаємозв'язок елементів, що включаються у механізм клієнтоорієнтованості компанії [1]

Як видно з рис. 1, взаємозв'язок між внутрішнім і зовнішнім середовищем компанії формується за рахунок механізмів клієнтоорієнтованості, і чим ефективніше будуть налагоджені комунікації та партнерство, тим продуктивнішими будуть взаємини.

Компанія повинна формувати свою клієнтоорієнтовану стратегію, тобто використовувати клієнта, його запити і потреби як ядро, навколо якого формуються зусилля (бізнес-процеси) компанії в усіх сферах її діяльності. Налагоджування тривалих позитивних відносин із клієнтом дає відчутний прибуток фірмі та утримання наявних клієнтів, що є найважливішим чинником забезпечення конкурентних переваг компанії.

Клієнтоорієнтований підхід передбачає три основні позиції:

- глибоке розуміння потреб клієнтів;
- ефективне задоволення потреб клієнтів;
- отримання компанією додаткового прибутку за рахунок перших двох позицій.

Додатковий прибуток виникає за рахунок продажу додаткових товарів і послуг клієнтам компанії. Наслідками переходу до клієнтоорієнтованості є висока оцінка клієнтом політики і тактики компанії та формування відповідного позитивного, клієнтоорієнтованого іміджу компанії.

Можна виокремити три категорії вигід клієнтоорієнтованого підходу для самих клієнтів, а саме:

- психологічні – тісне спілкування з компанією;
- соціальні – дружні відносини з персоналом;
- економічні – отримання знижок, різноманітних бонусів, індивідуального сервісу і товару, який пристосований під конкретного споживача.

Для того, щоб перетворити потенційного споживача на реального та постійного, не дати йому можливості перейти до конкурентів, необхідно впроваджувати в діяльність компанії концепцію індивідуалізації клієнта, тобто пропонувати йому товари та послуги, що будуть відповідати його потребам, надавати відповідний індивідуальний сервіс та обслуговування тощо.

Слід виокремити також вигоди клієнтоорієнтованого підходу і для компаній, окрім отримання конкурентних переваг, додаткового прибутку та успішності на ринку. Встановлення довгострокових довірчих відносин із клієнтами дає змогу знизити транзакційні витрати ринкових угод: пошуку інформації, укладання контрактів, вимірювання якості товару, захисту прав власності, захисту від демпінгу та агресивної поведінки фірм і покупців.

Розроблення, виробництво та продаж (доставка товарів чи послуг до кінцевих споживачів) повинні поєднуватися в єдиний бізнес-процес, націлений на задоволення конкретних визначених потреб споживачів. Формування клієнтоорієнтованої компанії передбачає реорганізацію не тільки її маркетингової концепції, а й управлінської моделі компанії у цілому.

Необхідні етапи побудови клієнтоорієнтованої компанії, що повинні базуватися на виділенні та реалізації основних елементів клієнтоорієнтованості представлені на рис. 2.

На першому етапі побудови клієнтоорієнтованості компанія повинна зрозуміти, хто є її ключовими (цільовими) клієнтами, якими критеріями вони її будуть оцінювати, і всі свої рішення орієнтувати на ці критерії.

Другий етап даного процесу передбачає наймання на роботу таких співробітників, які поділяють цінності та цілі компанії. Слід розробити певні критерії відбору працівників, які відповідатимуть корпоративній культурі компанії, орієнтованій на клієнта. Для відбору працівників можна використовувати різноманітні тести, анкети, інтерв'ю. Домогтися підвищення якості обслуговування споживачів можна тільки тоді, коли персонал побачить і чітко зрозуміє наявний взаємозв'язок між власними інтересами і орієнтованістю компанії на

кожного клієнта. Крім того, співробітники повинні вміти демонструвати і проявляти свою орієнтованість на клієнта так, щоб клієнт це міг помітити й оцінити.

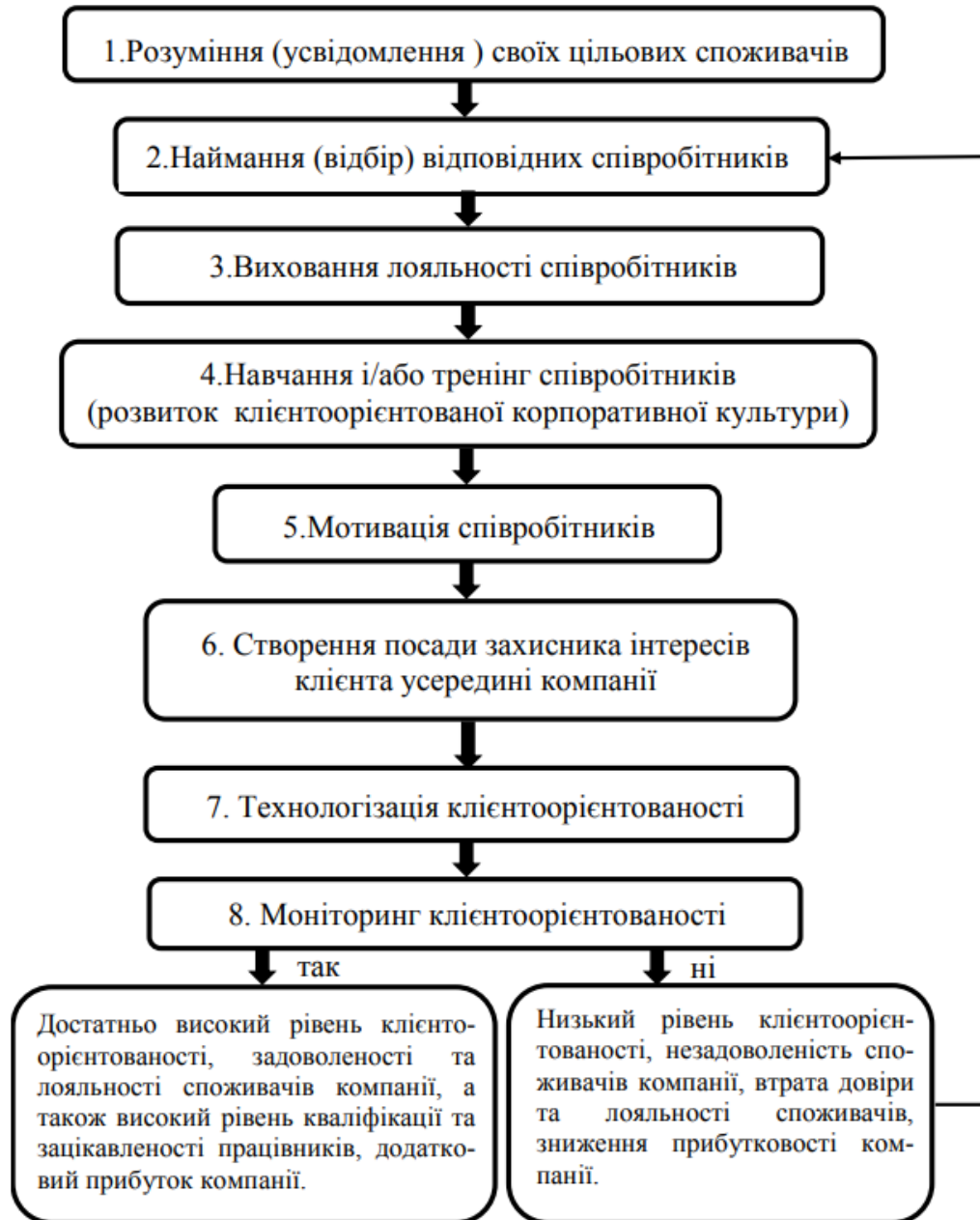


Рисунок 2 – Етапи побудови клієнтоорієнтованої компанії [1]

Для підвищення клієнтоорієнтованості слід відбирати в компанію «правильних» кандидатів. Відбираючи і приймаючи на роботу нових працівників, необхідно враховувати найбільший ступінь співпадіння корпоративних інтересів та цінностей, корпоративної культури з особистими цінностями, цілями та культурою претендентів на ті чи інші посади (рис. 3). Сутність наведеної моделі полягає у знаходженні балансу інтересів і вимог обох сторін, що дасть змогу підвищити клієнтоорієнтованість персоналу компанії.

Транспортні технології

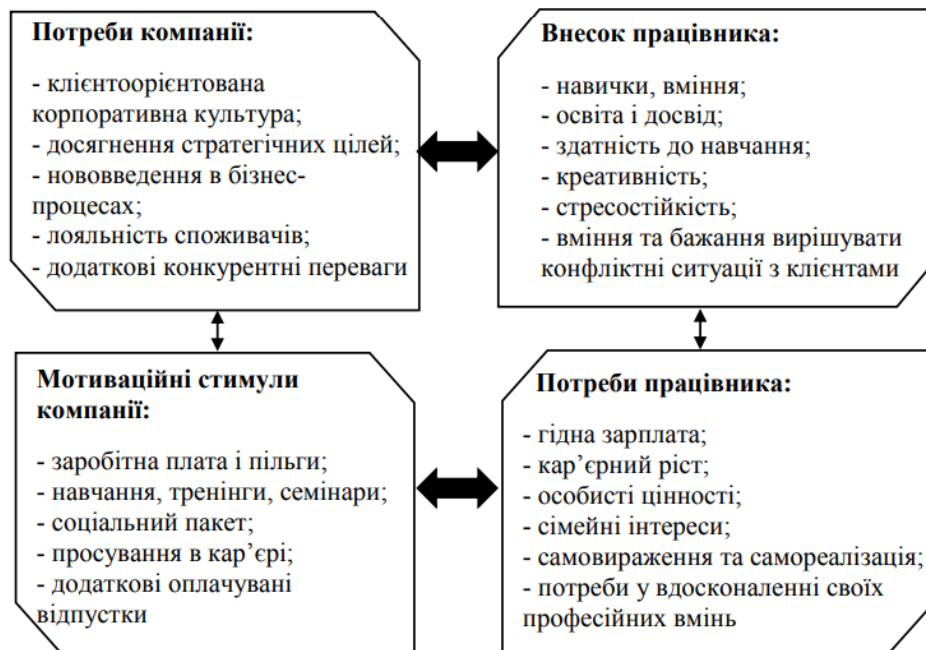


Рисунок 3 – Модель збігу потреб, інтересів та цінностей компанії і персоналу [1]

Відбираючи персонал на роботу, необхідно віддавати перевагу претендентам, які вміють і мають намір працювати з людьми (покупцями, клієнтами), які володіють високою стресостійкістю, є доброзичливими, вміють демонструвати позитивний настрій, здатні до навчання та вдосконалення своїх професійних навичок, уміють вирішувати конфліктні ситуації. Марним є навчання працівника, який не відповідає зазначеним вище критеріям відбору.

Однак, щоб підвищити клієнтоорієнтованість персоналу компанії, необхідно не тільки «фільтрувати» кандидатів, а й упровадити систему ефективного навчання і підготовки співробітників відповідно до встановлених у ній стандартів обслуговування клієнтів.

На третьому етапі процесу впровадження клієнтоорієнтованої бізнес-стратегії компанія повинна донести до своїх співробітників, якою є місія та основні цілі її діяльності, хто є її цільовими споживачами (клієнтами), у чому полягає її основна стратегія і тактика і, відповідно, якого світогляду вона вимагає від самого співробітника. Основні цілі діяльності компанії, як вже вище зазначено, повинні співпадати з внутрішніми особистісними цілями співробітника, і тільки у такому разі працівник зможе відповідати критеріям компанії, підвищувати свою продуктивність праці, а отже, і продуктивність та прибутковість компанії загалом, що є однією із заповорок успіху такої компанії.

На четвертому етапі відбувається навчання або тренінг співробітників. Навчання має проходити, спираючись на сформований певний рівень виховання. Для підвищення рівня клієнтоорієнтованості компанія повинна навчити своїх співробітників способам реалізації робочих завдань, способам реагування на типові робочі ситуації і способам реагування на нетипові ситуації. Працівники повинні отримати повне уявлення про клієнтів, товари чи послуги, які реалізують, навчитися працювати в команді, спілкуватися з клієнтами тощо.

П'ятий етап формування клієнтоорієнтованості компанії передбачає мотивацію співробітників, як матеріальну, так і моральну. Винагорода є справедливою, якщо за роботу, більш корисну для цілей компанії, співробітник отримує більше. Важливим також є формування сприятливого психологічного клімату в колективі. Від того, як працівники відчують себе на роботі, буде залежати те, як вони обслуговуватимуть клієнтів.

Дуже важливим є етап створення посади захисника інтересів клієнта всередині компанії передбачає його наявність у компанії для розвитку її клієнтоорієнтованості. У зарубіжній термінології ця посада називається Chief Customer Officer (CCO) [2]. Він відповідає за зв'язок компанії з її споживачами і повинен забезпечувати відчуття бачення споживача всередині компанії. Нині ці функції розширилися, їх виконує Head of Customer Experience (HCE) [3]. Точний переклад не передасть усіх функцій HCE, однак у його посадові обов'язки входить складання «карт подорожі (відвідин)» споживача компанії, рухаючись за якими у споживача викликаються певні (необхідні для компанії) емоції. Таким чином, інтереси клієнта враховуються повніше.

Технологізація клієнтоорієнтованості відбувається тоді, коли дії, пов'язані із забезпеченням процесу, диктуються спеціально створеними для цього інструментами – обладнанням або іншими технічними засобами. Основна проблема впровадження клієнтоорієнтованості – розроблення системи управління, в якій клієнтоорієнтованість була б частиною технологічного процесу.

Важливими елементами створення клієнтоорієнтованості компанії є моніторинг – постійна перевірка на клієнтоорієнтованість. Моніторинг повинен включати як оцінку внутрішньої клієнтоорієнтованості (задоволеність співробітників), так і оцінку клієнтоорієнтованості співробітників (їх ставлення до клієнтів) через установавлення зворотного зв'язку.

Для технологізації клієнтоорієнтованості в сучасному менеджменті застосовуються CRM-системи. CRM-система (з англ. Customer Relationship Management – управління взаємовідносинами з клієнтами) – це інформаційна система, призначенням якої є автоматизація бізнес-процесів компанії, що забезпечують взаємодію всіх її підрозділів із клієнтами на рівні, визначеному CRM-ідеологією. Така система, з одного боку, вирішує завдання, спрямовані на задоволення й утримання клієнтів, з іншого – служить оптимізації діяльності компанії, скорочуючи витрати, пов'язані з пошуком та обробкою інформації, аналізом даних, управлінням продажами і т. д. CRM слід розглядати як стратегію, націлену на формування довготривалих і прибуткових взаємин зі споживачами (покупцями, клієнтами, замовниками) через розуміння їхніх індивідуальних потреб.

Поява CRM – це реакція бізнесу на запити клієнтів, які постійно ускладнюються. CRM-системи є технічним рішенням, за допомогою якого можна реалізувати клієнтоорієнтованість на практиці, врахувати різні боки і характеристики клієнта, а також історію роботи з ним.

Практична реалізація клієнтоорієнтованої моделі часто передбачає більш загальні, глобальні зміни в компанії, які охоплюють усі основні бізнес-процеси, а не тільки бізнес-процеси, відповідальні за взаємодію з клієнтами, а саме: продаж, маркетинг, післяпродажний сервіс.

CRM-ідеологія пронизує всі бізнес-процеси компанії – від розроблення і виробництва до продажу та післяпродажного обслуговування. Великі компанії та корпорації давно оцінили переваги клієнтоорієнтованого підходу до бізнесу. Однак лише з появою інформаційних технологій CRM-ідеологія стала доступною широкому колу компаній, включаючи малі та середні підприємства. Отже, можна зазначити, що CRM-системи по відношенню до бізнесу відображають управлінську модель клієнтоорієнтованості.

Вдало реалізована клієнтоорієнтована бізнес-стратегія має потенціал для забезпечення продажів, підвищення рентабельності та стабільної конкурентної переваги.

Клієнтоорієнтованість компанії означає, що сьогодні звичайний продаж товарів чи послуг клієнтові є недостатнім, їх слід уміти продавати «правильно», тобто саме таким чином і способом запропонувати товар або послугу, щоб були враховані всі переваги клієнта, його смаки, можливості. У силу цього відбувається тенденція збільшення персоналізації клієнта.

Форми і методи роботи з ним стають основою корпоративної бізнес-моделі компанії, яка має назву «клієнтоорієнтованість».

Високий рівень клієнтоорієнтованості, що проявляється в ефективному обслуговуванні клієнтів, є конкурентною перевагою компанії, оскільки маркетингові стратегії, тактики, технології, заходи можуть бути легко скопійовані конкурентами, а скопіювати методику успішної взаємодії з клієнтами буде набагато складніше, оскільки вона розроблена для конкретної компанії і конкретного персоналу.

Система ефективного обслуговування клієнтів (висока клієнтоорієнтованість), упроваджена в компанії, дає змогу отримати такі переваги:

- підвищення конкурентоспроможності;
- підвищення ступеня лояльності клієнтів;
- поліпшення іміджу компанії;
- підвищення прибутку за рахунок збільшення продажів і припливу клієнтів;
- підвищення кваліфікації співробітників;
- психологічний комфорт у трудовому колективі;
- поширення позитивної інформації про компанію і серед споживачів, і серед претендентів на роботу [1].

Клієнтоорієнтованість як інтегративний процес спрямований на підвищення якості сервісного обслуговування клієнтів, в т. ч. транспортно-експедиторського. Стан клієнтоорієнтованості в першу чергу визначається вигідним поєднанням всіх характеристик транспортно-експедиторських послуг, що надаються споживачеві.

Сучасний ринок міжнародних транспортно-експедиторських послуг характеризується підвищеними вимогами клієнтів щодо якості. Кожен клієнт визначає, що він закладає в якість транспортно-експедиторських послуг, в т. ч. міжнародних автомобільних перевезень вантажів.

В сучасних ринкових умовах клієнти за визначеними ними критеріями, такими як: швидкість доставки вантажів, безпека, мінімальні витрати тощо, бажають отримати якісну транспортно-експедиторську послугу, в т. ч. вчасну доставку вантажів до місця призначення.

В практичній діяльності вибір методу доставки вантажів здійснюється на основі одного із визначених клієнтом критеріїв, а також можливий варіант коли використовується інтегрований показник, який враховує кілька критеріїв, наприклад: час доставки і приведені витрати, і розраховується за формулою:

$$K_{\text{інт}} = \frac{(C_{\text{в}} + F)}{W} \cdot (1 + \Delta)^{-n}, \quad (1)$$

де $K_{\text{інт}}$ – оцінка вартості вантажу і його доставки з урахуванням критерію часу (інтегральна оцінка);

$C_{\text{в}}$ – закупівельна вартість вантажу, грн;

F – вартість (фрахт) перевезення вантажу, грн;

Δ – ставка дисконту;

W – транспортна робота, ткм;

n – кількість періодів за рік, що розраховується за формулою:

$$n = \frac{365}{T_{\text{д}}}. \quad (2)$$

В сучасних умовах, дуже актуальною є задача вибору клієнто-орієнтованого методу організації міжнародних автомобільних перевезень партійних вантажів (МАППВ), яка полягає в наступному: необхідно визначити раціональний метод організації міжнародних автомобільних перевезень партійних вантажів з використанням принципів логістики, з урахуванням вимог клієнтів щодо якості МАППВ, транспортних і термінальних особливостей та інших факторів.

Набір альтернативних методів організації перевезень вантажів характеризується основними кількісними та якісними показниками, що характеризують потреби вантажовласників та технологічні можливості кожного учасника доставки, в залежності від характеристик потоку замовлень.

Раціональний метод організації МАППВ визначається з повної сукупності альтернативних методів організації МАППВ за критерієм, який вибрав клієнт, на підставі визначеного впливу вхідних параметрів на параметри методу організації МАППВ.

Проаналізовані базові методи організації перевезень партійних вантажів: наскрізний; збірно-розвізний; термінальний по завозу і розвозу. Ці методи мають такі особливості: наскрізний метод передбачає перевезення партійних вантажів від відправника в країні відправлення до вантажоодержувача в країні призначення без зміни вантажу і АТЗ; збірно-розвізний метод передбачає збір вантажів в країні відправлення і розвіз їх в країні призначення; термінальний по завозу і розвозу передбачає завіз вантажів на термінал в країні відправлення і розвіз з терміналу в країні призначення.

При виконанні МАППВ існує багато факторів, які відрізняються в країні відправлення і в країні призначення, такі як: стан під'їзду автопоїздів до вантажовласників, наявність терміналів відповідно в регіоні вантажовідправників країни відправлення і в регіоні вантажоодержувачів країни призначення, стан автомобільних доріг і вимоги до вантажних АТЗ при русі по них, екологічні вимоги в країнах тощо.

Для організації МАППВ доцільно враховувати ці фактори та комбінувати базові методи організації автомобільних перевезень партійних вантажів, тобто в країні відправлення перевезення виконується за частиною одного базового методу, а в країні призначення – за частиною іншого методу.

Для задоволення потреб клієнтів доцільно застосовувати такі альтернативні методи організації МАППВ: термінальний по завозу і розвозу, термінальний по завозу, термінальний по розвозу, термінально-розвізний, збірно-термінальний, збірно-розвізний, збірний, розвізний, наскрізний [4].

Отже, при зростанні конкуренції тільки високоякісний сервіс і лояльні клієнти дозволяють підвищити конкурентоспроможність. Саме орієнтованість на клієнта і його лояльність є основою успіху. Також важливу роль відіграють вміння передбачати майбутні зміни в потребах цільових клієнтів і адекватна оцінка внутрішніх можливостей організації в процесі цих змін. Отже, рівень орієнтованості на клієнта в результаті впливає на ефективність діяльності транспортно-експедиторських підприємств.

ВИСНОВКИ

За результатами дослідження, визначено поняття клієнтоорієнтованості як інструменту формування лояльності споживачів, конкурентних переваг, що спрямовані на отримання стійкого прибутку в довготривалій перспективі, а також розглянуто елементи клієнтоорієнтованості компанії. У дослідженні також виокремлено вигоди, котрі отримує і споживач (клієнт), і компанія від клієнтоорієнтованого підходу.

При аналізі процесу побудови клієнтоорієнтованої компанії визначена для упровадження клієнтоорієнтована бізнес-стратегія. Вона складається з відповідних етапів, де враховано важливість та актуальність CRM-системи, що передбачає технологізацію цього процесу та по відношенню до бізнесу відображає управлінську модель клієнтоорієнтованості.

В сучасних ринкових умовах клієнти за визначеними ними критеріями, такими як: швидкість доставки вантажів, безпека, мінімальні витрати тощо, бажають отримати якісну транспортно-експедиторську послугу. Для задоволення потреб клієнтів доцільно

застосовувати такі альтернативні методи організації МАППВ: термінальний по завоzu і розвоzu, термінальний по завоzu, термінальний по розвоzu, термінально-розвізний, збірно-термінальний, збірно-розвізний, збірний, розвізний, наскрізний. Отже, при зростанні конкуренції тільки високоякісний сервіс і лояльні клієнти дозволяють підвищити конкурентоспроможність. Саме орієнтованість на клієнта і його лояльність є основою успіху.

Список використаних джерел

1. Романчукевич, М. Й. Клієнтоорієнтованість як інструмент формування конкурентних переваг компанії. // Економіка та управління підприємствами. Інфраструктура ринку, Випуск 21. – 2018. – С. 165 – 173.
2. Chief customer officer. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Chief_customer_officer.
3. How to become the head of customer experience. Режим доступу: <http://www.customerbliss.com/become-head-customerexperience/>.
4. Свірін Д.О. Підвищення ефективності міжнародних автомобільних перевезень вантажів у логістичних ланцюгах – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.01 «Транспортні системи» (275 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)) Національний транспортний університет Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Shyriaieva S. V., Khomitskaya A. S.

CUSTOMER FOCUS IN TRANSPORT AND FORWARDING ACTIVITIES

The work defines the concept of customer orientation as a tool for forming consumer loyalty; competitive advantages aimed at obtaining sustainable profits in the long term, and also considers the elements of a company's customer orientation. The study also highlights the benefits that both the consumer and the company receive from a customer-oriented approach. The need to introduce the concept of customer individualization into the company's activities is determined, that is, offering him goods and services that will meet his needs, providing appropriate individual service and maintenance, etc. The process of building a customer-oriented company through the implementation of a customer-oriented business strategy is analyzed. This process consists of the corresponding stages, which take into account the importance and relevance of the CRM system, which involves the technologization of this process and reflects the management model of customer orientation. It is determined that a high level of customer orientation is manifested in effective customer service and is a strategic competitive advantage of the company. The analysis revealed that in modern market conditions, customers, based on their defined criteria, such as: speed of cargo delivery, safety, minimum costs, etc., want to receive high-quality freight forwarding services. An integrated indicator was determined that takes into account several criteria. To meet the needs of customers, it is advisable to use the following alternative methods of organizing MAPPV: terminal for delivery and delivery, terminal for delivery, terminal for delivery, terminal-delivery, group-terminal, group-delivery, group, delivery, end-to-end. It was concluded that customer orientation and loyalty are the basis for success, increasing competitiveness, and also generating profits.

Keywords: Customer orientation, freight forwarding, , approach, business strategy, consumer, technology, CRM-system, customer-oriented method of organizing international road cargo transportation.

Стаття надійшла 09.12.2025р.

Сова Н.В., Савченко Б.М., Ляшок І.О.,
Крюкова О.А., Рейвах О.В.

ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ БІОПОЛІМЕРІВ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА МІСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ

Оскільки біополімери входять до складу твердих побутових відходів, технології їх переробки критично важливі для мінімізації негативного впливу на міське середовище. Високої популярності біопластики набули завдяки здатності до біологічного розкладання, а отже, зменшення екологічної шкоди від накопичення відходів.

Стаття присвячена визначенню можливості багаторазової переробки полібутилен-адипат-ко-терефталату (ПБАТ) для зменшення впливу біопластику на навколишнє середовище за рахунок удосконалення технології переробки його відходів з мінімальними втратами і забрудненням довкілля. Досліджено зміну реологічних характеристик зразків трьох типів ПБАТ, зокрема повторно переробленого, під впливом температури, вологості та кратності переробки. Встановлено, що підвищення температури значно підсилює текучість ПБАТ; зокрема, показник текучості розплаву (ПТР) для вторинного ПБАТ зростає у 3,7 рази при збільшенні температури на кожні 30 °С, демонструючи його підвищену чутливість до термічного впливу. При цьому висока текучість вторинного матеріалу може бути потенційно використана для поліпшення механічних властивостей біополімеру. Встановлено, що багаторазова переробка спричиняє прогресуючу деградацію, про що свідчить систематичне підвищення ПТР на 4-5 одиниць з кожним циклом. Для гарантування якості продукції рекомендовано обмежити кількість циклів переробки для первинних марок до 10 циклів та до 5 циклів для вторинного ПБАТ. Доведено критичне значення попереднього висушування, оскільки волога інтенсифікує гідролітичну деструкцію та знижує термостабільність. Проведене дослідження підтверджує перспективність та технологічну доцільність використання відходів ПБАТ для створення ефективної та сталої системи утилізації, спрямованої на мінімізацію негативного впливу полімерних відходів на міське довкілля. Використання вторинних ресурсів є перспективним напрямом для створення екологічно сталих виробничих систем.

Ключові слова: Переробка відходів, полібутилен-адипат-терефталат (ПБАТ), рециклінг, ПТР, термостабільність, міське довкілля.

Постановка проблеми. Приблизно 3% усіх світових викидів парникових газів пов'язані з виготовленням та подальшою обробкою полімерних матеріалів. Щорічно виробляються сотні мільйонів тон пластику, але у нову продукцію фактично трансформується лише десята частина. Згідно з доповіддю Програми Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища (ЮНЕП), забруднення пластиком може бути скорочене на 80% до 2040 року. Для досягнення цієї цілі необхідні кардинальні політичні та ринкові трансформації, які мають бути впроваджені країнами та корпораціями, використовуючи вже наявні технологічні рішення [1].

Оскільки біополімери входять до складу твердих комунальних відходів (ТКВ), технології їх переробки критично важливі для мінімізації негативного впливу на міське середовище. Полібутилен-адипат-ко-терефталат (ПБАТ) належить до провідної категорії біополімерів. Згідно з дослідженнями [2], він сьогодні активно використовується і вважається одним із найбільш затребуваних біопластичних матеріалів на ринку.

Таким чином, розробка ефективної та сталої технології переробки відходів біополімерів, зокрема ПБАТ, становить стратегічний інтерес для підвищення ефективності управління

відходами, реалізації принципів циклічної економіки та сприятиме досягненню глобальних цілей скорочення пластикового забруднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Високої популярності біопластики набули завдяки здатності до *біологічного розкладання*, а отже, зменшення екологічної шкоди від накопичення *відходів* [3]. Зважаючи на низький рівень застосування технологій компостування при переробці твердих побутових відходів в Україні, життєво важливим є поглиблення досліджень процесів біорозкладу, зокрема з акцентом на безпечність впливу продуктів деструкції на живі організми. Розробка нових методів компостування та забезпечення сучасних потреб у об'єктах промислового компостування, а також розширення первинної сировинної бази за рахунок сільськогосподарських та харчових відходів для зниження вартості [4] є першочерговим завданням для інженерів і науковців. Не менш важливим є вирішення питань незадовільної поінформованості споживачів щодо поводження з одноразовим біорозкладним пакуванням і удосконалення системи управління цими відходами, що охоплює збір, сортування та компостування [5].

Полібутилен-адипат-ко-терефталат (ПБАТ) – це біорозкладний, компостований термопластичний кополіестер на основі нафти (або потенційно біорозкладний), відомий своєю еластичністю, міцністю та здатністю імітувати властивості поліетилену низької щільності. Це робить ПБАТ популярною екологічно чистою альтернативою для плівок, упаковки та сільськогосподарської мульчі [6], хоча його виробнича вартість може бути вищою, ніж у традиційних пластмас.

ПБАТ промислово синтезується з різних мономерів, таких як 1,4-бутандіол, адипінова кислота та диметилтерефталат або терефталева кислота. Ці мономери зазвичай виготовляються з таких невідновлюваних ресурсів, як сира нафта [7]. Таким чином, сучасне виробництво мономерів базується на «коричневій хімії» на відміну від «зеленої хімії». Виробництво ПБАТ з використанням мономерів, отриманих з відновлюваних ресурсів, таких як біомаса, може сприяти вирішенню таких проблем, як виснаження ресурсів, викиди парникових газів та екологічні загрози [8].

Автори дослідження [6] оцінюють небіологічне виробництво мономерів РВАТ з біомаси, як сировини, за допомогою гетерогенних каталітичних реакцій. Запропоновані каталітичні шляхи ще не є повністю конкурентоспроможними з традиційними шляхами на основі викопного палива, головним чином через високі ціни на сировину та існування інших альтернатив. Однак, враховуючи постійний технологічний прогрес у виробництві мономерів РВАТ з відновлюваних джерел, біологічний РВАТ має бути економічно вигідним найближчим часом.

РВАТ часто змішується з іншими біорозкладними полімерами (наприклад, полімолочною кислотою (PLA)) для покращення фізико-механічних та термічних властивостей кінцевого продукту (зокрема, біорозкладних плівок) [9]. Наприклад, мульчуючі плівки, виготовлені шляхом змішування РВАТ та PLA широко використовуються для покращення стану ґрунту та підвищення продуктивності сільськогосподарських культур у сільському господарстві [10]. Хоча результати досліджень [11-12] показують, що мікропластик ПБАТ може розкладатися мікроорганізмами з утворенням хімічних речовин, які є високотоксичними для рослин, що підтверджує гіпотезу, що біорозкладні пластики можуть становити небезпеку для навколишнього середовища.

З огляду на те, що основним виробом з ПБАТ є пакувальна продукція і, беручи до уваги бажання суттєво зменшити обсяги відходів ПБАТ, що потрапляють на полігони міст, та збільшити кількість циклів його використання, розробка технології повторної переробки як первинного так і вторинного ПБАТ стає все більш актуальною.

Мета дослідження. Мета дослідження – визначення можливості багаторазової переробки ПБАТ для зменшення впливу біопластику на навколишнє середовище за рахунок

удосконалення технології переробки його відходів з мінімальними втратами і забрудненням довкілля.

Основний матеріал дослідження. В роботі для досліджень використали біополімери:

~ПБАТ 1 – BASF Ecoflex® C1200 Biodegradable Polyester,

~ПБАТ 2 – BASF Ecovio® C2332 F Blend Biodegradable Polyester,

~вторинний ПБАТ, отриманий шляхом агломерування відходів з виробництва біопакетів, що використовуються для пакування.

Ecoflex® C1200 (ПБАТ 1) — це біорозкладний аліфатично-ароматичний співполіефір на основі мономерів 1,4-бутандіолу, адипінової кислоти та терефталової кислоти в полімерному ланцюзі [13]. ПБАТ 1 біологічно розкладається до основних мономерів 1,4-бутандіолу, адипінової кислоти та терефталової кислоти та, зрештою, до вуглекислого газу, води та біомаси під час метаболізму в ґрунті чи компості за стандартних умов. ПБАТ 1 розроблено для виготовлення плівок методом роздуву або лиття. Типовими застосуваннями є пакувальні плівки, плівки для сільського господарства та мішки для компосту.

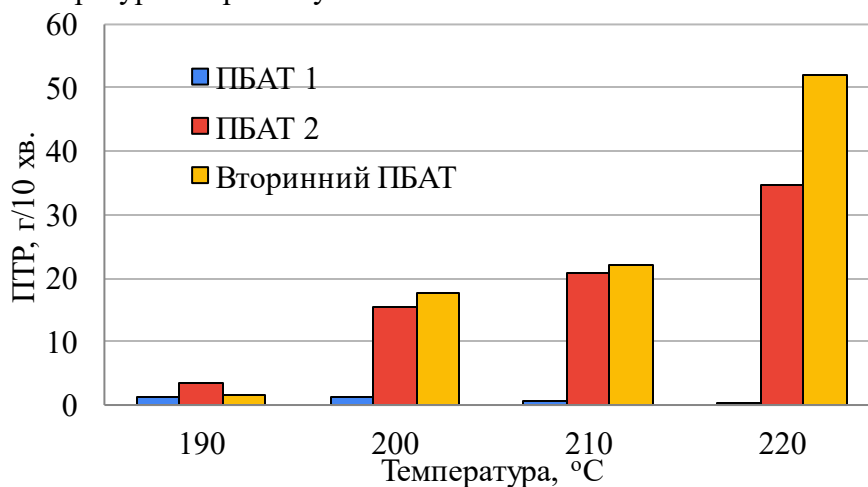
Ecovio® F Blend C2332 (ПБАТ 2) — біорозкладний полімер, який містить 18% відновлюваної сировини [14]. Це в основному суміш біорозкладного співполіефіру Ecoflex® F Blend і PLA. Завдяки своїй надзвичайній механічній міцності з ПБАТ 2 виготовляють пакети для сміття, для органічних відходів, сільськогосподарську плівку тощо. ПБАТ 2 вже містить антиблокувальні та ковзаючі добавки, які необхідні для легкої переробки на екструзійному обладнанні.

В даній роботі визначали вплив температури на показник текучості розплаву (ПТР) зразків, як показник термостабільності та оцінювали здатність до багаторазового перероблення. Визначення ПТР проводилося відповідно до ДСТУ EN ISO 1133-1:2022 «Пластмаси. Визначення швидкості масової течії розплаву (MFR) і об'ємної швидкості течії розплаву (MVR) термопластів. Частина 1» для висушених та кондиціонованих зразків ПБАТ.

Визначення здатності до багатократного перероблення відбувалося через серію переробних циклів. Для визначення ПТР застосовували прилад «Полімер ПТ-1», вантаж 2,16 кг, сопло $d = 2,095$ мм, тривалість витримки 3 хв.

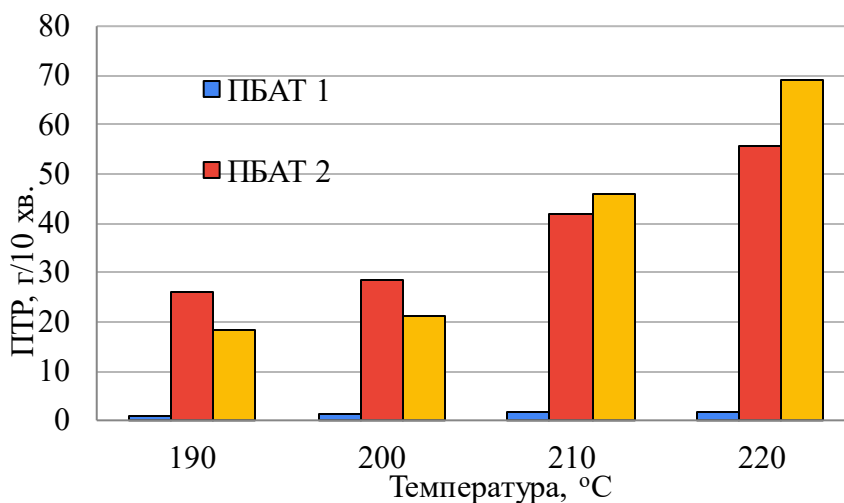
Під час дослідження зразків ПБАТ різних висушених та кондиційованих марок було встановлено залежність текучості матеріалів від температури процесу (рис.1).

Аналіз графічних даних показує, що ПТР різних висушених марок ПБАТ (рис.1 а) чутливий до температурного режиму.



а)

Екологічна безпека



б)

Рисунок – 1. Залежність показника текучості розплаву висушеного (а) та кондиціонованого (б) ПБАТ від температури.

Для всіх зразків відзначено очікуване підвищення текучості із зростанням температури від 190 °C до 220 °C. Для ПБАТ 1 характерний вкрай низький ПТР у всьому дослідженому діапазоні. Це свідчить про його високу молекулярну масу та придатність для технологій екструзії або видувного формування. ПБАТ 2 має помірний ПТР, який значно зростає з підвищенням температури, від приблизно 3 г/10 хв при 190 °C до приблизно 35 г/10 хв при 220 °C. Це вказує на меншу молекулярну масу порівняно з ПБАТ 1 і придатність для лиття під тиском. Максимального значення ПТР демонструє висушений вторинний ПБАТ, що значно перевищує ПТР для ПБАТ 2, і становить приблизно 52 г/10 хв.

Для кондиційованих зразків (рис. 1 б) значно вищі абсолютні значення ПТР у всьому температурному діапазоні. ПТР для ПБАТ 1 постійно демонструє вкрай низьке значення 2 г/10 хв, на відміну від ПБАТ 2, який характеризується помірним ПТР в межах 25-56 г/10 хв. Вторинна сировина ПБАТ виявляє найбільшу текучість при високих температурах 210 °C та 220 °C, сягаючи 70 г/10 хв. Це різке зростання ПТР у переробленого матеріалу є типовою ознакою зменшення середньої молекулярної маси, що, ймовірно, сталося внаслідок термомеханічної деградації. Ці реологічні відмінності критично важливі для налаштування технологічних параметрів і безпосередньо впливають на якість та фізико-механічні характеристики кінцевої продукції.

Таким чином, з підвищенням температури з 190°C до 220°C спостерігається підвищення показника текучості розплаву для вторинного ПБАТ приблизно в 3,7 рази. Для зразка ПБАТ 2 текучість зростає в 1,2 рази при збільшенні температури вимірювання на 30°C, що ймовірно пов'язано з присутністю в складі матеріалу добавки полілактиду, який запобігає різкому зростанню текучості. Всі кондиційовані зразки мають вищі показники ПТР у порівнянні з висушеними, що свідчить про вплив вологи на деструктивні процеси в ПБАТ.

З метою встановлення характеру зміни властивостей матеріалу при багаторазовому впливі термомеханічних напружень в роботі досліджували багаторазову переробку ПБАТ. На рис. 2. наведено залежність показника текучості розплаву ПБАТ від кратності перероблення при 210°C.

Для всіх трьох типів ПБАТ спостерігається чітка тенденція до зростання ПТР пропорційно збільшенню кількості циклів переробки. Це свідчить про прогресуюче зниження молекулярної маси полімеру внаслідок посилення термомеханічної деструкції під час кожного

Екологічна безпека

циклу переробки. Оскільки високе значення ПТР, особливо понад 50–60 г/10 хв, може зробити матеріал непридатним для виготовлення виробів, кількість циклів повторної переробки рекомендується встановити в межах 10 циклів для ПБАТ 1 та ПБАТ 2. Для вторинного ПБАТ кількість повторних циклів переробки не повинна перевищувати 5.

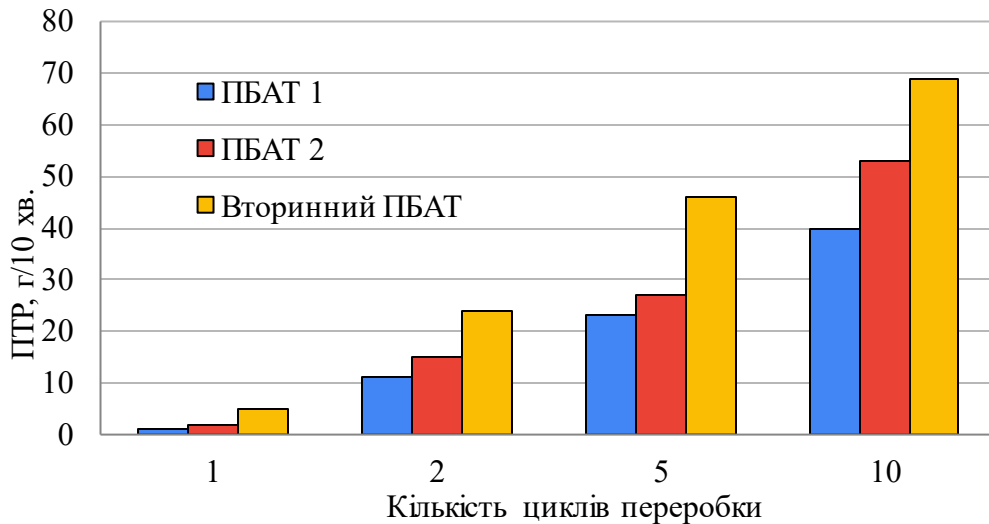


Рисунок 2 – Залежність показника текучості розплаву ПБАТ від кратності перероблення при 210°C.

Таким чином, практична реалізація технології повторної переробки ПБАТ є стратегічним кроком у відповідь на виклики щодо управління відходами, забезпечуючи перехід до більш відповідального використання цього важливого біопластику.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень встановлено, що підвищення температури значно підсилює текучість ПБАТ, причому для вторинного ПБАТ спостерігається різке збільшення ПТР у 3,7 рази при підвищенні температури на кожні 30 °C, що свідчить про його підвищену чутливість до термічного впливу. При цьому вищий рівень текучості вторинного матеріалу може позитивно впливати на механічні властивості фінального біополімеру, що відкриває потенціал для його ефективного використання.

Наявність вологи, навіть у кондиційованих зразках, істотно підвищує текучість при високих температурах, що свідчить про інтенсифікацію гідролітичної деструкції. З цієї причини висушений матеріал демонструє вищу термостабільність порівняно з матеріалом, що містить вологу.

Багаторазова переробка призводить до систематичного погіршення реологічних властивостей, оскільки кожен наступний цикл стабільно підвищує ПТР матеріалу приблизно на 4-5 одиниць, тому для гарантування максимальної якості вторинної сировини потрібно встановити чіткий ліміт на кількість циклів для кожної марки ПБАТ. Так для первинних ПБАТ 1 та ПБАТ 2 кількість повторних циклів переробки може складати до 10, тоді як для вторинного ПБАТ – не повинно перевищувати 5 циклів.

Проведене дослідження підтверджує перспективність та технологічну доцільність використання відходів ПБАТ для створення ефективної та сталої системи утилізації, спрямованої на мінімізацію негативного впливу полімерних відходів на міське довкілля.

Використання вторинних ресурсів є перспективним напрямом для створення екологічно сталих виробничих систем.

Список використаних джерел

1. UNEP. Solutions to Cut Global Plastic Pollution. UNEP, 2023. Режим доступу: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-roadmap-outlines-solutions-cut-global-plastic-pollution> (дата звернення: 06.12.2025).
2. Bartolucci L. Piechota Sustainable valorization of bioplastic waste: a review on effective recycling routes for the most widely used biopolymers / L. Bartolucci, S. Cordiner, E. De Maina, G. Kumar, P. Mele, V. Mulone, B. Igliński, G. // IJMS. – 2023. – Vol. 24, no. 9. – 7696. <https://doi.org/10.3390/ijms24097696>
3. Kumar S. Combating micro/nanoplastic pollution with bioplastic: Sustainable food packaging, challenges, and future / S. Kumar, N. Dubey, I. Choi, J. Jeon, M. Kim // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 363, no. 1. – 125077. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125077>
4. Самойленко Н.М. Актуальні аспекти розробки та використання біополімерних матеріалів для одноразового пакування / Н.М. Самойленко, Ю.С. Гадаєва // Екологічні науки. – 2025. – Vol. 59, no 2. – С.330-336. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.49>
5. Plastics of the Future? An Interdisciplinary Review on Biobased and Biodegradable Polymers: Progress in Chemistry, Societal Views, and Environmental Implications / Sara T. R. Velasquez, Qisong Hu, Johanna Kramm, Vitória C. Santin, Carolin Völker, Frederik R. Wurm // Angewandte Chemie International Edition. – 2025. – Vol. 64, no. 23. – e202423406. <https://doi.org/10.1002/anie.202423406>
6. Towards Sustainable Production of Polybutylene Adipate Terephthalate: Non-Biological Catalytic Syntheses of Biomass-Derived Constituents / Jechan Lee, Chanyeong Park, Yiu Fai Tsang, Kun-Yi Andrew Lin // ChemSusChem. – 2024. – Vol.17, no. 23. – e202401070. <https://doi.org/10.1002/cssc.202401070>
7. Biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) / Ty Burford, William Rieg, Samy Madbouly // Physical Sciences Reviews. – 2021. – Vol. 8, no. 8. – P. 1127-1156. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0078>
8. A study on the synthesis, modification and current market status of PBAT / W. Xu // E3S Web Conf. –2023. – Vol. 385. – 04007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338504007>
9. Recent advances in biodegradable polymer blends and their biocomposites: a comprehensive review / Kehinde Olonisakin, Amar K. Mohanty, Mahendra Thimmanagari and Manjusri Misra // Green Chem. – 2025. – Vol. 27. – 11656-11704. <https://doi.org/10.1039/D5GC01294E>
10. Advancing sustainable agriculture: Evaluation of Poly (lactic acid) (PLA) based mulch films and identification of biodegrading microorganisms among soil microbiota / Manmath Parida, Tapaswini Jena, Smita Mohanty, Sanjay K. Nayak // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – Vol. 269, no. 2. – 132085. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132085>
11. Negative effects of poly(butylene adipate-co-terephthalate) microplastics on Arabidopsis and its root-associated microbiome / Jiayi Liu, Peiyuan Wang, Yufan Wang, Yujia Zhang, Tengqi Xu, Yiqiong Zhang, Jiao Xi, Lijun Hou, Li Li, Zengqiang Zhang, Yanbing Lin // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – Vol. 437. – 129294. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129294>.

12. Efficient and precise outdoor lifetime prediction method for biodegradable poly (butylene adipate/ terephthalate) under various climate conditions / Yan Ye, Guoshuo Tang, Xiangze Meng, Rui Yang, Baohua Guo, Xuming Xie // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 500. – 145276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145276> .

13. BASF Ecoflex® C1200 F Blend Biodegradable Polyester. Режим доступу: https://lookpolymers.com/polymer_BASF-Ecoflex-C1200-F-Blend-Biodegradable-Polyester.php (дата звернення: 01.12.2025).

14. BASF Ecovio® C2332 F Blend Biodegradable Polyester. Режим доступу. https://www.lookpolymers.com/polymer_BASF-Ecovio-C2332-F-Blend-Biodegradable-Polyester.php (дата звернення: 1.12.2025).

Sova N.V., Savchenko B.M., Liashok I.O.,
Kryukova O.A., Reivakh O.V.

BIOPOLYMERS WASTE PROCESSING TO MINIMIZE OF THE NEGATIVE IMPACT ON THE URBAN ENVIRONMENT

Since biopolymers are part of solid waste, their processing technologies are critically important for minimizing the negative impact on the urban environment. Bioplastics have gained great popularity due to their ability to biodegrade, and therefore, reduce environmental damage from waste accumulation.

The article is devoted to determining the possibility of multiple recycling of polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) to reduce the impact of bioplastics on the environment by improving the technology for recycling its waste with minimal losses and environmental pollution. The change in the rheological characteristics of samples of three types of PBAT, in particular the recycled one, under the influence of temperature, humidity and number of recycling was studied. It was found that an increase in temperature significantly increases the fluidity of PBAT; in particular, the melt flow index (MFI) for secondary PBAT increases by 3.7 times with an increase in temperature for every 30 °C, demonstrating its increased sensitivity to thermal effects. At the same time, the high fluidity of the secondary material can potentially be used to improve the mechanical properties of the biopolymer. It has been established that multiple recycling causes progressive degradation, as evidenced by a systematic increase in the PTR by 4-5 units with each cycle. To guarantee product quality, it is recommended to limit the number of recycling cycles for primary grades to 10 cycles and to 5 cycles for secondary PBAT. The critical importance of preliminary drying has been proven, since moisture intensifies hydrolytic destruction and reduces thermal stability. The study confirms the prospects and technological feasibility of using PBAT waste to create an effective and sustainable recycling system aimed at minimizing the negative impact of polymer waste on the urban environment. The use of secondary resources is a promising direction for creating environmentally sustainable production systems.

Keywords: Waste processing, polybutylene adipate terephthalate (PBAT), recycling, MFI, thermal stability, urban environment.

Стаття надійшла 10.12.2025р.

Плаван В.П., Резанова Н.М., Ляшок І.О.,
Саблій Л.А., Резанова В.Г., Савченко Б.М.

ОЧИЩЕННЯ РІДКИХ ТА ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ З ВИКОРИСТАННЯМ ТОНКОВОЛОКНИСТИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Використання фільтрувальних та адсорбційних матеріалів виявляється ефективним підходом до вирішення поширеної проблеми забруднення рідких чи газових середовищ. В статті досліджувались фільтрувальні матеріали і пучки мікрОВОЛОКОН, одержані переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід складу 30/70 мас. % та модифікованих нанонаповнених композицій. Як нанодобавки вибрали пірогенний кремнезем марки А-300, кремнезем марки МАС-200М, а також кремнезем з нанесеними на його поверхню наночастинками діоксиду титану та кремнію $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Добавки вводили в кількості 1,0 мас.%. Переробкою вихідної та нанонаповнених сумішей були одержані зразки фільтрувальних матеріалів з товщиною фільтрувального шару (200 ± 20) мкм з однорідною структурою. Встановлено, що додавання твердих мінеральних нанодобавок не змінює характер процесу структуроутворення мікрОВОЛОКОН поліпропілену. Виконані мікроскопічні дослідження показали, що переважаючим типом структури для всіх композицій є мікрофібрили. Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікрОВОЛОКОН майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами.

Показано, що використання як нанонаповнювачів вихідного та модифікованих кремнеземів дає можливість покращити прецизійність і ефективність фільтрувальних матеріалів. При цьому одночасно зростає їх продуктивність у $2,6 \div 3,0$ рази, що обумовлено зменшенням гідравлічного опору фільтрувального шару. Таким чином, тонковолокнисті нанонаповнені поліпропіленові ФМ можуть використовуватися для очищення питної води, повітря та рідких і газових технологічних середовищ різних галузей промисловості.

Ключові слова: Фільтрувальні матеріали, мікрОВОЛОКНА, поліпропілен, мінеральні нанодобавки, кремнезем, затримувальна здатність, ефективність очищення.

Постановка проблеми. Важливим питанням сьогодення є захист людини і навколишнього середовища від шкідливого впливу токсичних викидів в атмосферне повітря і водойми. Очищення питної води, повітря та технологічних газових і рідких середовищ від механічних домішок і високодисперсних аерозолів мікронних і субмікронних розмірів з використанням тонковолокнистих фільтрувальних матеріалів (ФМ) є одним із найбільш ефективних, простих та економічно доцільних методів [1].

Новий звіт Всесвітньої організації здоров'я показує, що у 2023 році забруднення повітря стало причиною 7,9 мільйона смертей та втрати 232 здорових років життя у всьому світі. Звіт про стан світового повітря за 2025 рік вперше містить дані про деменцію. У 2023 році деменція, пов'язана із забрудненням повітря, призвела до понад 600 000 смертей та майже 12 мільйонів втрачених здорових років життя [2]. Після глобальної пандемії занепокоєння громадськості екологічними проблемами зросло ще більше.

Використання фільтрувальних та адсорбційних матеріалів виявляється ефективним підходом до вирішення поширеної проблеми забруднення. Ці матеріали можуть справлятися

з широким спектром забруднювачів навколишнього середовища та ефективно зменшувати кількість захворювань, спричинених забрудненням, оскільки вони природно мають здатність затримувати частинки, менші за номінальний розмір пор. Тому розробка стійких, високоефективних фільтраційних та адсорбційних матеріалів, що підтримують захист навколишнього середовища, стала важливим напрямком досліджень [3-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд способів виробництва нетканих фільтрувальних полотен, основною структурною одиницею яких є волокна з діаметрами мікро- і нанорозмірів, а саме: аеродинамічне розпилення розплаву струменем стиснутого повітря [5,6], електроформування із розчину або розплаву полімеру [7,8] та переробка розплавів сумішей термодинамічно несумісних полімерів у композити з мікро- і нанофібрилярною структурою [9]. За умови одержання нетканих матеріалів (НМ) аеродинамічним способом діаметр волокон коливається від 1,0 до 20,0 мкм, а при електроформуванні мінімальний розмір окремих філаментів складає від 10 нм. В нетканих матеріалах, одержаних методом роздуву або електроформуванням, волокна однорідні за діаметрами, проте через їх хаотичне (за законом випадку) розташування в шарі існує ймовірність утворення певної кількості пор з діаметрами, більшими за номінальні.

Наприклад, автори роботи [10] розробили ефективний повітряний фільтр на основі поліакрилонітрилу (ПАН), використовуючи метод роздуву. В результаті встановлення отриманого волокнистого фільтрувального матеріалу в якості віконного екрану досягнуто видалення 90,6% твердих частинок. Автори роботи [11] підготували багатошаровий фільтр SiO_2 /ПАН за допомогою електроформування. При цьому було виявлено, що наночастинки SiO_2 збільшують площу поверхні нановолокон ПАН та їх мезопористу структуру. Багатошаровий фільтр продемонстрував вищий рівень фільтрації, порівняно з одношаровим фільтром.

Метод отримання тонковолокнистих матеріалів переробкою розплавів сумішей полімерів (формування *in situ* мікро- або нанофібрил одного компоненту в матриці іншого) на сьогодні реалізований для багатьох пар полімерів шляхом екструзії, роздуву, одноосного розтягу та 3D формування. Структура композиційної плівки, що виходить із формувального отвору, являє собою суцільну фазу дисперсійного середовища, наповненого тонкими струменями (фібрилами/мікроволокнами). Після екстракції полімеру-матриці розчинником, інертним по відношенню до компоненту дисперсної фази, залишаються неткані полотна із мікроволокон. Одержані тонковолокнисті ФМ характеризуються впорядкованою локалізацією мікроволокон з діаметрами від десятих долей до декількох мікрометрів, які орієнтовані в напрямку екструзії. Метод 3D формування дозволяє регулювати ефективність мікрофібрилярних ФМ шляхом формування багатошарової композиційної плівки, в якій шари розташовані під різними кутами [12-13]. За умови формування мікроволокон одного полімеру в матриці іншого їх розмірні характеристики визначаються, перш за все, реологічними властивостями компонентів суміші, ступенем їх сумісності на межі поділу фаз, а також типом технологічного обладнання і параметрами переробки.

Одним із найбільш ефективних методів регулювання мікроструктури полімерних композитів є додавання в суміш третього компоненту, що проявляє компатибілізуючу дію (зменшує поверхневий натяг). Включення наночастинок також забезпечує ефективну компатибілізуючу дію через локалізацію на поверхні поділу фаз та контроль морфології [14].

Дослідження останніх років свідчать, що ефективними компатибілізаторами є речовини в наностані [15]. При цьому введення наночастинок в структуру мікроволокон дозволяє поєднати унікальні властивості надтонких волокон і речовин в наностані та створити якісно нові матеріали з прогнозованими характеристиками [16].

Мета дослідження. Метою наукового дослідження є підвищення ефективності очищення водних і газових середовищ шляхом модифікації властивостей тонковолокнистих

фільтрувальних матеріалів, одержаних переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід, через введення в їх структуру нанорозмірних добавок різної хімічної природи.

Основний матеріал дослідження. В статті досліджувались фільтрувальні матеріали і пучки мікрОВОЛОКОН, одержані переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід (ПП/СПА) складу 30/70 мас. % та модифікованих нанонаповнених композицій. Для дослідження були використані промислові зразки полімерів: волокноутворюючий компонент – ізотактичний поліпропілен марки 21060, матричний полімер – співполіамід (співполімер капролактаму і гексаметиленадіпінату у співвідношенні 50:50) марки ПА-6/66. Як нанодобавки вибрали пірогенний кремнезем марки А-300 з питомою поверхнею ($S_{\text{пт}}$) 342 м²/г, кремнезем марки МАС-200М (модифікований аеросил А-300 зі щепленими до поверхні диметильними групами) з $S_{\text{пт}}$ 224 м²/г, а також кремнезем з нанесеними на його поверхню наночастинками діоксиду кремнію $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ (вміст модифікуючої речовини 4,3 мкг/м²), $S_{\text{пт}}$ 62 м²/г. Добавки вводили в кількості 1,0 мас. %.

Для забезпечення максимальної концентрації нанодобавки в структурі мікрофібрил її попередньо диспергували в розплаві ПП за допомогою комбінованого черв'ячно-дискового екструдера. Гранули ПП/нанодобавка змішували з матричним полімером (СПА) на тому ж екструдері. Структурування в стренгах, одержаних після змішування інгредієнтів, оцінювали за допомогою електронного та оптичного мікроскопів шляхом підрахунку кількості всіх типів структур ПП та визначення їх розмірів. Розраховували середній діаметр мікрОВОЛОКОН (d), дисперсію розподіду (δ^2) та масову долю всіх типів структур (мікрОВОЛОКНА, частинки, плівки), які утворює поліпропілен в матриці. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики.

Композиційну плівку (напівфабрикат для одержання ФМ) формували на черв'ячному екструдері через плоско-щільну головку. Фільтрувальні неткані матеріали отримували після екстракції матричного полімеру із композиційної плівки водним розчином етилового спирту. Одержані зразки ФМ мали фільтрувальний шар з однорідною структурою товщиною 200±20 мкм (Рис. 1).

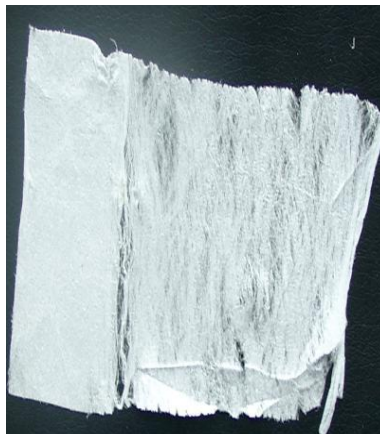


Рисунок 1 – Мікрофотографія зразка фільтрувального матеріалу

Затримувальну здатність ФМ оцінювали за ефективністю очищення атмосферного повітря від механічних домішок за допомогою лічильника аерозольних частинок АЗ-5 в діапазоні їх розмірів 0,3÷1,0 мкм. Ефективність фільтрації розраховували як відношення кількості затриманих частинок відповідного діаметру до їх кількості у повітрі. Проникність ФМ оцінювали на лабораторному стенді з використанням дистильованої води за тиску 0,5·10⁵ Па. Питому продуктивність оцінювали як об'єм фільтрату, що проходить через фільтрувальний шар за одиницю часу з одиниці його робочої поверхні. Гігроскопічні властивості ПП мікрОВОЛОКОН визначали ваговим способом відповідно до ISO 20158:2018

«Textiles — Determination of water absorption time and water absorption capacity of textile fabrics», а їх питому поверхню визначали відповідно до ISO 9277:2022 «Визначення питомої площі поверхні дисперсних та пористих матеріалів методом газової адсорбції».

Результати та їх обговорення

Фільтрувальні матеріали повинні мати високу затримувальну здатність (ефективність), невеликий гідравлічний опір (проникність матеріалу), стійкість до хімічної дії речовин, що розділяються, достатню міцність, теплостійкість за температури фільтрації, невисоку ціна, зручність у використанні (простота закріплення і швидкість заміни). Основними показниками, що характеризують ФМ, є ефективність, продуктивність та прецизійність фільтрації. Вони визначаються розмірами пор і формою елементів, з яких виготовлені ФМ, а також структурою матеріалу. Середній діаметр пор фільтрувальних шарів тим нижчий, чим менші розміри структурних елементів, а їх форма тим однорідніша, чим більш геометрично одноманітною і правильною є форма структур, що утворюють ФМ [1].

За умови переробки сумішей полімерів на екструзійному обладнанні компонент дисперсної фази деформується і руйнується з утворенням частинок різних розмірів та форми (сферичні, еліпсоїдальні, циліндричні, стрічкоподібні) або їх поєднання [17]. Для формування *in situ* мікрОВОЛОКОН одного полімеру в матриці іншого рідкі краплі дисперсної фази повинні деформуватися і зливатися у струмені в напрямку течії та зберігати сталу форму до моменту затвердіння. Візуальне дослідження залишків ПП після екстракції СПА із екструдатів свідчить, що при змішуванні компонентів на черв'ячно-дисковому екструдері має місце формування ПП мікрОВОЛОКОН в матриці СПА. Додавання твердих мінеральних нанодобавок не змінює характер процесу структуроутворення мікрОВОЛОКОН поліпропілену.

Виконані мікроскопічні дослідження показали, що переважаючим типом структури для всіх композицій є мікрофібрили [17]. При цьому має місце формування інших типів структур (частинки, плівки) (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив хімічної природи нанодобавок на мікроструктуру екструдатів суміші ПП/СПА

Назва добавки	Типи структур					
	мікрофібрили			частинки		плівки, мас. %
	$\bar{d}$, мкм	мас. %	δ^2	$\bar{d}$, мкм	мас. %	
без добавки	4,0	56,75	1,4	2,5	0,05	43,2
кремнезем	2,0	91,04	0,3	2,0	0,01	8,95
метилкремнезем	2,3	92,59	0,5	1,2	0,02	7,40
оксид титану/кремнезем	1,8	95,10	0,4	2,4	1,09	3,81

Як видно із Таблиці 1, введення всіх досліджених наноповнювачів сприяє вдосконаленню мікрофібрилярної морфології, що проявляється у різкому збільшенні масової долі мікрОВОЛОКОН, зменшенні ~ у 2 рази їх середнього діаметра та підвищенні однорідності розподілу. Як і слід було очікувати, модифікуюча дія наночастинок залежить від хімічної природи їх поверхні. Найбільший ефект досягнуто при використанні наночастинок $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ – середній діаметр ПП мікрофібрил є мінімальним, а їх масова доля – максимальною. Відомо, що найбільший вплив на процеси структуроутворення в розплавах сумішей полімерів забезпечує переважне розміщення наночастинок на межі поділу фаз за рахунок зменшення величини поверхневого натягу [9,18]. Оксиди в суміші є більш полярними, порівняно з вихідним кремнеземом і метилкремнеземом, через те, що поверхня оксидів металів є завжди полярною завдяки присутності аніонного кисню, а також за рахунок утворення на поверхні наночастинок кремнезему додаткових функціональних

груп Ti–OH та Si–O–Ti. Погане змочування наночастинок біфункціональної добавки розплавом неполярного поліпропілену сприяє їх виштовхуванню із розплаву ПП на межу поділу фаз компонентів та локалізацію в ній.

Аналіз результатів оцінки затримувальної здатності ФМ при очищенні атмосферного повітря від механічних частинок розміром $0,3 \div 1,0$ мкм свідчить, що введення нанодобавок в структуру поліпропіленових мікрОВОЛОКОН сприяє підвищенню їх ефективності (табл.2).

Таблиця 2 – Вплив хімічної природи нанодобавок на ефективність очищення атмосферного повітря (за тиску $0,5 \cdot 10^5$ Па)

Назва добавки	Ефективність, % (за частинками розміром, мкм)					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
без добавок	78,6	83,5	85,9	87,8	91,9	99,4
кремезем	99,9	100	100	100	100	100
метилкремнезем	99,5	99,9	100	100	100	100
оксид титану/ кремнезем	99,9	100	100	100	100	100

Фільтрування, як правило, є гідродинамічним процесом, який визначається різницею тисків по обидва боки фільтрувальної перегородки і опором рідині при її протіканні через пори і шар осаду, що утворився. При мікрофільтрації важливу роль відіграють фізико-хімічні явища, такі як адсорбція, коагуляція, пептизація осаду, наявність сольватної оболонки на твердих частинках тощо. Для механічних суспензій з великими частинками посилюється відносний вплив гідродинамічних факторів. За розміру домішок ≤ 1 мкм фізико-хімічні фактори стають визначальними, і саме вони обумовлюють те, що пори можуть затримувати частинки навіть у 5 разів менші за її діаметр [1].

Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікрОВОЛОКОН майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами. Крім того, процес фільтрації для досліджуваних частинок відбувається в основному за рахунок ряду фізико-хімічних явищ (ефекту доторкання, адсорбції, броунівської дифузії), а так званий ефект “сита” не відіграє суттєвої ролі. Завдяки цьому модифіковані ФМ затримують частинки більші за розмірами, ніж розмір пор. Вирішальний вплив процесу адсорбції підтверджується різким зростанням питомої поверхні мікрОВОЛОКОН з $84 \text{ м}^2/\text{г}$ для вихідних і до $190 \div 244 \text{ м}^2/\text{г}$ для нанонаповнених (табл.3).

Таблиця 3 – Вплив хімічної природи нанодобавок на величину питомої поверхні та гігроскопічність поліпропіленових мікрОВОЛОКОН

Назва добавки	Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$	Гігроскопічність, %
без добавок	84	0,17
кремезем	244	0,35
метилкремнезем	220	0,29
оксид титану/кремнезем	190	0,48

Продуктивність будь-якого фільтрувального матеріалу є другою важливою характеристикою. Проникність ФМ визначається перепадом тиску по обидва боки фільтрувальної перегородки та опором матеріалу по відношенню до середовища, що фільтрується. В ході дослідження виявлено різке зростання продуктивності ФМ по

дистильованій воді для модифікованих нанодобавками зразків (табл.4). Кращі властивості проявляють матеріали, модифіковані сумішшю діоксидів титану і кремнію. Зокрема продуктивність фільтрувальних матеріалів модифікованих нанодобавкою оксид титану/кремнезем в 3 рази вища, ніж не модифікованих.

Таблиця 4 – Вплив хімічної природи нанодобавок на продуктивність фільтрувальних матеріалів

Назва добавки	Продуктивність, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год.}$	Тиск, Па
без добавок	4050	$0,5 \cdot 10^5$
кремнезем	10650	
метилкремнезем	12190	
оксид титану/кремнезем	12230	

Це неочікуваний результат, оскільки підвищення прецизійності і ефективності фільтрів любого класу, як правило, супроводжується зменшенням їх проникності. Збільшення продуктивності обумовлене зниженням гідравлічного опору фільтрувального шару за рахунок кращої гідрофільності наноповерхні мікріволокон (табл.3). Наночастинки TiO_2 надають матеріалам здатність до самоочищення (подібно листкам рослин, крилам комах), що також може сприяти підвищенню продуктивності ФМ, модифікованих сумішшю оксидів.

Важливою перевагою розробленого методу одержання тонковолокнистого фільтрувального матеріалу шляхом переробки розплаву термодинамічно несумісної суміші полімерів є можливість збільшення робочої поверхні фільтру та виготовлення його у вигляді картриджу необхідного діаметру і довжини. При цьому слід підкреслити, що на відміну від інших методів, в даному випадку гофрується композиційна плівка (напівфабрикат), а не готовий фільтрувальний матеріал, що унеможливорює механічне пошкодження і забруднення фільтрувального шару та погіршення його властивостей. Розроблені картриджні фільтри витримують 20-разову стерилізацію гострою парою або розчинами водно-спиртовими та перекису водню, а також регенеруються зворотнім потоком на 80 %.

Введення наночастинок в структуру синтетичних волокон надає їм унікальні властивості, притаманні речовинам в наностані. Нанорозмірний діоксид титану проявляє антимікробні та фотокаталітичні властивості [19], які підсилюються під дією ультрафіолетового опромінення. Змішаний оксид, в якому наночастинки діоксиду титану нанесені на кремнезем, поєднує фотокаталітичну активність TiO_2 та сорбційні властивості SiO_2 [20]. Волокна, наповнені цією біфункціональною добавкою, можуть бути одночасно високоефективними сорбентами і фотокаталізаторами, поглинати із води широкий спектр іонів металів, руйнувати органічні сполуки, концентрувати і сепарувати радіонукліди, очищувати стічні води від багатьох фармацевтичних препаратів тощо. Подальші дослідження будуть направлені на відпрацювання технологічних параметрів процесу фільтрування для різних середовищ і типів забруднень.

ВИСНОВКИ

Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікріволокон майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами.

Важливою перевагою розробленого методу одержання тонковолокнистого фільтрувального матеріалу шляхом переробки розплаву термодинамічно несумісної суміші полімерів є можливість збільшення робочої поверхні фільтру та виготовлення його у вигляді картриджу необхідного діаметру і довжини.

Показано, що використання як нанонаповнювачів вихідного та модифікованих кремнеземів дає можливість покращити прецизійність і ефективність фільтрувальних матеріалів. При цьому одночасно зростає їх продуктивність у 2,6÷3,0 рази, що обумовлено зменшенням гідравлічного опору фільтрувального шару.

Таким чином, тонковолокнисті нанонаповнені поліпропіленові ФМ є прецизійними матеріалами глибинної дії і можуть використовуватися для очищення питної води, повітря та рідких і газових технологічних середовищ різних галузей промисловості.

Список використаних джерел

1. *Sutherland K. Filters and Filtration: Handbook / Ken Sutherland.* – 5th ed. – Oxford: Elsevier, 2008. – 536 p.
2. Institute for Health Metrics and Evaluation. – Режим доступу: <https://www.healthdata.org/news-events/newsroom/news-releases/new-report-shows-nearly-9-10-global-air-pollution-deaths-are> (дата звернення: 5.12.2025).
3. Sustainable pollution treatment system through Fiber filter materials / *Tianyu Luo, Junze Zhang, Jiaqi Wang, Hanzi Shi, Yan Hong, Run Zhao* // *Sustainable Materials and Technologies.* – 2024. – Vol. 42, no. 4. – e01168. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01168>
4. *Chikao Kanaoka.* Fine Particle Filtration Technology Using Fiber as Dust Collection Medium / *Chikao Kanaoka* // *KONA Powder and Particle Journal.* – 2019. – Vol. 36, no.1. – P. 88-113 <https://doi.org/10.14356/kona.2019006>
5. *Yesil Y.* Structure and mechanical properties of polyethylene melt blown nonwovens / *Y. Yesil, G.S. Bhat* // *Int. J. Sci. Tech.* – 2016. – V.28, no.6. – P. 780-793. DOI: 10.1108/IJCST-09-2015-0099
6. Mechanically robust and recyclable cross-linked fibers from melt blown anthracene-functionalized commodity polymers / *K. Jin, D. Banerji, F.S. Bates, C.J. Ellison* // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2019. – Vol. 11, no. 13. – P. 12863-12870. DOI: 10.1021/acsami.9b00209
7. Electrospinning versus fiber production methods: from specifics to technological convergence / *C.J. Luo, S.D. Stoyanov, E. Stride, E. Pelan, M. Edirisinghe* // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol. 41, no.13. – P. 4708-4735. DOI: 10.1039/c2cs35083a
8. *Li H.* Needleless melt-electrospinning of biodegradable poly(lactic acid) ultrafine fibers for removal of oil from water / *H. Li, Y. Li, W. Wang* // *Polymer.* – 2017. – Vol.9, no. 2. – P. 3-12. <https://doi.org/10.3390/polym9020003>
9. Micro and nano fibrillar composites (MFCs and NFCs) from polymer blends / *ed. by S. Thomas, R. K. Mishra, N. Kalarikka.* – Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. – 372 p. DOI: 10.1016/C2016-0-01649-2
10. Synthesis and filtration properties of polyimide nanofiber membrane/carbon woven fabric sandwiched hot gas filters for removal of PM 2.5 particles / *Q. Wang, Y. Bai, J. Xie, Q. Jiang, Y. Qiu* // *Powder Technol.* – 2016. – Vol. 292, no. 6. – P. 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.008>
11. Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration / *N. Wang, Y. Si, N. Wang, G. Sun, M. El-Newehy, S. S. Al-Deyab, B. Ding* // *Separation and Purification Technology.* – 2014. – Vol. 126, no. 6. – P. 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.017>

12. Production of high-performance multi-layer fine-fibrous filter materials by application of material extrusion-based additive manufacturing / *V.A. Beloshenko, V.P. Plavan, N.M. Rezanova, B.M. Savchenko, I. Vozniak* // *Int. J. Adv. Manuf. Techn.* – 2019. – Vol. 101. – P. 2681-2688. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3152-x>
13. Production of Filter Material from Polypropylene/Copolyamide Blend by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing: Role of Production Conditions and ZrO₂ Nanoparticles / *V. Beloshenko, V. Chishko, V. Plavan, N. Rezanova, B. Savchenko, N. Sova, I. Vozniak* // *3D Printing and Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 8, no. 4. – P. 253–262. DOI: 10.1089/3dp.2020.0195
14. *Fredi G.* Compatibilization of biopolymer blends: A review / *Giulia Fredi, Andrea Dorigato* // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2024. – Vol. 7, no. 4. – P. 373-404 <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.11.002>
15. Formation of microfibrillar structure of polypropylene/copolyamide blends in the presence of nanoparticles of metal oxides / *N.M. Rezanova, Yu.O. Budash, V.P. Plavan, V.I. Bessarabov* // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2021. – № 1. – P. 71-78. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-134-1-71-78
16. Nanoparticle Synthesis and Their Integration into Polymer-Based Fibers for Biomedical Applications / *J.M. Domingues, C.S. Miranda, N.C. Homem, H.P. Felgueiras, J.C. Antunes* // *Biomedicines*. – 2023. – Vol. 11, no. 7, 1862. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11071862>
17. Структурування у компатіблізованих нанонаповнених розтопах поліпропілен/пластифікований полівініловий спирт / *Н.М. Резанова, В.П. Плаван, Л.С. Дзюбенко, О.О. Сап'яненко, П.П. Горбик, А.В. Коришун* // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2018. – Т. 16, № 1. – С. 55-70.
18. *Polymer Blends: Formulation and Performance* / ed. by *Paul D.R., Bucknall C.B.* – New York: John Wiley & Sons, Inc. – 2000. – Vol.1. – 618 p. ISBN 10: 0471352799 / ISBN 13: 9780471352792
19. *Покотило О. А.* Фотокаталітична антибактеріальна активність наночастинок діоксиду титану (TiO₂) / *О. А. Покотило* // *Медична хімія*. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 92. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Med_chim_2014_16_4_29
20. Effect of silver Content and Morphology on the catalic Activity of Silver-grafted Titanium Oxide Nanostructure / *M.A. Kanjwal, Barakat N.M., Shceikh F.A., Balk W., Khil M.S., Kim H.Y.* // *Fibers and Polym.* 2010. Vol. 11, № 5. P. 700-709. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0700-x>

Plavan V.P., Rezanova N. M., Liashok I.O., Sablii L.A., Rezanova V.G., Savchenko B.M.

PURIFICATION OF LIQUID AND GASEOUS MEDIA USING FINE FIBRE FILTERING MATERIALS

The use of filtering and adsorption materials is an effective approach to solving the widespread problem of contamination of liquid or gaseous media. The article investigated filtering materials and bundles of microfibers obtained by melt processing the polypropylene/copolyamide mixtures of 30/70 wt. % and modified nanofilled compositions. Pyrogenic silica of the A-300 brand, silica of the MAS-200M brand, as well as silica with titanium dioxide and silicon TiO₂/SiO₂ nanoparticles deposited on its surface were chosen as nanoadditives. The additives were introduced in an amount of 1.0 wt.%. The samples of filtering materials with a filter layer thickness of (200±20) μm with a homogeneous structure were obtained by processing the initial and nanofilled mixtures. It was found that the addition of solid mineral nanoadditives does not change the nature of the process of structure

formation of polypropylene microfibers. The performed microscopic studies showed that the predominant type of structure for all compositions is microfibrils. Modified filter materials retain mechanical impurities of 0.5 microns and above with an efficiency of 100%. At the same time, the precision of filtration also increases. A significant improvement in one of the main indicators of filters is due to an increase in the uniformity of the structure of the filter layer due to a decrease in the average diameter of microfibers by almost 2 times and an increase in their uniformity of distribution by diameters. It is shown that the use of the original and modified silicas as nanofillers makes it possible to improve the precision and efficiency of filter materials. At the same time, their productivity increases by 2.6÷3.0 times, which is due to a decrease in the hydraulic resistance of the filter layer. Thus, fine-fiber nanofilled polypropylene filtering materials can be used to purify drinking water, air, and liquid and gaseous process media in various industries.

Keywords: Filter materials, microfibers, polypropylene, mineral nanoadditives, phase boundary, surface phenomena, retention capacity, purification efficiency.

Стаття надійшла 9.12.2025 р.

УДК 669.15-194:620.92

doi.org/10.31498/2522-9990302025347274

Нестеров О.В., Рубан В.Т., Капустян О.Є.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ШЛЯХИ ПІДТРИМАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ АГРЕСІЇ

Дослідження присвячено пошуку альтернативних напрямів заміни високолегованих сталей спеціального призначення шляхом розробки економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів для застосування в енергетичному обладнанні. Досліджувались структура, механічні та експлуатаційні властивості економнолегованих жаростійких сталей 03X8CЮ, 03X8CЮВМБ, у порівнянні з раніше розробленою сталлю 08X8CЮТч. Визначалась можливість отримання додаткових технологічних та експлуатаційних якостей, таких як покращена здатність до штампування та витягування, жароміцність завдяки використанню вольфраму та молібдену як додаткових легувальних елементів. Підтверджено оптимальне співвідношення механічних властивостей та достатній рівень жаростійкості виробів в агресивних середовищах при підвищених температурах і корозійній стійкості в атмосферних умовах, а застосування додаткового легування надає можливість поширити функціональне призначення цих сталей. Теоретично обґрунтовано усунення титану зі складу дослідної сталі з метою поліпшення стану поверхні листового матеріалу при збереженні феритної структури. Необхідний рівень феритизації цього матеріалу пов'язаний із впливом низького вмісту вуглецю разом зі збалансованим (за кількістю) вмістом хрому, алюмінію і кремнію як ефективних феритоутворювачів, а також вольфраму та молібдену, які позитивно впливають на рівень жароміцності. Напрацьовано результати наукових досліджень щодо застосування економнолегованих сталей, хімічний склад яких не потребує використання гостро дефіцитних та коштовних легувальних елементів, а отриманий сортамент гарячекатаних та холоднокатаних сталей дозволяє замінити високолеговані сталі спеціального призначення при виготовленні виробів енергетичного обладнання, зокрема облицювальних елементів топочних камер, труб та інших елементів, де застосовуються формозмінювальні операції і зварювання.

Ключові слова: Енергетичне обладнання, економнолеговані сталі, легувальні елементи, феритна структура, жаростійкість, жароміцність.

Постановка проблеми. Сучасні реалії економічного стану України полягають в тому, що через наслідки бойових дій виникає необхідність суттєвих змін в організації виробництва в багатьох галузях промисловості. Зокрема, вітчизняні підприємства металургійної галузі стикаються зі зниженням об'ємів та звуженням номенклатури легованих та високолегованих сталей спеціального призначення для виробів машинобудування та енергетики, отже вимушені прикладати багато зусиль для підтримки виробництва достатньої номенклатури металопродукції подвійного призначення, необхідної для забезпечення обороноздатності країни. Актуальність проблеми, головним чином, пов'язана зі зменшенням виробництва феросплавів, а в деяких випадках унеможливленням їх виробництва у зв'язку з руйнуванням профільних підприємств.

Технічне рішення, яке розглядається в статті, полягає у необхідності розробки та впровадження у виробництво економнолегованих спеціальних сталей як заміників традиційних високолегованих сталей. Розв'язанням цього завдання може бути розробка хімічного складу, технології виробництва необхідного сортаменту листових економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів. В практичній площині вирішувалось завдання по створенню листового металопрокату, призначеного для виготовлення складних елементів камер згорання топочних печей, газоходів, де температура досягає 800 °C в середовищі продуктів згорання твердих, рідких та газоподібних палив, а технології виготовлення їх передбачають застосування формозмінювальних операцій та зварювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При підготовці матеріалів для даної публікації були опрацьовані різні підходи до визначення можливості виробництва металопрокату з економнолегованих спеціальних сталей, які могли б бути заміниками високолегованих марок сталей, призначених для виробів, що працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ.

Слід зауважити, що на підприємствах металургійної галузі питанням створення економнолегованих металевих матеріалів приділялось недостатньо уваги, що було обумовлено доступністю матеріальних ресурсів.

Економічні умови пострадянського періоду, здороження та дефіцитність легувальних елементів, розвиток ресурсозберігаючих технологій визначили потребу створення економнолегованих сталей, листовий прокат з яких був би здатним до формоутворення методами штампування та витягування, мав би достатній рівень жаростійкості і корозійної стійкості, а за структурою був би однофазним.

В той же час в зарубіжній практиці були розроблені сталі з низьким сумарним вмістом вуглецю та азоту (0,025...0,035 %), додатково леговані кремнієм і титаном типу AISI-316, YUS-409D, AISI-409, DIN WNR 4512, що дозволило істотно знизити вміст хрому до 10...12 % за збереження рівня жаростійких та корозійностійких властивостей [1].

Дослідження в цьому напрямку були цікаві науковій спільноті на протязі останніх десятиріч, що було пов'язано з економічною кризою наприкінці двадцятого сторіччя. Суттєві результати були отримані науковцями Національного університету «Запорізька політехніка» (Запорізького національного технічного університету) сумісно з фахівцями металургійних підприємств «Дніпроспецсталь» та «Запоріжсталь». Основні результати були опубліковані в наукових звітах держбюджетних договорів та госпдоговорів з даними підприємствами, а також у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України та дисертаціях співробітників НУ «Запорізька політехніка».

Наукові дослідження на початковому етапі полягали у визначенні впливу кремнію та алюмінію на структуру та властивості залізохромистого сплаву з 7...13 % хрому. Показана принципова можливість стримання $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворення при легуванні такого сплаву кремнієм та алюмінієм в межах 1,0...2,25 % та 1,0...1,5 % відповідно. Для зменшення

аустенітоутворюючого впливу вуглецю, вміст якого може бути в межах до 1 %, передбачалося використання титану в межах 1 %. При такому його вмісті частина титану утворює карбонітридні фази, а інша частина, розчиняючись у твердому розчині, збільшує кількість феритоутворюючих елементів [1]. На це технічне рішення було отримано авторське свідоцтво на феритну жаростійку сталь 08X8CЮТч [2].

Практичне апробування результатів розробки здійснено під час виготовлення гарячекатаного та холоднокатаного листового металопрокату та електрозварних труб. На цьому етапі були виготовлені дослідно-промислові партії виробів для систем газовипуску засобів транспорту та їх випробування. Отримані позитивні результати, які підтверджуються відповідними актами впровадження як від виробника листового металопрокату, так і від підприємств-виробників кінцевої продукції. В процесі подальших досліджень дослідницький колектив прийшов до висновку про можливість розширення марочного складу економнолегованих жаростійких сталей, феритного класу, легованих хромом, алюмінієм та кремнієм, шляхом додаткового легування їх у невеликій кількості іншими елементами для отримання нових якостей та розширення галузей застосування.

Запропоновано знизити вміст вуглецю до 0,03 %, що стало можливим при впровадженні новітніх технологій виплавлення легованих сталей. Це дало змогу не використовувати титан, але зберегти феритну структуру. Сталь із вмістом 0,28 % C, 8,0 % Cr, 1,19 %, Si та 0,61 % Al прогнозовано отримала однофазну феритну структуру, навіть при відсутності у її складі титану, що дало змогу підвищити пластичність холоднокатаного прокату, який став більш придатним до операцій штампування та витягування, а також більш технологічним при зварюванні електрозварних труб та інших елементів газопроводів. Технічне рішення захищене патентом на корисну модель (сталь марки 03X8CЮ) [3].

Для вирішення завдання виготовлення елементів облицювання камер згорання топочних печей, де основною вимогою є достатній рівень жароміцності гарячекатаного прокату, було розроблено економнолеговану жаростійку сталь, особливостями якої є легування залізо-хромистої матриці при вмісті хрому 7...13 %, кремнієм та алюмінієм (0,8...1,5 % та 0,5...0,9 % відповідно), з додатковим легуванням вольфрамом, ванадієм, молібденом, ніобієм. Досліджено вплив додаткових легувальних елементів (W, V, Mo, Nb) для підвищення жароміцності економнолегованої жаростійкої дослідної сталі та визначенні границі їх вмісту: по вольфраму – 0,5...0,8 %, по ванадію – 0,6...0,9 %, по молібдену – 1,0...1,5 %, по ніобію – 0,5...0,8 %.

Роль додаткових легувальних елементів полягає в підсиленні міжатомних зв'язків у фериті, що збільшує пружний модуль зсуву. Це забезпечить збереження форми виробів при їх експлуатації в умовах підвищених температур. Крім цього дані елементи є ефективними феритоутворювачами. Отримана жаростійка сталь, яка містить: 0,03 % C, 8,0 % Cr, 1,2 % Si, 0,6 % Al, 0,65 % W, 0,75 % V, 1,0 % Mo, 0,65 % Nb. Це технічне рішення було також захищено патентом на корисну модель (сталь марки 03X8CЮВМБФ) [4].

Мета роботи. Пошук альтернативних шляхів заміни високолегованих сталей спеціального призначення шляхом розробки економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів для застосування в енергетичному обладнанні.

Для досягнення цілі необхідно вирішити наступні завдання:

- вибрати область легування сталі з метою одержання бажаної структури;
- встановити кількісне співвідношення легувальних елементів, що забезпечує отримання сталі з оптимальним поєднанням експлуатаційних і технологічних властивостей;
- розробити хімічний склад економнолегованої жаростійкої сталі;
- апробувати технологічність сталі при виробництві холоднокатаного листа та виготовленні з нього виробів;

– дослідити найважливіші експлуатаційні властивості сталі – жаростійкість і корозійну стійкість.

Виклад основного матеріалу. *Методи дослідження.* В роботі застосовано ряд досліджень, які дозволили у повній мірі визначити структурний стан досліджуваних сталей, значення механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей.

Було визначено ряд легувальних елементів, які входять до складу дослідницьких сталей, як додаткові, з метою розширення галузей використання отриманого металопрокату. Для визначення раціональних схем легування були створені лінійні плани експериментів, згідно яких були отримані плавки з різним вмістом легувальних елементів з урахуванням трьох факторів впливу.

Виплавку дослідних сталей проводили у вакуумно-індукційній електропечі. В подальшому зливки піддавали механічній обробці для видалення ливарної корки з поверхні та кування. Кування здійснювали за шість нагрівань. Видалення окалини теж здійснювали механічними засобами. Смуги розрізали на зразки розміри яких відповідали вимогам проведення подальших досліджень.

Дослідження мікроструктури проводили металографічним методом.

Механічні властивості зразків дослідних сталей після гарячого та холодного деформування та різних режимів рекристалізації визначали у відповідності із [5]. Випробування механічних властивостей зразків проводили на серво-гідравлічній машині фірми «Instron» моделі 8801. Визначали такі механічні характеристики: границя міцності, границя плинності, відносне подовження (звуження).

Порівняльні випробування жаростійкості проводили на зразках із економнолегованих дослідних сталей 08Х8СЮТч (база порівняння), 03Х8СЮ та 03Х8СЮВМБФ в умовах, близьких до експлуатаційних для елементів камер згоряння та систем газовідведення - температура випробування 700° С; тривалість випробування – 100 год.

При обробці отриманих результатів використовували метод розрахунку результатів за величиною привіску з отриманням приросту маси на одиницю площі (формула 1):

$$q = \frac{m_1 - m_0}{S}, \quad (1)$$

де q – приріст маси на одиницю площі, г/см²;
 m_1, m_0 – маси зразка до та після випробувань, г;
 S – площа поверхні зразка, см².

Показники корозії та корозійної стійкості зразків визначали в умовах близьких до експлуатаційних для глушників шуму автомобілів та тракторів з урахуванням хімічного складу та структури сталі згідно методики ГОСТ 9.908-85.

Ступінь ураження поверхні зразка корозією визначали за формулою 2:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \cdot 100, \quad (2)$$

де S_i – площа i -ї зони, м²;
 n – кількість зон.

Вибір раціональних схем легування для нових економнолегованих жаростійких сталей різного призначення.

Для визначення хімічного складу дослідницьких жаростійких сталей було розроблено математичний план ПФЕ (2³) з варіюванням основних легувальних елементів. Факторами варіювання були Cr, Si і Al.

Отримана жаростійка сталь однієї з дослідних плавок, яка містить: 0,03 % C, 8,0% Cr, 1,2% Si, 0,6% Al, 0,65% W, 0,75% V, 1,0% Mo, 0,65% Nb мала феритну структуру.

Результати досліджень мікроструктури зразків дослідних сталей в гаряче- та холоднодеформованому стані

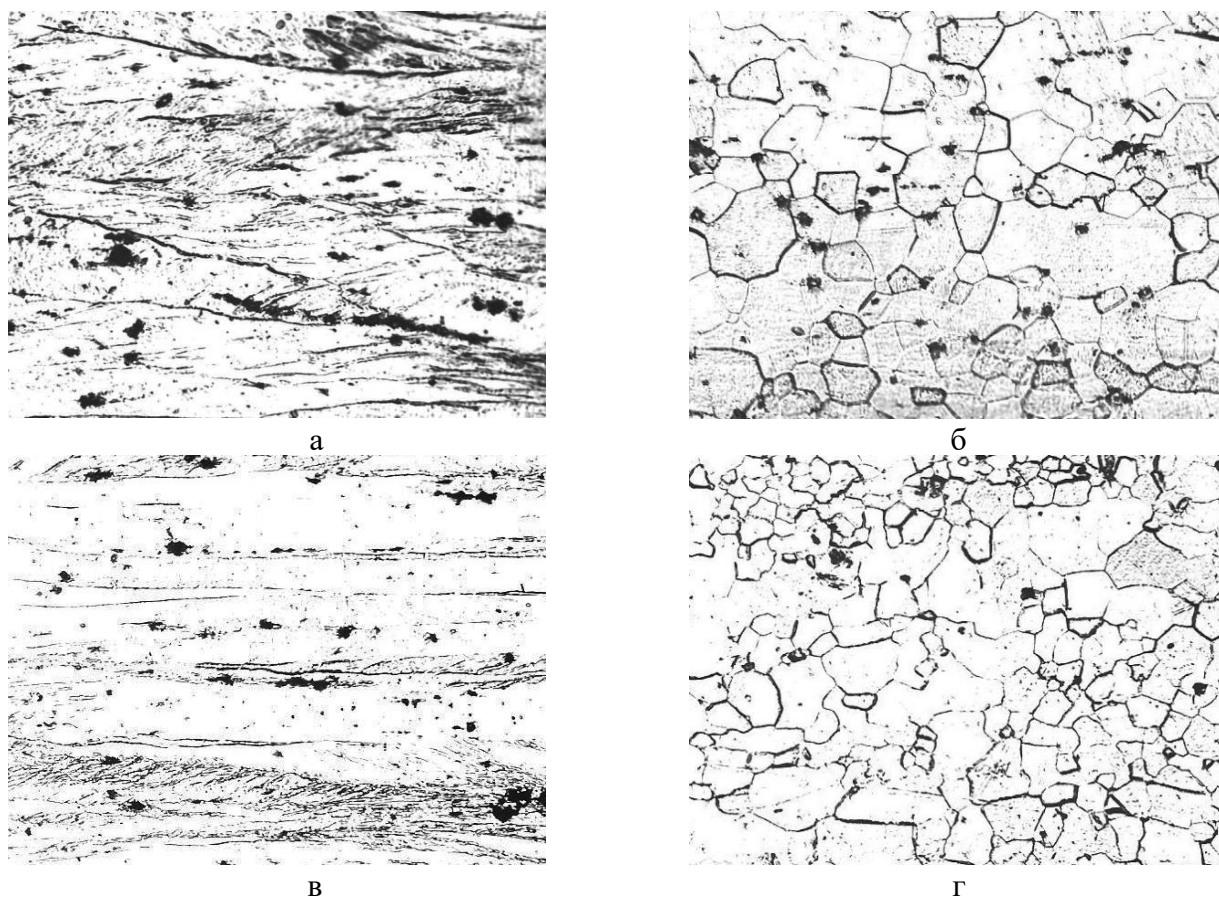
Дослідження структури зразків з дослідної сталі 03X8CЮ при переробці зливків на гарячедеформовані та холоднодеформовані смуги показало, що на усіх етапах зберігається структура фериту. Так, після гарячого кування зливків у структурі металу спостерігаються сліди смугастості (рис. 1, а).

Для поліпшення структури деформованого металу проводили рекристалізацію при температурі 950...970 °С. Волокнистість структури зникала і зерна фериту набували рівноосну форму з розміром зерен 4-5 балу (рис. 1,б). Холодну прокатку проводили з обтисненням близько 70%, при цьому структура знову набувала волокнисту будову (рис. 1,в). Формування кінцевої структури відбувалося у ході рекристалізації з температур 970...990 °С з охолодженням під водяним душем. По завершенню первинної рекристалізації зерна знову набували рівноосну форму з розвиненими границями. Розмір зерна зменшувався до 7-8 бала (рис. 1,г). Вважається, що листовий матеріал, який має таку форму і розмір зерен, найбільш придатний для отримання деталей методом штампування-витягування.

Дослідження мікроструктури дослідної сталі 03X8CЮВМБФ показало, що сталь має феритну структуру. Отримані зливки переробляли на гарячекатані сутунки методом вільного кування при ступені деформації близько 88 %. Мікроструктура гарячедеформованої сутунки представлена на рисунку 2,а. Сталь має однорідну структуру з витягнутими зернами фериту 3-4 балу.

З огляду на відсутність фазових перетворень та достатньо велику ступінь деформації та температуру кінця кування (780 °С) процес рекристалізації починається вже при температурі 870 °С. В подальшому при збільшенні температури рекристалізації зникає смугастість структури з невеликою різницею у розмірі зерен. При температурі рекристалізації 950-970 °С зерна набувають рівноосну форму з балом зерен 5-6 (рис. 2, б).

Результати випробувань механічних властивостей дослідних сталей з холоднокатаних смуг. Гаряче деформування зливків з дослідної сталі 03X8CЮ з температури 1050...1100 °С не спричиняло будь-яких складнощів. При наявності кремнію та алюмінію – легувальних елементів, які зміцнюють твердий розчин фериту – тріщин аж до кінця деформування (870 °С) не було виявлено. В результаті отримували штаби товщиною 5-6 мм, які піддавали рекристалізації при температурі 950...970 °С, де було усунення смугастості структури, що позитивно вплинуло на спорідненість значень механічних властивостей як впродовж, так і впоперек напрямку деформації.



а – гарячекатані смуги без термообробки; б – гарячекатані смуги після рекристалізації при 960 °С; в – холоднокатані нагартвані смуги; г – холоднокатані рекристалізовані смуги (980 °С)

Рисунок 1 – Типова структура дослідних зразків зі сталі 03X8CЮ на усіх етапах переробу, × 100



а – нагартований стан; б – рекристалізація при 950 °С

Рисунок 2 – Мікроструктури гарячекатаних дослідних зразків зі сталі 03X8CЮВМБФ у нагартваному та рекристалізованому стані; × 100

Механічні властивості металу у гарячекатаному стані є такими: $\sigma_T^{0,2} = 300$ МПа; $\sigma_B = 535$ МПа; $\delta_5 = 28$ %; НВ 388.

Підготовлені штаби піддавали холодній прокатці на смуги за 15-20 проходів на двовалковому стані до товщини 1,5...2,0 мм. Після холодної прокатки проводилась рекристалізація при температурі 950...970 С.

Механічні властивості холоднокатаного листа дослідної сталі є такими: $\sigma_T^{0,2} = 182$ МПа; $\sigma_B = 308$ МПа; $\delta_5 = 28$ %; НВ 235; $\sigma_T/\sigma_B = 0,59$. Значення механічних властивостей холоднокатаного листа з дослідної сталі свідчили про можливість отримання виробів шляхом штампування та витягування.

Для сталі 03Х8СЮВМБФ рекристалізація при температурах 870...950 °С з різним ступенем деформації позитивно впливає на отримання оптимальної феритної структури з розвиненими зернограничними зонами. Вплив додаткових легувальних елементів, таких як ванадій та ніобій, полягає у дисперсійному зміцненні частками термостійких інтерметалевих фаз, які стримують рух дислокацій, а легування вольфрамом і молібденом забезпечує необхідний рівень твердорозчинного зміцнення за рахунок локального викривлення кристалічної ґратки, тобто підвищення внутрішнього тертя.

Результати випробувань механічних властивостей сталі 03Х8СЮВМБФ у гарячедеформованому та рекристалізованому стані є такими: $\sigma_T^{0,2} = 203,3$ МПа; $\sigma_B = 522$ МПа; $\delta_5 = 22$ %; НВ 207.

Результати дослідження жаростійкості дослідних сталей в окислювальному середовищі. Температурні і часові параметри випробувань та кількісні показники жаростійкості, представлені у табл.1

Таблиця 1 – Характеристики жаростійкості дослідної сталі

Марка сталі	Жаростійкість, q , г/см ²
08Х8СЮТч	$8,21 \cdot 10^{-4}$
03Х8СЮ	$2,9 \cdot 10^{-4}$
03Х8СЮВМБФ	$3,06 \cdot 10^{-3}$

Результати досліджень свідчать про те, що сталь 03Х8СЮВМБФ та сталі 08Х8СЮТч і 03Х8СЮ мають достатній рівень жаростійкості притаманний більшості високолегованих корозійностійких сталей. Зважаючи на вміст легувальних елементів, які найбільш впливають на жаростійкість, але окрихчують твердий розчин – кремнію та алюмінію, вміст їх в сталі 03Х8СЮВМБФ знижено (з 1,0...2,25 % до 1,0...1,5 % та з 1,0...1,5 % до 0,6...0,9 % відповідно). Це і обумовило нижчі показники жаростійкості порівняно зі сталями 08Х8СЮТч і 03Х8СЮ. Однак отриманий рівень жаростійкості дозволяє використовувати ці матеріали для виготовлення виробів, які придатні працювати в умовах агресивних середовищ при температурах 700 °С довготривало та до 1000 °С короткочасно.

Аналіз результатів порівняльних випробувань стійкості до атмосферної корозії в умовах міського середовища та прискорених випробувань в камері сольового туману зразків сталі 03Х8СЮ. Визначили, що корозійні ушкодження на зразках після випробувань у міському середовищі, після експозиції 30000 год. виражені не явно (площа корозійних пошкоджень на зразках складає 15 %), при прискорених випробуваннях у камері сольового туману після експозиції 100 год, у зв'язку з набагато більшою агресивністю середовища, площа корозійних пошкоджень на зразках складає 80 % (рис. 3). Таким чином, розроблена дослідна сталь має достатній рівень корозійної стійкості, який є притаманним економнолегованим жаростійким сталям імпортного виробництва.



а – випробування у міському середовищі; б – прискорені випробування у камері сольового туману

Рисунок 3 – Корозійні ушкодження на зразках із дослідної сталі 03X8CЮ

Визначення рівня жароміцності дослідної сталі 03X8CЮВМБФ. За результатами досліджень встановлено, що найбільший внесок у підвищення показників жароміцності мають вольфрам та молібден. При цьому підвищення жароміцності не призводить до погіршення жаростійкості. Зразки з дослідної сталі випробували на руйнування при статичному навантаженні 100 МПа та температурі 600 °С, при витримці 100 год руйнування зразків не сталося.

Аналіз впливу додаткових легувальних елементів на експлуатаційні властивості сталі та результати випробувань дають підстави рекомендувати даний матеріал у гарячекатаному стані товщиною 6-8 мм для облицювання камер згорання теплогенеруючого обладнання.

ВИСНОВКИ

Таким чином, результати наукових досліджень здатні внести певний вклад у вирішення проблеми відновлення теплової електрогенерації України. Виготовлення холоднокатаного та гарячекатаного металопрокату розроблених економнолегованих жаростійких сталей дозволить використовувати вітчизняні промислові потужності та технології на підприємствах металургійної галузі, зменшити витрати на відновлення елементів енергетичного обладнання, які працюють в умовах підвищених температур та агресивних середовищ.

Список використаних джерел

1. Нестеров О.В. Дослідження та розробка економнолегованої ферритної жаростійкої сталі для системи вихлопного тракту автомобілів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01. Запоріжжя, 2000. 31 с.
2. Феритна жаростійка сталь: пат. 15168 Україна: МПК C22C 38/18, № u200512448; заявл. 23.12.2005; опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6, 3 с.
3. Феритна жаростійка сталь: пат. 94450 Україна: МПК C22C 38/18, заявл. 11.06.2014; опубл. 10.11.2014, Бюл. № 21, 4 с.
4. Жаростійка феритна сталь: пат. 61987 Україна: МПК C22C 38/18, № u201015817; заявл. 27.12.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15, 4 с.
5. ДСТУ EN ISO 6892-1:2022 Металеві матеріали. Випробування на розтягування. Частина 1. Метод випробування за кімнатної температури (EN ISO 6892-1:2019, IDT; ISO 6892-1:2019, IDT) [На заміну ДСТУ EN 10002-1:2006, ДСТУ 4131-2002, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 11701-84, ГОСТ 10006-80; чинний від 2023-12-31]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

ALTERNATIVE WAYS TO REPLACE HIGH-ALLOY SPECIAL-PURPOSE STEELS

The study is dedicated to finding for alternative ways to replace high-alloy special-purpose steels by developing economical alloyed steels, the structure and properties of which would ensure the manufacture and long-term operation of a wide range of products for use in energy equipment. The structure, mechanical and operational properties of economically alloyed heat-resistant steels 03X8SYU, 03X8SYUVMB were studied, in comparison with the previously developed steel 08X8SYUTch. The possibility of obtaining additional technological and operational qualities such as improved stamping and drawing ability, heat resistance due to the use of tungsten and molybdenum as additional alloying elements was determined. The optimal ratio of mechanical properties and a sufficient level of heat resistance of products in aggressive environments at elevated temperatures and corrosion resistance in atmospheric conditions were confirmed, and the use of additional alloying makes it possible to expand the functional purpose of these steels. Theoretically, the removal of titanium from the composition of the experimental steel is justified in order to improve the surface condition of the sheet material while maintaining the ferritic structure. The required level of ferritization of this material is associated with the influence of a low carbon content together with a balanced (in terms of quantity) content of chromium, aluminum and silicon as effective ferrite formers, as well as tungsten and molybdenum, which positively affect the level of heat resistance. The results of scientific research on the use of economically alloyed steels have been developed, the chemical composition of which does not require the use of acutely scarce and expensive alloying elements, and the resulting range of hot-rolled and cold-rolled steels allows replacing high-alloyed special-purpose steels in the manufacture of energy equipment products, in particular, lining elements of combustion chambers, pipes and other elements where shape-changing operations and welding are used.

Keywords: Power equipment, low-alloy steels, alloying elements, ferritic structure, heat resistance, heat resistance.

Стаття надійшла 08.12.2025 р.

Новини України та світу

НОВА ВИРОБНИЧА І РЕМОНТНА КОМПАНІЯ В ЗАПОРІЖЖІ І КРИВОМУ РОЗІ: ЩО ВІДОМО ПРО «МЕТІНВЕСТ МАШИНЕРІ»

«Метінвест» завершив об'єднання своїх ремонтних підприємств у Запоріжжі, Кривому Розі та Кам'янському в одну структуру – «Метінвест Машинері». Нове підприємство офіційно запрацювало з 1 грудня 2025 року. Запуск єдиної структури дав змогу зберегти зайнятість близько трьох тисяч працівників під час і після війни.

Про це повідомили у пресслужбі «Метінвесту».

Навіщо «Метінвест» створив окрему виробничу і ремонтну компанію «Метінвест Машинері».

Ремонтні підприємства «Метінвесту» в Запоріжжі, Кривому Розі та Кам'янському з 2023 року у своїх виробничих та адміністративних процесах були поєднані із Запорізьким ливарно-механічним заводом (ЗЛМЗ). З 1 грудня 2025-го ці активи офіційно працюють як



єдине підприємство під назвою «Метінвест Машинері».

Фундаментом нової структури став ЗЛМЗ – підприємство, створене у 2016 році на базі механічного, ливарного та цеху металоконструкцій «Запоріжсталі». У 2023-му воно розширилося після приєднання Криворізького ремонтно-механічного заводу.

Усі команди ремонтних підприємств працюватимуть у новій компанії без змін у зарплатах, системі мотивації та соціальних гарантіях, зазначили у «Метінвесті».

Профіль роботи також лишається тим самим. «Метінвест Машинері» спеціалізуватиметься на ремонті промислового обладнання, виготовленні запчастин та металоконструкцій, механообробці і сервісному супроводі для підприємств галузі. Підрозділи у трьох містах дозволять швидше виконувати замовлення як для металургійних комбінатів групи, так і для зовнішніх клієнтів, йдеться у релізі.

Нагадаємо, українські металургійні компанії Interpipe та «Метінвест» планують суттєво наростити виплавку сталі у 2026 році. Через це зросте потреба в металобрухті, дефіцит якого вже фіксується на внутрішньому ринку.

Генеральний директор «Метінвест-Ресурс» Іван Ковалевський повідомив, що компанія працює в запланованому режимі і готується збільшити обсяги виробництва сталі на 300-500 тисяч тон у 2026 році.

<https://thepage.ua/ua/news/metinvest-obyednav-remontni-pidpriyemstva-sho-vidomo-pro-metinvest-mashineri>

МЕТАЛУРГІЙНИЙ ХОЛДІНГ ВІДНОВИТЬ ВИПЛАВКУ СТАЛІ В ДНІПРІ

Металургійні компанії Interpipe та "Метінвест" планують збільшити випуск сталі у 2026 році у порівнянні із 2025 роком. Це зумовить збільшення споживання металобрухту, дефіцит якого й так спостерігається на внутрішньому ринку.

Про це повідомляє РБК-Україна з посиланням на інформацію топ-менеджерів компаній, представлену під час конференції Української асоціації вторинних металів ("УАВтормет"), яка відбулася 28 листопада.

Плани компанії Interpipe

Компанія Interpipe планує відновити виплавку сталі на заводі "Інтерпайп Сталь" в кінці грудня після вимушеної, аварійної, тимчасової зупинки підприємства та збільшити обсяги виплавки у наступному році. "В планах компанії – до кінця року ми повинні мати сталь", - сказав голова правління "Інтерпайп Дніпровтормет" Валентин Макаренко.

Доволі значні обсяги сталі, які було заплановано виробити у цьому році, будуть перенесені у плани наступного року. Це вимагатиме постачання додаткового ресурсу металобрухту на завод "Інтерпайп Сталь".

"Порівняно з попередньою програмою, наші плани на 2026 рік будуть ще збільшені щодо споживання і потреби в металобрухті", - сказав Макаренко.

Виробнича програма "Метінвесту"

Присутній на заході генеральний директор компанії "Метінвест-Ресурс", яка відповідає за забезпечення брухтом підприємств групи "Метінвест", Іван Ковалевський сказав, що компанія опрацьовує у запланованому форматі, навіть зі збільшенням обсягу виплавки – на 300-500 тисяч тон у 2026 році. "Споживання (брухту - ред.) у нас планує зростати", - додав Ковалевський.

Дефіцит брухту на внутрішньому ринку

Обидва спікери підкреслили, що на сьогодні на внутрішньому ринку спостерігається дефіцит брухту, який необхідний сталеплавильним підприємствам для виконання планів щодо збільшення виплавки сталі.

Спируючись на статистику "УАВтормет", Валентин Макаренко сказав, що хоча компанія Interpipe знизила використання металобрухту у цьому році, навіть за таких умов загальне споживання металобрухту по країні зросло на 100 тисяч тон за 10 місяців цього року у порівнянні із січнем-жовтнем попереднього року.

"Якби Interpipe працював на повну силу, то було б не плюс 100 тисяч тон за ці періоди до минулого року (а набагато більше - ред.)", - додав Макаренко. Брухтозаготівельним компаніям було б складно забезпечити ринок такими великими обсягами.

Ковалевський навів інший доказ дефіциту брухту на внутрішньому ринку - брухтозаготівельні компанії не повністю виконують плани перед "Метінвестом" по кількості відвантаженого брухту, відповідно до вже укладених договорів.

"Невиконання планів від всіх компаній (брухтозаготівельників - ред.) – 89 тисяч тон. Якщо у нас такий "профіцит", чому вони щомісяця недовиконують свої зобов'язання, які беруть на себе?" - додав Ковалевський.

Статистика ринку металобрухту

За січень-жовтень 2025 року заготівля металобрухту в Україні становила 1,7 млн тон, що на 16% більше показника минулого року, свідчать дані асоціації "УАВтомет". При цьому, споживання брухту металургійними підприємствами склало майже 1,3 млн тон.

Обсяг експорту за 10 місяців цього року становив 345,2 тисяч тон. У порівнянні до аналогічного періоду минулого року експорт металобрухту виріс у 1,5 рази. При цьому, виробництво сталі скоротилося на 5% – до 6,1 млн тон.

Нагадаймо, за 9 місяців 2025 року експорт брухту чорних металів зріс на 54% – до 311,8 тисяч тон, що є більшим показником за весь 2024 рік.

12 листопада на сайті "Урядовий портал" був опублікований проект постанови Кабміну про квоти на експорт-імпорт товарів у 2026 році. Для експорту групи 7204 (брухт чорних металів) пропонується встановити квоту на нульовому рівні.

Коментуючи проект урядової постанови, голова профільної асоціації "Укрметалургпром" Олександр Каленков, сказав, що обсяги експорт брухту вже давно набули характеру економічної загрози, адже це створює ризики для роботи сталеплавильних заводів. Зокрема, український брухт постачається на заводи Індії та Туреччини, які є одними із найбільших покупців російських енергоносіїв. Каленков додав, що експорт брухту – це найпримітивніша модель економіки, адже продаж за кордон готової сталевих продукції дає у 8-10 разів більше надходжень в економіку, ніж експорт брухту.

<https://www.rbc.ua/rus/news/rosiya-vzhe-zavtra-zapuskae-prodazh-obligatsiy-1764578490.html>

ІНДУСТРІАЛЬНІ ПАРКИ ЗРОСТАЮТЬЯК ГРИБИ: ЩО ЦЕ ОЗНАЧАЄ ДЛЯ ЕКОНОМІКИ

В Україні вже 104 індустриальних парки (ІП) працюють або готуються приймати інвесторів. Потенційно вони можуть щороку приносити державному бюджету близько 39,3 млрд грн, залучати 152,9 млрд грн інвестицій і створювати 152 тисячі робочих місць. Про це свідчить аналітичне дослідження девелоперської компанії Alterra Group.



2024 рік став переломним: було зареєстровано рекордні 31 новий індустриальний парк. Загалом із 2014 по 2025 роки створено 120, але 15 з них уже втратили статус через неактивність. Та навіть із цими втратами темп залишається вражаючим — держава фактично закладає нову інфраструктурну основу для розвитку виробництва.

В яких регіонах найбільше індустриальних парків у 2025 році

Найбільше цих майданчиків зосереджено у: Львівській області — 17 парків (486 га), Київській області — 13 парків (423 га), Закарпатській області — 12 парків (313 га).

Рейтинг регіонів за обсягом очікуваних інвестицій в індустриальні парки

Лідери за обсягом очікуваних інвестицій виглядають так:

Київська область — 32,5 млрд грн

Львівська область — 27,9 млрд грн

Рівненська область — 15,7 млрд грн

Закарпатська область — 13,3 млрд грн

В яких регіонах найбільше очікуваних робочих місць в ІП

За кількістю майбутніх робочих місць перші позиції утримують:

Львівська область — 33,8 тис. працівників,

Закарпатська область — 19,2 тис. працівників,

Київська область — 18,8 тис. працівників.

Які переваги бізнесу надають індустриальні парки в Україні

Аналітики наголошують, що індустриальні парки стають реальним двигуном регіональної економіки. Вони дають змогу бізнесу скористатися податковими стимулами: звільненням від податку на прибуток на 10 років, а також від ПДВ і мита при імпорті

обладнання. Це створює сприятливі умови для виробників, які прагнуть знизити витрати та вийти на нові ринки.

«Індустріальні парки формують екосистему, де виробники можуть не лише зменшити операційні витрати, а й отримати доступ до нових технологій, інвестицій і партнерств», — зазначив Олексій Шестак, менеджер з управління комерційною нерухомістю Alterra Group.

Дослідження базується на даних державного Реєстру індустріальних парків станом на 30 вересня 2025 року. Розрахунки показників здійснені з урахуванням середнього рівня зайнятості, зарплат і операційної активності резидентів.

Раніше ми писали, що на Тернопільщині будують індустріальний парк «БІО-ЛАН» для біоетанольного та біогазового виробництва із запланованими €110 млн інвестицій. Очікується, що проєкт має забезпечити 200 робочих місць та 7 млн грн надходжень до місцевого бюджету щороку.

Функціональне призначення індустріального парку «БІО-ЛАН» — переробна промисловість, а саме біоетанольне та біогазове виробництво.

<https://thepage.ua/ua/news/industrialni-parki-prinosyat-milyardi-ta-tisyachi-robochih-misc>

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. **Інформаційні технології.**
6. **Ремонт та відновлення деталей машин.**
7. **Матеріалознавство.**
8. **Транспортні технології.**
9. **Енергетичні системи та обладнання.**
10. **Економіка та управління підприємствами.**
11. **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 під малюнками 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, ст. доцент кафедри Зварювання та споріднені технології, **Зусін Антон Михайлович.**

E-mail: zusin_a_m@pstu.edu Тел. +38(097)477-54-93.

Підписано до друку 25.12.2025 р.
Папір тип №2. Умов. друк. ар. 10,69. Тираж 400. Формат 60х84 1/8.
Замовлення №110. Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу.
Ціна договірна.