

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 28**

**Дніпро**

**2024**

Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 28 / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2024. – 117 с.

## 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

**Блоконь 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. завідуючого кафедрою систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, h-індекс: 2

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

**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

**Грибов 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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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:* 87500, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, ДВНЗ «ПДТУ», каф. «Будівництва, технічної експлуатації і реконструкції». Тел. (0629) 44-66-23, 44-66-73. 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 24.09.2020 № 1188). Друкується згідно рішення Вченої Ради ДВНЗ «ПДТУ» (протокол № 5 від 26.12.2024 р.). Видається 2 рази на рік.

© Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), 2024

## ЗМІСТ

### **Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В.**

Складові методу визначення раціонального кінематичного режиму в осередку пластичного деформування металу у холодної прокатці труб валками..... 6

### **Григоренко В.У., Куцевол С.В.**

До розвитку методу визначення змінних параметрів зубчатої пари шестерня - рейка станів холодної прокатки труб для забезпечення природного процесу прокатки... 12

### **Бакланський В.М., Каргін С.Б.**

Розробка й випробування досліджених шус..... 18

### **Суглобов В.В., Крупко В.Г., Крупко І.В.**

Хвильові пасові та ланцюгові передачі в приводах технологічних машин..... 24

### **Воленко І.В., Щетиніна В.І., Щетинін С.В., Десятський С.П.**

Способи запобігання фреттинг-корозії..... 35

### **Лютова О.В., Капустян О.Є.**

Підвищення ливарних властивостей вторинних силумінів..... 43

### **Білоник Д.І., Грабовський В.Я., Капустян О.Є., Лаврись С.М., Лаптева Г.М., Білоник І.М.**

Структура і механічні властивості вторинного титану електрошлакової виплавки у відкритому кристалізаторі після гарячого кування ..... 54

### **Савонов Ю.М., Капустян О.Є., Парахневич Є.М., Єршов А.В.**

Порівняльна оцінка електродних матеріалів для зварювання хромонікелевих сталей..... 64

### **Зусін А.М.**

Оптимізація складу порошкового дроту шляхом математичного моделювання впливу хімічних елементів на експлуатаційні показники наплавленого металу..... 71

### **Захарова І.В., Студенікін Д.А.**

Вплив процесів термообробки на характеристики зварних з'єднань у виробництві труб задля важливих середовищ..... 79

### **Ануніч А.О., Кіріцева О.В.**

Сталий розвиток автомобільного транспорту: екологічні виклики та рішення..... 86

### **Каращук В.О., Гладченко М.А., Романовська С.В., Клецька О.В., Джус О.В.**

Аналіз аварійності на автомобільному транспорті з метою пошуку можливостей підвищення його безпеки..... 102

### **Монін В. Л., Хлестова О. А., Бурко В. А., Єлістратова Н. Ю.**

Причини та наслідки різьких атипових коливань рівня води в таганрозькій затоці азовського моря..... 112

**Новини України та світу..... 112**

**Вимоги до публікацій..... 115**

## CONTENTS

<b>Hrygorenko V.U., Iskrizhytskyi D.V.</b>	<b>6</b>
Components of the method of determining the rational kinematic mode in the center of plastic deformation of metal in cold rolling of pipes with rolls.....	
<b>Hryhorenko V.U., Kutsevol S.V.</b>	<b>12</b>
To the development of the method for determining the variable parameters of the gear pair - rail of the cold rolling stations of pipes to ensure the natural rolling process.....	
<b>Baklansky V.M., Kargin S.B.</b>	<b>18</b>
Development and testing of the researched shus.....	
<b>Suglobov V.V., Krupko V.G., Krupko I.V.</b>	<b>24</b>
Wave belt and chain gears in drives of technological machines.....	
<b>Volenko I.V., Shchetynina V.I., Shchetynin S.V., Desyatskyi S.P.</b>	<b>35</b>
Methods of fretting-corrosion prevention.....	
<b>Liutova O.V., Kapustian O.Ye.</b>	<b>43</b>
Increasing the foundry properties of secondary silumins.....	
<b>Bilonyk D.I., Grabovskyi V.Ya., Kapustian O.Ye., Lavrys S.M., Lapteva H.M., Bilonyk I.M.</b>	<b>54</b>
Structure and mechanical properties of secondary titanium of electroslag salt in an open crystalliser after hot forging.....	
<b>Savonov Y.M., Kapustian O.Ye., Parahnevich E.M., Ershov A.V.</b>	<b>64</b>
Comparative evaluation of electrode materials for welding chrome-nickel steel.....	
<b>Zusin A.M.</b>	<b>71</b>
Optimization of powder wire composition through mathematical modeling of the influence of chemical elements on the operational properties of the welded metal.....	
<b>Zakharova I.V., Studenikin D.A.</b>	<b>79</b>
The influence of heat treatment processes on the characteristics of welded joints in the production of pipes for critical environments.....	
<b>Anulich A., Kiritseva O.</b>	<b>86</b>
Sustainable development of road transport: environmental challenges and solutions.....	
<b>Karashchuk V. O., Hladchenko M.A., Romanovskaa S.V., Kletska O.V., Dzhus O.V.</b>	<b>92</b>
Analysis of accidents in road transport with the purpose of searching for possibilities to improve its safety.....	
<b>Monin V.L., Khliestova O.A., Burko V.A., Yelistratova N.Yu.</b>	<b>102</b>
Causes and consequences of sharp atypical water level fluctuations in the taganroz bay of the sea of azov.....	
<b>News of Ukraine and the world</b>	<b>112</b>
<b>Requirements for publications</b>	<b>115</b>

Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В.

## СКЛАДОВІ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО КІНЕМАТИЧНОГО РЕЖИМУ В ОСЕРЕДКУ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МЕТАЛУ У ХОЛОДНОЇ ПРОКАТЦІ ТРУБ ВАЛКАМИ

*Холодна прокатка труб валками застосовується у виробництво труб підвищеної якості по показникам точності їх по діаметру та по товщині стінки так і по відповідності мікроструктури та механічних властивостей металу вимогам стандартів та норм.*

*Конструкція станів холодної прокатки середніх та великих діаметрів труб така, що довжині ходу кліті задається примусовий катаючий радіус як правило для декілька сорторозмірів труб. Для забезпечення прокатки труб всього сортаменту стану застосовують декілька ведучих шестерен і прямозубу рейку. Рейку при цьому встановлюють відповідно діаметрові шестерні. Це приводить до того, що різниця між природним катаючим радіусом, що змінюється відповідності до діаметра прокатуємих труб та примусовим катаючим радіусом, що задається конструкцією стана і параметрами ведучої шестерні є значна і такою, що приводить до ковзання поверхні валків по трубі, що деформується в миттєвому осередку деформації. Це приводить до зносу валків і збільшення осьових сил.*

*Потрібно вирішувати проблему забезпечення малої різниці між примусовим катаючим радіусом і природним.*

*В роботі розглядається складові розвинутого методу розрахунку параметрів шестерні та прямозубої рейки, що забезпечують мінімально можливу різницю між примусовим катаючим радіусом і природним для прокатки кожного типорозміру труб.*

*Це дозволяє значно знизити швидкості ковзання між поверхнею валка та трубою в осередку деформування та осьові сили.*

*В свою чергу це виводить обладнання стану та процес прокатки на більш досконалий технічний рівень.*

**Ключові слова:** *холодне пластичне деформування труб, стан холодної прокатки труб, примусовий та природний катаючий радіуси, швидкості ковзання поверхні валка по поверхні металу труби, осьові сили.*

**Постановка проблеми.** Для виробництва труб підвищеної якості як по показникам точності розмірів їх поперечного перетину так і по відповідності мікроструктури та механічних властивостей металу вимогам стандартів та норм широко застосовують стани холодної прокатки труб валками.

Труби деформують валками, що мають рівчак з змінним поперечним профілем по периметру валка на нерухомій оправці конічної чи з криволінійною твірною форми (рис.1).

В діючих станах холодної прокатки труб типу кінематична взаємодія поверхні рівчака валка та поверхні металу труби задається величиною діляльного радіусу ведучої шестерні, що розташована на торцях вісі валків і яка опирається на нерухому зубчасту рейку (рис. 1).

На таких станах можливо прокатувати орієнтовно до 10...15 сорторозмірів труб за діаметром. Тоді для цього потрібно мати таку ж кількість шестерен з різним діляльним радіусом. Це великий парк шестерен. А також потрібен час на заміну шестерен на новий сорторозмір труб. Щоб скоротити кількість шестерен застосовують два – чотири розміри зубчастих коліс, кожний для декількох сорторозмірів труб.

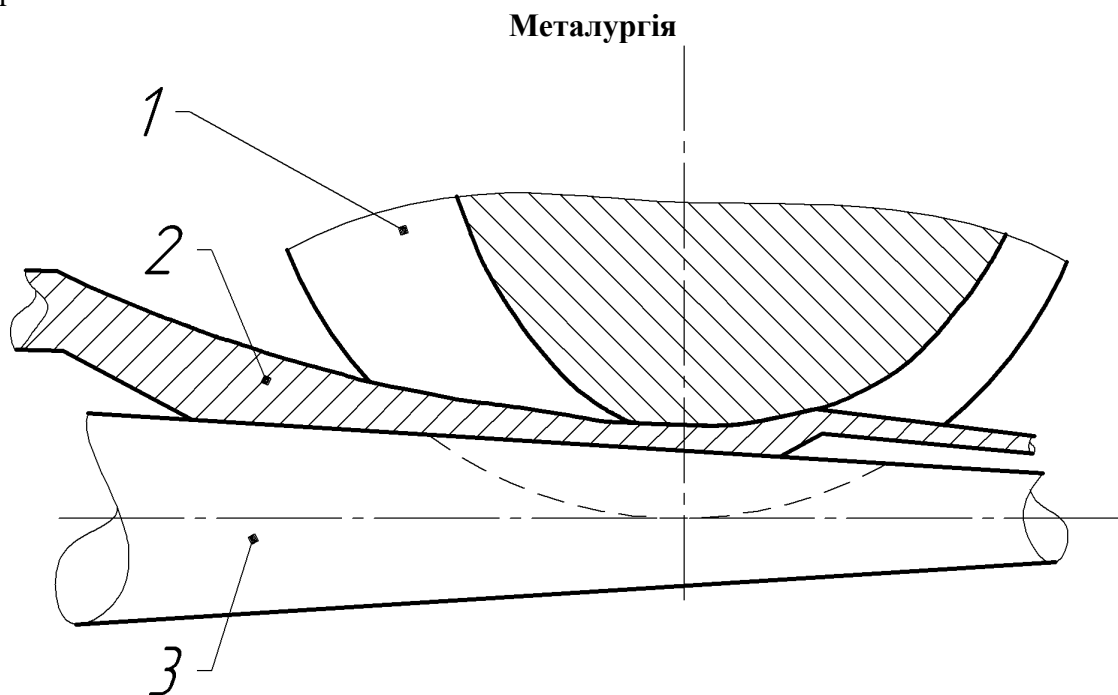


Рисунок 1 – Схема процесу холодної періодичної валкової прокатки на стані типу ХПТ: 1 – валок, 2 – робочий конус деформування, 3 – оправка

Напрямок розвитку процесу холодної прокатки труб і відповідно конструкції станів є модернізація системи ведуча шестерня – нерухома рейка для того щоби для кожного сорторозміру труби заготовки і готової труби мати відповідний радіус ділильного кола.

Це дозволить більш раціонально налаштувати кінематику процесу прокатки і відповідно силову картину навантаження на деталі стану. Також, це дозволить значно зменшити осьові сили, зменшити знос ривчаків валків, поліпшити поверхню труб та збільшити міжремонтний період роботи стану.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світі проблемам розвитку виробництва труб холоднодеформованих приділяють потрібну вагу [1]. Україна є державою де виробляють значні обсяги холоднокатаних труб. Використовують стани типу ХПТ, КРВ, G [2].

Відомі дослідження з визначення значень осьових сил з прокатки труб на [2] показали, що невелика зміна, наприклад, діаметра валка дає значні зміни осьової сили (таблиця 1).

Таблиця 1 Результати розрахунків осьового зусилля у прямому й зворотному ходах під час прокатки труби зі сплаву Gr-2 за маршрутом  $26 \times 1,7 \rightarrow 19,05 \times 0,99$  на стані КРВ-25 [2].

Діаметр бочки валка, мм	Максимальні осьові зусилля при прямому ході, кН*	Максимальні осьові зусилля при зворотному ході, кН*
209	11,5	10,4
210	6,7	7,8
211	<b>5,97</b>	5,2
212	8,8	<b>4,6</b>
213	12,26	5,46

\* модуль

## Металургія

На станах КРВ для прокатки труб малих діаметрів застосовують лише кілька розмірів ведучої шестерні, а для кожного розміру шестерні розраховують і змінюють (переточують) діаметр валків і таким чином створюють раціональні кінематичні умови прокатки за рахунок зменшення величин різниці колових швидкостей поверхні рівчачка валка та зовнішньої поверхні труби [2].

На станах холодної прокатки труб середніх та великих розмірів переточка діаметра валків не має сенсу по причині необхідності в переточуванні величин мас металу валка при зменшенні діаметра валка, наприклад, діаметром до 456 мм. Тому і міняють ведучі шестерні і піднімають чи опускають нерухому рейку відносно станини стана. Це роблять за допомогою встановлення прокладок між рейками та станиною.

**Мета дослідження.** Метою статті є представлення з розвитку методу визначення раціонального кінематичного режиму в осередку пластичного деформування металу у холодній прокатці труб валками. Розвиток методу направлено на зниження різниці між примусовим та природним катаючими радіусами. Це покращить кінематичні умови процесу холодної прокатки труб і приведе до зменшення інтенсивності тертя між поверхнями валків та труб в осередку деформування. Як наслідок зменшиться знос калібрів, знизять осьові сили. результати дослідження можуть бути в пригоді для конструкторів та технологів, що працюють в галузі виробництва обладнання та в галузі виробництва холоднодеформованих труб.

**Основний матеріал дослідження.** Обладнання станів холодної прокатки труб відносять до найбільш складних в обробці металів тиском (рис.2).

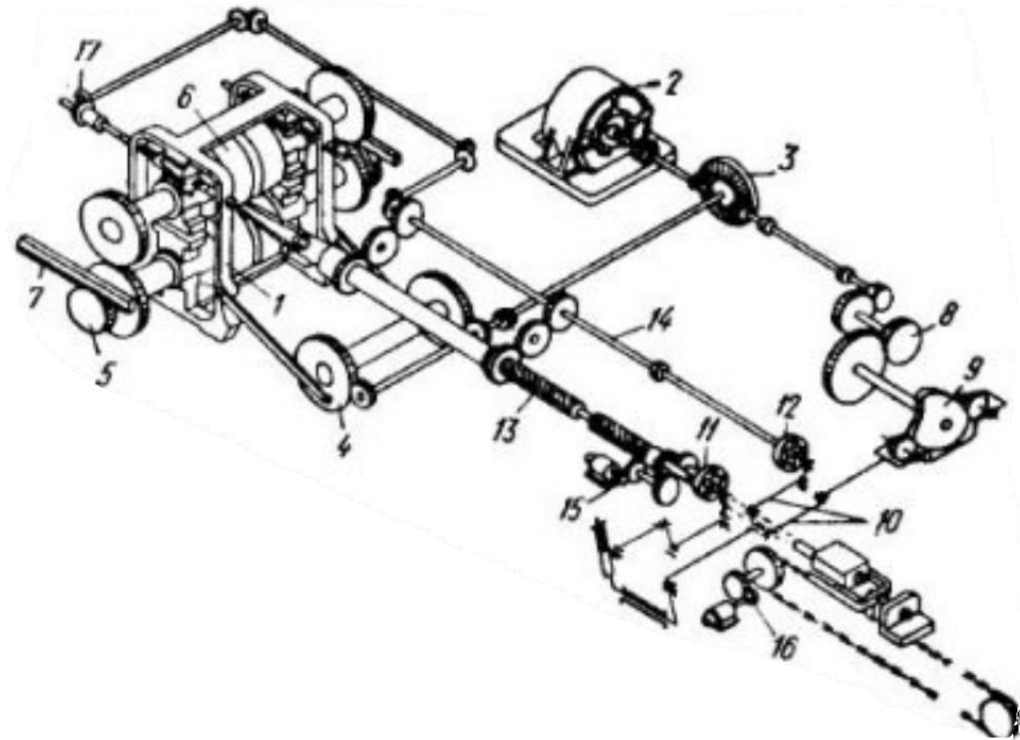


Рисунок 2 – Кінематична схема стану типу ХПТ: 1-робоча кліть;2- головний двигун; 3 – редуктор; 4 - кривошипно-шатунний механізм; 4 - валки; 5- ведуча шестерня; 6 -торці валків; 7- нерухомі шестеренчаті рейки;



## Металургія

Поперечний перетин рівчака валка має форму половини кола. Колова швидкість точок поверхні рівчака по його ширині є змінною. У вершині рівчака валка вона менша ніж біля бочки валка. В процесі холодної прокатки труб застосовують поняття примусовий катаючий радіус, що характеризує кінематику переміщення точок поверхні рівчака валка і природний катаючий радіус, що відповідає в процесі вільної прокатки точці на поверхні рівчака калібру в перетині виходу труби з валка, де горизонтальна швидкість точки поверхні калібру і точки поверхні робочого конусу деформування однакові.

В основному примусовий катаючий радіус приймають рівним середньому арифметичному діаметрів труби - заготовки та прокатої труби чи діаметру робочого конусу деформування, який знаходиться орієнтовно посередині довжини робочого конусу деформування (рис. 3).

Тоді від початку робочого конусу деформування до точки  $i$  положення валка (див. рис.3) ) вся поверхня валка в осередку деформації буде мати швидкість меншу, а від положення  $i$  до кінця робочого конусу деформування більшу ніж потрібна для природного процесу прокатки. Таким чином до  $i$  після точки  $i$  будемо мати протилежне направлення ковзання поверхні валка і поверхні робочого конусу.

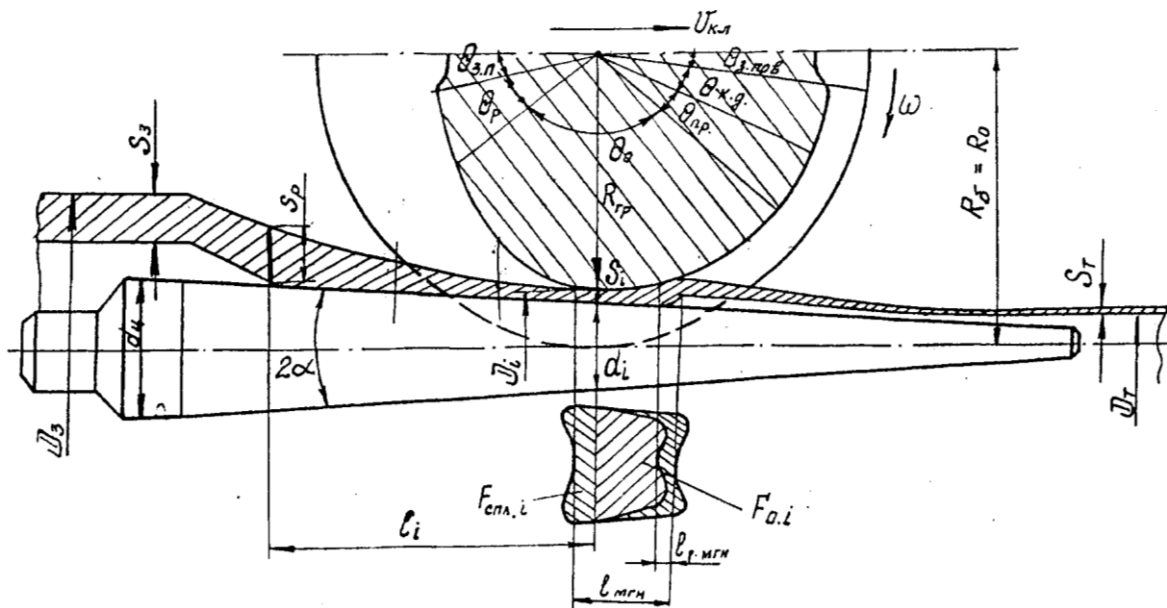


Рисунок 3 – Геометричні параметри (сумарного) робочого конусу деформування та миттєвого осередку деформації [3]:  $\theta_{3.n}$  - зев подачі;  $\theta_p$  - ділянка редукування;  $\theta_o$  - обтисної ділянка;  $\theta_{np}$  - передоздоблювальна ділянка;  $\theta_{к.д}$  - ділянка калібрування діаметра;  $\theta_{з.пов}$  - зев повороту;  $D_3$  - діаметр заготовки;  $d_u$  - діаметр циліндричної частини оправки;  $S_3$  - товщина стінки заготовки;  $S_p$  - товщина стінки в кінці зони редукування;  $2\alpha$  - два кута конусності оправки;  $d_i$  - діаметр робочого конусу у положенні  $i$ ;  $S_i$  - товщина стінки у положенні  $i$ ;  $R_{gp}$  - радіус гребня рівчака валка;  $d_i$  - діаметр оправки в положенні  $i$ ;  $R_b$  - радіус ідеального діаметра валка;  $S_m$  - товщина стінки прокатої труби;  $D_t$  - діаметр прокатої труби;  $F_{o,i}$  - горизонтальна проекція поверхні осередка деформації;  $F_{зпл.i}$  - величина збільшення  $F_{o,i}$  з-за площення валка в положенні  $i$ ;  $l_{мгн}$  - довжина миттєвого осередка деформування;  $l_i$  - довжина міся положення миттєвого осередка деформації від початку зони обтиснення;  $l_{р.мгн}$  - довжина зони редукування в миттєвому осередку деформування.

## Металургія

Інтенсивне ковзання та великі контактні напруження приводять до налипання частин металу на поверхню валків. Далі ці краплини металу руйнують при прокатці поверхню труби. Йде брак. Для запобігання цьому застосовують мідне чи фосфатне покриття труб у разі прокатки труб з вуглецевих марок сталей. Застосовують також змазки з високою вязкістю.

Природний катаючий радіус визначають по наступній залежності (див. рис. 3)

$$R_{npk} = R_o - 0,76D_i/2$$

де,  $R_o$  - ідеальний радіус бочки валка, що дорівнює половині діаметра бочки валка плюс зазор між валками при прокатці;

$D_i$  - діаметр круглого перерізу робочого конусу в положенні  $i$  кліті, що є змінним по довжині робочого конусу

Примусовий катаючий радіус визначається наступним чином

$$R_{primk} = k[R_o + (D_z + D_t)/2] - \text{діаметр прокатої труби};$$

де,  $R_o$  - ідеальний радіус бочки валка, що дорівнює половині діаметра бочки валка плюс зазор між валками при прокатці;

$D_z$  - діаметр заготовки

$D_t$  - діаметр прокатої труби;

$k$  - коефіцієнт, що враховує кривизну гребня рівчака валка.  $k = 0,7-0,8$ .

Максимальний обтиск по діаметру в станах холодної прокатки становить орієнтовно тридцять процентів. Сортамент станів по діаметру, наприклад, стану КРВ-75 75-45 мм. Діаметр валків 400 мм. По радіусу зовнішнього кола поперечного перетину труби це 37,5-22,5мм.

Природний катаючий радіус для всіх труб сортаменту стана буде змінюватись лише на 15 мм. (37,5-22,5=15)мм [4,5,6].

Рейка знаходиться в заціпленні з ведучою шестернею. Рейка має прямий зуб. Таким чином пропонується на зубчастому колесі зробити зуб на 15 мм довшим. Для цього треба підібрати стандартний зуб з більшим модулем, чи спроектувати спеціальний подовжений зуб на шестерні та на рейці.

## ВИСНОВКИ

Приведено складові розвиненого методу визначення параметрів шестерні та прямозубої рейки, що забезпечують мінімально можливу різницю між примусовим катаючим радіусом і природним для прокатки кожного типорозміру труб на станах холодної прокатки труб валками

Це дозволяє значно знизити швидкості ковзання між поверхнею валка та трубою в осередку деформування та осьові сили.

В свою чергу це виводить обладнання стану та процес прокатки на більш досконалий технічний рівень.

Отримані результати дослідження можуть бути корисними для проєктантів обладнання станів холодної прокатки труб та для технологів, що заняті виробництвом холоднодеформованих труб.

## Металургія

### Список використаних джерел

1. 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>.
2. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2010). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: монографія. Дніпропетровськ: Пороги. 120 с.
3. Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханін М.І. (2000). Розрахунки калібровки та зусиль в станах холодної прокатки труб з використанням ЕВМ: [Учб. посібник] - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2000. – 22 с.
4. Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В. (2024). До розвитку методу визначення раціонального кінематичного режиму в осередку пластичного деформування металу у холодній прокатці труб валками. 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.30-31. [https://drive.google.com/file/d/1GUhI\\_j5-ZS--VIMLesla7Ev0c\\_TQtd97/view](https://drive.google.com/file/d/1GUhI_j5-ZS--VIMLesla7Ev0c_TQtd97/view)
5. V.U. Grihorenko, D.V. Iskryzhitskyi Development of the method of determining the rational kinematic mode in the process of cold rolling of pipes with rolls. 17th SYMPOSIUM „MATERIALS AND METALLURGY“ supplement of “Book of Abstracts”, METALURGIJA 63 (2024) 3-4, 477-492. <https://hrcak.srce.hr/file/456175>
6. Григоренко В.У., Іскрижицький Д.В. (2024). Складові методу визначення раціонального кінематичного режиму в осередку пластичного деформування металу у холодній прокатці валками. 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.52-54. <https://pstu.edu.uk/fakultety-2/navchalno-naukovyj-institut-suchasnyh-tehnologij/>

**Hrygorenko V.U., Iskryzhitskyi D.V.**

### **COMPONENTS OF THE METHOD OF DETERMINING THE RATIONAL KINEMATIC MODE IN THE CENTER OF PLASTIC DEFORMATION OF METAL IN COLD ROLLING OF PIPES WITH ROLLS**

*Cold rolling of pipes with rolls is used in the production of high-quality pipes according to their accuracy in terms of diameter and wall thickness, as well as compliance of the microstructure and mechanical properties of the metal with the requirements of standards and norms.*

*The design of the cold rolling mills of medium and large diameter pipes is such that the forced rolling radius is set to the length of the cage stroke, as a rule, for several sizes of pipes. To ensure the rolling of pipes of the entire steel range, several drive gears and a spur gear are used. At the same time, the rails are installed with gears of corresponding diameter. This leads to the fact that the difference between the natural rolling radius, which varies according to the diameter of the rolled pipes, and the forced rolling radius, which is set by the design of the mill and the parameters of the driving gear, is significant and such that it leads to the sliding of the surface of the rolls along the*

## Металургія

pipe, which is deformed in an instant center of deformation. This leads to wear of the rolls and an increase in axial forces.

*It is necessary to solve the problem of ensuring a small difference between the forced rolling radius and the natural one.*

*The work considers the components of the developed method of calculating the parameters of the gear and spur gear, which ensure the minimum possible difference between the forced rolling radius and the natural one for rolling each standard pipe size.*

*This makes it possible to significantly reduce the sliding speed between the surface of the roll and the pipe in the center of deformation and axial forces.*

*In turn, this brings the mill equipment and the rolling process to a more advanced technical level.*

**Keywords:** cold plastic deformation of pipes, state of cold rolling of pipes, forced and natural rolling radii, sliding speed of the roll surface on the metal surface of the pipe, axial forces.

*Стаття надійшла 18.09.2024р.*

УДК 671.774.35

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318316](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318316)

Григоренко В.У., Куцевол С.В.

## ДО РОЗВИТКУ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ ЗУБЧАТОЇ ПАРИ ШЕСТЕРНЯ - РЕЙКА СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИРОДНОГО ПРОЦЕСУ ПРОКАТКИ

*Для виробництва високоякісних труб використовують значну кількість станів холодної прокатки труб. Холодну прокатку труб виконують валками на нерухомій оправці конічної форми чи з криволінійної твірною. Обертання валків забезпечується через розташоване на вісі валків ведуче зубчасте колесо, що контактує з зубчастою рейкою. Передаточне число є незмінним при переміщенні кліті і це приводить до невідповідності примусового катаючого радіуса природному. Це приводить до великих осьових сил та необхідності нанесення вартісних підсмазочних шарів та спеціальної змазки на труби. Потрібно вирішувати проблему забезпечення примусового катаючого діаметра природному.*

*В роботі розглядається розвинутий метод розрахунку параметрів зубчастого колеса зубчастої рейки, де кожний наступний зуб знаходиться на іншому ділільному колі, а різниця між ними дорівнює зміні природного катаючого радіусу у відповідному положенні пари зуб колеса та зуб колеса.*

*Вперше отримано розвинутий метод визначення змінних параметрів зубчастого колеса та рейки, що відрізняються тим, що забезпечується рівність примусового катаючого радіусу та природного радіусу по довжині ходу кліті у процесі холодної прокатки труб. Це дозволяє значно знизити осьові сили при холодній прокатці труб, знизити швидкості ковзання між поверхнею валка та трубою в осередку деформування.*

*Отримані результати потрібні при проектуванні нових станів холодної прокатки труб та для модернізації діючих, а також для підвищення рівня технології холодної прокатки труб з точки зору якості труб та підвищення міжремонтного часу обладнання стану.*

**Ключові слова:** холодна прокатка труб, природний та примусовий катаючий радіуси, швидкості ковзання поверхні валка по поверхні металу труби, осьові сили.

**Постановка проблеми.** На станах холодної прокатки виробляють труби підвищеної якості для застосування в різноманітних агрегатах відповідального призначення. Такі труби відрізняються від гарячекатаних значно більш якісною поверхнею, точністю геометрії,

## Металургія

стабільністю механічних властивостей. Роботам з розвитку технологій холодної прокатки приділяють значну увагу [1-6].

Пластичну холодну деформацію труб заготовок здійснюють валками на нерухомій оправці (рис. 1).

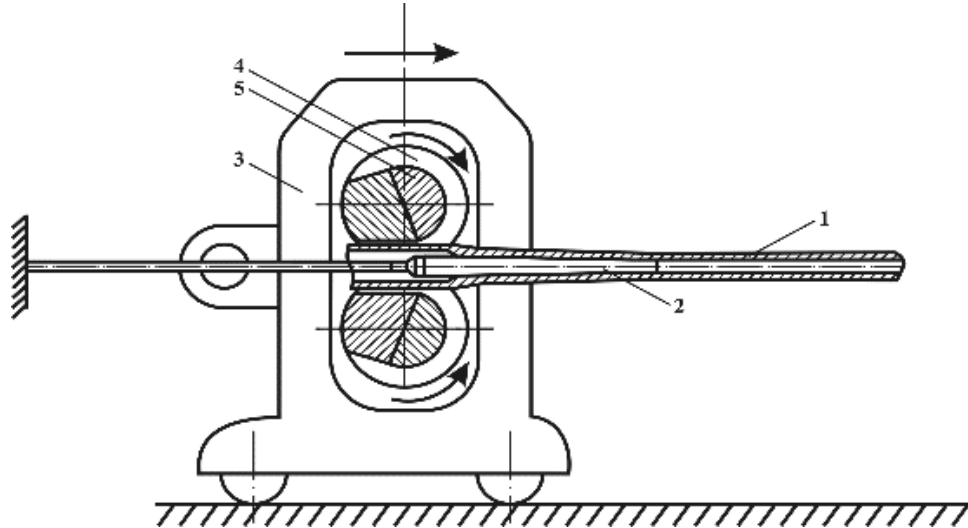


Рисунок 1 – Кліть стану ХПТ, труба та оправка зі стрижнем: 1 – прокатана труба ; 2 – оправка та робочий конус деформування на ній; 3 – станина; 4 – валок; 5 – калібр

Валки обертаються по поздовжньому ходу кліті за рахунок того, що на їх осях розташовані шестерні які контактують з нерухомими зубчастими рейками (рис. 2).

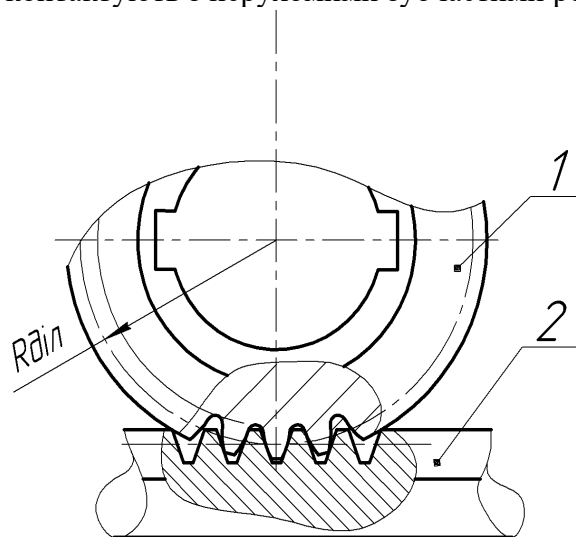


Рисунок 2 – Ведуче зубчасте колесо та нерухома рейка станів холодної прокатки труб валками: 1 - валок; 2 – зубчата рейка;  $R_{dir}$ - дільний радіус ведучого зубчастого колеса

Кінематичною особливістю прокатки труб у круглому калібрі є змінна колова швидкість точок поверхні рівчака по його ширині. У вершині калібру вона менша ніж у випусках. Радіус валка на калібрі, де швидкість виходу металу з калібру дорівнює коловій швидкості точки валка називають природним катаючим радіусом. Природній катаючий радіус знаходиться між вершиною рівчака валка та циліндричною поверхнею валка.

## Металургія

Примусовим радіусом називають радіус валка, що дорівнює радіусу ділільного кола ведучої шестерні.

Природний катаючий радіус залежить від зміни діаметру труби, що деформується і є змінним по довжині ходу кліті, а примусовий катаючий радіус дорівнює ділільному радіусу ведучої шестерні і є незмінним.

Ось цьому потрібно зменшити значно невідповідність (різницю) між примусовим та природним катаючим радіусом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В Україні для холодної прокатки труб використовують в основному стани типу ХПТ (32, 55, 90). В основному в останнє десятиліття почали використовувати сучасні імпортні стани холодної прокатки труб (стани КРВ-25, ХПТ 40-8, ХПТ 6-20 та ін.) .

В таких станах ще не вирішена задача по зменшенню невідповідності (різниці) між примусовим та природним катаючим радіусом. Різниця між примусовим та природним катаючим радіусом впливає на напрямок та інтенсивність ковзання металу між валком та оправкою. Це в свою чергу призводить до появи і збільшення осьових сил.

Відомі дослідження з визначення значень положення природного й примусового катаючого радіуса в калібрі під час прокатки труб на стані ХПТ-32 за маршрутом  $22 \times 1,5 \rightarrow 15 \times 0,9$  (рис. 4) [1].

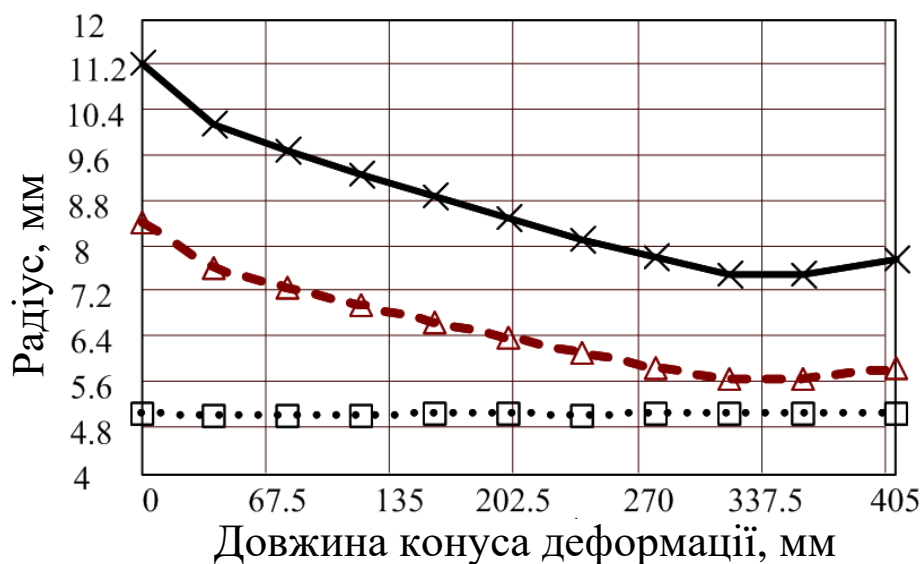


Рисунок 3 – Розрахункові значення значень параметрів калібру, що характеризують положення природного й примусового катаючого радіуса в калібрі під час прокатки труб на стані ХПТ-32 за маршрутом  $22 \times 1,5 \rightarrow 15 \times 0,9$  [1]

- ×× - радіус дна калібру
- - радіус шестерні
- ▲▲ - природний катаючий радіус

В трубному інституті (ВНИТИ) були виконані опробування щодо застосування ексцентричних шестерен в парі з незмінною рейкою. Відомі випробування застосування ексцентричних шестерен приводили до швидкого зносу зубів як в рейці так і шестерні. Головною причиною слід назвати те, що одночасно не було запропоновано методику розрахунків параметрів зубців колеса та рейки.

Відома пропозиція японських розробників по застосуванню некруглих зубчастих коліс з перемінним радіусом за ділільним діаметром [3].

## Металургія

Пізніше для наближення примусового процесу прокатки до природного були пропозиції та випробування щодо переміщення зубчастої рейки під час прокатки, застосування рейок під кутом до лінії прокатки, а також застосування пари зубчасте колесо та рейки з перемінним шагом зубців.

Але ці пропозиції на сьогодні не знайшли застосування.

**Мета дослідження.** Метою статті є представлення з методу визначення змінних параметрів зубастої пари зубчасте колесо та рейка станів холодної прокатки труб для забезпечення виготовлення пар шестерня з змінним ділильним радіусом шестерні і відповідним положенням зубців прямозубої рейки. Це потрібно для розрахунку параметрів шестерні і рейки і для наступного їх виготовлення. Це дає змогу забезпечити відповідність примусового процесу холодної прокатки природному. Це потрібно для проектування нових станів холодної прокатки труб та для модернізації діючих, а також для підвищення рівня технології холодної прокатки труб з точки зору забезпечення високої якості труб та підвищення міжремонтного часу роботи обладнання стану.

**Основний матеріал дослідження.** При холодній прокатці труб на нерухомій конічній оправці, чи з криволінійною твірною повздожнього її профіля крім сил, що діють на валок, виникають ще сили, що діють на оправку вздовж її вісі. Ці сили залежать в кожному положенні кліті від співположення примусового катаючого радіусу калібру заданого парою шестерня – рейка. Примусовий катаючий є незмінним в конструкціях станів холодної прокатки труб за довжиною ходу кліті а природний катаючий радіус є перемінним за довжиною ходу кліті і залежить від геометричних параметрів труби (рис. 4).

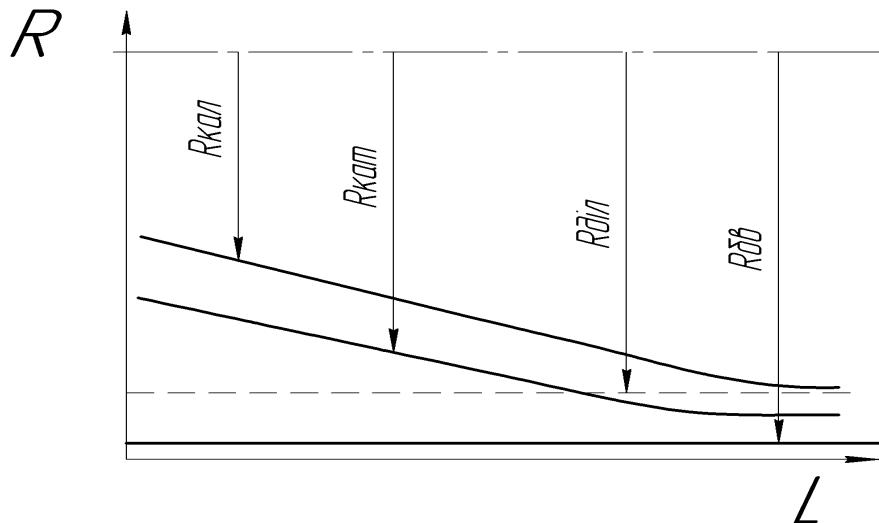


Рисунок 4 – Невідповідність примусового катаючого радіусу (ділильного радіусу ведучої шестерні) природньому катаючому радіусу калібру рівчака валка уздовж ходу кліті у стані холодної прокатки труб валками:  $R_{\text{кал}}$  – радіус валка по вершині калібру;  $R_{\text{кат}}$  - катаючий радіус,  $R$  – ділильний радіус ведучого колеса;  $R_{\text{бв}}$  – радіус поверхні бочки валка

Головною причиною не застосування некруглих зубчастих коліс слід назвати те що не було технологій, що могли б забезпечити масового та точного виготовлення пари шестерня – рейка з змінними параметрами (для шестерні з перемінним радіусом за ділильним діаметром, а для рейки необхідного та синхронного зі зміною в шестерні відповідного положення зубців).

Розвиток за останні десятиліття металообробних станків з програмним керуванням дає змогу це зробити.

## Металургія

Одним з варіантів зменшення різниці між примусовим та природним катаючими ( $R_{npk}$ ) радіусами є застосування шестерень з змінним ділильним радіусом для кожного наступного зуба шестерні за законом відповідно з зміною природного катаючого радіусу. Природний катаючий радіус визначається відповідно залежності

$$R_{npk} = R_o - 0,76R_i$$

де,  $R_o$  - ідеальний радіус бочки валка, що дорівнює половині діаметра бочки валка плюс зазор між валками при прокатці;

$R_i$  - радіус круглого перерізу робочого конусу в положенні  $i$  кліті, що є змінним по довжині робочого конусу

$$R_i = D_o/2 - \Delta D_i/2$$

де,  $D_o$  - діаметр робочого конусу деформації на вході труби-заготовки

$\Delta D_i$  - різниця між діаметром робочого конусу деформації на вході труби-заготовки та діаметром робочого конусу в положенні  $i$ .

В свою чергу розрахунки  $D_{ii}$  залежать від вибраного режиму обтиску по діаметру та по стінці труби і може бути визначеним за методом, що приведений в роботі [4].

Такий розвинутий метод [5,6] забезпечить змінне передаточне число між ведучою шестернею та рейкою з максимальним наближенням примусового природному катаючому радіусу і створить нормальні кінематичні та силові умови холодної прокатки труб по зрівнянню з рівнем технології, що застосовується зараз. Це приведе до зменшення зносу рівчаків валків, поліпшення якості поверхні труб та до зменшення осьових сил. Відповідно зменшується руйнування деталей стану.

Рейка з змінними параметрами положення зубців проектується відповідно з значеннями  $\Delta D_i$  (різниця між діаметром робочого конусу деформації на вході труби-заготовки та діаметром робочого конусу в положеннях  $i$ ).

## ВИСНОВКИ

Вперше отримано розвинутий метод визначення змінних параметрів зубчастого колеса та зубастої рейки, що відрізняються тим, що забезпечується рівність примусового катаючого радіусу та природного радіуса по довжині ходу кліті у процесі холодної пільгерної прокатки труб. Це дозволяє значно знизити швидкості ковзання між поверхнею валка та трубою в осередку деформування та знизити осьові сили при холодній прокатці труб.

Отримані результати потрібні при проектуванні нових станів холодної прокатки труб та для модернізації діючих, а також для підвищення рівня технології холодної прокатки труб з точки зору забезпечення високої якості труб та підвищення міжремонтного часу роботи обладнання стану.

### Список використаних джерел

1. 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>.

2. Григоренко В.У., Пилипенко С.В., Головченко О.П. (2010). Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: монографія.



## Металургія

Дніпропетровськ: Пороги. 120 с.

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

4. Григоренко В.У., Клименко П.Л., Ханін М.І. (2000). Розрахунки калібровки та зусиль в станах холодної прокатки труб з використанням ЕВМ: [Учб. посібник] - Дніпропетровск: НМетАУ, 2000. – 22 с.

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](https://drive.google.com/file/d/1GUhI_j5-ZS--VIMLesla7Ev0c_TQtd97/view)

6. V.U. Grigorenko, S.V. Kutsevol, I. Mamuzić. (2024). To ensure the supply of natural rolling radius of Primus in cold pipe rolling mills. 17th SYMPOSIUM „MATERIALS AND METALLURGY“ supplement of “Book of Abstracts”, METALURGIJA 63 (2024) 3-4, 477-492. <https://hrcak.srce.hr/file/456175>

**Hryhorenko V.U., Kutsevol S.V.**

### **TO THE DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING THE VARIABLE PARAMETERS OF THE GEAR PAIR - RAIL OF THE COLD ROLLING STATIONS OF PIPES TO ENSURE THE NATURAL ROLLING PROCESS**

*For the production of high-quality pipes, a significant number of cold rolling mills are used. Cold rolling of pipes is carried out by rolls on a stationary mandrel of a conical shape or with a curved mill. The rotation of the rolls is provided through a driving gear wheel located on the axis of the rolls, which is in contact with the toothed rail. The gear ratio is unchanged when moving the cage and this leads to a discrepancy between the forced rolling radius and the natural one. This leads to large axial forces and the need to apply expensive lubrication layers and special lubrication to the pipes. It is necessary to solve the problem of ensuring the forced rolling diameter to a natural one.*

*The paper considers a developed method of calculating the parameters of a gear wheel of a gear rack, where each subsequent tooth is located on a different dividing circle, and the difference between them is equal to the change in the natural rolling radius in the corresponding position of the pair of wheel tooth and wheel tooth.*

*For the first time, a developed method of determining the variable parameters of the gear wheel and rail was obtained, which differ in that the equality of the forced rolling radius and the natural radius along the length of the cage during the cold rolling of pipes is ensured. This makes it possible to significantly reduce axial forces during cold rolling of pipes, to reduce sliding speeds between the surface of the roll and the pipe in the center of deformation.*

*The obtained results are needed for the design of new cold rolling mills for pipes and for the modernization of existing ones, as well as for improving the level of cold rolling pipe technology in terms of pipe quality and increasing the time between repairs of mill equipment.*

**Keywords:** cold rolling of pipes, natural and forced rolling radii, sliding speed of the roll surface on the metal surface of the pipe, axial forces.

*Стаття надійшла 18.08.2024 р.*

## РОЗРОБКА Й ВИПРОБУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНИХ ШУС

*Отримані нові ШУС, що визначають умови формування зливка в кристалізаторі на меніску рідкої сталі та в зазорі між зливком і кристалізатором, головним чином як змащування і регулятор тепловідведення. Здатність суміші виконувати свої функції за даних умов розливання визначаються її раціональним складом і необхідним рівнем технологічних властивостей: в'язкість, температури твердіння, кількості кристалічної фази в затверділому шлаку та ін. Досліджено вплив складу і фізико-хімічних властивостей шлаку утворюючих сумішей на якість поверхні слябові заготовки і стабільність процесу безперервного розливання сталі.*

**Ключові слова:** машина безперервного лиття заготовок, проміжний ківш, кристалізатор, фракційний склад, шлак утворююча суміш, сляб, якість.

**Постановка проблеми.** Вітчизняні підприємства віддають перевагу ШУС зарубіжних фірм-виробників внаслідок їх високої якості, стабільності технологічних властивостей і експлуатаційних показників. Для створення конкурентоспроможної продукції вітчизняним виробникам ШУС необхідно оволодіти інформацією про те, чи відповідає рівень властивостей пропонованої продукції (ШУС) даним умовам розливання. Без такої інформації виробник ШУС діє "в сліпу" і методом "проб і помилок" може отримати лише дуже посередній результат. В зв'язку з цим актуальне дослідження технологічних властивостей шлаку утворюючих сумішей, які використовують високопродуктивні слябові МБЛЗ, вплив цих властивостей на якість поверхневих і під поверхневих зон безперервно литої заготовки і стабільність процесу розливання сталі, а також розробка складів ШУС з урахуванням проведених досліджень на базі вітчизняної вторинної сировини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Шлакоутворювальні суміші (ШУС) широко застосовуються останні 20-30 років при безперервним розливанні сталі з використанням заглиблених склянок, по яких сталь надходить із проміжного ківшу в кристалізатор. Правильний вибір ШУС дуже впливає, як на сам процес безперервного розливання, так і на якість поверхні литої заготовки. У результаті взаємодії ШУС із рідкою сталлю, на поверхні меніска утворюється шар рідкого шлаків, що частково спечений шар і неспечена порошкоподібна ШУС. Рідкий шлаки з нижнього шару надходить у зазор між міцнюючою кіркою й стінками кристалізатора. мастильний шар, Що утворюється, зменшує тертя. Шлаковий прошарок, що перебуває в зазорі між заготовкою й кристалізатором, виконує дві основні функції: збереження гомогенної, відповідним чином змащувальної плівки з підходящою в'язкістю, а також забезпечення достатнє інтенсивної й рівномірної теплопередачі між міцнюючою заготовкою й кристалізатором. Ступінь і рівномірність теплопередачі від злитка до кристалізатору через шар шлаків значно впливає як на ріст оболонки злитка, так і на припустиму швидкість розливання, а також на якість поверхні злитка й утвір тріщини [1].

Підтримка стабільного точного рівня ШУС у кристалізаторе є важливим чинником з погляду забезпечення плавної роботи МБЛЗ і гарної якості поверхні заготовок. Тому багато металургійних заводів приділяють особливу увагу розробці систем автоматичної подачі ШУС у кристалізатор. Однак при цьому для застосування звичайних механічних систем і вібраційних систем для транспортування суміші вимагає установки великої кількості одиниць устаткування в зоні кристалізатора [2].

Для забезпечення безаварійного процесу безперервного розливання особливу увагу необхідно приділяти шлакоутворювальним сумішам (ШУС), використовуваним у

## Металургія

кристалізаторе, які повинні сприяти ефективному відводу тепла від металу, що кристалізується, і мінімальному тертю заготовки про стінки кристалізатора для конкретних температуро-швидкісних характеристик, властивих певним маркам сталей [3].

**Мета дослідження.** Експериментальне і теоретичне дослідження технологічних властивостей шлаку утворюючих сумішей, а також умов їх роботи при безперервному розливанні слябів з метою розробки нових компонентних складів сумішей на основі вітчизняних вторинних відходів. Відповідно до мети роботи визначені наступні задачі:

- удосконалити методики дослідження властивостей ШУС (інтервалу плавлення, в'язкості, поверхневого натягу, здібності до виділення кристалічної фази), що визначають їх роботу в кристалізаторі МБЛЗ;

- дослідити фізико-хімічні властивості шлаку утворюючих сумішей, використовуваних для розливання слябів з підвищеною швидкістю з різних марок сталі і встановити залежності між цими властивостями і параметрами безперервного розливання, якістю поверхні отримуваних заготовок і стабільністю процесу розливання;

- визначити умови стабільного надходження рідкого шлаку в зазор між зливком і кристалізатором і формування в цьому зазорі твердої і рідкої плівки шлаку;

- дослідити роль ШУС в підвисанні зливка в кристалізаторі МБЛЗ, а також утворенні прориву металу;

- розробити склади ШУС для безперервного розливання слябів з підвищеною швидкістю на базі вторинних відходів з використанням виробничої бази вітчизняних виробників.

**Основний матеріал дослідження.** Властивості, склад та технологія виробництва двох компонентної ШУС. Нині за умов ММК "ім. Ілліча" широкий розвиток набуло виробництва та застосування ШУС двокомпонентної. Відомо, що для отримання оптимальних характеристик шлаку необхідно забезпечення заданої кількості помелу компонентів суміші (для двокомпонентної - флюсу), при якому відбувається зменшення насипної щільності як наповнювача, так і готової ШУС і деяке підвищення плинності засипки. Варіювання вмісту вуглецю з відносно дешевих ВУМ (вуглець утримуючі матеріали: аморфний графіт, терм антрацитовий пил) можливе лише у вузьких межах, зумовлених швидкістю зневугленароджування шару суміші. Тому переважно технологічний варіант виробництва ШУС з меншим (9-12 %) вмістом вуглецю, і меншою насипною щільністю ( $<1,0 \text{ т/м}^3$ ), яка в свою чергу досягається заданим фракційним складом мелених матеріалів (флюсу): фракція 0,100 мм - не менше 80%

Окремо необхідно відзначити взаємозв'язок технологічних параметрів ШУС при її виробництві в УШС ЦПО та її зовнішньою поведінкою при розливанні сталі на МБЛЗ [4].

Відпрацювання технології виробництва ШУС проводилася з використанням плавлених флюсів як наповнювачів і вуглецевмісних матеріалів як регуляторів швидкості плавлення. Випробувано 3 склади плавлених флюсів на основі оксидів системи  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaF}_2\text{-(B}_2\text{O}_3)$ . Зміст домішок не перевищувало, % мас.:  $\text{MgO-5,0; Al}_2\text{O}_3\text{-3,0; } \Sigma \text{FeO-3,0; MnO-1,0; S та P-0,20}$  кожного елемента. Основність становила 0,55-0,63; 0,89-1,12 та 0,95-1,12, а вміст ВУМ варіювався в межах 10-13 %. В качестве ВУМ использован графитовый порошок фракции 0,5 мм с содержанием углерода  $> 88 \%$  и технический углерод (сажа).

Технологія виробництва сумішей передбачала: контроль хімічного складу готових партій флюсів та ВУМ; помел флюсів у кульовому млині; дозування компонентів змішувач, змішування протягом 30 хв з видачою в закриту ємність; відбір проб ШУС для проведення контрольного хімічного аналізу та визначення гранулометричного складу суміші.

Усього випробувано 6 складів сумішей, кращі експлуатаційні показники відзначені у ШУС на основі флюсів основністю 0,9 і 1,05 (в середньому) із вмістом ВУМ 10-12%, в тому числі з додаванням сажі.

При проведенні попередніх випробувань відлито близько 7000 т сталі існуючого марочного сортаменту, в тому числі сталі 13Г1СУ. Відзначено зниження зусилля витягування

## Металургія

на 0,8-2,5 т порівняно з використанням 4-х компонентних ШУС. Питома витрата дослідних сумішей складала 0,4-0,6 кг/т сталі при швидкості розливу 0,5-0,8 м/хв, тоді як витрату 4-ох і 5-ти компонентних ШУС становить 0,8-1,3 кг/т. на відміну від використаних 4-ох та 5-ти компонентних ШУС, отриманих шляхом помелу та механічного змішування компонентів, при використанні всіх випробуваних складів ШУС розробки та виробництва ВАТ НВП "Технічний метал" не спостерігалось утворення "корочок"; "Шнурів" по периметру кристалізатора та інших порушень технології розливання [4].

З урахуванням безлічі параметрів технології виплавки сталі різного марочного сортаменту, позапічного доведення і розливання на МБЛЗ тим не менш простежується тенденція до зниження відсортуння по металу з 2,98% і 2,10% (1998) до 1,84 % ((1998) досвідчені плавки), зменшення зачистки полони з 1,24 % та 0,98 % до 0,71 % (досвідчені плавки) та зміни втрат прокату за дефектом "газовий міхур" з 0,25% і 0,10% до 0,11% (досвідчені плавки).

Зниження частки дефектів поверхні листового прокату дослідних плавок частково можна пояснити кращими теплофізичними властивостями шлаків, що утворюються в кристалізаторі МБЛЗ, більш стабільними параметрами захисного шлакового прошарку і, можливо, меншим зусиллям витягування слябів МБЛЗ. Досвід виробництва дослідно-промислових партій ШУС показує, що обладнання та технологічні цикли УШС СДО ККЦ придатні для серійного виробництва розроблених ВАТ НВП "Технічний метал" сумішей. Обладнання нового відділення дозволяє виробляти ШУС на основі плавлених флюсів і ВУМ (2-х компонентну) поряд з 5-ти компонентною без перетину технологічних циклів. Оскільки виробництво 2-х компонентної ШУС набагато простіше і не вимагає додаткових заходів щодо зниження гідратації компонентів; зменшення сепарації під час виробництва та транспортування; а також стабілізації хімічного та гранулометричного складів готових партій ШУС, то розроблені 2-х компонентні суміші можна вважати альтернативним варіантом для виробництва поряд з 5-ти компонентною ШУС [5].

Регламентованими параметрами у процесі виробництва суміші є:

1. При помелі флюсу:

-частка фракції < 100 мікрметрів понад 85%;

-насіпна щільність меленого флюсу трохи більше 1,0 т/м<sup>3</sup>;

-відсутність сторонніх домішок у процесі сушіння, подрібнення, дозування матеріалів;

2. При змішуванні компонентів:

-відхилення вмісту вуглецю від середньо заданого 1%;

-отримання насипної щільності готової суміші не більше 1,0 т/м<sup>3</sup>.

Менша насипна щільність і більш висока плинність, а також відсутність повторної гідратації обумовлюють менше налипання ШУС-2 на металеву поверхню механічного обладнання та зворотної тари в порівнянні з цемент вмісними сумішами.

На відміну від сумішей механічного приготування можлива технологічна заміна (часткова або повна) дорогого аморфного графіту (ГЛС-3) на дрібнодисперсний високо вуглецевий пил термоантрациту. Дана заміна дозволить знизити прихід вологи в ШУС на стадії її виробництва і поліпшити деякі експлуатаційні властивості суміші (знизити насипну щільність, підвищити газопроникність шару і поліпшити його тепло ізолюючі властивості).

Виконані лабораторні дослідження (швидкість плавлення, зміна в'язкості шлаків, динаміка випадання твердих фаз у процесі охолодження розплаву, розрахунковий вміст ВУМ у суміші).

Випробувано декілька видів УСМ: графіти ГС-4, ГЛС-3, технічний вуглець (сажа) та ін. Визначено основні вимоги до виробництва ШУС.

Виконано також детальний аналіз зміни хімічного складу та властивостей шлакового прошарку, динаміки зміни зусилля витягування МБЛЗ, оцінки якості листового прокату ЛПЦ-3000.

## Металургія

За результатами вищевказаних досліджень визначено вимоги до ШУС стосовно 3 основних груп марок сталі:

- низьковуглецевих та конструкційних;
- тріщино чутливих (головним чином, трубний сортамент);
- глибоко розкислених алюмінієм (08Ю та супутні).

Були випробувані 3 важливих складу флюсу при виробництві ШУС-2 і розливанні на МБЛЗ:

- сталі загального сортаменту (конструкційних, стандарту ASTM)-флюс основністю 0,8-0,9; вмісту «розріджувачів» в межах 5-7%, вміст вуглецю 9,0-13,2%;
- тріщино чутливих (головним чином 13Г1СУ)-флюс з пониженою основністю 0,7-0,8 і великим вмістом лужних металів;
- сталі 08Ю і супутніх - флюс основністю 0,7-0,9 і додатково введеним розріджувачем.

У всіх випадках при проведенні промислових досліджень на ШУС конкретного даного виду послідовно відливалися всі вироблені в той період в ККЦ марки сталі.

У всіх випадках 2-х компонентні суміші характеризувалися наступними перевагами:

- меншою в 1,5-2,0 рази питомою витратою;
- відсутністю гідратації, сепарації та спостереження;
- стабільністю властивостей захисного покриття в кристалізаторі МБЛЗ;
- мінімальним вмістом шкідливих домішок.

За даними аналізу якості прокату ЛПЦ-3000 металу із слябів дослідно-промислових плавок відмічене зниження шлюбу на 0,2-0,7 % за дефектами «тріщина», «полон». Це можна пояснити меншими коливаннями зусилля витягування МБЛЗ та більш стабільними властивостями шлакового гарнісажу, обумовленими застосуванням вже сплавлених матеріалів.

## ВИСНОВКИ

1. З розглянутих ШУС на «ММК ім. Ілліча» застосовуються ШУС-5 (п'яти компонентна, механічного змішування) та ШУС-Т-2 (двокомпонентна, на плавленій основі).

2. Технологія виробництва 2-х компонентної суміші в УШС ЦПО простіша, а питомі капітальні витрати є нижчими порівняно з виробництвом п'ятикомпонентних сумішей. Виключається необхідність повторного сушіння готової ШУС з подальшим змішуванням, втрати матеріалів та додаткове завантаження обладнання УШС ЦПО. Часткова чи повна заміна ГЛС на ТА (термоантрацит) знижує надходження вологи в суміші на 0,2-0,4 %.

3. При розливанні на МБЛЗ ККЦ стали широкого марочного сортаменту відзначені такі переваги:

- відсутність гідратації та спостереження;
- найкращі експлуатаційні характеристики;
- стабільність властивостей захисного покриття;
- мінімальний вміст шкідливих домішок.

4. За даними прокату на ЛПЦ-3000 металу із слябів дослідно-промислової плавки, зазначено зниження браку на 0,2-0,7 % за дефектами.

5. Фізико-хімічні властивості ШУС визначаються головним чином:

- зміною хімічного складу шлаку в кристалізаторі МБЛЗ; сублімацією фторидних з'єднань ( $\text{SiF}_4$ ,  $\text{AlF}_3$  та інші), відновленням  $(\text{SiO}_2)\cdot[\text{Si}]$ , асиміляцією НВ ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) та інші;

- підвищенням «ємності» по асиміляції  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , що є головною причиною погіршення в'язкісних характеристик робочих шлаків;

- швидкістю плавлення засипки суміші на дзеркалі металу яка тісно пов'язана з вмістом ВУМ і швидкістю витяжки на МБЛЗ, насипною щільністю суміші та її фракцією;

## Металургія

- здатністю павленої суміші даного хімічного і гранулометричного складу створювати само стабілізуючу систему «метал-шлак-засипка», що забезпечує повне покриття дзеркала металу при зміні швидкості витягування МБЛЗ і можливих коливаннях рівня сталі в кристалізаторі;

- нижчим вмістом екологічно шкідливих домішок (F, MnO).

6. Загальне відсортування по металу знизилося з 1,58 до 1,08 %, зменшилася частка дефектів поверхні листового прокату: брак по “полоні” знизився з 0,60 до 0,54 %, по “тріщині” - з 0,28 до 0,06%, дефект "газовий міхур" знизився з 0,47 до 0,20%. Це можна пояснити меншою схильністю павлених ШУС до гідратації, відсутністю у складі легко дисоціюючі сполучень (CaCO<sub>3</sub>, MgCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>) і важко розчинних у шлаковій фазі складових.

7. Всі без винятку ШУС можуть бути джерелами додаткового забруднення поверхні заготовок неметалевими включеннями. Механічні суміші на основі частково офлюсованих мінералів і введених для корекції основності SiO<sub>2</sub> - містять матеріали при їх павленні як на дзеркалі металу так і при частковому залученні мікро фрагментів, що не проплавилися, суміші в об'єм металу не можуть забезпечити формування повністю гомогенізованої шлакової в зазорі між стінкою кристалізатора і скоринкою сляба, що формується. Цим пояснюється і велика питома витрата механічних ШУС у порівнянні з павленими, великі коливання зусилля витягування щодо середнього рівня і, отже, грубіші сліди осциляції на поверхні безперервно литих слябів.

8. Знижена витрата ШУС-Т-4 (0,49-0,66 кг/т) дозволяє отримувати істотний економічний ефект поряд зі збереженням основних властивостей ШУС. У той же час, нерентабельне відмовлятися від ШУС-5. Бажано використовувати у складі ШУС-5 відходи металургійного виробництва.

9. Застосування похилих плоских живильників для забезпечення рівномірного розподілу засипки ШУС уздовж широкої грані слябу дозволить досягти більш рівномірного розподілу суміші, що дозволить підвищити ефективність теплоізоляції дзеркала металу і асиміляції НВ при перехідних періодах розливання МБЛЗ.

### Список використаних джерел

1. Казачков Е.А. Экспериментальное определение и прогнозирование свойств шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали / Е.А. Казачков, А.В. Остроушко, С.В. Живило // Вісник приазовського державного технічного університету. - Вип. №13. 2003.
2. Смирнов А.Н. Процессы непрерывной разливки / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев, С.В. Момот, Ю.Н. Белробров. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
3. Смирнов А.Н. Изменение эксплуатационных свойств шлакообразующих смесей при серийной разливке и их влияние на ход процесса непрерывного литья / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. Н. Максаев // Металл и литье Украины. - №11, 2015. С.3-4.
4. Огурцов А.П. Непрерывная разливка стали / А.П. Огурцов, А.Г. Величко, Е.И. Исаев и др. – Днепродзержинск: 1999. – 306 с.
5. Лидефельд Х. Характеристики рабочих свойств шлакообразующих смесей для непрерывной разливки стали / Х. Лидефельд, П. Хассельстром // Достижения в области непрерывной разливки стали. – М.: Металлургия, 1967. С.90-98.

**Baklansky V.M., Kargin S.B.**

## DEVELOPMENT AND TESTING OF RESEARCHED SHUS

*The new SHUS were obtained, which determine the conditions of ingot formation in the crystallizer on the meniscus of liquid steel and in the gap between the ingot and the crystallizer,*

## Металургія

*mainly as lubrication and heat dissipation regulator. The ability of the mixture to perform its functions under the given pouring conditions is determined by its rational composition and the necessary level of technological properties: viscosity, hardening temperature, the amount of the crystalline phase in the hardened slag, etc. The influence of the composition and physical and chemical properties of the slag-forming mixtures on the surface quality of the slab blank and the stability of the process of continuous steel pouring was studied.*

**Keywords:** machine for continuous casting of blanks, intermediate ladle, crystallizer, fractional composition, slag-forming mixture, slab, quality.

*Стаття надійшла 08.07.2024 р.*

## ХВИЛЬОВІ ПАСОВІ ТА ЛАНЦЮГОВІ ПЕРЕДАЧІ В ПРИВОДАХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

*Наведено результати дослідження можливості застосування хвильових передач, як складових елементів в приводах технологічних машин, для забезпечення нерівномірного руху робочих органів з метою підвищення їх енергоефективності. Запропоновано конструкції хвильових пасових і ланцюгових передач, які дозволяють змінювати передатне відношення приводів виконавчих механізмів з можливим простом веденого елемента, або без нього. Ці передачі також здатні забезпечити імпульсний рух веденої ланки, наприклад робочого органу (ковша) одноковшового екскаватора. Відзначено можливість обґрунтованого підходу до вибору і визначенню геометричних і кінематичних параметрів хвильових пасових і ланцюгових передач. Запропоновані конструкції і конкретні приклади застосування хвильових передач в приводах технологічних машин.*

**Ключові слова:** хвильові пасові і ланцюгові передачі, кінематика хвильових передач, пульсовий рух.

**Постановка проблеми.** В сучасному виробництві в транспортно-складських системах, досить широке застосування знаходять машини і механізми, що забезпечують переміщення, кантування, установку одиничних або насипних вантажів з різною, іноді змінною траєкторією і швидкістю або пульсовим рухом виконавчих органів та вантажів. В гірничодобувній та будівельній галузях робочі органи виконавчих механізмів технологічних машин, наприклад, екскаваторів, конвєсєрів, елеваторів при імпульсному русі можуть виконувати технологічні операції, пов'язані з руйнуванням та транспортуванням зовнішнього середовища (грунту, корисних копалин, будівельних сумішей тощо), що пов'язано зі значними енерговитратами та додатковими динамічними навантаженнями [1]. Застосування хвильових механізмів з передачею руху гнучким елементом у вигляді ланцюгів, стрічок, і пасів можуть забезпечувати неперервний та пульсовий рух виконавчих механізмів, а відповідно і вантажів з необхідними перервами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробки сучасних методик вибору раціональних параметрів механічних передач для технологічних машин з урахуванням робочих процесів направлені на визначення параметрів традиційних конструкцій передатних механізмів з постійними кінематичними характеристиками [2]. В той же час розроблено цілий ряд передатних механізмів, які можуть забезпечувати змінні (імпульсні) кінематичні параметри за рахунок взаємодії жорстких елементів механічних передач з гнучкими, що характерно для хвильових ланцюгових і пасових передач. Так в роботах [3-8] наведено приклади застосування хвильових ланцюгових передач в приводах виконавчих механізмів екскаваторів, кранів та машин безперервного циклу роботи. Для зменшення енергоємності процесів копання оператори землерийних машин досить часто застосовують зміну швидкості робочого органу за рахунок ручного керування процесом різання (копання) ґрунтів. Зміна швидкості робочого органу дозволяє руйнувати ущільнене ядро ґрунту, але це приводить до підвищення навантажень на привода і системи керування механізмами. Застосування механізмів з приводом на основі хвильового ланцюгового редуктора відкриває широкі перспективи в напрямку інтенсифікації землерийних робіт, а удосконалення конструкцій приводів дозволить досягти, зниження енергоємності процесів землерийних машин [5-8].



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Враховуючи особливості процесів копання гірничих порід і навантаження насипних вантажів застосування приводів, що забезпечують нерівномірну швидкість приведе до підвищення продуктивності землерийних машин. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження [5,8] дозволили підтвердити ефективність застосування хвильових ланцюгових передач для отримання нерівномірного (пульсового) руху веденого елемента передачі.

**Мета дослідження.** Хвильові механізми з передачею руху гнучким зв'язком являються порівняно новою конструкцією передатних механізмів, тому дослідження структури механізмів та процесу передачі тягового зусилля із забезпеченням пульсового руху виконавчих елементів є актуальним. Розробка методики вибору параметрів хвильових ланцюгових і пасових передач для приводів гірничих, підйомно-транспортних і транспортувальних машин з метою підвищення енергоефективності виконавчих механізмів також є актуальною науково-технічною задачею.

**Основний матеріал дослідження.** У хвильовій передачі принцип роботи полягає у перетворенні руху, який здійснюється гнучким елементом саме за рахунок деформування ланцюга або паска. Сутність принципу деформування пояснюється простим прикладом (рисунок 1).

Розробку методики по визначенню параметрів хвильових передач проведемо застосовуючи сучасні методи теоретичної механіки та теорії механізмів і машин. Так із умови рівноваги стрічки отримуємо вираз для передатного числа зусиль, показаних на рисунку 2:

$$i = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{2} \sin \gamma \quad (1)$$

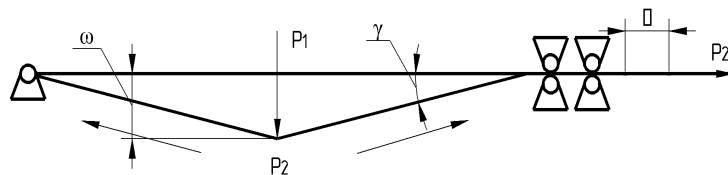


Рисунок 1 – Схема деформування гнучкого зв'язку

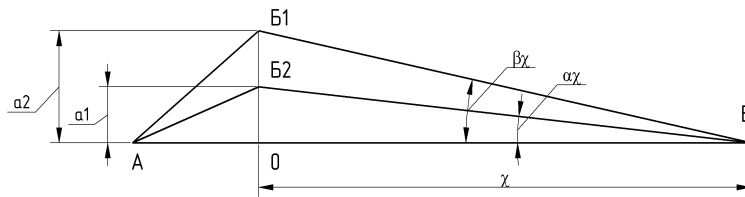


Рисунок 2 – Умовна схема механізму зворотного-поступального руху

В такому механізмі поперечні переміщення стрічки ω перетворюється в поздовжні θ через деформування стрічки. При малих кутах γ можна отримати дуже велике передатне відношення.

Розглянутий механізм являється механізмом разової або пульсової дії зі змінним передатним відношенням. Це може ускладнювати його застосування в техніці. Однак подібні механізми знайшли промислове застосування, наприклад, в приводах деяких технологічних машин [3,6]

На рисунку 2 наведена умовна схема подвоєного механізму зворотного-поступальної дії. Структурна схема плоского механізму цього типу представлена на рисунку 3. При повороті

## Машинобудування і зварювальне виробництво

кривошипу 1 з кінцевим шківом 2 на кут  $\pi$  гнучкий зв'язок 5 отримає максимальне одностороннє зміщення  $S_{max}$ . В межах кута  $\pi + 2\pi$  подальшого повороту кривошипа механізм здійснює звільнення гнучкого зв'язку. Для забезпечення безперервного зворотно-поступального руху необхідне застосування спарених механізмів, які працюють при зрушенні фаз на кут повороту  $\pi$ .

Якщо розглядати механізми суміщеними в одній площині, зводячи до нуля дугові ділянки гнучкого зв'язку, всі параметри позначені на схемах (рисунки 2,3).

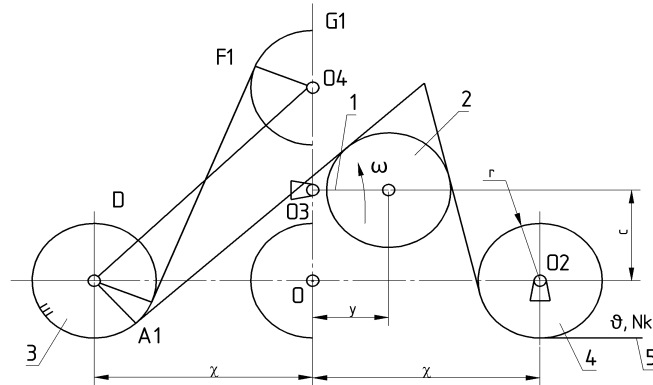


Рисунок 3 – Структурна схема механізму зворотно-поступального руху

При цьому прийняті такі співвідношення:

$$OB_1 = y_2 = const$$

$$OB_2 = y_1 = const$$

$$AO = x_1 = const$$

Із умовної схеми, представленої на рисунку 2, отримаємо функцію переміщення ланцюга ( $x$ ) від кута обертання водила :

$$f_1(x) = \frac{x}{\cos \alpha_{1x}} \quad (2)$$

$$f_2(x) = \frac{x}{\cos \alpha_{2x}} \quad (3)$$

Звідси:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \delta f(x) = x \lim_{x \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{\cos \alpha_{1x}} - \frac{1}{\cos \alpha_{2x}} \right) = 0 \quad (4)$$

З урахуванням геометрії процесу обертання водила з котками одержимо:

$$S_{max} = (AB_2 - AB_1) + (B_2B_x - B_1B_x) \quad (5)$$

$$S_{max} = C + \delta f(x) \quad (6)$$

При цьому

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$\lim S_{\max} = C \quad (7)$$

Таким чином, зі збільшенням  $X$  значення  $S_{\max}$  зменшується, наближаючись до  $C$ .

В результаті перетворень можна отримати фактичну величину зміщення гнучкого елемента:

$$\begin{aligned} 0,5S_{\max} = & \sqrt{(c+y)^2 + x^2 - 4r^2} - \sqrt{(c-y)^2 + x^2 - 4r^2} + \\ & + 2r \left( -\operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(c+y)^2 + x^2 - 4r^2}}{2r} + \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{(c-y)^2 + x^2 - 4r^2}}{2r} + \right. \\ & \left. + \operatorname{arctg} \frac{x}{c-y} - \operatorname{arctg} \frac{x}{c+y} \right) \quad (8) \end{aligned}$$

Аналогом розглянутому механізму служить і інший механізм (рисунок 4). При повороті кривошипа 1 з кінцевим роликом 2 гнучкий зв'язок переміщується вліво на відстань  $S$ :

$$S = z \cdot \Delta S \quad (9)$$

де  $z$  – кількість роликів генератора хвиль.

Середнє передатне число такої передачі знаходиться з виразу:

$$U_{\text{сеп1}} = \frac{2\pi Rr}{z \cdot \Delta S} \quad (10)$$

Хвильова не співвісна передача легко перетворюється у хвильовий рушій, наприклад транспортного засобу (рисунок 5). Швидкість переміщення каретки транспортного засобу знаходять за формулою:

$$v_2 = \frac{z \cdot \Delta S \cdot \omega}{2\pi} \quad (11)$$

Хвильову передачу (рисунок 5) можна назвати передачею із зовнішнім обкатуванням гнучкого зв'язку. В цій передачі ролики 4 генератора 3 мають зовнішнє розташування по відношенню до жорсткого колеса (шків) Передача, показана на рисунку 5, є модифікацією механізму натиску робочого органу (ковша) екскаватора [7,8].

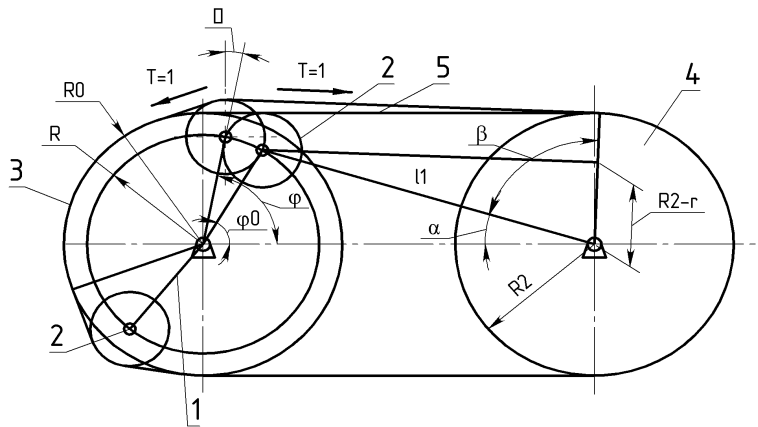


Рисунок 4 – Хвильова не співвісна передача з зовнішнім обкатуванням гнучкого зв'язку

## Машинобудування і зварювальне виробництво

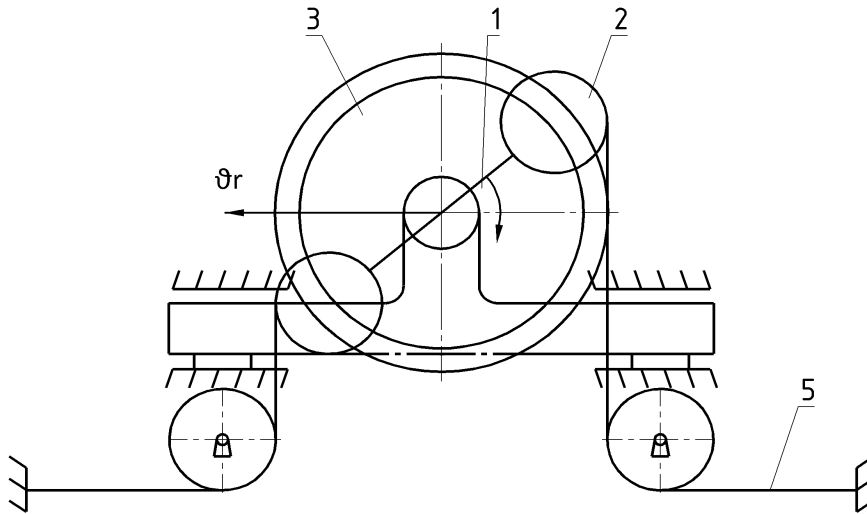
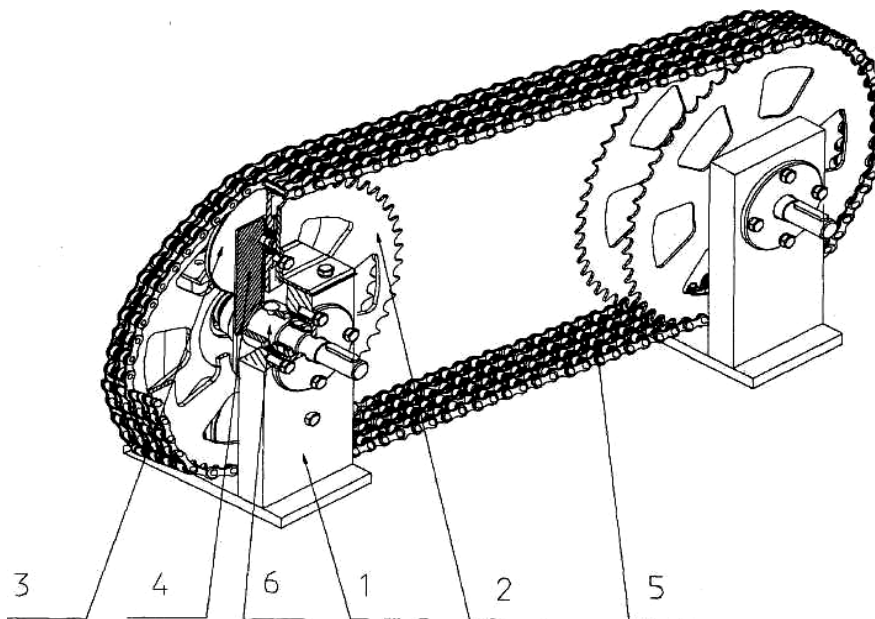


Рисунок 5 – Хвильова передача з зовнішнім обкатуванням гнучкого зв'язку (передача-рушій)

Конструктивно це здійснюється таким чином: жорстке колесо виконується збірним 3 з двох паралельних співвісних дисків; між дисками розташовується генератор хвиль 1 з «утопленими» в зазор між цими дисками деформувальними роликками 2; гнучке колесо 5 утворюється в результаті відсутності жорсткого з'єднання та збільшення периметру гнучкої частини, система перетворюється в гнучкий зв'язок; додається новий – ведений диск 4 (рисунок 4), або зірочка в ланцюгових передачах, кінематичне об'єднані з жорстким колесом або шківом та генератором хвиль гнучким зв'язком (пасом або ланцюгом) відповідно.

У випадку заміни гнучкого зв'язку ланцюговим контуром, а шківів зірочками можна отримати хвильову ланцюгову передачу, конструкція якої показана на рисунку 6.



1 – корпус; 2 – нерухома зірочка; 3 – катки; 4 – водило;  
5 – роликовий ланцюг; 6 – приводний вал.

Рисунок 6 – Хвильова ланцюгова передача з багаторядним роликовим ланцюгом

## Машинобудування і зварювальне виробництво

В результаті аналізу кінематики хвильової ланцюгової передачі (аналогічно як і для пасових передач) встановлено, що її середнє передатне число можна отримати з виразу:

$$U = \frac{Z_2}{n \cdot \Delta Z'} \quad (12)$$

де  $Z_2$  – число зубів ведучої зірочки;

$\Delta Z$  – різниця кроків ділянки ланцюга, який обкатується одним роликком генератора хвиль по відношенню до базової дуги обкатки;

$n$  – кількість роликів (котків) генератора хвиль.

Нормальна робота хвильової ланцюгової передачі забезпечується при виконанні наступної умови:

$$R + r \geq D_H + \delta, \quad (13)$$

де  $D_H$  – зовнішній діаметр зірочки;

$\delta$  – гарантований зазор, мм.

Наведені вирази характеризують кінематику та умови процесу передачі руху хвильових пасової і ланцюгової передач та порядок визначення їх окремих параметрів.

Теоретичні дослідження впливу значущих параметрів хвильової ланцюгової передачі дозволяють обґрунтовано підійти до вибору кінематичних схем та параметрів приводів виконавчих механізмів технологічних машин [6].

Миттєве значення передатного числа для цієї передачі знаходиться з виразу:

$$U_{\text{мит}} = \frac{R_2}{R} \cdot \frac{1}{\sin(\varphi_0 + \varphi) - \frac{R_0 - r}{R}}, \quad (14)$$

де  $\varphi = 0,5 - \alpha_0$ ;

$$\alpha_0 = \arccos \frac{R_0 - r}{R}.$$

Наведені залежності свідчать, що регулювання передатного числа можна забезпечити зміною параметрів  $R, R_0$ , або  $r$ .

Аналіз показує, що при рівномірному русі генератора хвиль, ведений елемент (шків або зірочка) може здійснювати пульсовий рух ( $\alpha = \alpha_0$ ) або пульсовий із вистоем відомої ланки ( $\alpha > \alpha_0$ ). Пульсовий рух можливий для фрикційної передачі тільки теоретично, так як в цьому випадку сумарний кут охоплення гнучким зв'язком обода рівний нулю.

У загальному випадку значення цього кута можливо отримати з виразу:

$$\alpha_{об} = \pi - z \cdot \arccos \frac{R_0 - r}{R} \quad (15)$$

Максимальне значення кутова швидкість  $\omega_2$  досягається при  $\varphi = \alpha_0$ :

$$\omega_{2max} = \frac{(R+r) - R_0}{R_2} \omega_1 \quad (16)$$

Для керування параметрами пульсацій швидкості необхідно визначити кут зміщення по фазі функцій  $\varphi_{зд}$  таким чином, щоб точка перетину графіків  $\omega_2 = f(\varphi)$  спарених передач

## Машинобудування і зварювальне виробництво

відповідала значенням  $\omega_2 = 0,5\omega_{2max}$ . В результаті алгебраїчних перетворень можна отримати:

$$\varphi_{сд} = 2 \cdot \arccos \frac{R+R_0-r}{2R} \quad (17)$$

Таким чином, рівняння руху відомої ланки спареної передачі, яка працює зі здвигом по фазі, буде:

$$\omega_{2сд} = \frac{R}{R_0} \left\{ \cos[\varphi - (\alpha_0 + \varphi_{сд})] - \frac{R_0-r}{R} \right\} \quad (18)$$

Рівняння руху відомої ланки зі спрямленою швидкістю матиме вигляд:

$$\omega_{вип} = \omega_2 + \omega_{2сд} \quad (19)$$

На рисунках 6, 7 наведено графіки зміни кутової пульсової швидкості відповідно без вистою та з наявністю вистою.

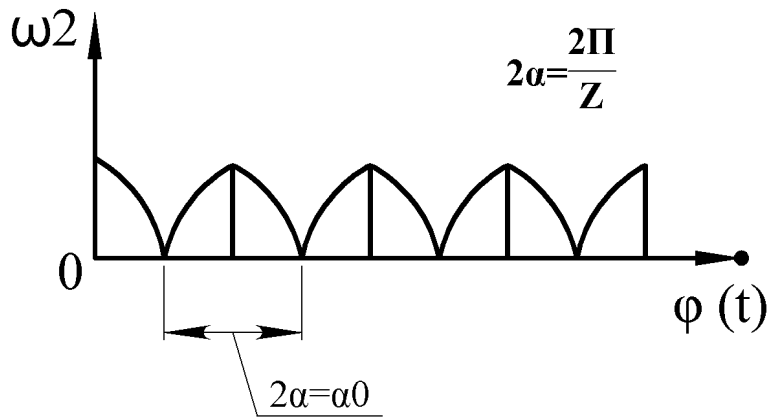


Рисунок 6 – Графік зміни кутової пульсової швидкості без вистою

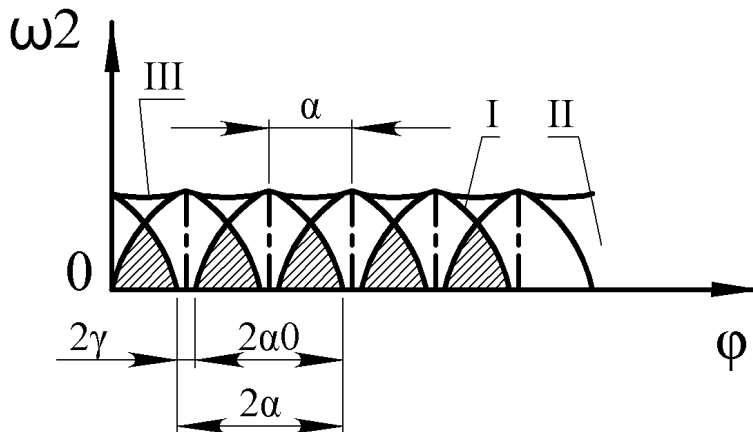


Рисунок 7 – Графік зміни кутової швидкості з наявністю вистою

Аналіз співвідношення параметрів отриманої передачі показує, що збільшення передатного числа призводить до зменшення кута охоплення.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Діапазон змін радіуса  $R$ , в будь-якому випадку знаходиться в межах  $R_{min} = (R_0 - r_x) \dots R_{max}$ . Значення  $R_{max}$  визначається при  $\alpha_{ox} = 0$ , тобто:

$$R_{max} = \frac{R_0 - r}{\cos\left(\frac{\pi}{z}\right)} \quad (20)$$

Вважаючи, що середньому значенню радіуса  $R$  відповідає задане середнє значення передатного числа [5], для практичних розрахунків отримуємо формулу визначення радіуса обкатки  $R_0$ , ввівши константи (рисунки 4):

$$C_1 = 1 - K, \quad (21)$$

$$C_2 = \left(1 + \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{z}\right)}\right) \quad (22)$$

При цьому:

$$U_{сep1} = \frac{\pi R_2}{z C_1 R_0 (\sqrt{C_2 - 1} - \arccos 1/C_2)}, \quad (23)$$

$$C = \frac{1}{\omega_1} \cos \varphi_0, \quad (24)$$

$$S_{c1} = R \left\{ [\cos \varphi_0 - \cos(\varphi_0 + \varphi)] - \frac{R_0 - r}{R} \right\}. \quad (25)$$

Можлива несинхронність руху гілок 1 та 2 гнучкого зв'язку знаходиться за формулою:

$$\delta S_\varphi^1 = S_{c1} - S_{c2}, \quad (26)$$

$$S_{max} = 2R \left( \sin \alpha_0 - \alpha_0 \cdot \frac{R_0 - r}{R} \right). \quad (27)$$

Тоді, після розрахунків:

$$\delta S_\varphi^1 = 0 \quad (28)$$

З рівняння рівноваги потужності на ведучому та веденому валах передачі, без урахування витрат зусиль на тертя в елементах передачі та при заданому одиничному зусиллі ( $T = 1$ ), можна отримати вираз для визначення складової швидкості верхньої гілки гнучкого зв'язку:

$$v_{c1}^1 = R \omega_1 \cos \gamma, \quad (29)$$

$$R'_0 = \frac{\pi R_2}{U_{сep1} z C_1 R_0 (\sqrt{C_2 - 1} - \arccos 1/C_2)}. \quad (30)$$

Тоді, вважаючи заданими  $U_{сp1}$  та  $R_0$ , можна визначити залежність тягової здатності передачі в межах  $R_x = R'_0 C_1 C_2$ :

$$\alpha_{об} = \arccos \frac{C_1 R_0}{R_x} \quad (31)$$

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Величина попереднього натягу гілок гнучкого елемента для фрикційної (наприклад пасової) передачі знаходиться за відомою формулою Ейлера:

$$S_0 = \frac{P}{2} \left( \frac{e^{f\alpha_{06}} + 1}{e^{f\alpha_{06}} - 1} \right), \quad (32)$$

де  $e$  – основа натурального логарифму;

$P$  – зусилля;

$f$  – коефіцієнт тертя ременя по жорсткому ободу.

Дані вирази дозволяють отримати графічні залежності середнього передатного числа та сумарного кута охоплення  $\alpha_{ox}$  від параметра  $R_x$  при різних числах роликів  $Z$  [5]

Розрахунки проведені при наступному припущенні: гілки гнучкого зв'язку при обертанні генератора хвиль та веденого шківів або зірочки залишаються паралельними самі собі у вихідному положенні. В цьому випадку швидкість руху ведучої гілки гнучкого зв'язку знаходиться з виразу:

$$v'_{c1} = \omega_1 R \left[ \sin(\varphi_0 + \varphi) - \frac{R_0 - r}{R} \right] \quad (33)$$

Для знаходження шляху переміщення цієї гілки у функції кута повороту  $\varphi$  отримаємо залежність:

$$\frac{dS_{c1}}{dt} = \omega_1 R \left[ \sin(\varphi_0 + \omega t) - \frac{R_0 - r}{R} \right], \quad (34)$$

При інтегруванні цієї залежності, отримаємо:

$$S_{c1} = \omega_1 R \left[ -\frac{1}{\omega_1} \cos(\varphi_0 + \omega t) - \frac{R_0 - r}{R} \right] t + C \quad (35)$$

Після тригонометричних перетворень маємо:

$$\gamma = \pi [(\varphi_0 + \varphi) + (\alpha + \beta)], \quad (36)$$

$$\alpha = \arctg \frac{R \sin(\varphi_0 + \varphi)}{A - R \cos(\varphi_0 + \varphi)}, \quad (37)$$

$$\beta = \arccos \frac{R_2 - r}{R_2 + A^2 - 2RA \cos(\varphi_0 + \varphi)}. \quad (38)$$

На рисунку 8 наведено графічні залежності середнього передатного числа та сумарного кута охоплення  $\alpha_{ox}$  від параметра  $R_x$  при різних числах роликів  $Z$



## Машинобудування і зварювальне виробництво

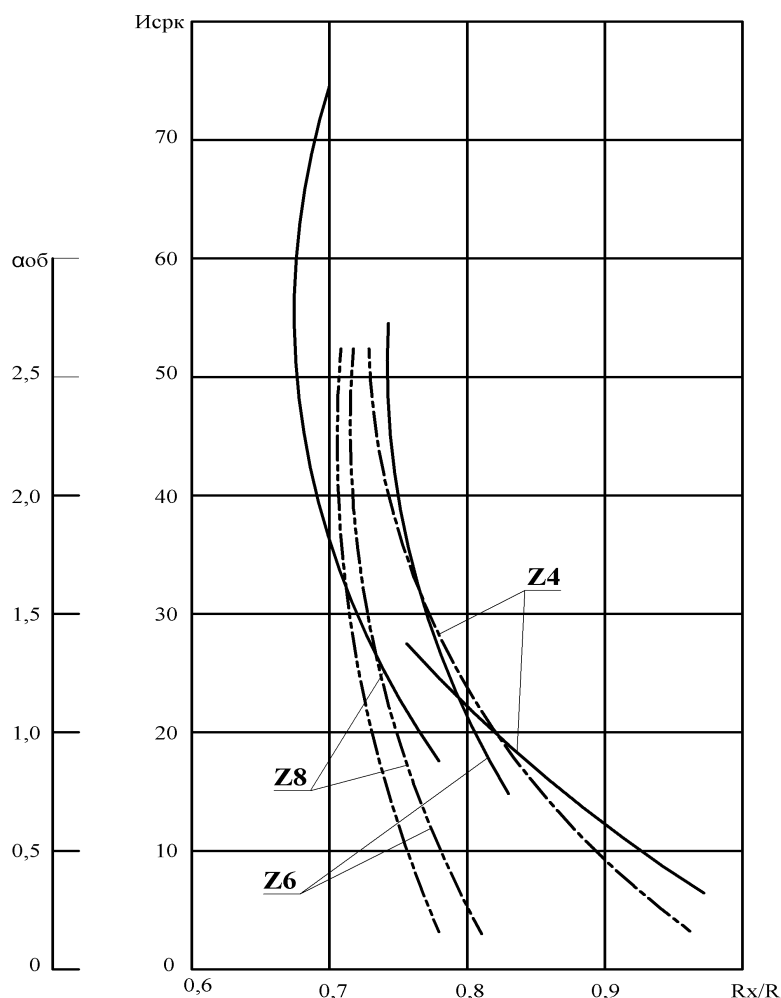


Рисунок 8 – Графічні залежності середнього передатного числа та сумарного кута охоплення  $\alpha_{об}$  від параметра  $R_x$  при різних числах роликів  $Z$

Теоретичні дослідження впливу значущих параметрів хвильової ланцюгової передачі дозволяють обґрунтовано підійти до вибору кінематичних схем та параметрів приводів виконавчих механізмів технологічних машин.

### ВИСНОВКИ

Наведено результати дослідження можливості застосування хвильових передач, як складових елементів в приводах технологічних машин, для забезпечення нерівномірного руху робочих органів з метою підвищення їх енергоефективності. К основним результатам дослідження відносяться:

- можливість забезпечення нерівномірної (пульсової) швидкості руху веденого елемента, яка залежить від конструктивних параметрів передачі;
- можливість в широкому діапазоні змінювати передатне відношення привода механізму з можливим вистом веденого елемента або без нього;
- можливість забезпечення імпульсного руху веденої ланки, наприклад робочого органу технологічної машини, при відповідній кутовій швидкості ведучого елемента;
- можливість обґрунтованого підходу до вибору і визначенню геометричних і

## Машинобудування і зварювальне виробництво

кінематичних параметрів хвильових пасових і ланцюгових передач;

- запропоновані конструкції і конкретні приклади застосування хвильових передач в приводах технологічних машин.

### Список використаних джерел

1. Блохін В.С., Маліч М.Г. Основні параметри технологічних машин. Машини для земляних робіт : У 2ч . – К.: Вища шк., 2006.- Ч.1 – 407 с. ISBN 966-642-289-1(ч. 1)
2. Малащенко В.О., Янків В.В. Деталі машин. Проектування елементів механічних приводів: Навчальний посібник.- Львів: Новий світ - 2000,2018. -264 с.
3. А.С. № 1234308. Привод для преобразования непрерывного вращательного движения в шаговое вращение. Степанов Е.А., Крупко В.Г., Бондаевский Г.И., Шнюков В.С. Бюл.изобрет №20, 1986.
4. Патент України на корисну модель № 68714 МПК Е 02F 16 G 13/00 від 16 08.2004 р. Хвильовий ланцюговий редуктор. Дорохов М.Ю. Крупко В.Г.
5. Крупко В.Г., Кучер Н.О. Хвильові ланцюгові передачі у приводах землерийних машин. Вісник ХНАДУ: зб. наукових праць. Вып.73. - Харків, 2016. - С 184-189.
6. Крупко В.Г., Дорохов М.Ю. Розробка привода сучасних підйомно-транспортних машин із хвильовим ланцюговим передаточним механізмом / Підйомно-транспортна техніка.- 2004. - №2(10) - С41-45.
7. Патент України на корисну модель №67932 МПК Е 02 F 3/08 від 15.07.2004 р. Натискний механізм екскаватора. Альошичев П.В., Дорохов М.Ю. Крупко В.Г.
8. Суглобов В.В., Крупко В.Г. Застосування хвильових ланцюгових передач в приводах технологічних машин /Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. - Вип. 25 //ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2023. – С. 44 – 49.

Suglobov V.V.,Krupko V.G., Krupko I.V.

## WAVE BELT AND CHAIN GEARS IN DRIVES OF TECHNOLOGICAL MACHINES

*The results of the study of the possibility of using wave transmissions as components in the drives of technological machines to ensure uneven movement of working bodies in order to increase their energy efficiency are presented. Designs of wave belt and chain gears are proposed, which allow changing the gear ratio of the drives of the executive mechanisms with or without the possible downtime of the driven element. These gears are also able to provide impulse movement of the driven link, for example, the working body (bucket) of a single-bucket excavator. The possibility of a reasonable approach to the selection and determination of geometric and kinematic parameters of wave belt and chain transmissions is noted. Proposed designs and specific examples of the application of wave transmissions in drives of technological machines.*

**Keywords:** wave belt and chain transmissions, kinematics of wave transmissions, pulsating motion.

Стаття надійшла 18.10.2024р.

## СПОСОБИ ЗАПОБІГАННЯ ФРЕТТИНГ-КОРОЗІЇ

*Підтверджено електромагнітну природу фреттинг-корозії опорних валків стану 3000 в результаті зближення та зміщення атомів, однакового напрямку мікрострумів електронів контактуючих поверхонь і виникнення міжатомних сил зв'язків.*

*Встановлено механізм регулювання магнітного поля та розроблено процес намагнічування контактуючих поверхонь із протилежним напрямом силових ліній магнітного поля, концентрації магнітного поля та створення електромагнітних сил та магнітного тиску відштовхування, що запобігає фреттинг-корозію.*

*Опорні валки, які запобігають прогину та поломиці чавунних робочих валків, працюють в умовах високих питомих тисків. У процесі прокатки тиски різко зростають, внаслідок шорсткості поверхні та нерівномірності питомих тисків. У місці виступів площа контакту зменшується, питомі тиски зростають, що призводить до пластичної деформації, зближення атомів на міжатомну відстань, зварюванню поверхонь, що контактують, і фреттинг-корозії, природа якої повністю не встановлена.*

*Фреттинг-корозія призводить до зниження втомної міцності металу, тому вивчення природи та розробка способів запобігання фреттинг-корозії є важливою науково-технічною проблемою.*

**Ключові слова:** *фреттинг-корозія, електромагнітна природа, індукція, електромагнітна сила, магнітний тиск, опорний валок.*

**Постановка проблеми.** Фреттинг-корозію пояснюють високими питомими тисками, під дією яких атоми контактуючих поверхонь зближуються на міжатомну відстань, і відбувається схоплювання [1]. Спочатку, при досягненні межі плинності, відбувається пластична деформація і розвиваються втомні явища, що супроводжуються утворенням мікротріщин. Існує теорія, згідно з якою одним з факторів виникнення фреттинг-корозії є невелика амплітуда відносного ковзання поверхонь, що контактують і реверсивне відносне мікро зміщення. Запропоновано молекулярну теорію фреттинг-корозії. Одним із факторів фреттинг-корозії розглядається кисень та утворення оксидів, що діють як абразив.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найімовірніша електромагнітна природа фреттинг-корозії, що полягає у наступному. У процесі прокатки, під дією високих питомих тисків, які різко зростають внаслідок шорсткості поверхонь та зменшення площі контакту опорного валка та втулки-цапфи, при досягненні межі плинності, відбувається пластична деформація та зближення атомів. Під впливом мікрозміщень атоми контактуючих поверхонь зміщуються щодо друг друга. Напрямок мікрострумів електронів атомів контактуючих поверхонь стає однаковим. Створені мікрострумами електронів, що обертаються навколо ядра, магнітні поля протилежних напрямків взаємно знищуються і індукція між атомами контактуючих поверхонь стає рівною нулю. Провідники зі струмами однакового напрямку рухаються у бік меншого магнітного поля та виникають міжатомні сили зв'язку тяжіння, природа яких електромагнітна. Ефективним є заснований на використанні квантових процесів електромагнітної взаємодії атомів спосіб запобігання фреттинг-корозії за рахунок намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка та втулки-цапфи з протилежним напрямом силових ліній магнітного поля та створення електромагнітних сил та магнітного тиску відштовхування, які діють на міжатомній відстані  $10^{-10}$  м.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Відповідно до квантової теорії магнетизму [2], електрон володіє внутрішнім власним механічним моментом (спином) та відповідним магнітним моментом, крім звичайного орбітального моменту та відповідного йому магнітного.

За відсутності намагнічування спини електронів розорієнтовані і компенсують один одного. Сумарне магнітне поле при цьому дорівнює нулю. При намагнічуванні спини електронів орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля, створюють результуюче поле і феромагнетик намагнічується.

Для намагнічування деталей невеликих розмірів рекомендують використовувати соленоїд, зробити виток навколо деталі та пропускати струм [3]. Опорний валок стану 3000, діаметр бочки якого 2100 мм, довжина бочки 3000 мм, загальна довжина понад 8000 мм і маса 120 тон, неможливо намагнітити за допомогою соленоїда. У виробничих умовах встановлено, що при пропусканні струму величиною 4800 А по витку навколо опорного валка та з протилежним напрямком втулки-цапфи намагнічування та запобігання фреттинг-корозії не забезпечується.

**Мета дослідження.** Тому, метою дослідження є вивчення природи процесу та розробка способів запобігання фреттинг-корозії опорних валків стану 3000.

Фреттинг-корозія опорного валка стану 3000 є процесом зварювання. Під дією високих питомих тисків, що перевищують межу плинності, відбувається пластична деформація, видаляються окисні плівки і атоми зближуються на міжатомну відстань. В результаті мікрозміщень контактуючих поверхонь опорного валка і втулки-цапфи, за рахунок люфту в області шпонки, забезпечується зміщення шарів атомів і однаковий напрямок мікрострумів електронів, обертаються навколо ядра. Створені мікрострумами магнітні поля протилежних напрямів взаємно знищуються і індукція стає рівною нулю. Мікроструми рухаються у бік меншого магнітного поля, внаслідок чого виникають міжатомні сили зв'язків, відбувається зварювання та фреттинг-корозія, природа якої електромагнітна.

**Основний матеріал дослідження.** З аналізу фреттинг-корозії опорних валків стану 3000 випливає, що процес виникає внаслідок концентрації тиску на площі, яка значно менша від загальної площі контакту опорного валка і втулки-цапфи.

Для намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка та втулки-цапфи та посилення магнітного поля встановлено механізм регулювання магнітного поля шляхом дослідження впливу на індукцію магнітопроводу зі струмом однакового напрямку.

Дослідження проводили шляхом моделювання процесу (рис.1) при пропусканні

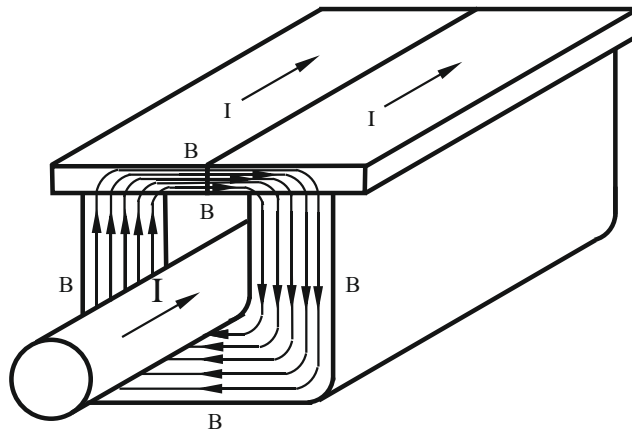


Рисунок 1 – Методика вимірювання поперечного магнітного поля в пластинах зі струмом однакового напрямку в магнітопроводі

## Машинобудування і зварювальне виробництво

постійного струму 2100 А по пластинах  $(8 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , з магнітопроводом  $(20 \times 66 \times 60 \times 90) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , в якому протікає струм однакового напрямку зі струмом у пластинах та вимірювання індукції поперечного та поздовжнього магнітних полів тесламетром EM4305. Як джерело живлення використовували випрямляч ВМГ5000.

Як встановлено (рис.2), відповідно до принципу суперпозиції і внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у магнітопроводі, що володіє великою магнітною проникністю, індукція поперечного поля зростає з максимального значення в пластинах 0,08 Т до 0,6 Т.

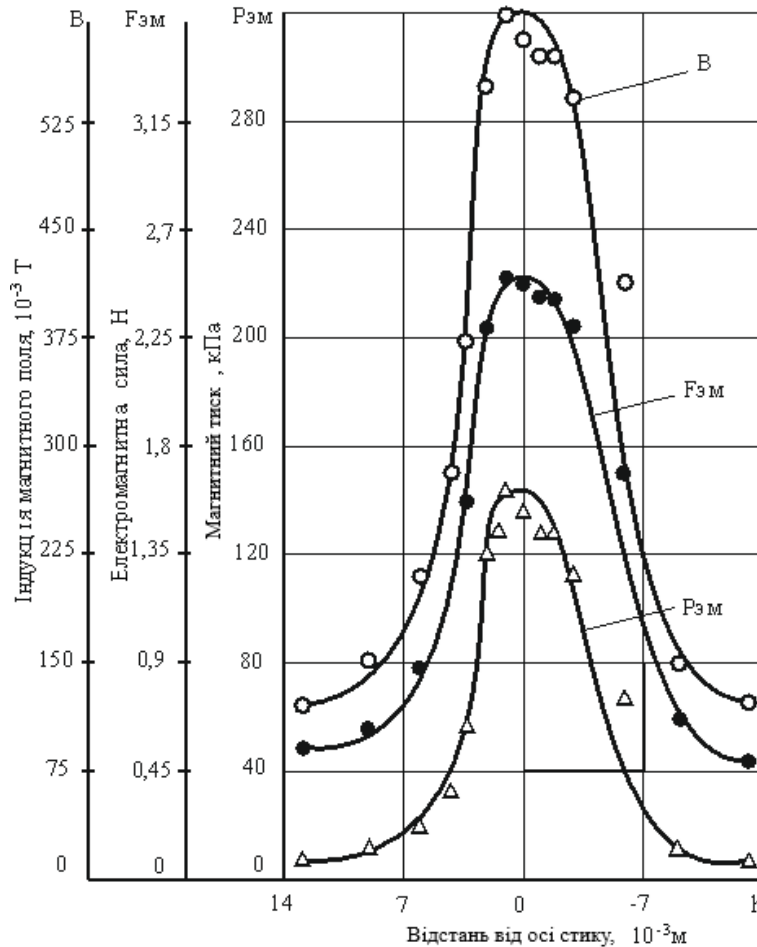


Рисунок 2 – Поперечне магнітне поле в пластинах  $(8 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3} \text{ м}$  зі струмом однакового напрямку у магнітопроводі  $(20 \times 66 \times 60 \times 90) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ : зазор у стику  $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ; струм 2100 А

Розподіл поля змінюється, напрямок поперечного поля в пластинах не змінюється і максимальне значення індукції досягається на середині товщини пластин, що є результатом замикання силових ліній магнітного поля в магнітопроводі та створення замкнутого контуру. Тому, розподіл індукції в пластинах з магнітопроводом аналогічно трубі значно збільшується магнітний потік, який визначається площею.

Магнітний потік залежить від індукції  $B$  та поверхні  $S$ , зі збільшенням якої магнітний потік магнітопроводу  $\Phi = BS$  зростає [4,5]. При постійному магнітному потоці індукція зі зменшенням площі збільшується. Тому, для підвищення індукції, необхідно зменшувати площу та концентрувати магнітну енергію.

Машинобудування і зварювальне виробництво

При пропусканні струму однакового напрямку в пластинах і магнітопроводі магнітний потік значно збільшується, за рахунок зменшення магнітного опору та принципу суперпозиції мікрострумів феромагнетика та струму, всередині магнітопроводу. При цьому, визначальним є струм усередині магнітопроводу, силові лінії якого замикаються в магнітопроводі, що має низький магнітний опір.

Пропорційно індукції, при протіканні струму однакового напрямку всередині магнітопроводу, зростають електромагнітна сила  $F_{EM} = IBL$ , Н [6,7] з 0,336 Н до 2,52 Н та у квадратичній залежності магнітний тиск

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu_0} \text{ Па [8] з 2,55 кПа до 143,3 кПа.}$$

При розташуванні магнітопроводу зі струмом однакового напрямку під пластинами максимальна індукція поздовжнього магнітного поля (рис.3), внаслідок концентрації силових ліній у магнітопроводі, що володіє великою магнітною проникністю, збільшилася з 0,051 Т до 0,09 Т. Закономірності розподілу поздовжнього і поперечного полів різні.

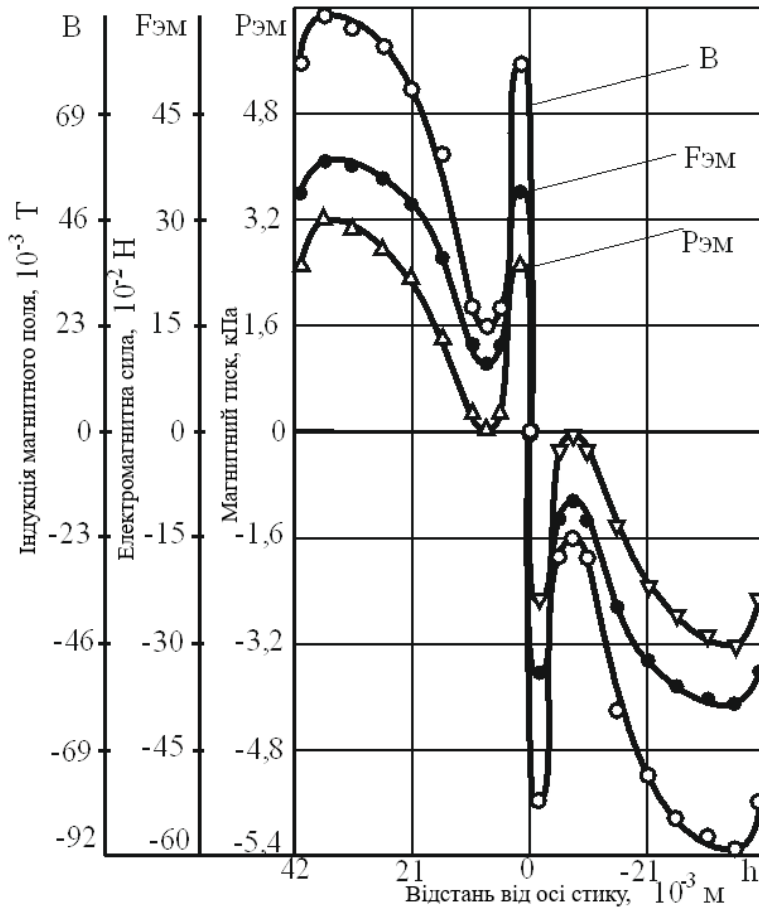


Рисунок 3 – Поздовжнє магнітне поле в пластинах  $(8 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$  м зі струмом однакового напрямку у магнітопроводі  $(20 \times 66 \times 60 \times 90) \cdot 10^{-3}$  м: зазор у стику  $2 \cdot 10^{-3}$  м; струм 2100 А

На кромці пластини, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля на феромагнетиці, індукція поля 0,078 Т. При наближенні до магнітопроводу індукція зростає, так як магнітопровід характеризується більшою магнітною проникністю, ніж пластини і досягає максимального значення на зовнішній кромці магнітопроводу 0,09Т. По товщині

магнітопроводу індукція поздовжнього магнітного поля знижується з 0,09 Т до 0,06 Т. У середині магнітопроводу індукція різко падає до 0,023Т на відстані 0,007 м від осі стику пластин. При наближенні до внутрішньої кромки пластини, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля у феромагнетиці, індукція різко підвищується і досягає 0,078 Т на внутрішній кромці, як і на зовнішній кромці. При подальшому наближенні до осі стику, внаслідок великого магнітного опору у зазорі, індукція поздовжнього поля різко зменшується і стає рівною нулю на осі стику. При переході через вісь стику індукція змінює напрямок протилежне.

Закономірність розподілу індукції другою пластині аналогічна першій. Пропорційно змінюється величина та напрямок електромагнітної сили, яка на кромках пластини 0,33 Н, на зовнішній кромці магнітопроводу – 0,38 Н, мінімальна електромагнітна сила 0,1 Н. Магнітний тиск на кромках пластини 2,42 кПа, на зовнішній кромці магнітопроводу – 3,22 кПа.

Поздовжнє магнітне поле, яке визначає електромагнітні сили та магнітний тиск відштовхування, значно нижче поперечного поля, тому для намагнічування необхідно збільшити поздовжнє магнітне поле. Посилення магнітного поля, за рахунок підвищення величини струму, обмежене нагріванням кабелів та розплавленням контактів під дією тепла Джоуля-Ленца  $Q=I^2Rt$  [5,6].

Найбільш ефективною є ідея та розроблені П.Л. Капицею [9] способи отримання сильних імпульсних магнітних полів, що дозволило підвищити індукцію до 50 Т. Розряджаючи батарею конденсаторів на соленоїд діаметром 0,001 м, П.Л. Капиця при струмі 7000 А і потужності 1000 кВт за 0,003 частки секунди, поки соленоїд не зруйнувався, отримав магнітне поле 50 Т. Основним способом посилення магнітного поля є концентрація магнітних полів за рахунок зменшення площі [9].

Для збільшення поздовжнього магнітного поля розроблено подвійний магнітопровід (рис.4), що складається з електротехнічної сталі зі струмом всередині, розташованого зверху і знизу пластин, по яких протікає струм однакового напрямку з магнітопроводом (20x66x60x90)·10<sup>-3</sup> м. Для концентрації магнітного поля пластини розташовувалися одна над іншою, що зменшувало площу контакту пластин з магнітопроводом.

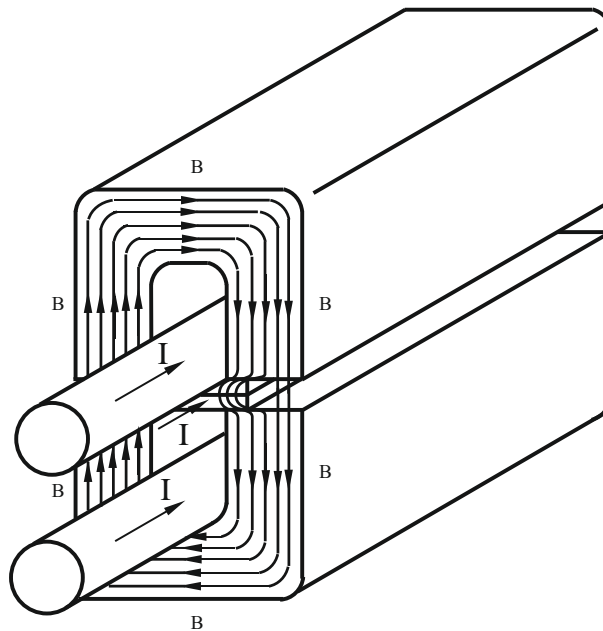


Рисунок 4 – Модель подвійного магнітопроводу

## Машинобудування і зварювальне виробництво

При зменшенні площі контакту максимальна індукція магнітного поля зростає (рис.5), внаслідок концентрації силових ліній на феромагнітній пластині.

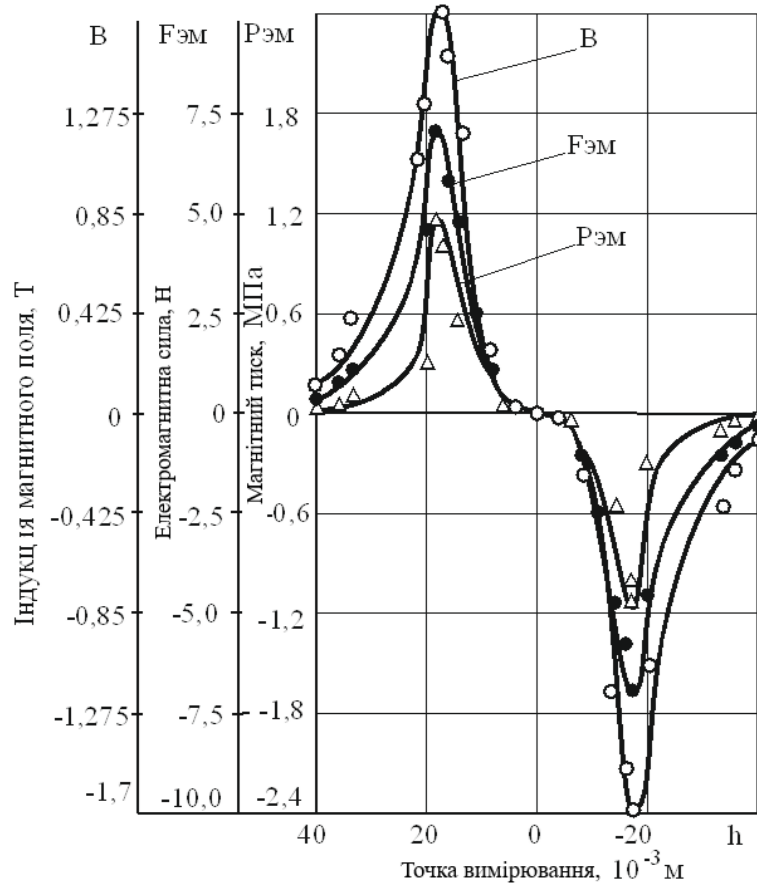


Рисунок 5 – Концентрація поздовжнього магнітного поля: магнітопровід  $(20 \times 66 \times 60 \times 90) \cdot 10^{-3}$  м; величина струму 2100 А; пластини  $(3,0 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$  м; повітряний зазор  $6 \cdot 10^{-3}$  м

На відстані  $7 \cdot 10^{-3}$  м від зовнішньої сторони магнітопроводу індукція поздовжнього магнітного поля дорівнює 0,15 Т. При наближенні до магнітопроводу індукція зростає, досягає на зовнішній стороні магнітопроводу 0,42 Т. При наближенні до кромки пластин індукція, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля на феромагнітних пластинах, зростає до 1,05 Т та до 1,3 Т на кромці пластин. У місці контакту магнітопроводу з пластинами на відстані  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м від кромки пластин індукція різко зростає до 1,7 Т, а потім знижується до 1,15 Т на внутрішній стороні магнітопроводу і до нуля на осі магнітопроводу. Незважаючи на низьку магнітну проникність, частина силових ліній магнітного поля проходить повітрям. При переході через вісь магнітопроводу індукція змінює напрямок на протилежний і розподіляється аналогічно першій стінці магнітопроводу.

При розташуванні магнітопроводів зверху та знизу пластин, пропускання струму по двох пластинах  $(3,0 \times 40 \times 300) \cdot 10^{-3}$  м та величині повітряного зазору  $6 \cdot 10^{-3}$  м індукція

поздовжнього магнітного поля зростає з 0,09 Т до 1,7 Т (рис.5), що є результатом зменшення площі контакту пластин з магнітопроводом, концентрації силових ліній магнітного поля, принципу суперпозиції та зменшення магнітного опору в магнітопроводі. Максимальна індукція при цьому знаходиться на середині контакту магнітопроводу з пластинами. Крім того,



## Машинобудування і зварювальне виробництво

при розташуванні магнітопроводу зверху і знизу в місці контакту пластин з магнітопроводом, відсутнє поперечне і створюється лише поздовжнє поле. Внаслідок концентрації, електромагнітна сила поздовжнього поля підвищилася з 0,38 Н до 7,14 Н, магнітний тиск зріс з 3,22 КПа до 1,15 МПа.

Таким чином, встановлені основні закономірності та механізм регулювання магнітного поля при протіканні постійного струму по виробу. Для збільшення поздовжнього магнітного поля розроблена конструкція подвійного магнітопроводу зі струмом всередині, розташованого зверху і знизу пластин, якими протікає струм однакового напрямку зі струмом в магнітопроводі. При цьому зменшується площа контакту пластин з магнітопроводом і різко зростає індукція поздовжнього магнітного поля, яке визначає електромагнітні сили, магнітний тиск відштовхування та запобігає фреттинг-корозію опорного валка та втулки-цапфи.

На підставі проведених досліджень встановлено закономірності та розроблено механізм регулювання магнітного поля, які дозволили використовувати квантові процеси електромагнітного відштовхування для запобігання заварюванню, шляхом намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка та втулок-цапф із протилежним напрямком силових ліній.

Виникнення електромагнітних сил відштовхування підтверджено при моделюванні за допомогою феромагнітного порошку, який встановлюється вздовж силових ліній магнітного поля. При наближенні однойменних полюсів феромагнітний порошок, унаслідок протилежного напрямку силових ліній відхиляється і полюси відштовхуються один від одного. Зі зменшенням відстані між полюсами електромагнітна сила відштовхування зростає і в квадратичній залежності підвищується магнітний тиск відштовхування, що свідчить про ефективність намагнічування поверхонь, що контактують.

На підставі проведених досліджень встановлено, що найбільш ефективно підвищується магнітне поле при протіканні струму всередині та концентрації силових ліній у подвійному магнітопроводі. В результаті зростають електромагнітна сила і магнітний тиск (рис.6), який визначає електромагнітне відштовхування, запобігає заварюванню поверхонь, що контактують і фреттинг-корозію.

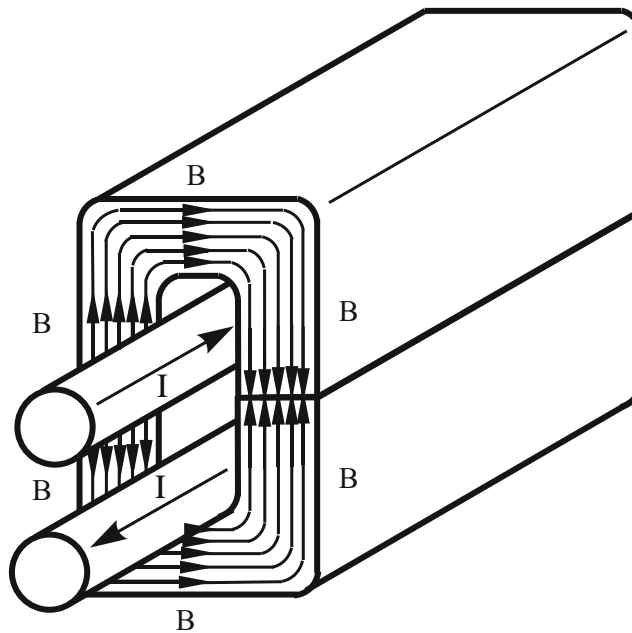


Рисунок 6 – Силові лінії магнітного поля відштовхування

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для концентрації магнітного поля та електромагнітної обробки контактуючих поверхонь опорного валка та втулки-цапфи намагнічування проводиться ділянками, розміри яких дорівнюють довжині та ширині магнітопроводу.

Ефективність електромагнітного запобігання фреттинг-корозії підтверджена у виробничих умовах обробки опорного валка та втулки-цапфи стану 3000.

### ВИСНОВКИ

1. Підтверджена електромагнітна природа фреттинг-корозії, під дією високих питомих тисків, що зростають внаслідок зменшення площі контакту в місці виступів, мікрозміщень атомів контактуючих поверхонь, однакового напрямку мікрострумів електронів, що обертаються навколо ядра, взаємного знищення магнітних полів, руху електронів у бік меншого магнітного поля та виникнення міжатомних сил зв'язків.

2. Ефективним способом підвищення індукції поздовжнього поля, електромагнітної сили та в квадратичній залежності магнітного тиску є концентрація силових ліній за рахунок зменшення площі та магнітного опору, за допомогою подвійного магнітопроводу, всередині якого протікає струм, так як при цьому всі силові лінії концентруються в магнітопроводі, що володіє великою магнітною проникністю.

3. Розроблено спосіб запобігання фреттинг-корозії, за рахунок створення електромагнітних сил відштовхування, шляхом намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка і втулки-цапфи з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, за допомогою концентрації поля, що в квадратичній залежності посилює магнітний тиск відштовхування і ефективно запобігає фреттинг-корозію.

### Список використаних джерел

1. Голєго Н.Л., Аляб'єв А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-корозія металів. - К.: Техніка, 1974. - 272 с.
2. Уайт Р. Квантова теорія магнетизму. Пров. з англ. - К.: Світ, 1985. - 304с.
3. Вонсовський С.В. Магнетизм. - К.: Наука, 1984. - 208с.
4. Бінс К. та Лауренсон П. Аналіз та розрахунок електричних та магнітних полів. Перкл. з англ. К.: Енергія. - 1970. - 376с.
5. Зільберман Г.Є. Електрика та магнетизм. - К.: Наука, 1970. - 383с.
6. Безсонов Л.А. Теоретичні засади електротехніки. Електромагнітне поле. - К.: Гардаріки, 2001. - 317 с.
7. Абрамович Г.П. Прикладна газова динаміка - К.: Наука, 1969. - 824с
8. Паркінсон Д., Малхолл Б. Отримання сильних магнітних полів - К.: Атоміздат, 1971. - 198 с.
9. Електротехніка / За ред. В.С. Пантюшина. - К.: Машинобудування, 1976. - 560 с.

**Volenko I.V., Shchetynina V.I., Shchetynin S.V., Desyatskyi S.P.**

### METHODS OF FRETTING-CORROSION PREVENTION

*The electromagnetic nature of fretting corrosion of the support rolls of the 3000 mill has been confirmed as a result of the convergence and displacement of atoms, the same direction of the electron microcurrents of the contacting surfaces and the emergence of interatomic bonding forces.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*A mechanism for regulating the magnetic field has been established and a process for magnetizing the contacting surfaces with the opposite direction of the magnetic field lines, concentrating the magnetic field and creating electromagnetic forces and magnetic repulsion pressure, which prevents fretting corrosion, has been developed.*

*Support rolls, which prevent deflection and breakage of cast iron work rolls, operate under conditions of high specific pressures. During the rolling process, the pressures increase sharply due to surface roughness and uneven specific pressures. At the location of the protrusions, the contact area decreases, the specific pressures increase, which leads to plastic deformation, the convergence of atoms to the interatomic distance, welding of the contacting surfaces, and fretting corrosion, the nature of which has not been fully established.*

*Fretting corrosion leads to a decrease in the fatigue strength of the metal, therefore, studying the nature and developing methods for preventing fretting corrosion is an important scientific and technical problem.*

**Keywords:** *fretting corrosion, electromagnetic nature, induction, electromagnetic force, magnetic pressure, support roll.*

*Стаття надійшла 20.10.2024р.*

УДК 544.537:669.715

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318351](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318351)

Лютова О.В., Капустян О.Є.

## ПІДВИЩЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВТОРИННИХ СИЛУМІНІВ

*Робота присвячена підвищенню ливарних властивостей вторинних силумінів. Розглянуто вплив вмісту стружки в шихті, кількості заліза в сплаві та модифікатора, що використовується для обробки рідкого розплаву, на рідину, лінійну усадку, тріщиностійкість і бал пористості силуміну АК9М2. Алюміній є ключовим матеріалом сучасної промисловості, який активно використовується в багатьох галузях завдяки своїм унікальним властивостям: легкості, високій корозійній стійкості, питомій міцності, теплопровідності та технологічності. Його застосування охоплює автомобілебудування, авіацію, будівництво, електротехніку та інші сфери. Однак виробництво первинного алюмінію пов'язане зі значними витратами енергії та високим рівнем екологічного забруднення. У зв'язку з цим усе більшої ваги набуває вторинна переробка алюмінію, особливо у виготовленні силумінів — сплавів на основі алюмінію з кремнієм, що відзначаються широкими можливостями застосування.*

*Однак вторинні алюмінієві сплави мають певні недоліки. Через наявність домішок, таких як залізо, кальцій чи інші неметали, їх механічні та технологічні властивості можуть бути значно обмеженими. Для покращення характеристик таких сплавів застосовують рафінування й модифікування. Методи рафінування спрямовані на очищення металу від неметалевих включень і розчинених газів. Серед основних підходів — відстоювання, обробка флюсами, продування інертними газами й фільтрація через спеціальні системи.*

*Модифікування структури сплаву відбувається за допомогою введення легувальних компонентів, зокрема перехідних металів, стронцію, титану, бору, сурми. Такі добавки дозволяють контролювати процес кристалізації, зменшуючи розміри зерен і рівномірно розподіляючи частинки зміцнюючої фази, що позитивно впливає на міцність, пластичність і ливарні властивості.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*Нові методи, зокрема використання сірки або багатокomпонентних лігатур, демонструють перспективу для створення вторинних алюмінієвих сплавів із покращеними властивостями. Ці підходи дозволяють ефективніше вирішувати завдання повторного використання металу, підвищуючи якість продукції та зменшуючи вплив на довкілля.*

**Ключові слова:** вторинні силуміни, ливарні властивості, модифікація.

**Постановка проблеми.** Алюміній, який отримав колись назву «срібло з глини», на сьогоднішній день є одним із найважливіших технічних матеріалів, а також одним із найпоширеніших у земній корі елементів (7,5 %) [1]. Споживання алюмінію та його сплавів у світі, на сьогоднішній день, становить приблизно 20 млн. т на рік і посідає друге місце після заліза. Такий попит обумовлений його фізико-механічними, хімічними та службовими властивостями. Він легкий, маса алюмінієвої деталі втричі легша за сталеву деталь таких же розмірів. За питомою міцністю алюмінієві сплави не поступаються ряду вуглецевих та легованих сталей. Вони корозійностійкі у повітрі, а також у середовищі багатьох рідин і газів, мають високу пружність і не окрихчуються при низьких температурах. Алюміній добре проводить електричний струм та тепло, за цими показниками його перевершує лише мідь. Піддається обробці методами різання та тиску, зварювання.

Виробництво первинного алюмінію є високоенерговитратним та екологічно шкідливим. Єдиний в Україні виробник первинного алюмінію – Дніпровський алюмінієвий завод фактично припинив свою роботу. Виробництво вторинного алюмінію та його сплавів, внаслідок менших енергетичних витрат та викидів у навколишнє середовище, має тенденцію до зростання. До 2030 року, згідно з прогнозами, випуск вторинного алюмінію у світі може сягнути 22...24 млн. т на рік [2]. Головними недоліками вторинних алюмінієвих сплавів є низькі технологічні та механічні властивості, внаслідок забруднення вихідної шихти залізом, мастилами, пластмасами та іншими шкідливими домішками.

Серед ливарних алюмінієвих сплавів найбільшого поширення знайшли силуміни, що характеризуються сприятливим поєднанням механічних та ливарних властивостей. Властивості силумінів, значною мірою, визначаються якістю шихти та процесами металургійного переділу. Відповідно до результатів досліджень А.А. Мітєєва, Н.С. Калініної, В.З. Куцовой та ін., ретельна підготовка та сортування шихтових матеріалів у поєднанні з рафінуючо-модифікуючою обробкою рідкого металу дозволяють суттєво підвищити механічні (міцність, пластичність, твердість, ударна в'язкість) та службові (витривалість, кавітаційна та корозійна стійкість) первинних металів. На жаль, у цих, як і в більшості інших робіт, мало приділяється уваги технологічним властивостям, в першу чергу ливарним (рідкотекучості, тріщиностійкості, усадці та ін.), а також зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів. Усунення цієї прогалини, у значній частині, присвячена ця робота.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах дефіциту первинної сировини, що все зростає, підвищення технологічних і механічних властивостей вторинних силумінів в результаті вдосконалення процесів шихтовки, рафінування та модифікування розплаву є актуальним завданням. Ливарні властивості відносяться до важливих технологічних характеристик, що визначають якість виливків, їх механічні та службові властивості. Силуміни володіють в цілому досить високими ливарними властивостями: хорошими рідкотекучістю та тріщиностійкістю, низькою об'ємною усадкою. Використання вторинної сировини, в першу чергу стружки, при виробництві силумінів негативно позначається на їх ливарних та механічних властивостях, внаслідок забруднення шихти залізом, мастильно-охолоджувальними рідинами, пластмасами та іншими небажаними домішками. Це вимагає проведення додаткових заходів щодо рафінування рідкого розплаву.

Методи рафінування: Плавка та лиття алюмінієво-кремнієвих сплавів супроводжуються окисленням розплаву та розчиненням у ньому газів, внаслідок чого сплави забруднюються

## Машинобудування і зварювальне виробництво

неметалевими включеннями. Неметалічні включення, розташовуючись на межах зерен, сприяють зниженню механічних та технологічних властивостей силумінів [3]. Алюміній має велику спорідненість до кисню, підвищену схильність до газонасичення, що призводить до забруднення розплаву оксидами. Основна неметалічна домішка у алюмінієвих сплавах – оксид алюмінію  $Al_2O_3$ .

Значний вплив на властивості алюмінієвих сплавів надає водень. Волога, що міститься у футеровці печей і ковшів, флюсів і шлаків, мастильні матеріали, що містяться в шихті, є основним джерелом водню в металі (> 80% від загального обсягу газів) [4]. Пористість, спричинена підвищеним вмістом водню, є основним дефектом алюмінієвих сплавів.

Причина утворення газової пористості – зниження розчинності водню у металі зі зниженням його температури. Розчинність за температури плавлення алюмінію становить  $0,69 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ ,  $15,6 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  – розчинність у рідкому алюмінії при 2343 К. При 700 ... 1000 °С мідь і кремній знижують розчинність водню в алюмінії. Утворення нітридів, оксидів, карбідів, сульфідів у розплаві при його взаємодії з атмосферою, оксидами сірки та вуглецю не призводить до збільшення пористості [5].

Для зниження негативного впливу неметалевих включень та газів проводять операцію рафінування. Усі методи рафінування засновані на виконанні двох необхідних умов: виділення домішок у самостійну фазу та максимальне відділення цієї фази від рідкого розплаву.

Найбільш простим та широко використовуваним методом рафінування є відстоювання розплаву. Легкі частинки домішок і бульбашки газів у об'ємі розплаву спливають на його поверхню, важкі осідають на дно печі. Недоліком цього є тривалість процесу відстоювання, що знижує продуктивність роботи цеху, і навіть залежність ступеня рафінування від вологості атмосфери в цеху. На виробництві найчастіше використовують три технологічні прийоми: обробку розплаву флюсами, продування його інертними та активними газами, фільтрацію.

Рафінування флюсами полягає у фізико-хімічній взаємодії флюсів з неметалевими включеннями та газами, що знаходяться в розплаві. Найбільш широке поширення знайшли флюси на основі фтористих та хлористих солей натрію та калію. Застосування при виплавці сплаву АЛ32 (АК8М) флюсів наступних складів:

- 1) 44 % NaCl+44 % KCl+12 % NaF ( $T_{пл} = 610 \text{ °C}$ );
- 2) 42 % NaCl+ 42 % KCl+16 % NaF ( $T_{пл} = 620 \text{ °C}$ ),
- 3) 47,25 % NaCl+47,25 % KCl+5,5 % KF ( $T_{пл} = 640 \text{ °C}$ ),

зменшив газовміст сплаву проти існуючого на 1...2 бали пористості за шкалою ВНДІАМ [5]. У виливках був виявлено шлакових включень, а механічні властивості відповідали вимогам стандарту.

Використання інертних або активних газів для продування розплаву є адсорбційним методом рафінування. Для цілей рафінування можна використовувати аргон, азот, хлор, фтор, фреон та ін. [6-9].

Сполуки хлору, фтору – високотоксичні речовини, що погіршують екологію; з'єднання фреону негативно впливають на озоновий шар Землі, руйнуючи його. Тому використання цих газів обмежене. Нетоксичним газом є азот, його вартість набагато нижче вартості аргону. Також може бути використана суміш чадного газу (CO) з азотом.

Останнім часом все більш широке застосування в комплексах, що рафінують-модифікують, знаходить сірка та її сполуки. Рафінуюча дія сірки полягає в утворенні сірководню, а також великої кількості газоподібної сірки ( $T_{кип} = 445 \text{ °C}$ ), що реалізує механізм адсорбційного хімічного рафінування. У роботі [10] сплав АК5М4, виплавлений із низькосортних шихтових матеріалів, був оброблений порошкоподібною сіркою у струмені азоту. Обробка алюмінієвого розплаву масою 500 кг добавкою 0,05% сірки викликала утворення пари сірки за обсягом в 1,5...2 рази більше порівняно з об'ємом аргону, що продуває протягом 10 хв через розплав тієї ж маси. Вміст водню зменшилося з  $0,28 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  (при

## Машинобудування і зварювальне виробництво

обробці розплаву універсальним флюсом) до  $0,10 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Сірка також виступає у ролі модифікатора залізовмісних фаз. Це, за даними [10], призвело до збільшення рідини з 240 (обробка універсальним флюсом) до 300 мм (обробка сіркою).

Встановлено [11], що при введенні сірки, у складі сумішей або у вигляді сполук, забезпечувався найвищий рівень властивостей сплавів, тоді як порошкоподібна сірка у чистому вигляді інтенсивно випаровувалась, не забезпечуючи стійкого ефекту, що рафінує. Введення сірки у вигляді сполук знизило у 8...10 разів кількість газових викидів, що утворюються при модифікуванні [12]. Дослідженнями, проведеними Б.М. Немененком та ін., встановлено, що під дією сірки пластинчаста форма залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах змінюється на рівноосну щодо  $\text{Mn:Fe} > 0,5$ .

Застосування технології обробки розплаву рафінуючими таблетками (50% сірки +50% кальцинованої соди) при виплавці поршневих сплавів [13], дозволило використовувати в шихті 60...70% власних відходів при економії первинних матеріалів 40...50% і на 5...10% зменшити газоусадочну пористість, на 20...30% підвищити рідинну сплаву. Механічні властивості сплаву відповідали ГОСТ 1583-89.

Ще одним простим та ефективним методом рафінування є фільтрація. Як фільтри використовуються склотканина, гранули вогнетривких матеріалів, рідкий флюс та ін.

У роботі [14] для фільтрування вторинного силуміну АК9М2 було застосовано фільтр складу 50%  $\text{CaF}_2$ +50%  $\text{MgF}_2$ . При використанні даного фільтра з розплаву віддалилися великі частинки сполук заліза, об'ємна частка фаз залізовмісних складала 1,5% по відношенню до 2,7% (без фільтра), відбулося також модифікування кремнію евтектики, очищення розплаву від включень оксидів. Сприятливі структурні зміни призвели до підвищення пластичності металу.

Для рафінування вторинних алюмінієвих сплавів від заліза було запропоновано технологічну схему [15], яка включала такі етапи:

- а) визначення вмісту заліза та кремнію в сплаві;
- б) якщо вміст  $\text{Fe} > 3,0\%$  – переплав на розкислювач;
- в) якщо вміст  $\text{Fe} \leq 3,0\%$  – коригування хімічного складу;
- г) ведення Al-Cr з метою отримання співвідношення  $\text{Cr: Fe} = 1:1$ ;
- д) фільтрація через пінокерамічні фільтри;
- е) отримання товарного металу.

Крім видалення заліза зі сплаву, фільтрація сприяла видаленню розчинених газів, оксидних плівок і шлакових включень, при цьому залишковий хром у товарному сплаві забезпечив підвищення корозійної стійкості. Цей метод екологічно безпечний, що дозволяє підвищити культуру виробництва вторинних алюмінієвих сплавів.

### Методи модифікування

Одним з ефективних та найбільш універсальних методів підвищення технологічних та механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів є модифікування. Його основне завдання полягає у сприятливій зміні величини та форми структурних складових сплаву, при введенні в рідкий метал добавок-модифікаторів, які практично не змінюють хімічного складу сплаву. Ці добавки умовно поділені на дві групи: модифікатори I та II роду.

У першій групі як модифікатори виступають хімічні елементи, які утворюють тугоплавкі сполуки, що кристалізуються в першу чергу. Виділяючись у вигляді дисперсних частинок, ці сполуки (карбіди, нітриди, оксиди) є зародками кристалів, що виникають під час затвердіння. Як модифікатори I роду можуть виступати титан, ванадій, цирконій та ін.

До другої групи відносяться поверхнево-активні елементи, які адсорбуються на межах кристалу, що зародився, і тим самим знижують швидкість його зростання. Лужні та лужноземельні метали (натрій, калій) відносяться до цієї групи. Останнім часом, як модифікатори доевтектичних і евтектичних силумінів, широкое поширення знайшли стронцій і сурма. Найбільш ефективним є використання комплексів, що складаються з кількох

## Машинобудування і зварювальне виробництво

елементів-модифікаторів. У роботах В.З. Куцової [16-18] показано, що модифікування сплаву АК7ч комплексом, до складу якого входить 0,1% стронцію і 0,5% скандію, призводить до підвищення диференціювання евтектики, а також поліпшення властивостей сплаву - підвищення межі міцності в 1,7...2,0 рази, твердості в 1,5 ... 1,8 рази, при рівні пластичних властивостей немодифікованого силуміну.

Застосування потрійної лігатури Al+2,2 % Si+10 % Sr при модифікуванні сплаву АЛ4 (АК9ч) забезпечувало отримання рівномірної структури, що містить розгалужені дендрити твердого розчину та тонкодиференційовану евтектику [19]. Стронціймісткі інтерметалідні включення розташовувалися по межах зерен, не знижуючи при цьому показників механічних властивостей сплаву. Евтектичні потрійні лігатури системи Al-Si-Sr дозволили підвищити міцність виливків на 5...10%, пластичність на 50...70% порівняно з використанням подвійної лігатури Al+5% Sr.

Як модифікатори алюмінієвих сплавів використовуються лігатури алюмінію з перехідними металами. Добавки перехідних металів впливають на утворення пересичених твердих розчинів, змінюючи за рахунок цього розміри литого зерна. Згідно з результатами досліджень [20] застосування лігатур Al-3% Zr і Al-2,5% Ti для модифікування сплаву АЛ5М призвело до подрібнення евтектичного кремнію, крім того титан і цирконій, що знаходилися в твердому розчині, сприяли зміцненню сплаву. Надлишкові алюмініди були відсутні, хоча сумарний вміст титану та цирконію становив 0,25 %.

Використання дрібнокристалічної лігатури АТ3 (алюміній+титан) для модифікування сплаву АК6М2, шихта якого складалася з 40% первинного чушкового сплаву АК6М2 та 60% власного повернення, збільшило вміст титану з 0,14 до 0,16...0,17. Після обробки розплаву лігатурою АТ3 (алюміній+0,16 % титану) модифікуючий ефект зберігався протягом 2...3 год, спостерігалася подрібнення макроструктури сплаву. Такі зміни сприятливо позначилися лише на рівні технологічних і механічних властивостей. Показники межі міцності перебували лише на рівні 250 МПа, твердості 89 НВ, бал пористості знизився до 1 бала згідно з ГОСТ 1583-93. Зниження рідинної плинності на 4,7 % порівняно з діючою технологією можна вважати несуттєвим.

Модифікування висококремнистого алюмінієвого сплаву АК12М2,5Н2,5 ітрієво-кремнієвою лігатурою (40 % Y-Si), за рахунок більшої спорідненості ітрію до водню, в порівнянні з іншими компонентами сплаву, сприяло зв'язуванню його в гідриди, зменшивши газову пористість [21, 22].

Нині для підвищення якості ливарних силумінів використовується технологія обробки порошковими модифікаторами. Як модифікуючі добавки виступають частинки карбідів, нітридів, боридів, оксидів металів, розміри яких становлять 100 нм і менше. Застосування таких модифікаторів забезпечує полегшення та екологічну безпеку технологічного процесу виплавки алюмінієвих сплавів.

У роботах, проведених Н.Є. Калініною із співавторами розроблено схему отримання з відходів феросплавного виробництва нанокристалічних сполук карбиду кремнію, нітриду алюмінію, карбонітриду титану для модифікування сплавів, у тому числі й алюмінієвих [23]. Як модифікатор для ливарних алюмінієвих сплавів АЛ2, АЛ4, АЛ4С використовувався дисперсний порошок карбиду кремнію [24-26]. Комплексні дослідження з вивчення механічних та технологічних властивостей сплавів показали, що обробка розплавів дисперсним порошком карбиду кремнію сприяла: подрібненню макро- та мікроструктури сплавів, підвищенню механічних та технологічних властивостей. Межа міцності підвищилася на 3...8 %, відносне подовження на 19...26 %, рідинна плинність збільшилася на 0,8...3,3 %, щільність - на 1,5...2,4 %, спостерігалася висока тріщиностійкість, пористість склала 1 бал згідно ДСТУ 2839-94.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для підвищення рівня механічних і технологічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів застосовується комплексна обробка, що включає процеси рафінування і модифікування. Відомості про комплексну обробку силуміну АЛ4 наведено у роботі [27]. Введення в розплав 3% шихтових матеріалів, закристалізованих під тиском, призвело до зменшення розмірів дендритів та підвищення межі міцності, обробка розплаву 0,5% флюсового модифікатора призвела до подальшого подрібнення структури евтектики та збільшення її об'ємної частки до 50%. В результаті було досягнуто підвищення пластичності, рідинної плинності, продовжено збереження модифікуючого ефекту до 1,5...2 год.

Комплексна обробка, що полягає в плавлі силуміну АК12М2 під покривним флюсом (суміш хлоридів і фторидів лужноземельних металів) і подальша обробка рафінуючим флюсом і модифікатором (патенти України № 57584А, № 58793А) методом продувки через розплав за допомогою азоту запропоновано О.А. Міт'яєвим та І.П. Вовчком [28, 29]. Ця технологія забезпечила очищення розплаву від водню за рахунок його хімічного зв'язування та видалення за адсорбційно-флотаційним механізмом, а також рафінування від неметалевих та шлакових включень. Структура литого металу мала рівномірний розподіл модифікованого евтектичного кремнію, залізовмісні фази набули сприятливої форми китайських ієрогліфів та великих багатогранників. При цьому рідкотекучість і формозаповнюваність сплаву підвищилися на 20...30 %, пористість знизилася з 3...2 до 2...1 бала ДСТУ 2839-94 проти заводської технологією виробництва.

У роботах І.Ф. Червоного [30, 31] встановлено, що одним із факторів, що визначає рівень механічних властивостей алюмінієвої катанки, є ступінь рафінування (відстоювання) та модифікування розплаву.

Аналіз літератури показує, що дані про вплив якості шихти та процесів рафінування та модифікування на якість вторинних алюмінієвих сплавів часто суперечливі та не систематизовані. У зв'язку з цим необхідні дослідження з комплексного вивчення впливу якості шихти та рафінуючо-модифікуючої обробки на механічні та технологічні властивості вторинних силумінів.

Слід зазначити, що в літературі недостатньо висвітлено вплив якості вихідної шихти на ливарні властивості силумінів. З цього питання є лише окремі, часто суперечливі дані. Так у роботі [32] було досліджено вплив вмісту заліза та молібдену на рідину, щільність, величину повної усадки, об'єм концентрованої раковини та пористість сплаву АК12М2. Автори показали, що зі збільшенням вмісту заліза довжина рідинної плинності (пруткова проба) при температурах  $t = 680, 730, 880$  °С зменшилася приблизно на 20% (рис. 1).

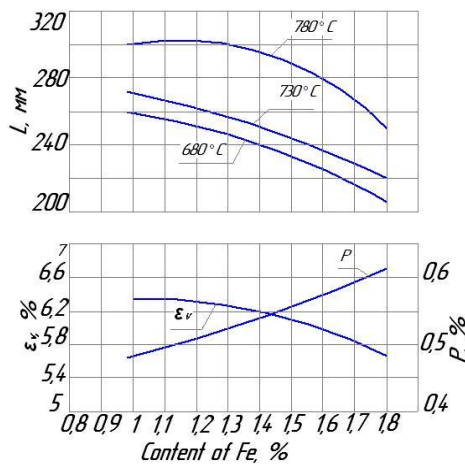


Рисунок 1 – Вплив заліза на рідинну текучість L, об'ємну усадку  $\epsilon_v$  та пористість P сплаву АК12М2



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Введення молібдену в кількості 10% вмісту заліза приводило при досліджуваних температурах до підвищення рідини на 5...10%. Було також встановлено, що зі збільшенням вмісту заліза на 1% підвищувалася щільність, зменшувався обсяг повної усадки на 12%, збільшувався об'єм концентрованої усадкової раковини та бал усадкової пористості. При додатковому введенні молібдену щільність збільшилася, а усадкові характеристики помітно зменшувалися. Наведені вище результати свідчать про негативний вплив заліза на ливарні властивості силумінів. Не викликає сумніву, що ці показники певною мірою залежать від якості шихти, наприклад, від вмісту в ній стружки, а також технології рафінуючої обробки рідкого металу.

У нашій роботі [33] проведено дослідження щодо підвищення ливарних властивостей сплаву АК12М2МгН. Сплав був виплавлений в індукційній печі зі стружки з підвищеним вмістом заліза, забрудненої мастильно-охолоджувальними рідинами. Після рафінування універсальним флюсом у печі, сплав оброблявся модифікатором [34] складу: 25-40% карбонату натрію  $\text{NaCO}_3$ , 12-20% карбиду кремнію  $\text{SiC}$ , 3-8% титану, решта - сірка S в 125 кг розливних ковшах. Кількість модифікатора змінювалося не більше 0...0,4% від маси рідкого металу. Як видно з рисунку 2, зі збільшенням присадки модифікатора від 0 до 0,16% бал пористості зменшується від 3...4 до 0...1 згідно з ГОСТ 1583-93, а рідинна плинність збільшувалася з 230 до 420 мм. При подальшому збільшенні модифікатора бал пористості та рідина не змінювалися.

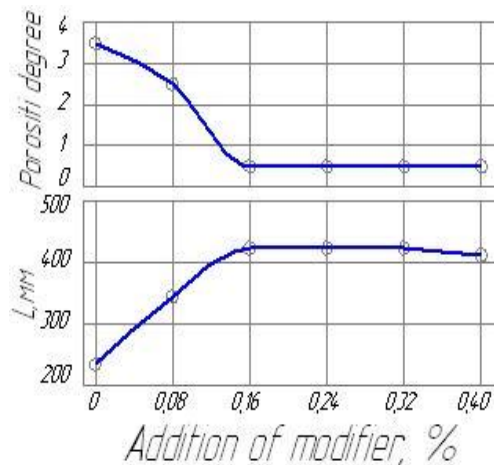


Рисунок 2 – Вплив присадки модифікатора (addition of modifier) на рідинну текучість L та бал пористості (porositi degree) сплаву АК12М2МгН

Позитивний вплив модифікатора пояснюється його здатністю до рафінування розплаву від оксидів і продуктів розпаду мастильно-охолоджуючих рідин, а також його здатністю до зміни структурних складових сплаву, в першу чергу, інтерметалідних фаз:  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ ,  $\text{T}(\text{Al}_6\text{CuNi})$ ,  $\text{W}(\text{Al}_x\text{Mg})$ ,  $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_3\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_5\text{SiFe}$ ,  $\text{Al}_4\text{Cu}_2\text{Fe}$ ,  $\text{Al}_8\text{SiFe}_2$ .

**Мета дослідження.** Аналіз впливу вмісту стружки у шихті та технології рафінуючої обробки рідкого металу на рідину, пористість, тріщиностійкість вторинних силумінів.

**Основний матеріал дослідження.** Були проведені комплексні дослідження щодо впливу стружки (від 1 до 19%), заліза (від 0,6 до 2,3%) та модифікатора (від 0,02 до 0,22%) на структуру та ливарні властивості: рідинна плинність (пруткова проба  $\varnothing 5$ ), тріщиностійкість (проба типу швелер) та лінійну усадку (циліндрична проба) сплаву АК9М2.

Досліджувані чинники істотно вплинули на форму та розміри інтерметалідних фаз, параметр їх форми (ставлення максимального розміру до мінімального) змінювався в межах від 1,5 до 45...50 (рис. 3).

## Машинобудування і зварювальне виробництво

З даних видно, що збільшення вмісту стружки у складі шихти з 1 до 19% призвело до різкого укрупнення інтерметалідних фаз без істотної зміни параметра їх форми (рис. 3 а, б). Рідкотекучість  $L$  знизилася з 455 мм до 365 мм, лінійна усадка  $\varepsilon_1$  зменшилася з 1,2 до 0,8, ймовірно, внаслідок підвищення газової пористості з 1 до 4 бали ГОСТ 1583-93. Проба на тріщиностійкість сплаву з 1% стружки не мала тріщин, а сплав з 19% довжина тріщини  $l_c$  склала 40 мм (рис. 4).

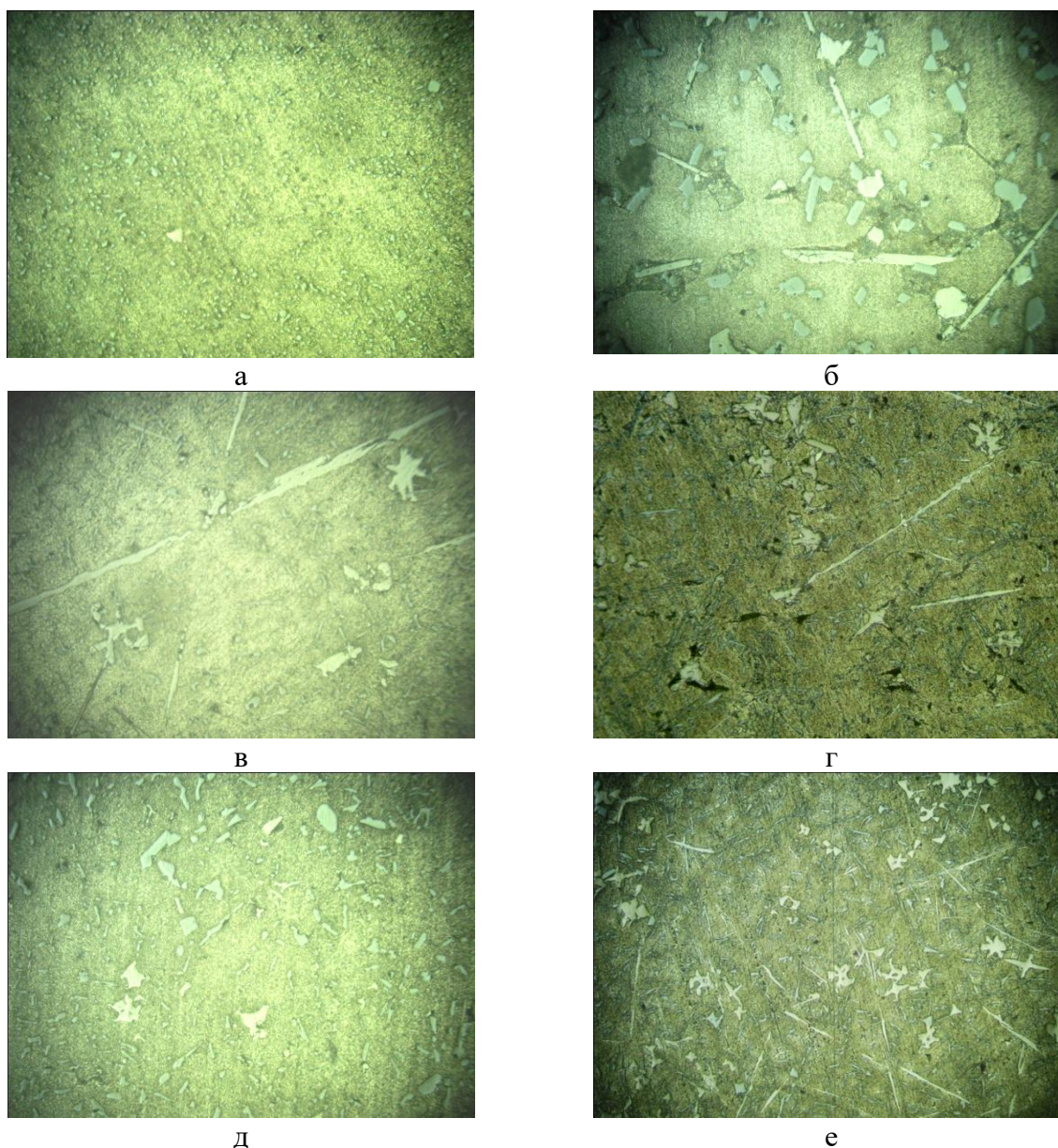


Рисунок 3 – Структури сплаву АК9М2: а) 1% стружки; б) 19% стружки; в) 1% заліза; г) 2% заліза; д) 0,06% модифікатора; е) 0,18% модифікатора

Збільшення вмісту заліза приблизно вдвічі призвело до помітного укрупнення інтерметалідних фаз, а також до зростання параметра їх форми (рис. 3, в, г). Рідина сплаву знизилася з 295 мм до 265 мм, лінійна усадка з 0,9 до 0,6%, газова пористість з 2 до 4 бали. Довжина тріщини в пробі з 1% заліза становила 53 мм, а за 2% заліза відбулося повне руйнування проби по периметру 92 мм.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

У сплаві АК9М2, обробленому 0,06% модифікатора інтерметалідні фази (рис. 3,д) були представлені витягнутими включеннями з параметром форми близько 20. Зі збільшенням модифікатора до 0,18% відбулося зменшення розмірів фаз та параметрів їх форми (рис. 3,е) і підвищення рідинної плинності з 260 до 320 мм, лінійна усадка залишилася практично незмінною – 0,8%; тріщин у пробі на тріщиностійкість не спостерігалось.

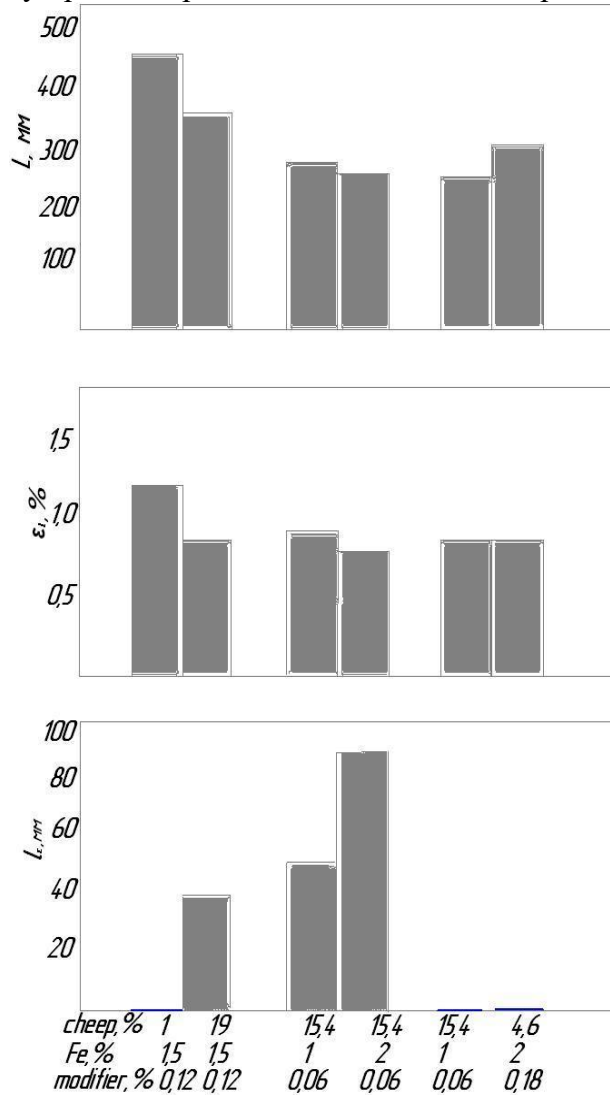


Рисунок 4 – Вплив вмісту стружки (cheep), заліза (Fe) та модифікатора (modifier) на ливарні властивості сплаву АК9М2

### ВИСНОВКИ

Підтверджено, що збільшення кількості стружки в шихті та вмісту заліза в сплаві призводить до отримання грубих інтерметалідних включень та зниження ливарних властивостей вторинних силумінів. Обробка рідкого розплаву модифікатором [34] дозволяє покращити структуру та ливарні властивості алюмінієвих сплавів.

### Список використаних джерел

1. Лебедев В.М. Применение литейных алюминиевых сплавов в сельском хозяйстве / В.М. Лебедев // Литейное производство. – 1991. – № 3. – С. 5-6.
2. О повышении эффективности производства вторичных алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ukrbascompany.at.ua/index/o\\_povyshenii\\_ehffektivnosti\\_proizvodstva\\_vtorichnykh\\_aljuminievyykh\\_splavov/0-135](https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtorichnykh_aljuminievyykh_splavov/0-135)). - Дата звернення 05.10.2024.
3. Хохлев В.М. Производство литейных алюминиево-кремниевых сплавов / В.М. Хохлев – М.: Металлургия. – 1980. – 67 с.
4. О рафинировании и модифицировании алюминиевых сплавов / С.П. Задруцкий, Б.М. Немененок, С.П. Королев [и др.] // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 17-20.
5. Рафинирование сплава АЛ32 легкоплавкими флюсами / А.С. Кауфман, Л.И. Жутаев, В.В. Хлынов [и др.] // Литейное производство. – 1982. – № 11. – С. 7-9.
6. Повышение эффективности дегазации алюминиевых сплавов продувкой инертными газами / В.А. Палачев, С.В. Инкин, В.Д. Белов [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 3. – С. 10-11.
7. Тимошкин В.И. Комплексная обработка алюминиевых сплавов с продувкой инертным газом / В.И. Тимошкин, В.П. Соловьев, Р.М. Мацнев // Литейное производство. – 1989. – № 5. – С. 8-9.
8. Рафинирование алюминиевых сплавов высокоскоростной продувкой инертным газом / С.В. Инкин, В.Д. Белов, В.А. Палачев [и др.] // Литейное производство. – 1992. – № 2. – С. 13-15.
9. Рафинирование алюминиевых сплавов высокоскоростной продувкой газами / С.В. Инкин, В.Д. Белов, В.А. Палачев [и др.] // Литейное производство. – 2000. – № 9. – С. 24-25.
10. Рафинирование алюминиевых сплавов порошкообразной серой в струе азота / А.М. Глушко, Г.В. Довнар, М.М. Ситниченко [и др.] // Литейное производство. – 2004. – № 3. – С. 23-25.
11. Влияние серы на структуру и свойства алюминиевых сплавов / Б.М. Немененок, А.М. Галушко, Г.В. Довнар [и др.] // Литье и металлургия. – 2005. – № 4(36). – С. 106-108.
12. Немененок Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Немененок Б.М. – Мн.: Технопринт, 1992. – 272 с.
13. Производство вторичного Al-Si-сплава для производства поршней / А.А. Андрушевич, И.Н. Казаневская, М.Н. Чурик [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 3. – С. 25-26.
14. Курдюмов А.В. О возможности повышения пластичности вторичных силуминов фильтрованием расплавов / А.В. Курдюмов, Т.А. Базлова // Литейное производство. – 1991. – № 8. – С. 7-8.
15. Каленик О.Н. Рафинирование вторичных алюминиевых сплавов от примеси железа / О.Н. Каленик, Б.М. Немененок, В.Л. Трибушевский // Литье и металлургия. – 2002. – № 4. – С. 52-55.
16. Куцова В.З. Модифікування алюмінієвих сплавів / В.З. Куцова, О.В. Швець, Т.А. Аюпова // «МОМ». – 2001. – № 1-2. – С. 99-109.
17. Куцова В.З. Міжатомна взаємодія і вибір елементів модифікаторів для сплаву АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 1. – С.55-59.
18. Куцова В.З. Влияние микролегирования Sr и Sc на фазовый состав и свойства АК7ч / В.З. Куцова, Т.А. Аюпова, М.Ю. Амбражей // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 41, ч.1. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2007. – С. 55-59.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

19. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств сплава АЛ4, модифицированного лигатурой Al-Si-Sr / В.З. Куцова, Н.В. Попова, К.И. Коваленко [и др.] // Литейное производство. – 1991. – № 8. – С. 8-10.
20. Взаимосвязь структуры и модифицирующей способности Al-Ti и Al-Zr лигатур при получении отливок из высокопрочных силуминов / И.Г. Бродова, Д.В. Баилюков, Т.И. Яблонских [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 23-25.
21. Модифицирование сплава АК6М2 / В.И. Никитин, А.И. Ивашкевич, А.В. Ивлев [и др.] // Литейное производство. – 1999. – № 1. – С. 30-31.
22. Гаврилов А.И. Модифицирование силумина иттриево-кремниевыми лигатурами / А.И. Гаврилов, А.А. Аникин, К.И. Власкина // Литейное производство. – 1989. – № 12. – С. 13-15.
23. Получение нанокристаллических композиций управляемым плазмохимическим синтезом / В.Т. Калинин, А.С. Дубников, А.Я. Качан [и др.] // Вісник двигунобудування. – 2007. – № 1(15). – С. 134-137.
24. Калинина Н.Е. Модифицирование литейных алюминиевых сплавов порошковыми композициями / Н.Е. Калинина, В.П. Белоярцева, О.А. Квац // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 2. – С. 193-195.
25. Квац О.А. Современные способ модифицирования литейных силуминов / О.А. Квац, Н.Е. Калинина, В.Т. Калинин // Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта: тезисы докладов 67 Международной научно-практической конференции, 24-27 мая 2007 г. – Днепропетровск – С. 251-252.
26. Калинина Н.Е. Влияние модифицирования на фазовый состав высокопрочных алюминиевых сплавов / Н.Е. Калинина, З.В. Вилищук // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 5, – Днепропетровск, ПГАСиА. – 2010. – С. 39-44.
27. Оптимизация свойств сплава АЛ4 при литье в кокиль поэтапным планированием экспериментов / А.М. Парамонов, В.И. Никитин, В.В. Павлов [и др.] // Литейное производство. – 1986. – № 11. – С. 12-14.
28. Митяев А.А. Комплексная рафинирующе-модифицирующая обработка алюминиевых сплавов / А.А. Митяев // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. научн. тр. – Вып. 45, ч.2. – Днепропетровск, ПГАСиА. – 2008. – С. 138-142.
29. Рязанов С.Г. Повышение качества алюминиевых сплавов / С.Г. Рязанов, А.А. Митяев, И.П. Волчок // «Nauka I Technologia»: V konferencja naukovo-techniczna Odlewnictwa Metali Niezaleznych. Lucien, 6-8 czerwca 2002 r. – Lucien, Poland. – 2002. – P. 16-20.
30. Шульга А.И. Производство алюминиевой катанки на технологической линии Continuus Properzi / А.И. Шульга, И.Ф. Червоний, С.Г. Егоров // Литье и металлургия. – 2008. – № 1(45). – С. 62-65.
31. Шульга А.И. Влияние технологических факторов на свойства алюминиевой катанки / А.И. Шульга, И.Ф. Червоний, С.Г. Егоров // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 4-5. – С. 83-86.
32. Байкина А.И., Лебедев К.П., Степанов Ю.Н., Шеметев Г.Ф. Литейные силумины с повышенным содержанием железа. – Л.: Знание, 1983. – 28 с.
33. Лютова О., Митяев О., Волчок І. Підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів // Машинознавство. – 2007. - № 4 – С.35-40.
34. Патент 57584А Украина, МКИ С22С1/06. Модификатор для алюминиевых сплавов /И.П. Волчок, А.А. Митяев (Украина). № 2002108343; Заявл. 22.10.2002; Оpubл. 16.06.2003. Бюл. № 6.

Liutova O.V., Kapustian O.Ye.

### INCREASING THE FOUNDRY PROPERTIES OF SECONDARY SILUMINS

*The work is devoted to improving the casting properties of secondary silumins. The influence of the content of chips in the charge, the amount of iron in the alloy and the modifier used for processing the liquid melt on the liquid, linear shrinkage, crack resistance and porosity score of AK9M2 silumin is considered. Aluminum is a key material of modern industry, which is actively used in many industries due to its unique properties: lightness, high corrosion resistance, specific strength, thermal conductivity and manufacturability. Its application covers automotive, aviation, construction, electrical engineering and other areas. However, the production of primary aluminum is associated with significant energy consumption and a high level of environmental pollution. In this regard, the secondary processing of aluminum is gaining increasing importance, especially in the manufacture of silumins - alloys based on aluminum with silicon, which are characterized by wide application possibilities. However, secondary aluminum alloys have certain disadvantages. Due to the presence of impurities such as iron, calcium or other non-metals, their mechanical and technological properties can be significantly limited. Refining and modification are used to improve the characteristics of such alloys. Refining methods are aimed at purifying the metal from non-metallic inclusions and dissolved gases. The main approaches include settling, fluxing, inert gas purging and filtration through special systems.*

*The alloy structure is modified by introducing alloying components, in particular transition metals, strontium, titanium, boron, antimony. Such additives allow controlling the crystallization process, reducing grain size and evenly distributing the particles of the strengthening phase, which has a positive effect on strength, ductility and casting properties.*

*New methods, in particular the use of sulfur or multi-component alloys, show promise for creating secondary aluminum alloys with improved properties. These approaches allow more effectively solving the problem of metal reuse, improving product quality and reducing environmental impact.*

**Keywords:** secondary silumins, foundry properties, modification.

Стаття надійшла 06.10.2024р.

УДК 669.295.054.85

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318359](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318359)

Білоник Д.І., Грабовський В.Я., Капустян О.Є.,  
Лаврись С.М., Лаптева Г.М., Білоник І.М.

### СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВТОРИННОГО ТИТАНУ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ВИПЛАВКИ У ВІДКРИТОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ПІСЛЯ ГАРЯЧОГО КУВАННЯ

*В роботі наведені результати дослідження структури та стандартних механічних властивостей вторинного титану в литому стані (електрошлаковий зливочок) та після його гарячого кування з коефіцієнтами деформації  $\varepsilon = 40\%$  і  $\varepsilon = 90\%$ . Зливки отримали на електрошлаковій установці А-550 конструкцію якої удосконалили для переплаву витратних електродів виготовлених зі 100% листової обрізі титану ВТ1-0. На верхньому фланці відкритого кристалізатора встановили ковзний струмопідвід і пристрій, який захищав аргоном поверхню шлакової ванни і розігріту частину витратного електроду. Для виконання*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

роботи виплавили електрошлаковий зливочок вторинного титану діаметром 85 мм. Поверхня зливка гладка, гофри та пережими відсутні. Хімічний склад зливка, мас. % Fe – 0,05 %; C – 0,030 %; Si – 0,06 %; O – 0,031 %; N – 0,058 %; H – 0,0012 %; Ti – основа. У порівнянні з титаном ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91) вміст кисню та азоту в електрошлаковому зливку був вищим в 1,51 та 1,45 разів відповідно. З отриманого зливка виготовили зразки для досліджень макро – мікроструктури і механічних властивостей ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ , KCU) у литому стані та після гарячого кування з коефіцієнтами деформації  $\varepsilon = 40\%$  та  $\varepsilon = 90\%$ . Макроструктура злиwkів вторинного литого титану – крупнокристалічна, щільна, однорідна. Розмір литого зерна відповідає 9 – 10 балу. Мікроструктура типова для  $\alpha$  – титанових сплавів і складається з пластин  $\alpha$ -фази, які зібрані в пачки товщиною 15 – 20 мкм і довжиною 300 – 500 мкм. При таких структурних складових, характеристики пластичності литого вторинного титану виявились не дуже високими ( $\delta = 11,5\%$ ;  $\psi = 12,5\%$ ;  $KCU = 0,28 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$ ), а зростання міцності ( $\sigma_b = 560$  МПа та  $\sigma_T = 505$  МПа) можна пояснити впливом кисню і азоту. При гарячому куванні дослідних зразків електрошлакового титану встановлено, що вторинний титан добре піддається обробці тиском, яка також суттєво подрібнює структуру. Так, при деформації з коефіцієнтом  $\varepsilon = 40\%$  отримали 5 – 6 бал зерна, а при  $\varepsilon = 90\%$  3 – 4 бал. Характеристики пластичності при цьому становлять  $\delta = 20\%$ ;  $\psi = 31,5\%$ ;  $KCU = 0,45 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$  та  $\delta = 24,5\%$ ;  $\psi = 47,5\%$ ;  $KCU = 0,58 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$  відповідно. На міцність вторинного гарячекованого електрошлакового титану впливають ступінь деформації і підвищений вміст кисню та азоту. При  $\varepsilon = 40\%$   $\sigma_b = 625$  МПа;  $\sigma_T = 540$  МПа, а при  $\varepsilon = 90\%$   $\sigma_b = 700$  МПа;  $\sigma_T = 580$  МПа.

**Ключові слова:** вторинний титан, електрошлакова технологія, гаряче кування, мікроструктура, макроструктура, механічні властивості, бал зерна.

**Постановка проблеми.** Титан вторинний – це титан, отриманий із вторинної сировини, тобто, із відходів, які виникають при виробництві титана первинного (отриманого з природної мінералогічної сировини), а також при виготовленні і експлуатації виробів із титану первинного та його сплавів [1].

Останні десятиліття питання ресурсозбереження й переробки металевих відходів стали дуже актуальними, і вторинний титан привернув увагу як перспективна сировина, що здатна суттєво знизити споживання ресурсів і зменшити вплив на навколишнє середовище. Основними перевагами вторинного титану є його висока корозійна стійкість, низька щільність і висока міцність, а також економічна вигода порівняно з первинним титаном.

Розробкою технологій рециклінгу відходів титану в Україні займаються такі провідні наукові установи як ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, ДП «Науково-виробничий центр «ТИТАН» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», АТ «ІНСТИТУТ ТИТАНУ». Структуру, механічні та корозійні властивості титану та його сплавів, які виготовлені за новими перспективними технологіями, досліджують в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, провідних університетах НУ «Запорізька політехніка», НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», «Український державний хіміко-технологічний університет».

Промислове впровадження та подальше вдосконалення технології рециклінгу титанових відходів виконують ДП «Науково-виробничий центр «ТИТАН» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», компаніями «АНТАРЕС», «ФІКО», АТ «Мотор СІЧ» та ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Активно проводять роботи по отриманню титанових злиwkів із залученням відходів такі закордонні фірми як CARPENTER, ATI, Timet, корпорація «Titanium metals» та інші. Компанія «ЕСО Titanium» закінчує будівництво в Європі по рециклінгу лома і відходів титану для

## Машинобудування і зварювальне виробництво

потреб авіакосмічної індустрії. Планується застосування сучасного обладнання, такого як плазмово-дугової та двох вакуумнодугових печей, що дозволить отримувати зливки легованих та високолегованих титанових сплавів високої якості.

Із вище наведеного можна зробити висновок, що на сьогодні актуальною тематикою є розробка технологій рециклінгу, які найбільш економічні та дозволяють залучати у злинок до 100% відходів титану. Не менш важливим є подальше комплексні дослідження властивостей вторинного титану (зливок, напівфабрикат), що дозволить визначити раціональні сфери його застосування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботах [2–6] доведено, що найбільш доречно залучати титанові відходи у шихту, або в пресовані витратні електроди для подальшого отримання злиwkів методами вакуумної гарнісажної плавки, електронно-променевої плавки, плазмово-дугової плавки, камерного електрошлакового переплаву. Такі технології дозволяють переробляти майже всю номенклатуру титанових відходів, наведених в ДСТУ 3211:2009 /ГОСТ 1639:2009/ «Лом та відходи кольорових металів і сплавів». Але, у вищезазначених технологіях, кількість титанових відходів, яку можна додавати в плавку, не перевищує 30–40% від маси зливка.

Титанові зливки, хімічний склад яких відповідає ГОСТ 19807-91, піддають обробці тиском. З них виготовляють такі напівфабрикати як лист, плита, смуга, фольга, пруток, поковки [6]. В результаті обробки тиском не тільки змінюється форма, розміри зливка, а й суттєво поліпшуються механічні властивості. Наприклад, для зливка титану ВТ1-Л  $\sigma_b = 340$  МПа,  $\delta = 10\%$ ,  $\psi = 38\%$ ,  $KCU = 0,5 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$ , а для напівфабрикатів із титану ВТ1-0, наприклад прутків діаметром 120–140 мм  $\sigma_b = 510$  МПа,  $\psi = 40,2\%$ ,  $KCU = 0,7 \frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$  [7,8]. Тому, можна очікувати, що гаряче кування електрошлакових злиwkів вторинного титану, отриманих з залученням 100% відходів теж повинно забезпечити підвищення механічних властивостей.

Нажаль, у науковій літературі майже не наведено інформації стосовно якості злиwkів, отриманих зі 100% титанових відходів, а питання наступної обробки тиском та її вплив на структуру і механічні властивості вторинного титану потребують додаткових досліджень.

**Мета дослідження.** Метою роботи є: з'ясувати здатність електрошлакових злиwkів вторинного титану виплавлених у відкритому кристалізаторі до гарячого кування; дослідити структуру і механічні властивості електрошлакового зливка вторинного титану, виплавленого у відкритому кристалізаторі з використанням витратних електродів, виготовлених зі 100% відходів листової обрізи титану ВТ1-0; литого титану; визначити вплив гарячого кування з коефіцієнтами деформації 40% та 90% на структуру і механічні властивості вторинного титану електрошлакової виплавки у відкритому кристалізаторі.

Для цього потрібно виконати наступні завдання:

1. Виготовити витратні електроди зі 100% листової обрізи титану ВТ1-0;
2. Виплавити електрошлаковий злинок вторинного титану у відкритому кристалізаторі, дослідити структуру та механічні властивості;
3. Підготувати зі зливка зразки та обробити їх тиском методом вільного гарячого кування з коефіцієнтами деформації  $\varepsilon=40\%$  та  $\varepsilon=90\%$ . Дослідити структуру та механічні властивості деформованого титану.

**Основний матеріал дослідження.** 1. Матеріал витратного електрода.

Для електрошлакової виплавки вторинного титану в якості матеріалів, з яких виготовляли витратні електроди, застосовували кондиційні відходи листової обрізи титану ВТ1-0 (рис. 1), які виникали на підприємстві ВАТ «Южцветметгазоочистка» при виготовленні повітряводів, газоходів, різноманітних корпусів та іншого обладнання для хімічних комбінатів.



## Машинобудування і зварювальне виробництво



Рисунок 1 – Відходи листової обрізі титану VT1-0

Слід зазначити, що на даному підприємстві застосовували титан тільки однієї марки – VT1-0. Хімічний склад смуг, з яких виготовляли витратні електроди, безумовно різнився між собою, але відповідав вимогам ГОСТ 19807-91:  $Fe \leq 0,25\%$ ;  $C \leq 0,07\%$ ;  $Si \leq 0,1 \%$ ;  $O \leq 0,2\%$ ;  $N \leq 0,04\%$ ;  $H \leq 0,01\%$ ;  $Ti \ 99,24 - 99,7\%$ .

### 2. Виготовлення витратних електродів.

Відходи листової обрізі титану (рис.1) являють у своїй більшості смуги довжиною до 2000 мм, шириною 30–50 мм та товщиною від 2 до 8 мм. Це дозволило майже без додаткової обробки збирати їх у пакет для подальшого зварювання у витратні електроди. Між собою полоси зварювали аргонодуговим методом неплавким електродом (спосіб TIG ГОСТ 14771-76) з двох протилежних сторін з кроком 50–60 мм. На одному з кінців електроду свердлили отвір для різьбового з'єднання з інвентарною головкою, яка встановлювалась у електродотримач електрошлакової установки.

### 3. Обладнання та режим плавки.

Переплавлення витратних електродів виконували на електрошлаковій установці А-550 з трансформатором ТШС – 3001. Враховуючи, що електричний опір титану майже у 10 разів вище ніж у сталей, то в процесі електрошлакової плавки в квазістаціонарний період при проходженні електричного струму по витратному електроду він нагрівається до температури 700–800 °С. Це призводить до насичення його поверхні киснем та азотом повітря, що в подальшому небажано впливає на якість титанового зливка. Щоб виключити це явище провели удосконалення конструкції установки А-550. Взагалі, застосували ковзний струмопідвід, який встановлювали на верхньому фланці кристалізатора. Поверхню шлакової ванни та частину розігрітого витратного електроду захищали аргоном. Для цього було розроблено спеціальний пристрій.

Параметри електрошлакової виплавки вторинного зливка титану наступні: струм плавки – 2600 – 2700 А, напруга на шлаковій ванні – 27 В, флюс – 100%  $CaF_2$ , кристалізатор діаметром 85 мм, переріз електроду – 40x35мм; довжина електроду – 2000 мм. Робочий момент електрошлакової виплавки вторинного титану наведено на рис. 2.

### 4. Методики досліджень вторинного титану.

Хімічний склад отриманих зливок визначали спектральним методом з використанням прибору «SPECTROMAX» фірми «СПЕКТРО» по стандартним методикам (ГОСТ 19863.1-91; 19863.6-91; 19863.8-91; 19863.10-91; 19863.13-91). Вміст домішок (азоту, кисню та водню)



Рисунок 2 – Електрошлакове виплавлення вторинного титану

визначали згідно ГОСТ 190013-86, для чого застосовували газоаналізатор моделі ON900 фірми «ELTRA» з використанням виготовлених циліндричних зразків діаметром 5 мм та довжиною 3,5 мм. Данні дослідження виконали в акредитованих лабораторіях «Send Lab» м. Дніпро та ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» м. Запоріжжя.

Дослідження макроструктури зливок та зразків після гарячого кування проводили візуальним оглядом, а також з використанням стереометричного мікроскопу «Stemi» 200-с (фірма «Karl Zeiss», Німеччина) на травлених макротемплетях. Розмір литого зерна визначали лінійним методом січних А.А. Глаголева [9]. Макроструктуру вторинного титану після деформації оцінювали згідно Інструкції № 1054-76 «Металографічний аналіз титанових сплавів». Додатково виконували дефектоскопію зливок та зразків після кування ультразвуковим методом з використанням дефектоскопа УД4-1 і датчика 5К6 в акредитованій лабораторії ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

Зразки для досліджень мікроструктури готували послідовним шліфуванням з застосуванням паперу різної зернистості (від № 40 по ГОСТ 5009-75 до мікронної М20 ГОСТ 10054-75) та поліруванням на сукні, змоченому суспензією «DialDuo» (фірма «STRUERS») на основі алмазних часток фракції 3 мкм. Травлення шліфів виконували у реактиві наступного складу: HF – 10 мл, HNO<sub>3</sub> – 25мл, гліцерин – 65 мл, а також в реактиві Крола: H<sub>2</sub>O – 100 мл, HNO<sub>3</sub> – 6 мл, HF – 3 мл.

Мікроструктуру досліджували після відпалу зразків при T=650°C на оптичному металографічному мікроскопі «Axio Observer. Dlm» (фірма «Karl Zeiss», Німеччина), оснащеного камерою ARTCAM-300MI (3M pixels progressive USB2/0 COLOR CMOS CAMERA); зйомка виконана у відбитому світлі за методами світлового поля. Також застосовували металографічні мікроскопи MIM-8, NEOFOT-32.

При дослідженні механічних властивостей зразків литого та гарячекованого вторинного титану визначили:

– межу плинності, межу міцності, відносне звуження, відносне подовження згідно ГОСТ

## Машинобудування і зварювальне виробництво

1497-84 (СТСЭВ 471-88) на стандартних циліндричних зразках діаметром 5 мм і довжиною робочої частині 30 мм на розрівній машині Instrom 8801;

– ударну в'язкість за ISO 6892-84 на зразках 55x10x10 мм з U-образним концентратором на маятниковому копрі МК-30;

– твердість стандартними методами Роквелла та Бринеля (ГОСТ 9013-69, ГОСТ 9013-59) твердомірами ТК-2М та ТШ-2М, мікротвердість – прибором ПМТ-5.

Для оцінювання здатності вторинного електрошлакового титану до обробки тиском застосували стандартні методики [10, 11]. Зі зливка діаметром 85 мм після обточування альфірованого шару виготовили зразки діаметром 80 мм і товщиною 50 мм (Рис.3) для гарячого кування.

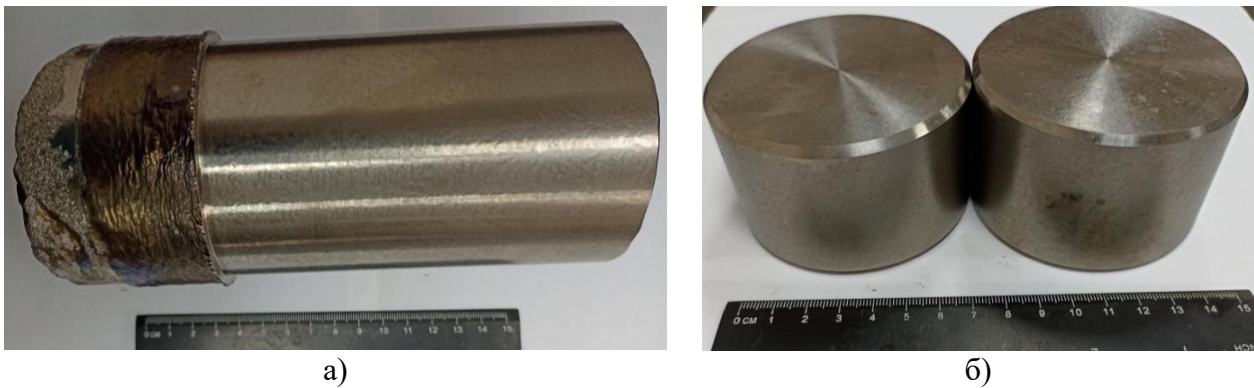


Рисунок 3 – Дослідний електрошлаковий зливкок вторинного титану та зразки для кування: а) електрошлаковий зливкок вторинного титану після обточування альфірованого шару; б) зразки для гарячого кування

В інституті УкрНДІСпецсталь за діючою технологією на гідравлічному пресі ОКП-500 зусиллям 250 тон зразки на гарячо відкували з коефіцієнтами деформації  $\epsilon = 40\%$  та  $\epsilon = 90\%$ . Досліджували структуру та механічні властивості деформованого вторинного титану за методиками, наведеними вище.

5. Отримані результати та їх обговорення.

Хімічний склад електрошлакового вторинного зливка наступний, мас. %: С – 0,030; Fe – 0,05; Si – 0,06; O – 0,31; N – 0,058; H – 0,0012. Результати свідчать, що отриманий вторинний електрошлаковий титан у порівнянні з ГОСТ 19807-91 містить більш високу кількість кисню та азоту. На наш погляд, це можливо викликано недостатньо ефективним захистом розігрітої частини витратного електроду та поверхні шлакової ванни. Але слід зазначити, що в сучасному машинобудуванні застосовується нелегований титан, у якому вміст кисню та азоту ще більше ніж у отриманому електрошлаковому зливку, наприклад RT-18, 3.7055, Ti3, 3.7065, Ti4 (Німеччина), Class 3 (Японія), Ti-P.03, T-50, Ti-P.04, T-60 (Франція) [12, 13].

Макроструктура зливка вторинного титана крупнокристалічна, щільна, однорідна, дефекти металургійного та технологічного походження відсутні. Ультразвуковий контроль також не виявив дефектів. Розмір литого зерна відповідає 9 – 10 балу (рис. 4).

Потрібно зазначити, що макроструктура характерна для електрошлакового зливка при поступовому плавленні витратного електроду і кристалізації розплавленого металу у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

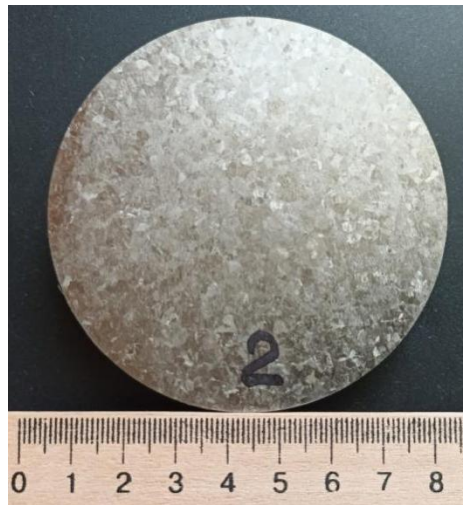
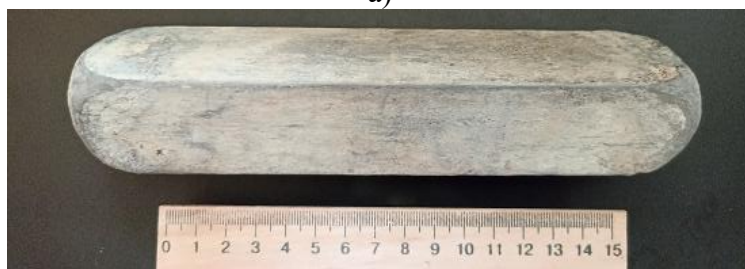


Рисунок 4 – Макроструктура зливка вторинного титану. Поперечний темплет

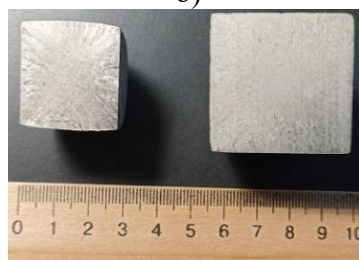
На рисунку 5 наведені зразки після гарячого кування з коефіцієнтами деформації 40% і 90% та їх макроструктура. Слід зазначити, що в процесі гарячого кування не виникало додаткових технологічних труднощів. На поверхні зразків відсутні тріщини, розриви та інші дефекти. Після ультразвукового контролю також не виявлено внутрішніх дефектів. Це дозволяє зробити висновок, що вторинний електрошлаковий титан можна обробляти тиском і взагалі гарячим куванням.



а)



б)



в)

Рисунок 5 – Зовнішній вигляд гарячекованих зразків: а) з коефіцієнтом деформації 40%; б) з коефіцієнтом деформації 90%, та в) їх макроструктура

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Макроструктура (рис. 5) деформованого зразка електрошлакового зливку вторинного титану, ступінь деформації 40% характеризується:

- наявністю, переважно, макрозерен, витягнутих у напрямку деформації, в центральній частині зразка – макрозерна за формою наближені до рівновісної, діаметром до 2 мм (за шкалою величини макрозерна – відповідають 5–6 балів);
- фон макроструктури матовий, з елементами блиску;
- дефектів металургійного та деформаційного походження у дослідженому перерізі заготовки не виявлено.

Макроструктура (рис. 5) зразка, виготовленого з більшою деформацією ( $\epsilon=90\%$ ), також має матовий фон травимості, макрозерна дрібні, однорідні та по перерізу відповідають 3–4 балам. Дефекти деформаційного походження не виявлено. Однорідні дрібні зерна свідчать про достатнє деформаційне опрацювання металу при температурах, що не перевищують температуру поліморфного перетворення титану.

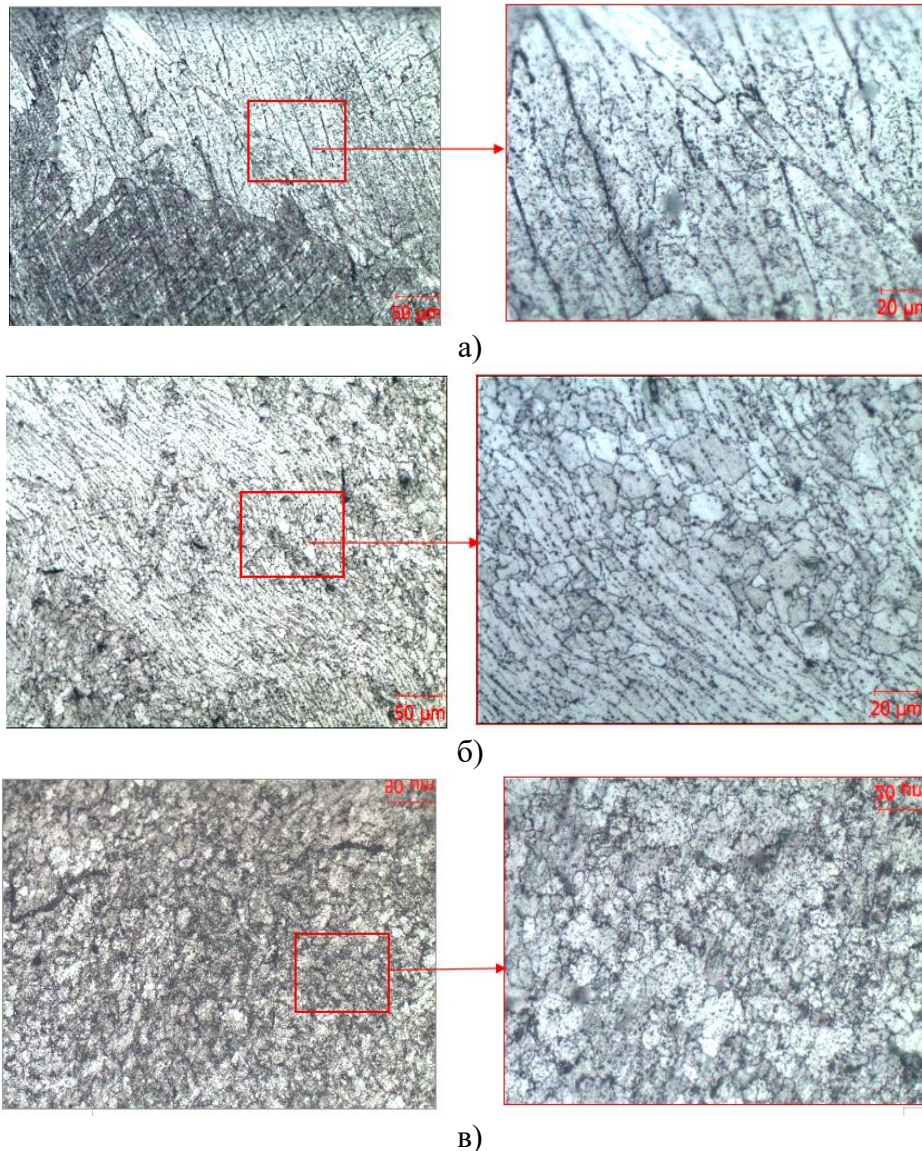


Рисунок 6 – Мікроструктура електрошлакового вторинного зливка титана: а) відпал 650°C; б) деформація 40%; в) деформація 90 % + відпал 650 °C

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Мікроструктура зливка електрошлакового вторинного титану (рис. 6, а) типова для литих  $\alpha$ -титанових сплавів: складається з пластин  $\alpha$ -фази різної орієнтації, зібраних у пачки, товщина яких становить  $\sim 15\text{...}20$  мкм, а довжина їх –  $300\text{...}500$  мкм.

Мікроструктура деформованого ( $\varepsilon=40\%$ ) з вторинного титану складається з двох типів зерен (рис. 6, б): деформованих і витягнутих у вигляді волокон, поряд з якими виявлено дрібні ( $\sim 5\text{...}10$  мкм) рівновісні зерна, що свідчить про протікання процесу рекристалізації при нагріванні до температури початку рекристалізації Тп.р  $\sim 500^\circ\text{C}$  та зародження нових зерен на фоні деформованої структури. При подальшому підвищенні температури до  $650^\circ\text{C}$  відбувається збільшення кількості рекристалізованих зерен. Судячи з вигляду деформованої мікроструктури, що зберіглася, з витягнутих і сплюснутих зерен, в зразку з  $\varepsilon=40\%$  при відпалі  $650^\circ\text{C}$  стадія збиральної рекристалізації пройшла не в повному обсязі.

Мікроструктура електрошлакового вторинного титану, виготовленого з більшим ступенем деформації ( $\varepsilon=90\%$ ) по всьому полю шліфа складається з рівновісних зерен  $\alpha$ -фази, товщина яких становить  $7 - 8$  мкм, а довжина  $200 - 300$  мкм (рис. 6, в). Вочевидь, ступінь деформації ( $\varepsilon=90\%$ ) призвів до більшої енергії активації процесу рекристалізації при відпалі  $650^\circ\text{C}$  і, як наслідок – зростання нових рекристалізованих зерен, що мало місце по всій поверхні зразка.

Результати механічних випробувань зразків наведені в таблиці 1. Всі зразки піддавалися відпалу при температурі  $650^\circ\text{C}$ .

Таблиця 1 – Механічні властивості електрошлакового вторинного титану

Варіанти дослідних зразків	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, $\frac{\text{кгс}\cdot\text{см}}{\text{см}^2}$
$\varepsilon=0\%$	560	505	11,5	12,5	0,28
$\varepsilon=40\%$	625	540	20,0	31,5	0,45
$\varepsilon=90\%$	700	580	24,5	47,4	0,58

Таким чином, застосування гарячого кування дозволяє суттєво підвищувати механічні властивості вторинного електрошлакового титану до рівня стандартних нелегованих  $\alpha$ -титанових сплавів.

### ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що електрошлакові зливки вторинного титану, отримані у відкритому кристалізаторі із залученням 100% відходів титану та які мають підвищений вміст кисню (0,31%) та азоту (0,058%), здатні до гарячого кування з  $\varepsilon = 40\%$ ,  $\varepsilon = 90\%$ , про що свідчить відсутність зовнішніх та внутрішніх дефектів.

2. При дослідженні макроструктури зразків вторинного титану встановили, що гаряче кування суттєво подрібнює зерно з  $9 - 10$  балу (литий стан) до  $5 - 6$  балу при  $\varepsilon = 40\%$  і до  $3 - 4$  балу при  $\varepsilon = 90\%$ .

3. Будова мікроструктури кованих зразків також відображає інтенсивність деформації. Встановлено, що для литого вторинного титану мікроструктура складається з пластин  $\alpha$ -фази різної орієнтації і зібраних у пачки товщиною  $15 - 20$  мкм і довжиною  $300 - 500$  мкм. Після деформації з  $\varepsilon = 40\%$  розмір зерен  $\alpha$ -фази зменшився до  $8 - 10$  мкм, при  $\varepsilon = 90\%$  – до  $6 - 7$  мкм.

4. Доведено, що гаряче кування змінило структуру вторинного титану, яка забезпечила суттєве підвищення механічних властивостей і більш за все характеристики пластичності. Це дає можливість застосовувати вторинний електрошлаковий титан після гарячого кування на рівні зі стандартними марками нелегованого титану.

### Список використаних джерел

1. Колобов Г.А., Пожуев В.И., Телин В.В. Титан вторичный. Часть 1. Монография. – Запорожье, ЗГИА. 2006. – 124 с.
2. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. Дослідження якості деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9, отриманого способом електронно-променевої плавки /Сучасна електрометалургія. – 2021. – №4. С.2 – 25
3. Бурнашов В.Р., Никитенко Ю.О., Барабаш В.В., Шаповалов В.О. Переплав відходів титану та титанових сплавів в умовах плазмодугової плавки/Сучасна електрометалургія. – 2021. – №4. С. 32–38
4. Патон Б.Є., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. Электроннолучевая плавка титана / Киев: Наукова Думка. 2006. – 248 с.
5. Шейко И.В., Шаповалов В.А., Шестко И.В. Альтернативные технологии переплава промышленных отходов титана и его сплавов / Сучасна електрометалургія. – 2007. – №3 - С. 44-53
6. Колобов Г.А., Воденников С.А. Печерица К.А. Технологии использования оборотных литейных отходов в производстве титанового фасонного литья и слитков/ Металлургия/ № 2(38). – 2017. – С. 46–50.
7. Ильин А.А., Калачев Б.А. Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС-МАТИ. – 2009. – 520 с.
8. Калачев Б.А., Буханова А.А. Механические свойства титана и его сплавы. М.: Металлургия. – 1976. – 544 с.
9. Салтыков С.А./ Стереометрическая металлография. М.: Металлургия. – 1976. – 270 с.
10. Сторожев М.В. Технологияковки и горячей штамповки цветных металлов [Текст]. М.: Высшая школа. – 1976. – 350 с.
11. Илларионов А.Г., Попов А.А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2014. – 137 с.
12. Калачев Б.А., Польшкин И.С., Талалаев В.Д. Титановые сплавы разных стран. Справочник. М.: ВИЛС. – 2000. – 316 с.
13. ASTM B348/B348M-19 Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets. – 2019.

**Bilonyk D.I., Grabovskyi V.Ya., Kapustian O.Ye.,  
Lavryts S.M., Lapteva H.M., Bilonyk I.M.**

### **STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SECONDARY TITANIUM OF ELECTROSLAG SALT IN AN OPEN CRYSTALLISER AFTER HOT FORGING**

*The paper presents the results of the study of the structure and standard mechanical properties of secondary titanium in the cast state (electroslag ingot) and after its hot forging with deformation coefficients  $\varepsilon = 40\%$  and  $\varepsilon = 90\%$ . The ingots were received at the A-550 electroslag plant, the design of which was improved for the remelting of consumable electrodes made from 100% VT1-0 titanium sheet cut. On the upper flange of the open crystallizer, a sliding current lead and a device were installed, which protected the surface of the slag bath and the heated part of the consumable electrode with argon.*

*To perform the work, an electroslag ingot of secondary titanium with a diameter of 85 mm was melted. The surface of the ingot is smooth, there are no corrugations and crimps. Chemical*

composition of the ingot, wt. % Fe – 0.05%; C – 0.030%; Si – 0.06%; O – 0.031%; N – 0.058%; H – 0.0012%; Ti is the base. Compared to VT1-0 titanium (GOST 19807-91), the oxygen and nitrogen content in the electroslag ingot was 1.51 and 1.45 times higher, respectively. Samples were made from the obtained ingot for studies of macro-microstructure and mechanical properties ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$ ,  $\Psi$ , KCU) in the cast state and after hot forging with deformation coefficients  $\varepsilon = 40\%$  and  $\varepsilon = 90\%$ .

The macrostructure of ingots of secondary cast titanium is coarse-crystalline, dense, and homogeneous. The size of the cast grain corresponds to 9–10 points. The microstructure is typical for  $\alpha$ -titanium alloys and consists of  $\alpha$ -phase plates, which are assembled into bundles with a thickness of 15–20  $\mu\text{m}$  and a length of 300–500  $\mu\text{m}$ . With such structural components, the plasticity characteristics of cast secondary titanium turned out to be not very high ( $\delta = 11.5\%$ ;  $\Psi = 12.5\%$ ; KCU = 0.28  $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$ ), and the increase in strength ( $\sigma_B = 560 \text{ MPa}$  and  $\sigma_T = 505 \text{ MPa}$ ) can be explained by the influence of oxygen and nitrogen.

During hot forging of experimental samples, it was established that secondary titanium is well amenable to pressure treatment, which also significantly grinds the structure. Thus, at deformation with a coefficient of  $\varepsilon = 40\%$ , a grain score of 5–6 was obtained, and with  $\varepsilon = 90\%$ , a score of 3–4 was obtained. The characteristics of plasticity are  $\delta = 20\%$ ;  $\psi = 31.5\%$ ; KCU = 0.45  $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{cm})^2$  and  $\delta = 24.5\%$ ;  $\psi = 47.5\%$ ; KCU = 0.58  $\text{kgf}\cdot\text{m}/\text{cm}^2$  respectively. The strength of secondary hot-forged electroslag titanium is affected by the degree of deformation and the increased content of oxygen and nitrogen. At  $\varepsilon = 40\%$   $\sigma_B = 625 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_T = 540 \text{ MPa}$ , and at  $\varepsilon = 90\%$   $\sigma_B = 700 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_T = 580 \text{ MPa}$ .

**Keywords:** secondary titanium, electroslag technology, hot forging, microstructure, macrostructure, mechanical properties, grain size.

Стаття надійшла 06.10.2024р.

УДК 674.164.02-.621.791

doi.org/10.31498/2522-9990282024318363

Савонов Ю.М., Капустян О.Є., Паракневич Є.М., Єршов А.В.

### ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ХРОМОНІКЕЛЕВИХ СТАЛЕЙ

Великою проблемою залишається отримання зварних з'єднань з нержавіючих сталей, які експлуатуються в агресивних середовищах різноманітних виробництв, з високими характеристиками і тривалим терміном роботи. Вимоги до зварних з'єднань: корозійна стійкість і достатні механічні показники. Проблема полягає в тому, що експлуатація зварного обладнання в агресивних середовищах викликає, по-перше: вибіркоче руйнування наплавленого металу зварних швів, а по-друге: вибіркоче розчинення однієї з фаз в структурі металу, так зване, структурно-вибіркоче руйнування. Відомо, що властивості наплавленого металу зварних швів залежать від кількості легувальних елементів. Ця необхідна кількість визначає структурний стан та механічні характеристики наплавленого металу. Існує велика кількість електродних матеріалів для виготовлення зварного обладнання з нержавіючих сталей, наведені довідкові дані їх механічних властивостей, але дані про корозійну поведінку цих зварних з'єднань або недостатні, або зовсім відсутні. Метою цієї роботи було зробити порівняльну оцінку основних електродних матеріалів, які можуть бути використані при виготовленні зварного технологічного обладнання, яке експлуатується в лужних середовищах. Для цього досліджували вплив хімічного складу на структурний стан та корозійну стійкість наплавленого металу зварних з'єднань. На першому етапі визначали



## Машинобудування і зварювальне виробництво

*вплив різних хімічних елементів, а також їх кількість у складі зварювальних матеріалів на корозійну поведінку і структурний стан наплавленого металу. Показано, що нікель, хром і ніобій підвищують корозійну стійкість. Вплив молібдену однозначно не виявлено. При своїй здатності зменшувати струм корозії він сприяє підвищенню швидкості корозії. Ці дослідження дозволили визначити вміст легувальних елементів для забезпечення високих показників опору корозії. Корозія хромонікелевого металу в лужних середовищах має структурно-виборчий характер по  $\delta$ -фериту. Ферит в нержавіючих сталях збагачений хромом, але містить невелику кількість нікелю. Тому ферит в електрохімічній парі аустеніт-ферит виступає в якості анода і підлягає переважному руйнуванню в лужних середовищах. Електрохімічні дослідження підтвердили зроблені висновки. Для надання високого опору корозійному руйнуванню наплавлений метал зварних з'єднань повинен містити певну кількість нікелю, хрому та ніобію (як ефективного утворювача карбідів і, тим самим, запобігання міжкристалітній корозії). Наведено рекомендації щодо використання марок електродів для обладнання з нержавіючих сталей при їх експлуатації, як в лужних середовищах невеликих концентрацій, так і в більш концентрованих.*

**Ключові слова:** лужне середовище, корозійна стійкість, зварне з'єднання, наплавлений метал.

**Постановка проблеми.** Широкого поширення набули нержавіючі хромонікелеві сталі, що застосовуються, в основному, при виготовленні об'єктів хімічного машинобудування, завдяки стійкості проти атмосферної, рідинної та газової корозії, жароміцності, а також високих та стабільних показників міцності та пластичних властивостей у широкому діапазоні температур. При виробництві конструкцій із жароміцних та кислотостійких аустенітних хромонікелевих сталей (08X18H10T, 10X18H10T, 12X18H10T тощо) основним видом зварювання є дугове зварювання плавленням. Устаткування глиноземного і гідролізного способу виробництва (трубопроводи, циклони, пропарювальні камери й ін.), що виготовляється зі сталі 12X18H10T, зазнає інтенсивних руйнувань по зварних швах. З аналізу характеру й причин руйнування устаткування випливає, що руйнування – наслідок корозійних процесів у лужних технологічних середовищах. Це може спричинити значне зниження працездатності зварних конструкцій. У зв'язку з цим виникла потреба зміни технології зварювання таких з'єднань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Як відомо, при зварюванні трубних систем, які виготовлені з аустенітних сталей типу 12X18H10T, зазвичай застосовуються присадні матеріали, які забезпечують високонікелевий наплавлений аустенітний метал. Для зварювання аустенітних хромонікелевих сталей та їх сплавів покритими електродами застосовують такі вітчизняні [1] марки електродів: ЦЛ-11, ЦЛ-11Р, ЦТ-15, ЕА-395/9, ЭА-400/1, ОЗЛ-6, ОЗЛ-8, ОЗЛ-40, ОЗЛ-41 і багато інших [2]. Вони мають переважно основний вид покриття, класифікаційний тип 04X20H9, 07X20H9, 02X21H10Г2, 06X22H9, 08X16H8M2, 08X17H8M2, 06X19H11Г2M2, 02X20H14Г2M2, 02X19H9Б, 08X19H10Г2Б, 08X20H9Г2Б, 08X19H10Г2МБ, 09X19H10Г2M2Б, 08X19H9Ф2С2, 08X19H9Ф2Г2СМ, 09X16H8Г3M3Ф, 07X19H11M3Г2Ф, 08X24H12Г3СТ, 10X25H13Г2, 12X24H14С2, 10X25H13Г2Б, 03X15H9АГ4, 10X20H9Г6С, 28X24H16Г6, 02X19H15Г4АМ3В2, 02X19H18Г5АМ3, 11X15H25M6АГ2, 09X15H25M6Г2Ф [3].

Також широко застосовують електроди зарубіжного виробництва [4,5]. Так, широку номенклатуру електродів для зварювання нержавіючих та жаростійких сталей випускають, наприклад, фірми ESAB (OK61.25, OK61.30, OK61.35, OK61.85, OK63.34 [6]), Böhler-Uddeholm (BOEHLER FOX EAS 2-A (AWS A5.4: E308L-17), BOEHLER Q E 308L-17 (AWS A5.4: E308L-17), BOEHLER FOX EAS 4M-A (AWS A5.4: E316L-17), BOEHLER AWS E316L-17 (AWS A5.4: E316L-17), Thermanit 19/15 H (AWS A5.4: E316LMn-15), BOEHLER FOX SAS 2-A (AWS

## Машинобудування і зварювальне виробництво

A5.4: E347-17), BOEHLER FOX SAS 4-A, Thermanit 25/22 H, BOEHLER FOX EASN 25M, BOEHLER FOX CN 20/25 M-A (AWS A5.4: E385-17), , BOEHLER FOX FFB (AWS A5.4: E310-15 (mod.)) [7].

Є відомості про механічні властивості наплавленого металу цими електродами; наведено структуру, хімічний склад, механічні та корозійні властивості зварних швів та з'єднань; існують способи зменшення та усунення напружень та деформацій, що виникають при зварюванні [8]. Однак, користуватися такими даними для порівняльної оцінки при виготовленні і розробці зварних конструкцій, що працюють у лужних середовищах, досить важко через відсутність показників корозійної стійкості наплавленого металу і конкретних рекомендацій зі зварювання.

**Мета дослідження.** Аналіз впливу хімічного складу і структури на корозійну стійкість наплавленого металу і вибір присадних матеріалів для зварювання устаткування, що експлуатується в лужних середовищах.

**Основний матеріал дослідження.** Дослідження фізико-хімічних властивостей металу виконували на зразках багатошарових наплавлень і зварних з'єднань сталі типу 12X18H10T електродами різних марок (табл. 1). Вміст δ-фериту розраховували аналітично і визначали експериментально феритометром ФМ-10і.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні властивості наплавленого металу

№	Марка електроду	Вміст, %									Механічні властивості			Швидкість корозії, г/м <sup>2</sup> ×год	
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	фериту	σ <sub>B</sub>	σ <sub>T</sub> , МПа	KCV <sub>K</sub> , Дж/м <sup>2</sup>	30 % NaOH	55 % NaOH
1	ОЗЛ-8	0,07	0,60	1,40	20,0	8,9	-	-	-	7	598	353	1177	0,6921	0,9937
2	ОЗЛ-6	0,09	0,55	1,25	25,6	12,5	-	-	-	4	559	343	1079	0,5972	0,8862
3	ОЗЛ-9	0,20	0,50	6,0	24,5	16,9	-	-	-	-	598	372	1373	0,0175	0,0835
4	ЗЮ-8	0,07	0,55	1,89	23,8	12,6	-	-	-	3,5	549	333	981	0,6007	0,8894
5	ЦЛ-11	0,10	1,00	1,55	19,8	9,5	-	0,98	-	6	608	353	990	0,590	0,6249
6	ЗЮ-3	0,09	0,65	1,67	18,5	10,0	-	0,90	-	5	598	343	980	0,420	0,7877
7	ЦЛ-9	0,11	0,85	1,50	21,0	11,2	-	0,80	-	4	677	372	981	0,1270	0,5971
8	ЦТ-15	0,09	0,35	1,90	19,0	9,4	-	0,80	-	4	589	314	971	0,4510	0,7112
9	АНВ-13	0,03	0,12	0,65	18,4	10,3	-	1,00	-	3,5	578	305	981	0,840	1,1218
10	АНВ-23	0,08	0,80	1,45	18,7	9,1	-	0,36	-	3,5	579	314	981	1,8700	1,3773
11	ЦЛ-4	0,07	0,50	1,95	18,5	9,2	2,3	-	-	7	589	334	981	1,8011	2,3672
12	НИАТ-1	0,09	0,72	1,25	18,3	8,7	2,1	-	-	5	579	343	1079	0,7812	1,5243
13	ЕА-395/9	0,09	0,69	1,70	15,5	25,0	5,8	-	-	-	608	462	1177	0,0290	0,0438
14	АНВ-17	0,22	0,35	6,50	24,5	16,0	2,1	-	-	-	589	353	1275	0,0480	0,1615
15	ЕА-400/10У	0,07	0,48	2,10	18,0	10,5	2,5	-	0,52	6	550	363	1079	0,6900	3,2094
16	ЕА-981/15	0,08	0,50	2,00	15,3	25,0	5,8	-	1,25	-	677	490	1079	0,0440	0,0507
17	НЖ-13	0,06	0,60	1,3	18,0	10,5	2,2	0,65	-	6	608	470	981	0,2930	3,2110
18	НИИ-48	0,18	0,38	5,60	19,8	10,2	0,1	-	-	-	550	372	981	0,2511	0,9596
19	12X18H10T	0,11	0,80	2,00	18,5	10,0	-	0,7	-	2	490	210	981	0,4807	1,3775

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Механічні властивості наплавленого металу визначали випробуванням зразків Гагаріна, які вирізані з багатошарових наплавлень; ударну в'язкість металу зварних швів – на зразках типу V за ДСТУ 8817:2018. Корозійну стійкість визначали гравіметричним методом. Потенціостатичні діаграми будували за допомогою потенціостату П-5827М. Криві оцінювали за величиною щільності струму в активній області ( $i_{кр}$ ), зсуву потенціалу пасивації ( $E_{п.п}$ ), щільності струму в пасивній області ( $i_{п.п}$ ) і потенціалу Фляда ( $E_{кр}$ ).

Технологічна міцність і корозійна стійкість зварних швів забезпечується певною структурою і хімічним складом наплавленого металу. Виходячи з цього, при виборі зварювальних матеріалів і встановленні припустимого ступеня проплавлення основного металу оцінювали структуру і можливі властивості різних ділянок шва.

Аналіз робили за допомогою діаграми Шефлера [9] стосовно до умов кристалізації металу при зварюванні сталі 12X18H10T (рис. 1).

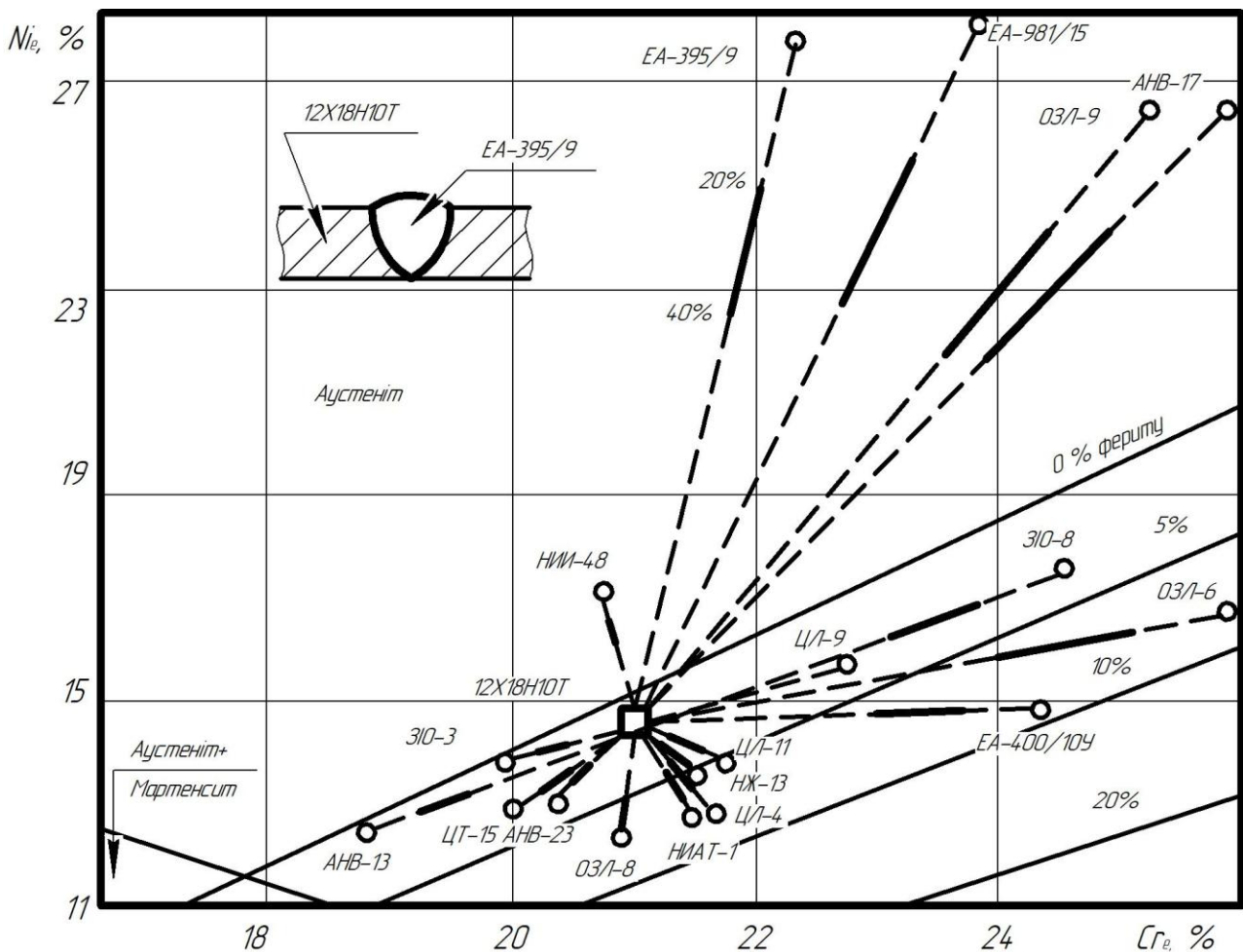


Рисунок 1 – Визначення структурного стану наплавленого металу за допомогою діаграми Шефлера для нержавіючих сталей

Відповідно до правил побудови подібних діаграм усі аустенітоутворювальні елементи приведені до еквівалентного вмісту нікелю [10]:

$$Ni_e = \% Ni + 30 \% C + 30 \% N + 0,5 \% Mn, \quad (1)$$

а всі феритоутворювальні - до еквівалентного вмісту хрому:

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$C_{re} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \% Si + 1,5 \% V + 0,8 \% W + 0,5 \% Nb + 4 \% Ti + 3,5 \% Al \quad (2)$$

При виборі зварювальних матеріалів слід враховувати можливість розвитку у зварних з'єднаннях структурної, хімічної і механічної неоднорідностей, що значно знижує працездатність і надійність зварних конструкцій. Результати випробувань по визначенню механічних властивостей наплавленого металу показали, що характеристики міцності його після зварювання перевищують рівень показників основного металу типу 12X18H10T. Вміст хрому, нікелю, молібдену і ніобію збільшує властивості міцності, про що свідчить співставлення даних, які отримані при наплавленні електродами ОЗЛ-9, ЦЛ-9, АНВ-17, ЕА-395/9 і ін. Межі текучості наплавленого металу перебувають на високому рівні, що обумовлене легуванням хромонікелевого металу елементами, які зміцнюють твердий розчин (Мо, Nb і V). Ударна в'язкість металу, наплавленого електродами ЗІО-3 і ЦТ-15, на рівні з показниками основного металу. Електроди ОЗЛ-9, АНВ-17, ОЗЛ-8, ЕА-395/9 забезпечили метал зварних швів з пластичністю, яка на 22-40 % більша, ніж у основного металу.

Результати корозійних випробувань показали, що зміна вмісту легувальних елементів, вуглецю й розкислювачів значно впливає на корозійну стійкість металу зварних швів (див. табл. 1). Так, зі зміною вмісту хрому від 20 % до 25,6 % і нікелю від 10 % до 12,5 % корозійна стійкість металу збільшується (зразки № 1 і 2, див табл. 1). При вмісті нікелю 16,9 % швидкість корозії знижується до 0,0175 г/м<sup>2</sup>• год, проти 0,4200 г/м<sup>2</sup>• год (в 24 рази) для вмісту нікелю 10 % (зразки № 3 та 6 відповідно, див табл. 1).

Легування хромонікелевого металу ніобієм позитивно впливає на корозійну стійкість. Так, наплавлений метал типу Х19Н10Б має швидкість корозії незначно меншу, в порівнянні з основним металом. Виключення становлять зразки, які наплавлені електродами АНВ-13 і АНВ-23. Наплавлений метал з молібденом – Х18Н9М2 (зразок № 11) має низьку корозійну стійкість. Марганець незначно підвищує корозійну стійкість, а вплив кремнію в лужних середовищах не визначено.

При дослідженні електрохімічних характеристик зварних з'єднань (табл. 2) встановлено ослаблення активного розчинення і зменшення критичної щільності струму в лужних розчинах зі зростанням вмісту хрому. Крім того, підвищення корозійної стійкості хромонікелевого металу зв'язане зі зниженням струму корозії. Збільшення вмісту нікелю поліпшує пасивувальну здатність наплавленого металу, тому що знижуються критична щільність струму пасивації і струм корозії системи “шов – основний метал”.

Таблиця 2 – Електрохімічні характеристики зварних з'єднань

№ зразка	Тип наплавленого металу	Параметр корозійних процесів				струм корозії, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
		$I_{кр}, \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$I_{п.п}, \mu\text{A}/\text{cm}^2$	$E_{кр}, \text{В}$	$E_{п.п}, \text{В}$	
19	12X18H10T	1,06	0,12	-0,065	+0,04	6,8
1	07X20H10	1,70	0,22	-0,105	+ 0,14	6,4
3	20X25H17	0,88	0,14	-0,045	-0,01	6,3
11	07X18H10M2	0,96	0,12	-0,020	+0,04	6,0
5	10X19H10Б	1,27	0,12	-0,060	-0,01	5,4
17	06X18H10Б	1,22	0,13	-0,070	-0,01	4,2

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Молибден звужує область активного розчинення і незначно поліпшує його пасивувальну здатність. Однак, струм корозії, при додатковому легуванні зварного шва молибденом, перевищує такий для деяких інших типів наплавленого металу (зразки № 11, № 5, № 17, див. табл. 2). Вочевидь, молибден, при своїй здатності впливати на пасивувальні характеристики, все ж-таки, активно розчиняється і сприяє збільшенню швидкості корозії. Ніобій утруднює пасивувальну здатність хромонікелевого металу, збільшуючи вміст  $\delta$ -фериту. Відзначається зменшення струму корозії системи шов – основний метал.

Корозія хромонікелевого металу в лужних середовищах має структурно-виборчий характер по  $\delta$ -фериту. Металографічні дослідження показали переважне травлення цієї фази в лужних середовищах. Результати випробувань за корозійною стійкістю наплавленого металу підтвердили залежність швидкості корозії металу від вмісту  $\delta$ -фериту у зварному шві (див. табл. 1). Найбільш високу корозійну стійкість мають зварні шви з однофазною аустенітною структурою (електроди ОЗЛ-9, ЕА-395/9, ЕА-981/15, АНВ-17). З появою другої структурної складової ( $\delta$ -фериту), швидкість корозії наплавленого металу зростає (електроди ОЗЛ-8, ЗІО-8, АНВ-13, ЦЛ-9 і ін.). Однак, між швидкістю корозії і вмістом  $\delta$ -фериту немає однозначної залежності

### ВИСНОВКИ

Проведено вибір присадних матеріалів для зварювання устаткування, що експлуатується в лужних середовищах та комплекс експериментів з дослідження впливу хімічного складу і структури на корозійну стійкість наплавленого металу.

На основі аналізу корозійної поведінки та електрохімічних досліджень металу зварних швів на нержавіючих сталях можна зробити висновок, що вплив легувальних елементів проявляється у формуванні структури, зміні електрохімічної і корозійної поведінки наплавленого металу.

Порівняльна оцінка електродних матеріалів дозволяє рекомендувати наступні зварювальні матеріали при розробці технологічних процесів виготовлення конструкцій зі сталі 12Х18Н10Т: ЦЛ-9, ЦЛ-4, ЗІО-3 (лужні середовища невеликих концентрацій). Для устаткування, що експлуатується в більш агресивних технологічних середовищах, – електроди ЕА-395/9, ЕА-981/15, ОЗЛ-9, ОЗЛ-6.

### Список використаних джерел

1. ДСТУ EN ISO 3581:2019 Матеріали зварювальні. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання неіржавких та жароміцних сталей. Класифікація
2. <https://weldmarket.online/uk/markuvannya-zvaryvalnyh-elektrodiv/>
3. *Петров Г.Л.* Сварочные материалы / *Г.Л. Петров* // Учебное пособие для вузов. - Москва: Машиностроение, 1972. - 280 с.
4. AWS A5.4/A5.4M Specification for Stainless Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding STANDARD by American Welding Society , 01/01/2012 56p
5. DIN 8556-1:1986-05 Filler metals for welding stainless and heat-resisting steels; designation, technical delivery conditions German 10p
6. <https://nisa-svarka.com.ua/ua/g2777339-elektrody-dlya-nerzhaveyuschih>
7. <http://interchim-btw.com.ua>
8. *Каховский Н.И.* Электродуговая сварка сталей / *Н.И. Каховский, В.Г. Фартушный, К.А. Ющенко* // Киев: Наукова думка, 1975. — 480 с.
9. Сварка. Резка. Контроль: справочник в 2-х т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Алешина,

Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. – 624 с.

10. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. 2- изд. Доп. И испр. / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. под общ. Ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.

**Savonov Y.M., Kapustian O.Ye., Parahnevich E.M., Ershov A.V.**

### COMPARATIVE EVALUATION OF ELECTRODE MATERIALS FOR WELDING CHROME-NICKEL STEEL

*A big problem remains the production of welded joints made of stainless steels, which are operated in aggressive environments of various industries, with high characteristics and a long durability. Requirements for welded joints: corrosion resistance and sufficient mechanical parameters. The question at issue is that operation of welding facilities in aggressive environments causes, firstly: selective destruction of deposited weld metals, and secondly: selective dissolution of one of the phases in the metal structure, the so-called structural selective destruction.*

*It's well known, that the properties of deposited weld metals depend on the amount of alloying elements. This required amount determines structural condition and mechanical properties of the deposited metal. There is a big variety of electrode materials for fabrication of welded equipment from stainless steels, specified their reference mechanical parameters, but the data about the corrosion resistance of this welded joints are either deficient or completely absent.*

*The goal of present research was to make a comparison of main electrode materials that can be used for fabrication of welded equipment that is operating in alkaline environment.*

*For this purpose, the effect of chemical composition on the structural state and corrosion resistance of the deposited metal of welded joints was investigated. At the first stage, the effect of various chemical elements on the corrosion behavior and structural state of the deposited metal, as well as their amount in the composition of welding materials, was quantified.*

*Nickel, chromium and niobium have been shown to increase corrosion resistance. The effect of molybdenum was not clearly detected. With its ability to reduce the corrosion current, it helps to increase the rate of corrosion. These researches made it possible to quantify the content of alloying elements to ensure high corrosion resistance.*

*Corrosion of nickel-chromium steel in alkaline environment has a structural selective nature for delta ferrite. Ferrite in stainless steels is enriched with chrome, but contains a small quantity of nickel. That's why in electrochemical couple of austenite-ferrite the last one stands as anode and is subject to preferential destruction in alkaline environments. The electrochemical researches confirmed the drawn conclusions.*

*To attain high corrosion resistance, the deposited metal of welded joints may contain certain quantity of nickel, chrome, and niobium (as an effective former of carbides and, thereby, preventer of weld decay).*

*The given recommendations of electrode grades for fabrication of welded equipment from stainless steels during their operation in alkaline environments, as low-, as well higher concentrated.*

**Keywords:** *alkaline environment, corrosion resistance, welded joint, deposited metal.*

*Стаття надійшла 06.10.2024р.*

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ПОРОШКОВОГО ДРОТУ ШЛЯХОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

*Проблема збереження ресурсів є однією з найважливіших, адже в різних галузях промисловості щороку витрачаються десятки тисяч тон металу для виготовлення запасних частин та заміни швидкозношуваних деталей. Це вимагає великих трудових витрат, призводить до збільшення простоїв обладнання, потреби в заміні зношених елементів і зниження продуктивності машин та апаратів. Підвищення зносостійкості та тривалості служби обладнання є важливим завданням виробництва. Одним із ефективних шляхів розв'язання цієї проблеми є відновлення деталей машин та інструментів і подовження їхнього терміну служби за допомогою електродугового наплавлення. У багатьох випадках для цього використовуються дефіцитні легувальні матеріали, що робить процес дорогим. Рішенням є розробка нових економнолегованих наплавних матеріалів, які покращують експлуатаційні властивості. У зв'язку з цим у роботі досліджуються можливості створення зносостійких наплавних матеріалів, які забезпечують отримання наплавленого металу з властивістю динамічного самозміцнення під час експлуатації, що підкреслює актуальність і важливість цього напрямку для різних галузей промисловості. Методи дослідження: під час проведення досліджень використовували: металографічний аналіз, хімічний та рентгеноспектральний аналіз наплавленого металу, вимірювання твердості, комплексні випробування на зносостійкість за умов сухого тертя, абразивного та ударно-абразивного зношування, а також математичне моделювання наплавленого металу системи Fe-Cr-Mn-Ni-N.*

**Ключові слова:** порошковий дріт, аустеніт, зносостійкість, легування, дугове наплавлення, карбіди, нітриди, математичне моделювання.

**Постановка проблеми.** Для розробки економнолегованих наплавних матеріалів була обрана система легування Fe-Cr-Mn-Ni-N. Наявність дорогого нікелю в системі легування вимагає зниження його вмісту у складі наплавленого металу для скорочення витрат. Обрана система легування демонструє добрі результати за умов абразивного, ударно-абразивного та сухого зношування. Основними легувальними елементами наплавленого металу обрано такі компоненти: хром, нікель, азот.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із відомих методів відновлення та підвищення довговічності деталей машин і конструкцій є електродугове наплавлення, яке особливо ефективне при використанні порошкових дротів [1,2]. Електродугове наплавлення має низку переваг порівняно з іншими видами наплавлення завдяки простоті технології, широким можливостям формування різного хімічного складу наплавленого металу та його високій якості. Перспективним напрямом є створення наплавних матеріалів без дорогих легувальних елементів, таких як Ni, V, Mo. У цьому випадку легування доцільно та економічно вигідно здійснювати недорогими та широко розповсюдженими в Україні компонентами, як-от марганець, хром, кремній тощо [3].

Склад і структура наплавленого металу визначають його призначення та здатність працювати за різних видів зношування: сухого тертя металу об метал, ударно-абразивного, абразивного, корозійного, кавітаційного. Серед них найчастіше наплавлення застосовується для деталей, які працюють за умов абразивного, ударно-абразивного зношування та тертя ковзання металу об метал. Основний аналіз літературних даних зосереджено на роботах,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

пов'язаних з наплавленням зносостійких металів. Серед використовуваних наплавних матеріалів особливий інтерес становлять матеріали на основі Fe-Cr-Mn, оскільки вони не містять дорогих легувальних елементів [4]. У дослідженнях [11,12] показано схожість впливу нікелю та марганцю на формування структури сталей, що дозволяє використовувати марганець як заміну дорогому нікелю.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка наплавного матеріалу у вигляді порошкового дроту та флюсу, що забезпечують утворення метастабільного аустеніту в наплавленому металі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Дослідити вплив легування на формування структури наплавленого металу;
- Визначити оптимальні режими для досягнення необхідних властивостей металу під термічним та динамічним впливом;
- Розробити склад порошкового дроту та флюсу, що забезпечують отримання зносостійкого наплавленого металу.

**Основний матеріал дослідження.** Існує тип наплавних матеріалів, заснований на принципі отримання в наплавленому металі структури метастабільного аустеніту, який під час навантаження в процесі експлуатації зазнає мартенситних перетворень. Роль мартенситного перетворення полягає в тому, що під час експлуатації відбувається не лише зміцнення, але й релаксація мікронапружень, що ускладнює утворення та зростання тріщин. Вибір оптимального режиму наплавлення та термообробки після наплавлення дозволяє активувати розвиток мартенситних перетворень при навантаженні, досягаючи максимальної зносостійкості наплавлених деталей [5–13]. Структура метастабільного аустеніту, порівняно з іншими, має значно більшу енергоємність, через що більша частина енергії зовнішнього впливу витрачається на розвиток мартенситних перетворень, а менша частина – на руйнування.

Найкращі результати демонструють сплави на хромомарганцевій основі. Властивості цих сплавів можуть бути значно покращені шляхом легування різними елементами [10]. Вплив легування на зміцнення обумовлений низкою факторів. Легувальні елементи створюють спотворення кристалічної решітки, змінюють енергію міжатомних зв'язків аустеніту, впливають на його стабільність. Стабілізуючий ефект при введенні легувальних елементів значною мірою залежить від їхнього впливу на утворення дефектів упаковки кристалічної решітки.

Внаслідок легування зменшується ймовірність утворення дефектів упаковки, що пов'язано зі стабілізуючим впливом легувальних елементів. Крім цього, відбувається закріплення дислокацій атомами впровадження та зниження рухливості комірок, які утворюються при деформації, що призводить до стабілізації аустеніту [10]. Кількісне співвідношення між аустенітом і мартенситом, яке визначає рівень механічних властивостей сплавів, залежить від хімічного складу та розташування мартенситної точки [13].

Було вивчено роботи, присвячені впливу азоту на структуру та зносостійкість наплавленого металу 20X18H8ЮАТ [14–17]. Введення азоту підвищує зносостійкість металу за рахунок зниження дефектів упаковки.

Регулювання співвідношення між мартенситом і аустенітом у наплавленому металі дозволяє адаптувати його до конкретних умов експлуатації, що підкреслює науковий і практичний інтерес до подальших досліджень у розробці наплавних матеріалів у вигляді порошкових дротів.

Для наплавлення деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, були розроблені наплавні матеріали на основі Fe-Mn-Cr-V-C [18]. Особливістю цих матеріалів є утворення в структурі наплавленого металу метастабільного аустеніту (у деяких випадках разом із мартенситом), зміцненого карбідами хрому та ванадію.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Хром є феритоутворюючим елементом, який знижує мартенситну точку і зменшує розчинність вуглецю в аустенітній фазі. Марганець, у свою чергу, має сильний аустенізуючий ефект, стабілізуючи аустенітну фазу при високих температурах.

Якщо підсумувати, можна виділити основні фактори, що обумовлюють підвищену зносостійкість наплавленого металу з метастабільним аустенітом на хромомарганцевій основі. Це включає:

- Вплив хрому на зниження мартенситної точки і стабільність аустеніту, що сприяє утворенню зносостійкої структури;
- Аустенізуючий ефект марганцю, що допомагає підтримувати аустеніт у стабільному стані при різних температурах, підвищуючи механічні властивості металу;
- Формування зміцнюючих фаз, таких як карбіди хрому і ванадію, що ще більше покращують зносостійкість металу під час експлуатації.

Формування механічних властивостей в наплавленому метастабільному металі при виборі наплавних матеріалів для відновлення та підвищення зносостійкості деталей необхідно враховувати умови зношування. В умовах, де переважають такі види зношування, як сухе тертя металу об метал, абразивне та ударно-абразивне зношування, коли ударна складова мінімальна, потрібні матеріали з високими показниками твердості та міцності [5]. У цьому випадку перевага надається твердим структурам в поверхневому шарі: мартенсит, бейніт, карбіди, бориди тощо. Однак в умовах ударно-абразивного зношування, коли ударна складова велика, основними параметрами металу є його енергоємність, здатність поглинати зовнішню енергію ударного впливу; в цьому випадку твердість не є вирішальним фактором. Основними показниками для наплавленого металу в таких умовах є в'язкість структури з низькою твердістю, такі як аустеніт чи ферит. Тому для цього краще використовувати наплавні матеріали, що дозволяють отримати аустеніт в наплавленому металі, оскільки він є більш в'язким і міцним.

З цього можна зробити висновок, що найбільш перспективним для підвищення міцнісних характеристик наплавленого металу є створення матеріалів з нестабільною аустенітною структурою, яка здатна зазнавати деформаційне мартенситне перетворення [3]. Деформаційне мартенситне перетворення дозволяє поглинати енергію зовнішнього впливу, в результаті чого менша частина енергії йде на руйнування наплавленого металу, що позитивно впливає на зносостійкість.

Під час деформаційного мартенситного перетворення з в'язкого і відносно м'якого аустеніту утворюється мартенсит деформації. Мартенсит деформації є однією з найтвердіших структур. Основною перевагою динамічного мартенситного перетворення є те, що відбувається релаксація мікронапружень в укріплених ділянках [3], що запобігає розвитку мікротріщин. Ці фактори збільшують працездатність наплавленого металу.

Вплив абразивних частинок призводить до утворення мартенситу та наклепу залишкового аустеніту в зоні контакту. Внаслідок зношування відбувається зміцнення наплавленого металу в поверхневому шарі, товщина цього шару залежить від силових впливів у зоні зношування, ступеня метастабільності аустеніту, а також обсягу деформаційного мартенситного перетворення. Товщина укріпленого шару коливається від кількох мікрометрів до міліметра.

У сталях класу Fe-Cr-Mn в поверхневому шарі під час експлуатації утворюється  $\alpha'$ -мартенсит, який перевищує за зносостійкістю  $\epsilon'$ -мартенсит, що утворюється в Fe-Mn сталях; ці результати є актуальними і для наплавних матеріалів [19,20]. У роботі [3] показано, що утворення  $\epsilon'$ -мартенситу починається з концентрації марганцю 10-12%. У роботі [17] доведено, що механічні властивості поверхневого шару залежать, з одного боку, від фазового складу і структури наплавленого металу, отриманого при наплавленні та термообробці, а з іншого боку — від кінетики динамічного мартенситного перетворення, складу, кількості і структури утвореного мартенситу деформації. Основними перевагами наплавних матеріалів на основі

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Fe-Cr-Mn є можливість регулювання міцнісних параметрів наплавленого металу за допомогою легування, режимів та параметрів термічної обробки, умов зношування при випробуваннях і експлуатації.

Температура відпуску також впливає на механічні властивості, які залежать від кінетики деформаційного мартенситного перетворення та кількості утвореного при деформації  $\alpha'$ -мартенситу деформації. У роботі [15] встановлено, що оптимальна кінетика деформаційного мартенситного перетворення досягається при температурі відпуску 650°C.

Також слід зазначити, що окрім деформаційного мартенситного перетворення в поверхневому шарі під час процесу зношування може відбуватися динамічне деформаційне старіння мартенситу загартування, мартенситу деформації та залишкового аустеніту з виділенням дисперсних карбідів, нітридів. Ці фактори, в свою чергу, також сприяють підвищенню зносостійкості.

Виходячи з усіх факторів механізмів зміцнення матеріалів з метастабільним аустенітом, слід зазначити, що їх комплексне використання дасть значний вигравш у формуванні експлуатаційних властивостей.

Для проведення багатфакторного експерименту була вибрана регресійна квадратична математична модель. Для математичної обробки результатів експериментів значення факторів прийняті у закодованому вигляді (табл. 1).

Таблиця 1 – Фактори та рівні їх варіювання

Фактори	X <sub>1</sub> (Cr,%)	X <sub>2</sub> (Ni,%)	X <sub>3</sub> (N,%)
Основний рівень (X <sub>i0</sub> )	19,0	3,0	0,15
Інтервал ( $\Delta X_i$ )	0,5	3,0	0,05
Верхній рівень (X <sub>i</sub> = 1)	19,5	9,0	0,20
Нижній рівень (X <sub>i</sub> = -1)	18,5	2,5	0,05
Зіркова точка + $\alpha$	20,0	9,5	0,25
Зіркова точка - $\alpha$	18,0	2,0	0

Кодовані та натуральні значення факторів були пов'язані наступними співвідношеннями:

$$X_1 = \frac{Cr, \% - 19,0}{2,5}; X_2 = \frac{Ni, \% - 3,0}{3,0}; X_3 = \frac{N, \% - 0,15}{0,05}; \quad (1)$$

За отриманими експериментальними даними були розраховані регресійні залежності твердості та зносостійкості від хімічного складу наплавленого металу.

Зносостійкість та твердість наплавленого металу досліджувалися при різних складах порошкової проволоки. Відносна зносостійкість позначена таким чином:  $\epsilon$  – сухе тертя,  $\epsilon_a$  – абразивний знос,  $\epsilon_{y-a}$  – ударно-абразивний знос. Твердість позначена як – HRC. Також було проведено розрахунок впливу відпуску при 650°C на твердість і зносостійкість наплавленого металу.

Рівняння регресії отримано у наступному загальному вигляді:

$$Y_i = \beta_0 X_{1i} + \beta_1 X_{1i}^2 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \epsilon_i \quad (2)$$

де  $\beta_0$  — зсув,  $\beta_1$  — коефіцієнт лінійного ефекту,  $\beta_2$  — коефіцієнт квадратичного ефекту,  $\epsilon_i$  — випадкова помилка змінної Y в i-му спостереженні.

Умови експериментів та їх результати наведені в таблиці 2.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

За результатами квадратичного рівняння регресії були проведені розрахунки показників твердості та зносостійкості до і після низькотемпературного відпуску. Адекватність моделі перевіряли за критерієм Фішера (табл. 2).

Перевірка показала, що квадратичні моделі виду (2) адекватно описують експериментальні результати з ймовірністю 95%.

Середня відносна похибка, що оцінюється через різницю між експериментальними та розрахунковими значеннями твердості та зносостійкості, складає від 2 до 5%.

Рівняння, отримані після перетворення факторів із кодованих значень у натуральний масштаб, наведені нижче у наступному вигляді.

$$\text{HRC}_{650^\circ\text{C}} = 452,9 \cdot \text{Cr} - 11,9 \cdot \text{Cr}^2 + 3,8 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 4270,3 \quad (3)$$

$$\text{HRC} = 11,2 \cdot \text{Cr} + 1307,5 \cdot \text{N} - 69 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 184,1 \quad (4)$$

$$\varepsilon = -0,04 \cdot \text{Ni} + 67,6 \cdot \text{N} + 0,015 \cdot \text{Cr}^2 - 3,65 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} + 0,35 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 3,63 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{650^\circ\text{C}} = 4,71 \cdot \text{N} + 0,0034 \cdot \text{Cr}^2 + 0,0015 \cdot \text{Ni}^2 - 16,29 \cdot \text{N}^2 + 0,93 \quad (6)$$

$$\varepsilon_a = 0,77 \cdot \text{Cr} + 0,00039 \cdot \text{Cr} \cdot \text{Ni} + 0,2 \quad (7)$$

$$\varepsilon_{a\ 650^\circ\text{C}} = -10,6 \cdot \text{Cr} - 1,01 \cdot \text{Ni} + 27,04 \cdot \text{N} + 0,27 \cdot \text{Cr}^2 + 0,06 \cdot \text{Cr} \cdot \text{Ni} - 1,29 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 0,0087 \cdot \text{Ni}^2 - 0,57 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} + 102,62 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{y-a} = 0,25 \cdot \text{Cr} + 28 \cdot \text{N} - 1,55 \cdot \text{Cr} \cdot \text{N} - 0,0017 \cdot \text{Ni}^2 + 0,16 \cdot \text{Ni} \cdot \text{N} - 2,81 \quad (9)$$

$$\varepsilon_{y-a\ 650^\circ\text{C}} = 0,069 \cdot \text{Ni} - 0,005 \cdot \text{Ni}^2 + 2,36 \quad (10)$$

Таблиця 2 – Матриця планування експерименту

№	Вміст комп-в, %			Зносостійкість та твердість НМ							
	Cr	Ni	N	HRC <sub>650°C</sub>	HRC	ε	ε <sub>650°C</sub>	ε <sub>a</sub>	ε <sub>a 650°C</sub>	ε <sub>y-a</sub>	ε <sub>y-a 650°C</sub>
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>	Y <sub>7</sub>	Y <sub>8</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	19	3	0,15	35	29	1,6	2,6	1,71	2,4	1,93	2,55
2	18,6	3,9	0,16	33	27	1,5	2,6	1,72	2,45	1,93	2,58
3	19,1	3,6	0,12	31	30	1,7	2,6	1,75	2,48	1,91	2,53
4	18,9	3,3	0,14	35	27	1,5	2,5	1,75	2,45	1,91	2,53
5	19,2	4,1	0,17	32	28	1,6	2,5	1,73	2,43	1,93	2,55
6	18,8	3,8	0,12	32	29	1,6	2,65	1,73	2,37	1,95	2,55
7	19,3	3	0,09	35	30	1,6	2,5	1,78	2,35	1,93	2,57
8	19,2	8,3	0,08	31	30	1,5	2,5	1,69	2,5	1,93	2,51
9	19,1	8,6	0,07	34	26	1,7	2,65	1,78	2,5	1,91	2,57
10	19,5	8,4	0,16	34	24	1,7	2,65	1,77	2,5	1,91	2,51
11	19,5	9	0,2	37	30	1,7	2,7	1,8	2,3	2	2,67
12	18,9	7,6	0,14	35	30	1,5	2,55	1,73	2,3	1,9	2,6
13	18,9	6,3	0,12	33	30	1,5	2,55	1,68	2,35	1,9	2,6
14	18,7	6,1	0,15	30	22	1,6	2,4	1,68	2,38	1,95	2,6
15	19,1	3,8	0,16	31	25	1,6	2,3	1,65	2,39	1,95	2,54
16	19	3,6	0,11	28	29	1,5	2,5	1,65	2,42	1,94	2,48
17	19,3	3,3	0,12	30	29	1,7	2,6	1,68	2,41	1,94	2,45
18	18,5	2,5	0,05	26	21	1,4	2,3	1,6	2,3	1,8	2,4

## Машинобудування і зварювальне виробництво

19	18,9	5,7	0,07	32	30	1,6	2,3	1,71	2,5	1,95	2,6
20	19	5,2	0,09	33	30	1,6	2,6	1,71	2,5	1,98	2,6
21	18,9	4,6	0,11	35	28	1,6	2,5	1,68	2,4	1,98	2,5
22	19,3	4,3	0,18	36	28	1,6	2,5	1,67	2,4	1,97	2,5
23	19,1	4,1	0,13	34	28	1,7	2,6	1,68	2,42	1,97	2,5
24	19	4,8	0,09	36	27	1,6	2,6	1,78	2,41	1,97	2,65
25	19,1	5,5	0,14	34	29	1,5	2,55	1,78	2,4	1,87	2,67
26	19,4	4	0,16	29	30	1,5	2,65	1,75	2,4	1,88	2,57
27	19,4	3,5	0,2	27	26	1,4	2,6	1,75	2,5	1,85	2,57
28	18,7	3	0,12	34	29	1,6	2,4	1,73	2,3	1,85	2,55
29	18,9	6,5	0,14	37	30	1,6	2,7	1,73	2,33	1,85	2,55
30	19,2	7	0,17	33	26	1,6	2,6	1,7	2,41	1,93	2,5
31	19,3	2,5	0,15	35	30	1,6	2,6	1,7	2,4	1,93	2,5
32	18,9	4,5	0,11	31	29	1,7	2,5	1,63	2,4	1,93	2,6
33	18,6	3,5	0,07	33	28	1,5	2,4	1,65	2,4	1,93	2,6
34	18,5	5	0,16	30	30	1,7	2,5	1,63	2,5	1,95	2,6
35	19,1	3	0,13	28	25	1,5	2,4	1,61	2,5	1,95	2,61

Були проведені розрахунки отриманих рівнянь регресії, на основі яких побудовані графіки, що показують вплив кожного з факторів на твердість та відносну зносостійкість при наступних видах зносу: сухе тертя, абразивне та ударно-абразивне впливи.

Побудована квадратична модель дає можливість прогнозувати вплив кожного з легуючих елементів на твердість та зносостійкість наплавленого металу.

При збільшенні вмісту хрому в наплавленому металі твердість змінюється в межах малих значень. Це обумовлено тим, що з ростом вмісту хрому збільшується кількість карбидів, а також зростає кількість аустеніту в структурі наплавленого металу. При збільшенні вмісту нікелю з 3% до 10% твердість наплавленого металу знижується, що пояснюється збільшенням вмісту аустеніту в його структурі. При збільшенні вмісту азоту з 0% до 0,3% твердість наплавленого металу зростає. Це пояснюється утворенням нітридів алюмінію, хрому та ванадію в наплавленому металі. Вміст азоту не повинен перевищувати 0,3% в наплавленому металі, оскільки це призводить до крихкості та утворення пористості. Отримані дані показують, що хром позитивно впливає на зносостійкість наплавленого металу. Хром у досліджуваному інтервалі підвищує зносостійкість для кожної з наплавов. Позитивний вплив на стійкість до всіх трьох видів зносу обумовлений тим, що хром сприяє утворенню карбидів  $Cr_{23}C_6$  на межах зерен аустеніту, які мають підвищену твердість. При ударно-абразивному зносі важливу роль відіграє збільшення вмісту залишкового аустеніту під впливом хрому та підвищення його стабільності. Це дозволяє поглинати енергію удару та інтенсифікувати процес деформаційного мартенситного перетворення [21]. Таким чином, при ударно-абразивному зношуванні збільшення вмісту нікелю призводить до підвищення зносостійкості. Це можна пояснити впливом кількості залишкового аустеніту, який при інтенсивному навантаженні проходить динамічне мартенситне перетворення. При малих навантаженнях, таких як сухе тертя та абразивний знос, утворення мартенситу деформації відбувається менш інтенсивно, що призводить до зниження твердості та зносостійкості наплавленого металу. У таблиці 3 наведено результати складів наплавленого металу з найбільшими показниками розрахункової зносостійкості при трьох видах зносу, на основі математичної моделі та експериментальних даних.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 3 – Склад наплавленого металу з найбільшими розрахунковими показниками

Порошкова проволочка	Розрахункова відносна зносостійкість			Вміст елементів, %			Розрахункова твердість, HRC
	$\epsilon$	$\epsilon_a$	$\epsilon_{y-a}$	Cr	Ni	N	
X20H10Г6 (Еталон)	1	1	1	20	10	-	21
X19H4Г10	1,17	1,29	1,41	19	4	-	24
X19H3Г10АТ (N – 0,075%)	1,36	1,58	1,71	19	3	0,075	26
X19H3Г10АТ (N – 0,15%)	1,55	1,69	1,89	19	3	0,15	28
Порошкова проволочка	Експериментальна відносна зносостійкість			Вміст елементів, %			Експериментальна твердість, HRC
	$\epsilon$	$\epsilon_a$	$\epsilon_{y-a}$	Cr	Ni	N	
X20H10Г6 (Еталон)	1	1	1	20	10	-	23
X19H4Г10	1,2	1,32	1,46	19	4	-	24
X19H3Г10АТ (N – 0,075%)	1,4	1,62	1,76	19	3	0,075	27
X19H3Г10АТ (N – 0,15%)	1,6	1,71	1,89	19	3	0,15	29

### ВИСНОВКИ

На основі отриманих даних можна зробити висновок, що побудована квадратична математична модель повністю описує твердість та зносостійкість наплавленого металу, виготовленого за допомогою розроблених порошкових проволочок, та в повній мірі відповідає результатам, отриманим експериментальним шляхом. Це підтверджує її адекватність реальним процесам, що відбуваються в наплавленому металі.

1. На основі літературних та експериментальних даних розроблена математична модель впливу легуючих елементів хрому, нікелю та азоту на твердість та зносостійкість наплавленого металу, що містить метастабільний аустеніт.

2. Достовірність отриманої математичної моделі підтверджена результатами досліджень наплавленого металу в лабораторних умовах ДВНЗ «ПДТУ» з використанням необхідного обладнання.

#### Список використаних джерел

1. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н. А. Гринберг, Э. Г. Куркумелли // М. : Машиностроение, 1969. 188 с.
2. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов / И.А. Рябцев // К. : Екотехнология, 2004. 160 с.
3. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л.С.Малинов, В.Л. Малинов // Мариуполь : изд. «Рената», 2009. 568 с.
4. Малинов Л.С. Упрочнение нестабильных аустенитных Cr-Mn-N сталей / Л.С. Малинов, Т.Д. Эйсмонт. // Изв. АН СССР. Металлы, 1969. №2, с. 114-120.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

5. Малинов Л.С. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.А. Харланова // Сварочное производство, 1995. №10, 22с.
6. Титаренко В.В. Опыт совместных работ ОАО «Запорожсталь» и ОП «Реммаш» в разработке и внедрении новых наплавочных материалов / В.В. Титаренко, Г.В. Хоменко, В.И. Титаренко, А.В. Титаренко // Сборник работ 2-ой научно-практической конференции «Модернизация и переоснащение предприятий. Эффективные технологии ремонта и восстановления деталей». В рамках Международного промышленного форума «УкрИндустрия - 2006», Днепропетровск 11.10.2006. Экспоцентр «Метеор», с. 39-43.
7. Малинов Л.С. Повышение абразивной и ударно-абразивной износостойкости хромомарганцевых сталей / Л.С. Малинов // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost', 2001. №2, с. 54-56.
8. Разиков М.И. Сварка и наплавка кавитационной стали марки 30X10Г10 / М.И. Разиков, В.П. Ильин. М.: НИИМАШ, 1964. 35 с.
9. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. М.: Машиностроение, 1984. 103 с.
10. Малинов В.Л. Разработка состава порошковой проволоки, обеспечивающей эффект самозакалки при эксплуатации и внедрение ее для наплавки крановых колес / В.Л. Малинов, Л.С. Малинов. Отчет о научно-исследовательской работе, 2009. 66 с.
11. Разиков М.И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М.И. Разиков, Б. А. Кулишенко // Сварочное производство. 1967. №7, с. 10-12.
12. Уманский В.Б. Упрочнение деталей металлургического оборудования / В.Б. Уманский, А. А. Костенко, Ю. Г. Худик. М. : Металлургия, 1991. 176 с.
13. Потехин Б.А. Вклад мартенситного превращения при деформации в пластичность метастабильных аустенитных сталей // ФММ. 1979. т.48, вып. 5, с. 1065-1075.
14. Литвиненко Арьков В.Б. Исследование влияния азота и нитридообразующих элементов на структуру и износостойкость наплавленного металла / В. Б. Литвиненко Арьков // 8-я Российская конф. молод. научн. сотр. и аспирантов. «Физико-химия и технология неорг. материалов», Москва, 1518 ноября 2011. М., 2011. с. 599-600.
15. Цырлин Э.С. Азотирование мартенситностареющей стали Н18К9М5Т / Э.С. Цырлин // МиТОМ. 1979. №9, с. 22-25.
16. Лахтин Ю.М. Азотирование мартенситностареющей стали / Ю.М. Лахтин, Э.С. Цырлин. // ФиХОМ. 1973. №1, с. 101.
17. Коротич И.К. Поверхностное упрочнение малоникелевых мартенситностареющих сталей методом азотирования и цементации / И.К. Коротич, Л.С. Малинов, К.Н. Соколов и др. // Тез. докл. Второй Всесоюз. науч. конф. «Химико-термическая обработка металлов и сплавов». Минск. 1974. С.210-211.
18. Малинов Л.С. Хромомарганцевые стали с мартенситными превращениями при охлаждении и/или деформации. / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. // Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки. 2009. с. 243-288.
19. Влияние дополнительного легирования метастабильных аустенитных сталей на эксплуатационную стойкость / С.С. Черняж // Изв. вузов. Черная металлургия, 1993. №6. с. 48-52.
20. Филиппов М.А. Стали с метастабильным аустенитом / М.А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский. М. : Металлургия, 1988. 256 с.
21. Попов В.С. Износостойкость прессформ огнеупорного производства / В.С. Попов, Н.Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко // М.: Металлургия, 1971. 160 с.

Zusin A.M.

### OPTIMIZATION OF POWDER WIRE COMPOSITION THROUGH MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF THE WELDED METAL

*The problem of resource conservation is one of the most important, as tens of thousands of tons of metal are used annually in various industries to manufacture spare parts and replace rapidly worn components. This requires significant labor costs, leads to increased downtime of equipment, the need for replacing worn-out parts, and a reduction in the productivity of machines and devices. Increasing the wear resistance and service life of equipment is an important task in production. One effective way to address this issue is through the restoration of machine parts and tools and extending their service life by means of arc welding. In many cases, scarce alloying materials are used for this purpose, making the process costly. A solution is the development of new cost-effective alloyed welding materials that improve operational properties. In this context, the study investigates the possibilities of creating wear-resistant welding materials that provide the welded metal with the property of dynamic self-strengthening during operation, which emphasizes the relevance and importance of this direction for various industries. Research methods: the study employed metallographic analysis, chemical and X-ray spectral analysis of the welded metal, hardness measurements, comprehensive wear resistance tests under dry friction, abrasive, and impact-abrasive wear conditions, as well as mathematical modeling of the Fe-Cr-Mn-Ni-N welding metal system.*

**Keywords:** powder wire, austenite, wear resistance, alloying, arc welding, carbides, nitrides, mathematical modeling.

Стаття надійшла 10.10.2024р.

УДК 621.791.052

[doi.org/10.31498/2522-9990282024318367](https://doi.org/10.31498/2522-9990282024318367)

Захарова І.В., Студенікін Д.А.

### ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ТЕРМООБРОБКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ У ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ ЗАДЛЯ ВАЖЛИВИХ СЕРЕДОВИЩ

*Трубопроводи є одним з основних елементів інфраструктури атомної електростанції (АЕС), оскільки вони забезпечують транспортування різноманітних середовищ (води, пари, пароводяних сумішей, повітря тощо) між різними частинами станції [3,4].*

*Для трубопроводів насиченого пара, які йдуть до турбін, використовують сталі типу 12Х1МФ, оскільки вони здатні витримувати високі температури та тиски, а також мають високу корозійну стійкість [1]. Сталь 12Х1МФ є оптимальним вибором для систем, що транспортують важливі середовища.*

*Для визначення ролі термообробки після зварювання проведено серію експериментів, що включали зварювальні випробування, випробування з термообробки після зварювання.*

*Отримані результати дозволяють детальніше оцінити вплив різних режимів термообробки на структурні та механічні властивості зварних з'єднань, що є важливим для підвищення надійності та довговічності продукції з цієї сталі.*

*Наявність залишкових напружень, що виникають після процесу зварювання, сприяє утворенню корозійних тріщин та знижує стійкість металу до втомного пошкодження. У*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

зв'язку з цим, важливо досліджувати методи зменшення залишкових напружень, серед яких найбільш ефективним є термообробка після зварювання.

Термін "термообробка (DHT)" зазвичай розшифровується як *Dehydrogenation Heat Treatment* (дегідрогенізаційна термообробка). Цей процес використовується для видалення водню зі зварного з'єднання або металевої деталі після зварювання. Водень може проникати в метал під час зварювання і спричиняти дефекти, такі як тріщини, особливо в зонах зварних швів. Тому дегідрогенізаційна термообробка проводиться для запобігання крихкості та руйнування зварних з'єднань.

Додатково проаналізовано вплив різних параметрів процесу термообробки після зварювання на ефективність зниження залишкових напружень.

Виявлено, що підвищення температури термообробки сприяє більшому зменшенню залишкових напружень, особливо в зонах максимальних напружень, із піковою температурою в межах 650–750 °C.

**Ключові слова:** залишкові напруження, термообробка, трубні сталі, руйнування.

**Постановка проблеми.** Сталь марки 12X1МФ — це низьколегована хромо-молібденова сталь, яка використовується для виготовлення трубопроводів та обладнання, що працюють при високих температурах і тисках. Її основне застосування — це котли, теплообмінники та паропроводи в енергетиці, хімічній промисловості та нафтохімії. Попри її добрі механічні властивості та жаростійкість, робота з цією сталлю пов'язана з рядом проблем, особливо під час зварювання та подальшої експлуатації зварних з'єднань.

Основні проблеми зварювання сталі 12X1МФ

1. Під час зварювання 12X1МФ існує високий ризик утворення гарячих тріщин у зварному шві та зоні термічного впливу (ЗТВ). Це зумовлено високим вмістом хрому (1%) і молібдену (0,5%), які збільшують жорсткість зони зварювання. При швидкому охолодженні можуть утворюватися крихкі фази, що сприяють тріщиноутворенню.

2. Після зварювання в сталях 12X1МФ виникають значні залишкові напруження, особливо при зварюванні товстостінних труб. Це призводить до утворення деформацій та зниження тріщиностійкості, особливо під час експлуатації при високих температурах і тисках.

3. Сталь 12X1МФ схильна до утворення оксидних плівок при тривалій експлуатації в умовах високих температур (понад 500°C). Оксидні плівки можуть зменшувати теплопровідність та викликати корозію під напругою.

4. При термообробці зварних з'єднань 12X1МФ існує ризик утворення крупнозернистих структур, що знижує ударну в'язкість і міцність. Неправильна термообробка може призвести до передчасного руйнування в умовах циклічного навантаження.

Зварювання та термообробка труб зі сталі 12X1МФ вимагають спеціальних заходів через високу схильність до утворення тріщин, зміну мікроструктури та утворення залишкових напружень. Правильний вибір зварювальних матеріалів, оптимізація режимів зварювання, використання попереднього підігріву та після зварювальної термообробки є ключовими факторами для забезпечення якості зварних з'єднань.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У промисловому виробництві існує кілька процесів термообробки після зварювання, таких як дегідрогенізаційна термообробка (DHT), нормалізація, відпустка тощо. Вибір відповідних процесів термообробки залежно від властивостей матеріалу та характеристик зварювання є важливим питанням для виробників. Наприклад, дослідження показали, що DHT може лише незначно зменшити залишкові напруження у сталі високої міцності. Khalaj та ін. провели порівняльне дослідження різних процесів термообробки сталі API X60, виявивши, що двоступенева термообробка "гартування + відпустка" є більш ефективною, ніж традиційна одноступенева нормалізація [2]. Варто зазначити, що неправильно спроектований процес термообробки може не лише не зменшити



## Машинобудування і зварювальне виробництво

залишкові напруження, але й завдати шкоди. Виявили, що неналежна термообробка після зварювання призводить до нерівномірного розподілу температури у трубопроводі 12Cr1MoV, що може викликати тріщини в зварних з'єднаннях.

**Мета дослідження.** Метою статті є дослідити вплив різних процесів термообробки на залишкові напруження у зварних з'єднаннях, що дозволить визначити оптимальні методи підвищення довговічності та надійності зварних конструкцій.

**Основний матеріал дослідження.** У даній роботі були проведені експериментальні зварювальні випробування для труб зі сталі 12ХМФ1, які включали підготовку зразків, зварювання, а також термообробку після зварювання. Для проведення зварювання використовували стандартні методи зварювання, а зразки формували у вигляді труб з відповідними геометричними характеристиками.

Випробування проводили на зразках сталі 12Х1МФ у вигляді трубних заготовок 273 мм, довжиною 150 мм і товщиною стінки 26 мм. на них була проведена V-подібна оброблення крайок під кутом 30° з притупленням торця 2 мм (рис. 1).



Рисунок 1 – Характеристики зварного з'єднання та технологічні параметри

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Труба зі сталі 12Х1МФ виготовлена відповідно ТУ 143р-55-2001 і використовується при монтажі паропроводу.

Для проведення випробувань зі зварювання трубні заготовки розрізали на сегменти. Далі проводили зварювання сегментів між собою по ряду технологічних режимів.

Для зварювання даних сегментів використовували електроди марки ТМЛ –3у Ø3мм, призначені для зварювання паропроводів з сталей марок 12Х1МФ, 15Х1МФ, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ, що працюють при температурі до 570 °з, і елементів поверхонь нагріву з сталей марок 12Х1МФ, 12Х2МФСР, 12Х2МФБ незалежно від робочої температури, а також для заварки дефектів в елементах з тих же сталей. Зварювання даними електродами можна проводити у всіх просторових положеннях, крім вертикального «зверху вниз», на постійному струмі зворотної полярності.

Для вимірювання окружних та осьових напружень у різних точках вздовж перетину зварного шва, було проведено тест з використанням інструментального вдавлювання. Цей метод має переваги майже без руйнівного характеру та зручності в експлуатації. Вимірювання залишкових напружень проводилося за допомогою індикаторного тестера KJS-3, що ілюстрований на рисунку. Спочатку поверхня зварного з'єднання механічно полірувалася. Потім до контрольних точок були приклеєні деформаційні датчики за допомогою спеціального клею, і тестер напружень був підключений до датчиків. Третім етапом було розміщення ударного вдавлювального пристрою на зварному з'єднанні з вирівнюванням сферичного індентора з деформаційним датчиком. Нарешті, ударна сила прикладається до зварного з'єднання шляхом розпуску пружини ударного пристрою. [3-5].

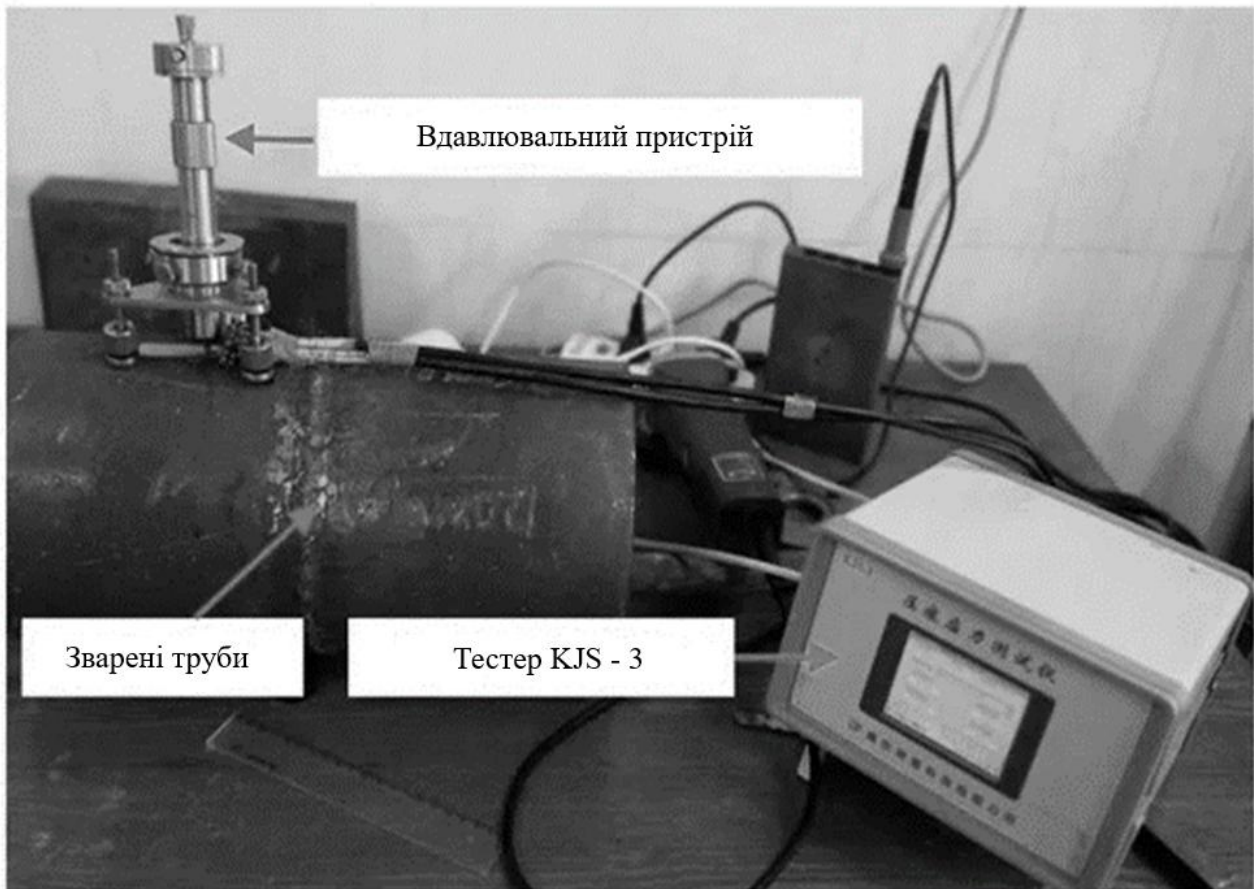


Рисунок 2 – Випробування залишкових напружень за допомогою індикаторного тестера

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для розгляду мікроструктури були підготовлені зразки зварних з'єднань

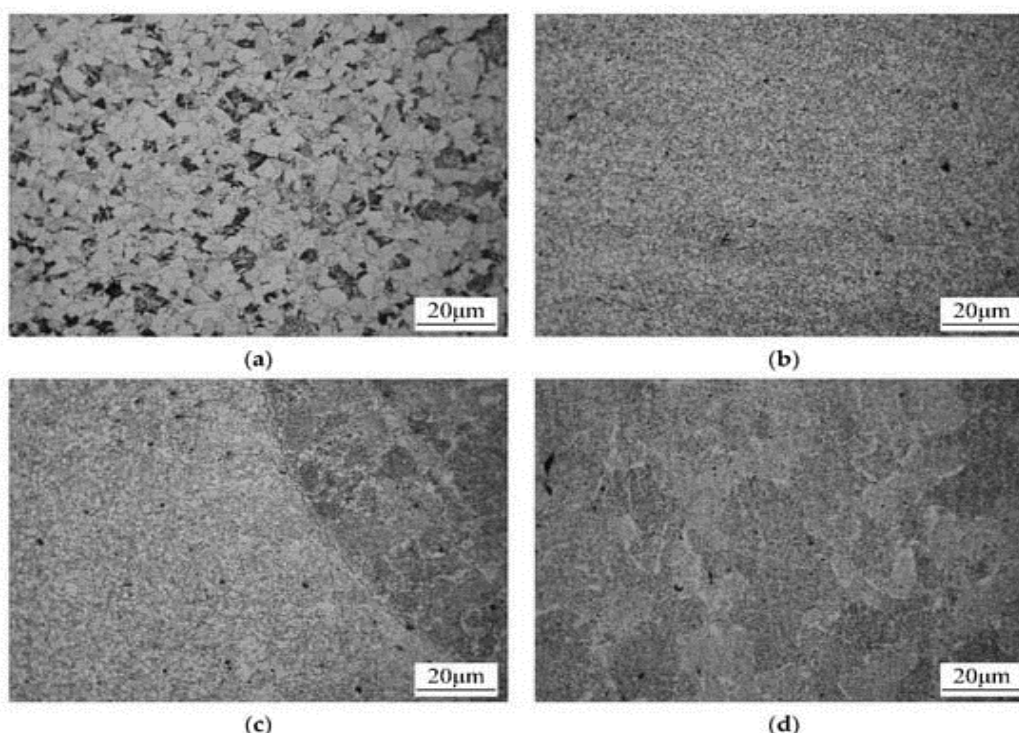


Рисунок 3 – Мікроструктури зварного з'єднання 12X1МФ після деігідації:  
(а) Основна металева частина; (б) Зона термічного впливу; (с) Зона злиття; (д) метал шва

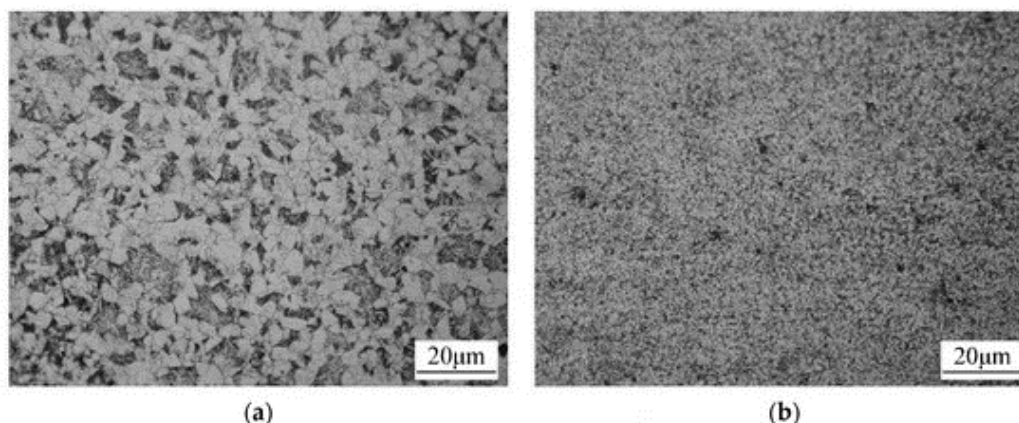


Рисунок 4 – Мікроструктури зварного з'єднання 12X1МФ термічної обробки: Основна металева частина; (б) Зона термічного впливу;

Мікроструктури зварного з'єднання сталеві труби 12X1МФ після деігідації та термічної обробки показані на рисунку. Згідно з морфологією мікроструктури та розмірами зерен, зварне з'єднання поділяється на чотири підзони: основна металева частина зона термічного впливу, зона злиття та зварювальний метал

Обидва основні метали, що піддавалися ДНТ та термічній обробці, складаються з фериту та перліту. Однак кількість перліту суттєво відрізняється. Мікроструктурні спостереження виявили, що вміст перліту в основному металі з ДНТ (див. Рисунок 3а) вищий, ніж у основному металі з термічною обробкою (див. Рисунок 4а). Порівняння між Рисунок 3б і Рисунок 4б показує, що розмір зерен ЗТВ з ДНТ менший, ніж у ЗТВ з термічною обробкою.

### ВИСНОВКИ

В результаті виконаної роботи були досліджені структури наплавленого металу шва, ЗТВ, а також механічні властивості зварних з'єднань з теплостійкої сталі 12Х1МФ виконані по 6 технологічним режимам (за п'ять проходів ручним дуговим зварюванням покритими електродами і зазнали різних режимів попереднього підігріву і подальшої ТО). На основі отриманих результатів були зроблені наступні висновки:

1. Зварювання без підігріву призводить до формування тріщин в наплавленому металі кореневої частини зварного з'єднання. Початком формування тріщин можуть служити різного роду дефекти, наприклад, пори і великі не металеві включення. Подальша термічна обробка не виключає даного роду сформованого дефекту.

2. Введення в технологічний процес зварювання тільки підігріву не забезпечує зниження рівня твердості за обсягом наплавленого металу. Мікроструктура особливо в обсязі кореня шва зберігається метастабільною з незначною кількістю окремих феритних зерен. В обсязі наплавленого металу другого проходу дані структурні складові зберігаються в співвідношенні 50:50.

3. Підігрів і подальша термічна обробка при 740°C вирівнює рівень мікротвердості по всьому об'єму зварного з'єднання. Структура має дендритну будову по межах яких знаходиться феритний прошарок.

4. Додаткова термічна обробка зварного з'єднання у вигляді високої відпустки при 740°C призводить до формування практично однорідної ферито-перлітної суміші в зоні термічного впливу, мікротвердість якої практично не перевищує рівень HV основного металу. Це дозволяє отримати рівномірне зварне з'єднання з основним металом. Руйнування при статичному навантаженні відбувається по основному металу. Рівень міцності і пластичності знаходиться в інтервалі значень характерних для вихідного матеріалу (ТУ 14-Зр-55-2001).

5. На основі всього комплексу результатів рекомендується найбільш раціонального технологічного процесу зварювання труб 273 з товщиною стінки 26 мм зі сталі 12Х1МФ: підігрів 250°C перед зварюванням і подальша термічна обробка зварного з'єднання у вигляді високого відпустки при 740°C з витримкою 2 години і подальшим охолодження на спокійному повітрі.

### Список використаних джерел

1. Бучинський М. Я., Горик О. В., Чернявський А. М., Яхін С. В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О. В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. — Харків: Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. [ISBN 978-966-2989-39-7](#)

2. Khalaj-Amirhosseini, M. Microwave filters using waveguides filled by multilayer dielectric [Текст] / M. Khalaj-Amirhosseini // Progress In Electromagnetics Research, PIER 66. - 2006, p. 105-110.

3. Анохов А.Е., Корольков П.М., Зварювання і термічна обробка корпусного енергетичного обладнання при ремонті.- Київ:Екотехнологія,2003

4. Анохов А.Е., Корольков П.М., Термічна обробка зварних з'єднань. Київ:Еко-технологія, 2002.-112с.

5. Хромченко Ф.А., Корольков П.М. Технології і обладнання для термічної обробки зварних з'єднань:Енергоатом Видання,1997.-200 с.

## THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT PROCESSES ON THE CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS IN THE PRODUCTION OF PIPES FOR CRITICAL ENVIRONMENTS

*Pipelines are one of the main elements of the infrastructure of a nuclear power plant (NPP), as they provide transportation of various media (water, steam, steam-water mixtures, air, etc.) between different parts of the plant [3,4].*

*For pipelines of saturated steam, which go to turbines, steel type 12Cr1MoV. is used, because they can withstand high temperatures and pressures, and also have high corrosion resistance [1]. Steel 12Cr1MoV is the optimal choice for systems that transport important media.*

*To determine the role of heat treatment after welding, a series of experiments was conducted, which included welding tests, tests on heat treatment after welding.*

*The obtained results allow for a more detailed assessment of the effect of different heat treatment modes on the structural and mechanical properties of welded joints, which is important for increasing the reliability and durability of products made of this steel.*

*The presence of residual stresses arising after the welding process contributes to the formation of corrosion cracks and reduces the resistance of the metal to fatigue damage. In this regard, it is important to investigate methods of reducing residual stresses, among which heat treatment after welding is the most effective.*

*The term "heat treatment (DHT)" is usually deciphered as Dehydrogenation Heat Treatment (dehydrogenation heat treatment). This process is used to remove hydrogen from a welded joint or metal part after welding. Hydrogen can penetrate the metal during welding and cause defects such as cracks, especially in weld areas. Therefore, dehydrogenation heat treatment is performed to prevent brittleness and destruction of welded joints.*

*In addition, the influence of various parameters of the heat treatment process after welding on the effectiveness of residual stress reduction was analyzed.*

*It was found that an increase in the temperature of the heat treatment contributes to a greater reduction of the residual stresses, especially in the zones of maximum stresses, with a peak temperature in the range of 650–750 °C.*

**Keywords:** residual stresses, heat treatment, pipe steel, destruction.

*Стаття надійшла 12.11.2024р.*

## СТАЛИЙ РОЗВИТОК АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ: ЕКОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА РІШЕННЯ

У статті розглядається актуальна проблема екологічної безпеки автомобільного транспорту як одного з ключових аспектів інтеграції у європейський економічний і транспортний простір. Зростання рівня забруднення навколишнього середовища, викликаного автомобільними викидами, є значним викликом для сучасного суспільства. Основна увага приділяється аналізу сучасного стану екологічної безпеки транспортних систем, вивченню ризиків, пов'язаних із традиційними паливними технологіями, та пошуку шляхів зменшення негативного впливу транспорту на довкілля.

У роботі детально проаналізовано основні фактори, що обумовлюють необхідність переобладнання транспортних засобів на екологічно чисті паливні системи. Основним із таких рішень є впровадження газобалонного обладнання, яке дозволяє суттєво зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу та відповідає сучасним екологічним стандартам. Зокрема, підкреслено, що використання зрідженого газу та компримованого природного газу як альтернативних видів палива є найпоширенішим підходом у світі. У статті акцентується увага на перевагах газобалонного обладнання, серед яких зниження рівня шкідливих викидів, економія енергоресурсів і відповідність міжнародним екологічним нормам.

Висвітлено стан розвитку інфраструктури газобалонного обладнання в Україні, зокрема наявність значної кількості автозаправних станцій, газових сховищ та спеціалізованих транспортних засобів для перевезення зрідженого газу. Звертається увага на те, що в Україні понад 800 000 автомобілів використовують скраплений газ як основне паливо, що свідчить про значний потенціал ринку та перспективи його розвитку.

У статті також проаналізовано ризики, пов'язані з транспортною галуззю. До них віднесено не лише екологічні, а й економічні аспекти, такі як штрафи за перевищення норм викидів, затримки під час перевезення через екологічні обмеження та загальні ризики невиконання умов контрактів. Ці аспекти є важливими для формування сталих транспортних систем, особливо у контексті європейської інтеграції.

Окрему увагу приділено аналізу світового та національного ринків газобалонного обладнання. У статті розглянуто сучасні тенденції розвитку цього ринку, зокрема розширення попиту в Азії та Близькому Сході, а також стабільне зростання у країнах Європи. У дослідженні підкреслено роль українських виробників газобалонного обладнання у задоволенні внутрішнього та зовнішнього попиту.

Наукова новизна статті полягає у системному підході до аналізу екологічних ризиків та пропозиції практичних заходів для їх мінімізації. Запропоноване переобладнання автомобілів на газобалонне обладнання як ефективний спосіб зниження рівня шкідливих викидів і оптимізації транспортних витрат. Визначено також необхідність розвитку національної транспортної інфраструктури, що забезпечить підтримку інтеграції України до європейських транспортних коридорів. Робота підкреслює важливість державної підтримки в реалізації екологічних ініціатив, а також необхідність популяризації екологічно чистих технологій серед населення та підприємств транспортної галузі.

**Ключові слова:** екологічна безпека, автомобільний транспорт, газобалонне обладнання, альтернативні види палива, шкідливі викиди, екологічні стандарти, транспортна інфраструктура, екологічні технології, автомобільні двигуни.

## Транспортні технології

**Постановка проблеми.** Один з найважливіших факторів соціально-економічного розвитку, що поглинає великі обсяги ресурсів і серйозно впливає на навколишнє середовище – це транспорт. При всій значущості транспортного комплексу як складової економіки необхідно враховувати дуже серйозний негативний вплив на природні екосистеми. Більшість українців проживають у районах із сильним забрудненням атмосферного повітря, а середня концентрація забруднюючих речовин у повітрі перевищує максимально допустиму у більшості міст.

Україна, як частина глобального економічного простору, має враховувати нові екологічні виклики і адаптувати свою транспортну інфраструктуру відповідно до сучасних стандартів. Особливо важливим є забезпечення екологічної безпеки у сфері автомобільних перевезень, оскільки саме автотранспорт залишається одним із головних джерел забруднення повітря. За даними досліджень, на автомобільний транспорт припадає значна частка викидів парникових газів, що обумовлює необхідність впровадження екологічно чистих технологій і модернізації паливних систем.

Сучасні тенденції глобалізації впливають на світовий ринок стислих технічних газів та суміжні галузі, при цьому провідні виробники скорочують витрати та переміщують виробництво у більш сприятливі для бізнесу регіони. Просування екологічно чистих видів палива, розвиток виробництва обладнання для газового устаткування для транспорту, виробництва сталі та металопродукату, електроніки, нейтралізація промислових стічних вод дозволить скоротити використання метану, азоту, кисню, аргону, вуглекислого газу та різні газові суміші. Тому необхідно проаналізувати та оцінити ризики, які можуть вплинути на екологічну безпеку під час транспортування, та знайти шляхи зниження впливу на навколишнє середовище.

Сьогодні екологія стає інструментом інтеграції у Європі та в усьому світі. Структурне та регіональне планування дозволило організувати доставку товарів, людей та енергоносіїв за допомогою більш екологічних та чистих транспортних засобів та інтермодальних систем.

До завдань дослідження входить:

- Аналіз сучасного стану питань екологічної безпеки автомобільних систем та конкретні пропозиції щодо переходу на газобалонне обладнання автомобілів.
- Аналіз факторів, що визначають необхідність переоснащення автомобілів екологічно безпечними газобалонними системами.
- Формування шляхів сполучення – коридорів, що поєднують екологічно чистий транспорт, обмундирування та іншу інфраструктуру.
- Визначення характеристик вітчизняного та світового ринку газобалонного обладнання в розрізі попиту, що склався, на продукцію автомобільних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Показники ризику починають все ширше використовуватись у сфері безпеки дорожнього руху. Особливо це стає актуальним у процесі аудиту безпеки існуючих автомобільних доріг, коли необхідно провести експрес-аналіз небезпеки ділянок доріг або дати оцінку безпеки руху на конкретних автомобільних шляхах. На сьогодні немає однозначного розуміння сутності ризику.

Насамперед це пояснюється великою кількістю аспектів цього явища. Крім того, ризик – це складне явище, що має безліч незбіжних, а іноді протилежних реальних основ. Це обумовлює можливість існування великої кількості визначень поняття «ризик» з різних поглядів. Ризик проявляється у всіх сферах діяльності людини, на всіх етапах функціонування і розвитку об'єкта, їхньої взаємодії з навколишнім середовищем і всередині себе. Транспортна галузь не є винятком. Вивченню явища «ризик» присвятили свої роботи багато вчених, серед них Д. Хенлі, Х. Кумамото, Ст. Маршал, М. Муртонен тощо. В Україні нині з'являється все

## Транспортні технології

більше робіт, присвячених аналізу й оцінці ризику. Серед таких можна виділити роботи В. Государєва, Л. Маханця, К. Пуліковського, А. Водяника, Н. Касьянова, О. Кружилко тощо [1].

Існує безліч різних визначень ризику. Найчастіше ризик визначають як сукупність можливості збитку і його тяжкості. Проте досі немає єдиної думки у трактуванні поняття «ризик» через різноманітність його аспектів. Нижче наведені деякі визначення поняття ризик. Так, Оксфордський словник англійської мови визначає ризик як ймовірність небезпеки, поганих наслідків, втрат тощо». Вебстерський словник трактує поняття «ризик» як можливість втрат, пошкодження, шкоди або руйнування. У сучасних підручниках зустрічається таке трактування: «Ризик – це частота, з якою може проявитися можлива небезпека». Д. Хенлі та Х. Кумамото у своїй роботі дають таке визначення ризику: «Ризик – ймовірність людських жертв і матеріальних витрат або травм і пошкоджень». Н. В. Хохлов вважає, що ризик, насамперед, це подія або група споріднених випадкових подій, що завдають шкоди об'єкту, якому належить цей ризик.[7].

**Мета дослідження.** Наукове обґрунтування вибору заходів по зниженню ризиків при управлінні екологічною безпекою перевезень.

**Основний матеріал дослідження.** Викиди в атмосферу є одним із основних ризиків в управлінні екологічною безпекою транспорту. Насамперед, це викиди, які утворюються внаслідок процесу згоряння палива в двигуні внутрішнього згоряння під час руху автомобіля.

Коли паливо, таке як бензин або дизель, згорає, утворюються газоподібні продукти, серед яких вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ), оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), чадний газ ( $\text{CO}$ ), вуглеводні ( $\text{HC}$ ) та тверді частинки ( $\text{PM}$ ). Ці речовини викидаються в атмосферу через вихлопну систему автомобіля, сприяючи забрудненню повітря та негативно впливаючи на довкілля і здоров'я людини. Викиди та їх вплив залежать від палива, що використовується у конкретному типі транспортного засобу.

Важливо враховувати такий аспект, як «вантажні ризики». Недотримання вимог безпеки під час перевезення може значно вплинути на довкілля, спричиняючи потенційно шкідливі наслідки.

Ризик нерозмитнення та накладення штрафів під час транзиту. Він виникає через недотримання умов перетину кордону. Це може спричинити затримки у перевезеннях і, як наслідок, невиконання умов контракту. Однією з причин подібних проблем є рівень викидів автотранспорту в атмосферу, що залежить від типу паливної системи транспортного засобу. Варто зважати на цей ризик, щоб уникнути фінансових втрат і порушень графіків доставки.

Екологічна безпека автомобілів, як багатогранний показник, повинна оцінюватися за допомогою спеціалізованих інструментів. Ця оцінка охоплює різні властивості, що поділяються на індивідуальні, групові, узагальнені та комплексні індикатори, які відображають екологічний вплив транспортного засобу.

Кожна узагальнена властивість містить кілька групових властивостей із власними показниками. Кожна властивість групи містить окремі індикатори. В результаті формується трирівнева ієрархія лічильників, оцінка яких може дати уявлення про екологічну безпеку автомобільної конструкції. [3]

В Україні досить розвинена інфраструктура зберігання зрідженого газу (установка газових балонів) – 70 АЗС, загальна потужність одноразового зберігання близько 30 000 тон.

Балонні заправні станції знаходяться у віданні місцевої газової компанії та налічують близько 340 одиниць. В Україні для перевезення зрідженого газу використовується 700 газозовів (з них 50% нових), а для перевезення побутових балонів близько 1,5 тис. автомобілів. Близько 800 000 автомобілів в Україні використовують як моторне паливо (автогаз) скраплений газ. Зріджений газ реалізується на 1800 АЗС, 30% у тому числі мобільні [5].

Одним з головних джерел забруднення атмосфери шкідливими речовинами, такими як оксиди вуглецю, азоту, вуглеводні, що не згоріли, а також одним з основних парникових газів



## Транспортні технології

(вуглекислий газ), є промислові підприємства, включаючи електростанції, компресорні станції, металургійні та теплові двигуни хімічної промисловості. Проте, найбільше забруднення повітря спричиняють автомобільні двигуни. Вони відповідають за 21% викидів CO<sub>2</sub>, з яких 17,5% припадає на автомобільний транспорт. У світі налічується близько 900 мільйонів автомобілів, і їх кількість продовжує зростати. Це підкреслює важливість зменшення токсичності вихлопних газів і вуглецевого сліду, який залишають транспортні засоби.[5].

Основними заміниками бензину, на даний час, є скраплені вуглеводневі гази та компримований природний газ. Це єдині два види палива, що мають широке комерційне поширення у світі. Формування комунікаційних шляхів, коридорів, що поєднують екологічно чистий транспорт, єдину енергетичну та інші інфраструктури, необхідно ґрунтувати на передумовах розвитку місцевих та регіональних енергетичних, транспортних та промислових ринків. Стратегія розвитку єдиного європейського транспортного коридору ґрунтується на створенні умов для розширення єдиного ринку, вільного руху капіталу та розвитку інших факторів виробництва [7]. Тому необхідно провести процедуру переобладнання автомобіля на екологічно безпечне газобалонне обладнання.

На цей момент ця практика тільки починає розвиватися і ще не набула широкого поширення в Україні для використання в транспортних та сільськогосподарських машинах. Крім того, наразі реалізуються лише проекти в рамках державних програм, що дозволяють організувати виробництво необхідного обладнання та розробити відповідні технології.

В результаті спільних зусиль науковців і виробничих підприємств, було здійснено значний прорив у сфері газової техніки. Зокрема, Державний трубний інститут (м. Дніпро) за участю Інституту газу НАН України та ВАТ «Бердичівський машинобудівний завод «Прогрес» розробив інноваційну технологію та організував виробництво суцільнометалевих полегшених газових балонів. Ці балони, виготовлені на заводі «Прогрес», за своїми масово-об'ємними характеристиками відповідали параметрам аналогічних виробів італійської фірми Faber, яка є найбільшим у світі виробником такого обладнання, і відзначалися високою довговічністю, що дозволяло порівнювати їх з італійськими аналогами.

Ще одна компанія, частку якої припадає 7% українського ринку продукції, спеціалізується на доведенні балонів виробництва Південної Кореї та Китаю. Згідно зі статистикою, попит на цей тип обладнання, ймовірно, буде найбільшим в Азії. Основним драйвером зростання є ринок метану, що розширюється, в Таїланді, Індії, Індонезії, Малайзії і на Філіппінах. Значне зростання очікується на Близькому Сході. Північна Америка та Південна Америка показують найнижче зростання. Очікуване зростання попиту у Західній та Східній Європі становить у середньому близько 5-7% на рік. Імпортні та митні процеси здійснюються відповідно до правил, встановлених Митним законодавством України, та залежать як від економічних, так і від політичних чинників. Вимоги державних органів, що регулюють зовнішньоекономічну діяльність, чітко сформульовані та повинні виконуватись компаніями-імпортерами [1].

Для ввезення продукції на митну територію України необхідно надати митним органам комплект документів, які чітко підтверджують причини переміщення продукції та умови її ввезення. Закон також передбачає обов'язок сплачувати збори, податки та акцизні збори з продукції, що перевозиться. Далі необхідно документально підтверджувати ці платежі. Крім того, необхідно дотримуватись усіх вимог митного законодавства, що стосуються нетарифного регулювання імпорту та інших обмежувальних заходів держави. Імпортні документи є обов'язковими для реєстрації продукції та товарів у режимі імпорту.

### ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підкреслює важливість впровадження екологічно безпечного обладнання для транспортних засобів у контексті зменшення шкідливих викидів і підвищення екологічної безпеки транспорту. Перехід на газобалонне обладнання є одним із найбільш ефективних рішень для зменшення викидів вуглекислого газу, оксидів азоту та інших шкідливих речовин, що негативно впливають на довкілля.

Основними перевагами переобладнання автотранспорту на використання зрідженого газу є:

1. Зменшення екологічного навантаження. Скраплений газ має нижчий вуглецевий слід у порівнянні з бензином та дизельним паливом. Це допомагає зменшити рівень забруднення атмосфери та вплив на зміну клімату.

2. Економічна доцільність. Використання газобалонного обладнання дозволяє суттєво знизити витрати на паливо, що є особливо актуальним для вантажоперевізників і підприємств, що здійснюють регулярні перевезення.

3. Зниження ризику штрафів. У країнах Європи існують суворі обмеження на викиди автотранспорту. Використання газобалонного обладнання дозволяє відповідати екологічним стандартам, уникаючи штрафних санкцій та затримок у транзиті.

4. Підвищення ефективності перевезень. Впровадження інтермодальних систем та створення екологічно чистих транспортних коридорів сприяє більш оптимальному використанню ресурсів, що позитивно впливає на логістичні процеси.

5. Отже, впровадження газобалонного обладнання є важливим кроком до досягнення більш екологічної, економічно вигідної та ефективної транспортної системи. Це не лише допоможе зменшити негативний вплив на довкілля, але й сприятиме інтеграції України у європейські та світові екологічні стандарти транспортної галузі.

### *Список використаних джерел*

1. Державна служба статистики України: сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/>.
2. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р (зі змінами, внесеними згідно з Розпорядженням КМ № 321-р від 07.04.2021). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>.
3. Про затвердження Правил експлуатації колісних транспортних засобів: Наказ Міністерства інфраструктури України від 26.07.2013 № 550. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1453-13#Text>.
4. Угода про прийняття єдиних технічних приписів для колісних транспортних засобів, предметів обладнання та частин, які можуть бути встановлені та/або використані на колісних транспортних засобах, та про умови взаємного визнання офіційних затверджень, виданих на основі цих приписів: сайт. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_343#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_343#Text).
5. Угода про прийняття єдиних умов періодичних технічних оглядів колісних транспортних засобів та про взаємне визнання таких оглядів: сайт. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_e51#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_e51#Text)
6. Волков В.П., Матейчик В.П., Ніконов О.Я., Комов П.Б., Грицук І.В., Волков Ю.В., Комов Є.А. Інтеграція технічної експлуатації автомобілів у структури та процеси інтелектуальних транспортних систем. / Під редакцією Волкова В.П. - Харків. Волкова В.П. - Харків: Вид-во ХНАДУ, 2013. - 400 с.

7. Інтелектуальні транспортні системи в технічній експлуатації автомобілів / Волков В.П., Панченко В.П., Грицук І.В., Волкова Т.В., Курцев М.С., Мамедов Е.А. - Баку, «Апостроф-А», 2019. - 476 с.

8. Методи та засоби дистанційного контролю технічного стану автомобілів / Волков В.П., Грицук І.В., Грицук Ю.В., Волкова Т.В., Волков Ю.В., Володарець Н.В., Сергієнко Н.Є., Агапов О.М., Павлова Н.М. - Харків: ФОП Панов А.М., 2019. - 320с.

**Anulich A., Kiritseva O.**

### **SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF ROAD TRANSPORT: ENVIRONMENTAL CHALLENGES AND SOLUTIONS**

*The article addresses the pressing issue of environmental safety in road transport, emphasizing its importance as a key aspect of integrating into the European economic and transport space. The growing level of environmental pollution caused by vehicle emissions poses a significant challenge to modern society. The main focus is on analyzing the current state of ecological safety in transport systems, examining risks associated with traditional fuel technologies, and exploring ways to reduce the negative environmental impact of transportation.*

*The study provides a detailed analysis of the key factors necessitating the conversion of vehicles to environmentally friendly fuel systems. One prominent solution is the implementation of gas-cylinder equipment, which significantly reduces harmful emissions into the atmosphere and complies with modern environmental standards. It highlights that the use of liquefied petroleum gas (LPG) and compressed natural gas (CNG) as alternative fuels is the most widespread approach globally. The article emphasizes the benefits of gas-cylinder equipment, including reduced harmful emissions, energy resource savings, and compliance with international environmental regulations.*

*The development status of gas-cylinder equipment infrastructure in Ukraine is also covered, including the availability of numerous refueling stations, gas storage facilities, and specialized vehicles for transporting liquefied gas. It is noted that over 800,000 vehicles in Ukraine use liquefied gas as their primary fuel, underscoring the market's potential and future growth prospects.*

*Additionally, the article analyzes risks associated with the transport sector, not only ecological but also economic. These include fines for exceeding emission standards, delays in transportation due to environmental restrictions, and general risks of contract non-fulfillment. These aspects are crucial for developing sustainable transport systems, particularly in the context of European integration.*

*The article also examines the global and national markets for gas-cylinder equipment, considering modern development trends, such as increasing demand in Asia and the Middle East and steady growth in European countries. It highlights the role of Ukrainian manufacturers in meeting both domestic and international demand for gas-cylinder equipment.*

*The scientific novelty of the article lies in its systematic approach to analyzing ecological risks and proposing practical measures to minimize them. The recommended conversion of vehicles to gas-cylinder equipment is presented as an effective method for reducing harmful emissions and optimizing transport costs. The article also emphasizes the need for developing a national transport infrastructure to support Ukraine's integration into European transport corridors. It underscores the importance of state support in implementing ecological initiatives and promoting environmentally friendly technologies among the population and transport enterprises.*

**Keywords:** *environmental safety, road transport, gas-cylinder equipment, alternative fuels, harmful emissions, environmental standards, transport infrastructure, ecological technologies, automotive engines.*

*Стаття надійшла 20.10.2024 р.*

Карашук В.О., Гладченко М.А., Романовська С.В., Клецька О.В., Джус О.В.

## АНАЛІЗ АВАРІЙНОСТІ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ З МЕТОЮ ПОШУКУ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО БЕЗПЕКИ

У роботі проведений аналіз аварійності на автомобільному транспорті з метою пошуку можливостей підвищення його безпеки. В процесі дослідження проаналізовано кількість дорожньо-транспортних пригод з постраждалими в Україні за період 2021-2023 роки. В процесі аналізу визначені середньорічна кількість дорожньо-транспортних пригод з постраждалими, кількість травмованих та загиблих осіб. Визначені показники дитячого травматизму внаслідок дорожньо-транспортних пригод. В результаті аналізу встановлено, що з вини водіїв ліцензованого автомобільного транспорту щорічно стається шість цілих десятків десятих процента всіх випадків аварій. Розподіл дорожньо-транспортних пригод за видами показав, що зіткнення є основним видом аварій, який характеризується високою смертністю та травмуванням людей. Також в роботі було досліджено випадки аварій за днями тижня та годинами доби. В процесі аналізу передумов виникнення дорожньо-транспортних пригод з постраждалими встановлено, що більшість таких випадків є результатом перевищення безпечної швидкості. За територіальною ознакою сімдесят вісім процентів дорожньо-транспортних пригод відбувається у населених пунктах. За результатами проведеного аналізу зрозуміло, що сучасний стан безпеки автомобільного транспорту в Україні є незадовільним, характеризується високим ступенем травматизму та потребує пошуку нових можливостей та інструментів для його покращення. Авторами роботи були визначені виклики, що існують для транспортної галузі у питанні його безаварійної роботи та безпеки перевезень та запропоновано можливості їх подолання.

**Ключові слова:** транспортна безпека, дорожньо-транспортні пригоди, аварійність, травмовані, загиблі, автомобільний транспорт.

**Вступ.** Аварійність на автошляхах є показником ефективності транспортної політики та функціонування транспортного сектору. Підвищення інтенсивності руху, значний приріст транспортних засобів призводить до дисбалансу системи управління транспортними потоками, в наслідок чого збільшується кількість ДТП з постраждалими, особливо у містах.

Велика кількість постраждалих в результаті настання дорожньо-транспортних пригод показує низьку соціальну відповідальність перевізників, висвітлює проблеми транспортної інфраструктури, проблеми управління транспортними потоками в містах, низьким рівнем контролю в питанні забезпечення безаварійної роботи громадського транспорту, ліцензованого автомобільного транспорту та всієї автотранспортної системи.

Основні напрями покращення якості надання транспортних послуг, передбачені транспортною стратегією України до 2030 року [1] є наближення рівня їх надання та розвитку інфраструктури до європейських стандартів, підвищення рівня безпеки та зменшення негативного впливу на навколишнє природне середовище.

**Постановка проблеми.** В умовах зростання урбанізації та збільшення кількості транспортних засобів на автошляхах питання транспортної безпеки стоїть дуже гостро. Високий ступінь аварій, в тому числі з постраждалими особами, за участю водіїв ліцензованого автомобільного транспорту потребує пошуку нових підходів щодо подолання проблем транспортної безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблемою безпеки перевезень та аварійності на автомобільному транспорті займається велика кількість науковців. Авторами

## Транспортні технології

роботи [2] виконано оцінку стану формування безпечної системи роботи автомобільного транспорту України. У роботі [3] розроблено експрес спосіб оцінювання рівня безпеки руху балами безпосередньо на автодорозі. У роботі [4] проведено аналіз показників аварійності дорожнього руху, на підставі якого запропоновано їх розподілення за призначенням для проведення аудиту безпеки дорожнього руху. Наукові праці [5-6] присвячені питанням оцінки впливу дорожніх умов на аварійність та прогнозуванню аварійності на регульованих перехрестях.

Дослідження які виконані у наукових працях присвячені вирішенню проблем оцінки, аудиту безпеки на дорозі, дослідженню впливу дорожніх умов на аварійність автомобільного транспорту, прогнозуванню аварійності відповідно до існуючої дорожньої інфраструктури але не розглядають загальні виклики для галузі та можливості їх подолання.

**Мета дослідження.** Метою цієї роботи є аналіз аварійності на автошляхах України, визначення викликів пов'язаних з безпекою роботи ліцензованого автомобільного транспорту з метою обґрунтування можливостей їх подолання для галузі.

### Основний матеріал дослідження.

Проаналізувавши період з 2021 року по 2023 рік в Україні (див. табл.1.), в середньому щорічно трапляється 22264 випадків дорожньо-транспортних пригод (ДТП), в результаті яких є постраждалі особи (травмовані та/або загиблі).

Таблиця 1 - Аналіз кількості дорожньо-транспортних пригод з постраждалими в Україні за період 2021-2023 р.р.

Назва показника	Кількість випадків/осіб			Середнє значення показника
	Період, роки			
	2021	2022	2023	
Загальна кількість (дані [7, 8])				
ДТП з загиблими та/або травмованими, випадків	24521	18628	23642	22264
Травмовані, осіб	29738	23145	29502	27462
Загиблі, осіб	3238	2791	3053	3027
ДТП з загиблими та/або травмованими дітьми (до 18 років), випадків	3691	2625	3964	3427
Травмовані діти, осіб	4160	2978	4538	3892
Загиблі діти, осіб	193	125	171	163
За участю водіїв ліцензованого автомобільного транспорту (дані [9,10])				
ДТП з загиблими та/або травмованими, випадків	2696	1703	2818	2406
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>11,0</i>	<i>9,1</i>	<i>11,9</i>	<i>10,8</i>
Травмованих, осіб	913	777	950	880
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>3,1</i>	<i>3,4</i>	<i>3,2</i>	<i>3,2</i>
Загиблих, осіб	125	135	166	142
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>3,9</i>	<i>4,8</i>	<i>5,4</i>	<i>4,7</i>
З вини водіїв ліцензованого автомобільного транспорту (дані [9,10])				
ДТП з загиблими та/або травмованими, випадків	1519	930	1627	1359
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>6,2</i>	<i>5,0</i>	<i>6,9</i>	<i>6,1</i>
Травмованих, осіб	414	351	396	387
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>1,4</i>	<i>1,5</i>	<i>1,3</i>	<i>1,4</i>
Загиблих, осіб	38	47	76	54
<i>Відсоток від загальної кількості</i>	<i>1,2</i>	<i>1,7</i>	<i>2,5</i>	<i>1,8</i>

## Транспортні технології

Щорічна кількість травмованих осіб (за вищезначений період) склала - 27462 людини, та 3027 загиблих (див. рис. 1.). Гістограма розподілу кількості ДТП з постраждалими в Україні за період 2021-2023 р.р. наведено на рис.1.

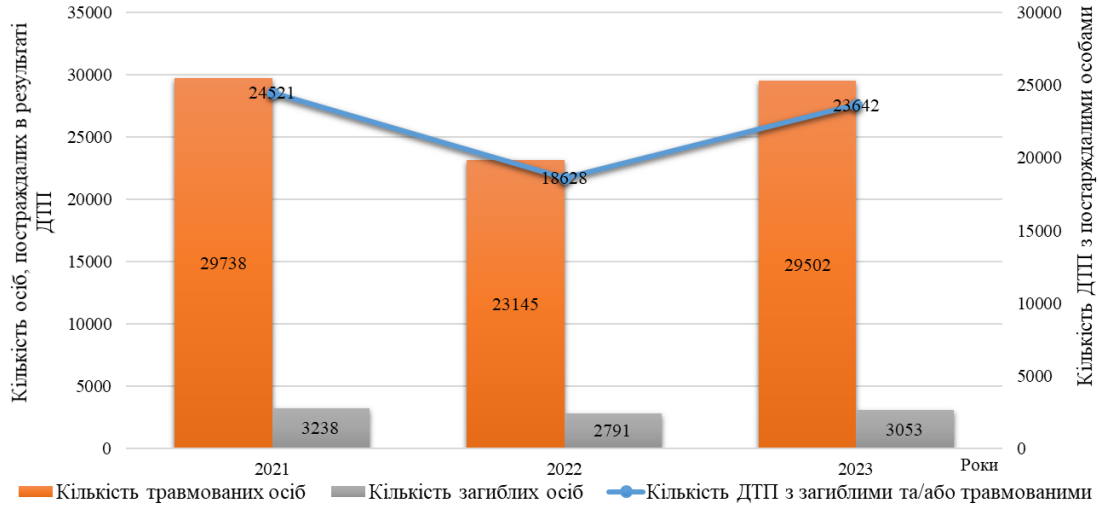


Рисунок 1 – Гістограма розподілу ДТП з постраждалими в Україні за період 2021-2023 р.р. (складено на основі даних [7,8])

Кількість ДТП за участю водіїв ліцензованого автомобільного транспорту (АТ) щорічно складає 2406 випадків, тобто 10,8% від загальної кількості ДТП з постраждалими, причому 6,1% випадків з вини водіїв цих транспортних засобів (див. рис. 2.).

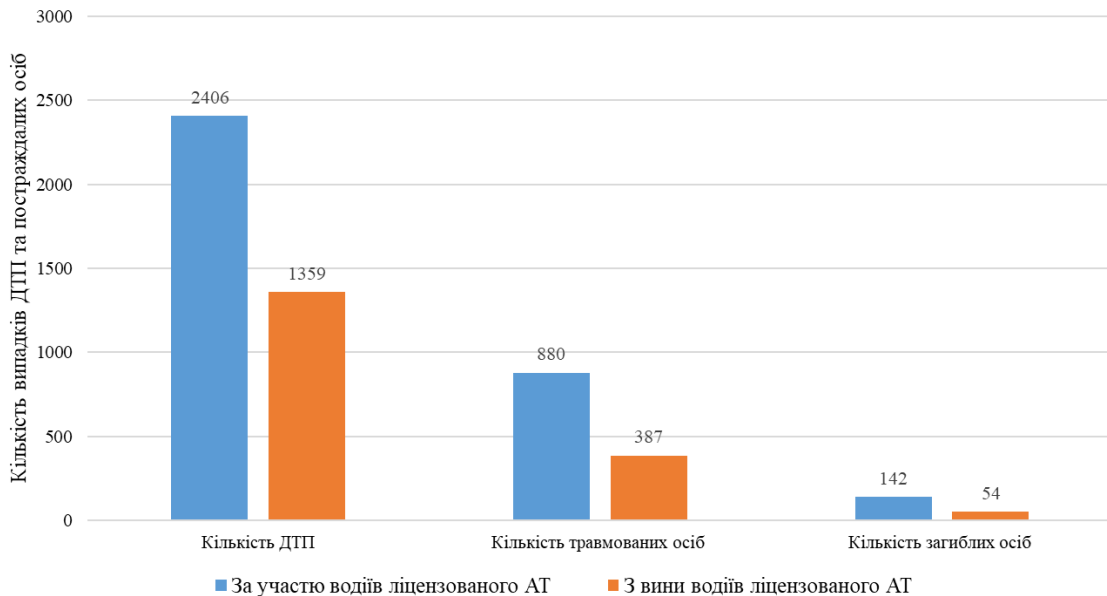


Рисунок 2 – Гістограма розподілу кількості ДТП з постраждалими за участю та з вини водіїв ліцензованого АТ в середньому за рік (складено на основі даних [9,10])

Кількість травмованих осіб в ДТП за участю водіїв ліцензованого АТ щорічно складає 880 осіб (3,2% від загальної кількості), з вини водіїв цих транспортних засобів – 387 осіб (1,4% від загальної кількості). Кількість загиблих в результаті настання ДТП за участю водіїв

## Транспортні технології

ліцензованого АТ складає - 142 особи (4,7% від загальної кількості), з вини водіїв ліцензованих транспортних засобів – 54 особи (1,8% від загальної кількості).

З вини водіїв автобусів, в середньому за рік стається 255 випадків ДТП, що призвели до отримання травм у 432 людини та смерті 17 осіб.

Досліджуючи види ДТП за період 2022-2023 р.р. (див. рис. 3.) встановлено, що зіткнення є основним видом на який припадає 40,6% всіх аварій; 27,9% - наїзд на пішохода; 12,8% - наїзд на перешкоду; 8,8% - перекидання транспортного засобу; 6,3% - наїзд на велосипедиста, і менше 4% - інші.

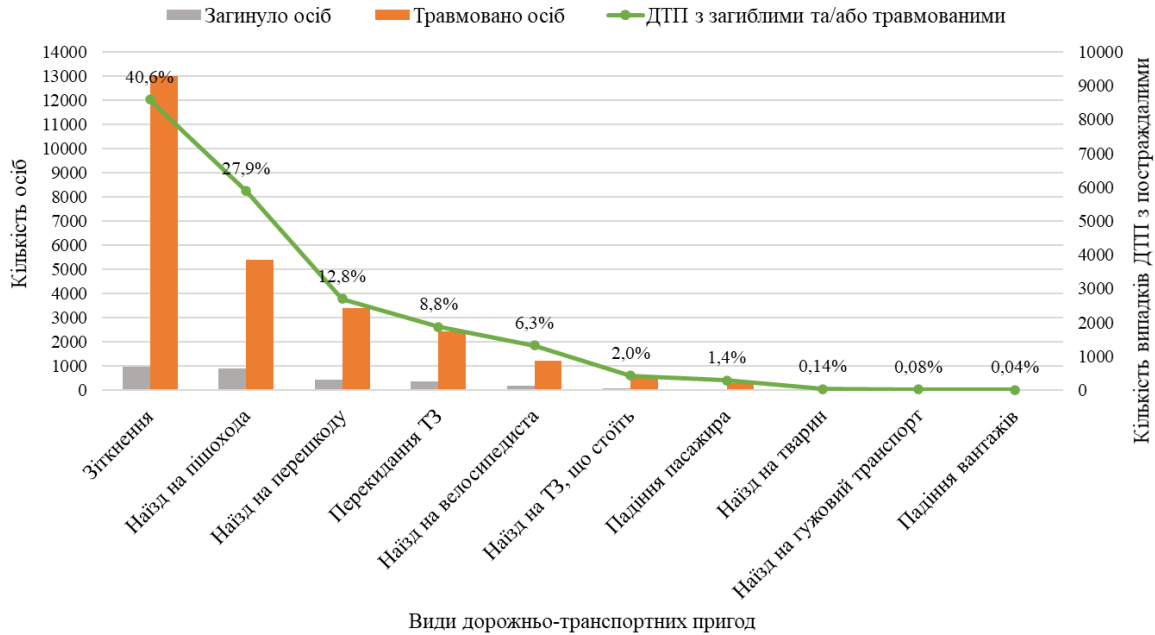


Рисунок 3 – Гістограма розподілу кількості ДТП за видами з постраждалими в середньому за рік (за період 2022 -2023 р.р.) в Україні (складено на основі даних [7, 8])

Основними видами ДТП, що призводять до великої кількості постраждалих є: зіткнення, наїзд на пішохода, наїзд на перешкоду, перекидання транспортного засобу, наїзд на велосипедиста (див. рис. 4).

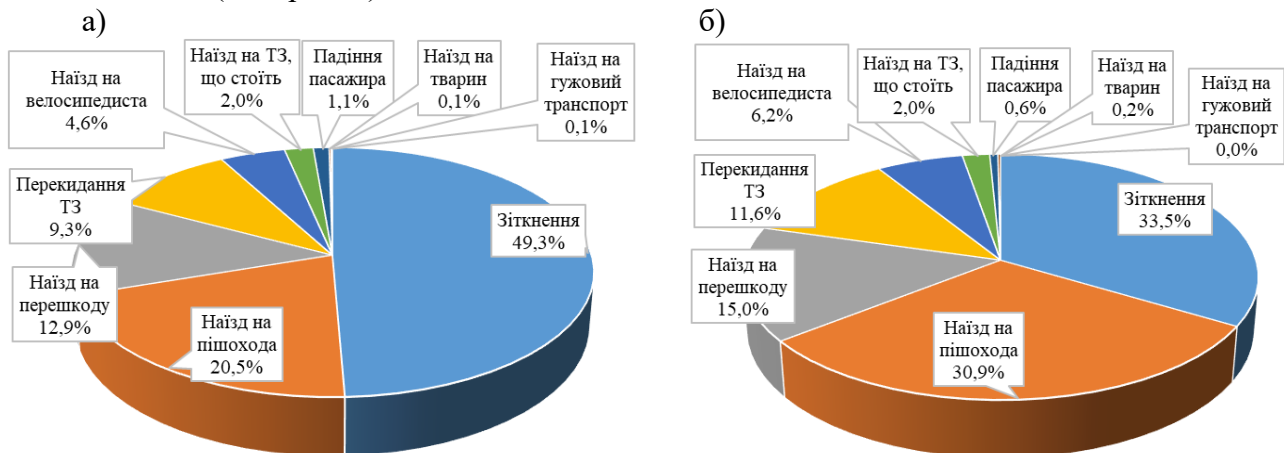


Рисунок 4 – Розподіл травмованих (а) та загиблих (б) осіб за видами ДТП в середньому за період 2022-2023 р.р. (складено на основі даних [7, 8])

## Транспортні технології

Кількість ДТП також залежить від часу доби та днів тижня. З рис. 5. можна побачити, що кількість ДТП з постраждалими стається майже однаково впродовж тижня, невелике збільшення спостерігається у п'ятницю та суботу.

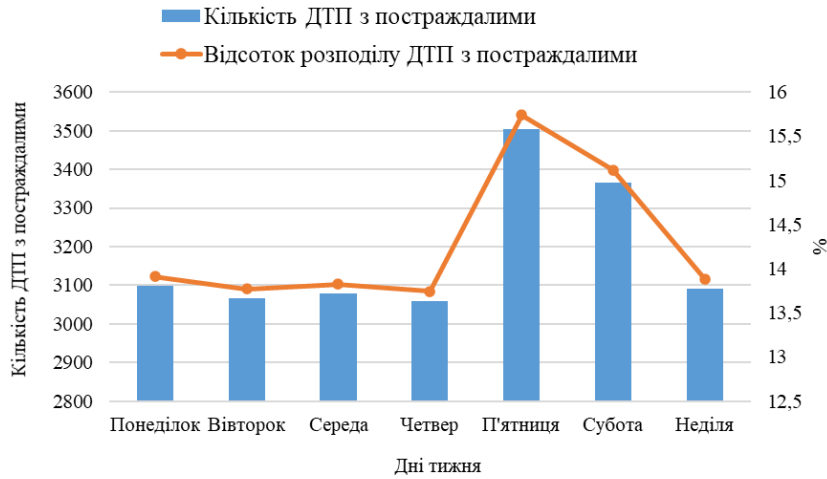


Рисунок 5 – Розподіл кількості ДТП з постраждалими в середньому за період 2021-2023 р.р. в залежності від днів тижня (складено на основі даних [7, 8])

Пік випадків ДТП припадає на час з 16:00 до 20:00 години. Найбільша кількість ДТП стається о 17:00, найменша о 4:00 (див. рис. 6.).

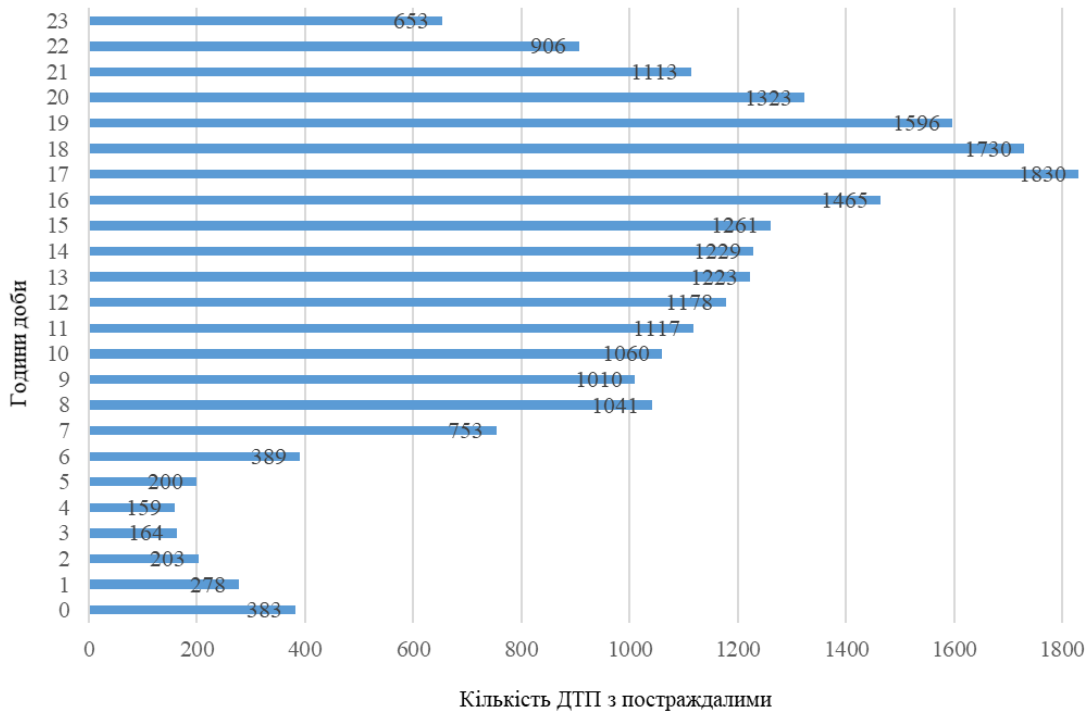


Рисунок 6 – Розподіл кількості ДТП з постраждалими в середньому за період 2021-2023 р.р. в залежності від години доби (складено на основі даних [7, 8])



## Транспортні технології

Аналіз причин виникнення ДТП з постраждалими (див. рис.7.) показав, що основними з них є:

- перевищення безпечної швидкості – 39,7% всіх ДТП (травмовані – 39,9%; загиблі – 52,7%);
- порушення правил маневрування – 21,4% (травмовані – 21,5%; загиблі – 14,0%);
- порушення правил проїзду перехресть – 8,2% (травмовані – 9,5%; загиблі – 2,1%);
- порушення правил проїзду пішохідних переходів – 7,3% (травмовані – 5,9%; загиблі – 3,7%);
- недотримання безпечної дистанції – 4,7% (травмовані – 4,8%; загиблі – 2,6%);
- керування транспортним засобом у стані сп’яніння – 4,1 % (травмовані – 4,3%; загиблі – 3,2%);
- перехід пішоходів у невстановленому місці – 3,3 % (травмовані – 2,1%; загиблі – 5,5%);
- перевищення встановленої швидкості – 2,6 % (травмовані – 2,7%; загиблі – 4,7%);
- виїзд на смугу зустрічного руху – 2,1 % (травмовані – 2,9%; загиблі – 5,0%) ;
- інші – 6,6 % (травмовані – 6,5%; загиблі – 6,6%).

Гістограма розподілу кількості ДТП, травмованих та загиблих осіб відповідно до причин, що їх призвели в середньому за період 2022-2023 р.р. в Україні наведено на рис. 7.

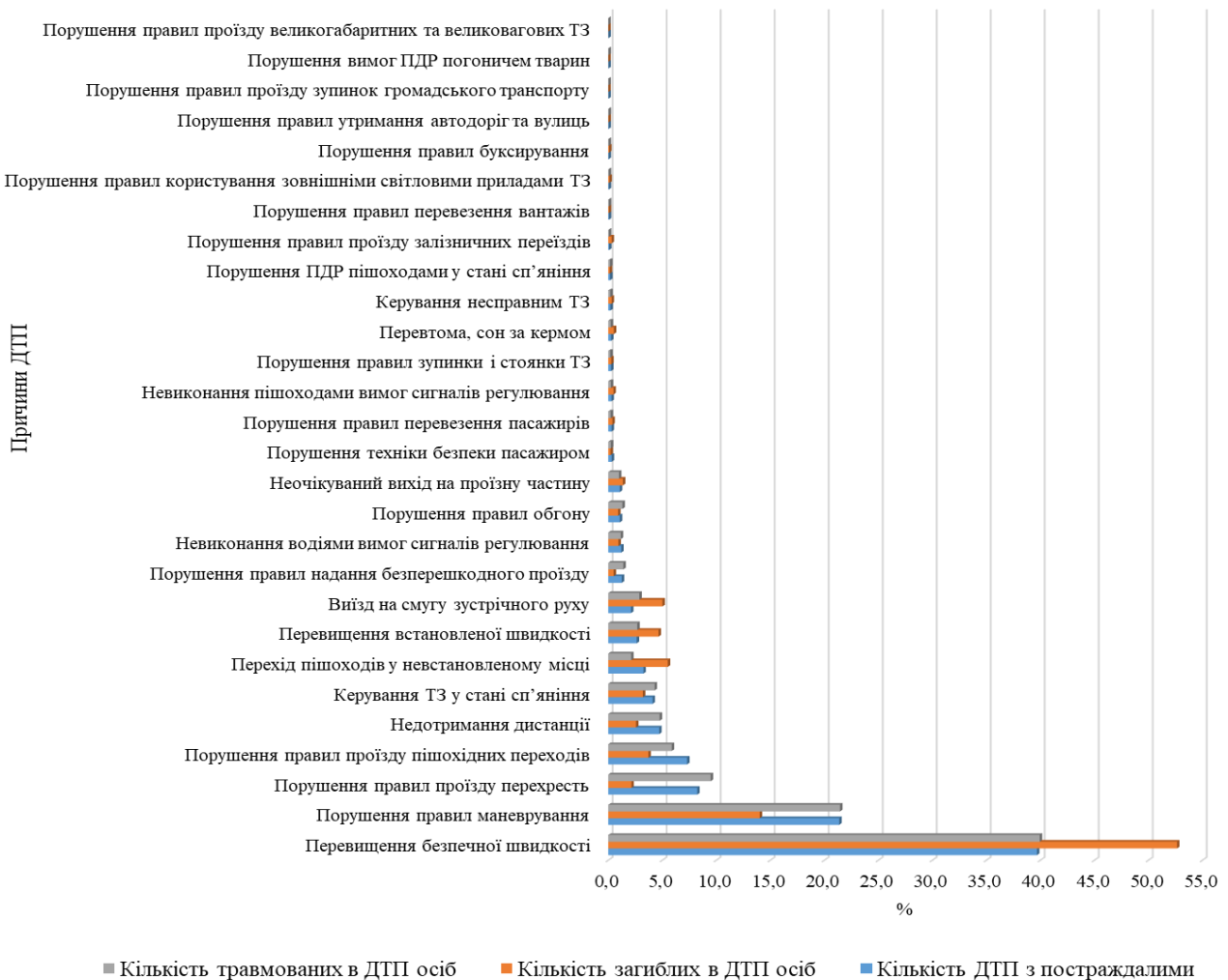


Рисунок 7 – Гістограма розподілу кількості ДТП, травмованих та загиблих осіб відповідно до причин, що їх призвели в середньому за період 2022-2023 р.р. в Україні (складено на основі даних [7, 8])

## Транспортні технології

За територіальною ознакою 78,3% ДТП з постраждалими відбуваються у населених пунктах. Окремо можна виділити столицю держави, де щорічно відбувається 1834 випадки ДТП з постраждалими, що складає 8,2% від всіх випадків по країні.

За результатами проведеного аналізу складемо таблицю викликів, що існують для транспортної галузі у питанні його безаварійної роботи та безпеки перевезень та розглянемо можливості їх подолання (див. табл. 2).

Таблиця 2 - Виклики щодо безпеки автотранспорту та можливості їх подолання

Виклики	Короткий опис	Можливості
Велика кількість ДТП з постраждалими, в тому числі дітей (до 18 років)	Середньорічна кількість ДТП з постраждалими в Україні складає близько 22264 випадків. В результаті яких щорічно травмується – 27462 осіб, кількість загиблих – 3027 осіб.	Оновлення інфраструктури; впровадження інновації для транспорту, пов'язаних з застосуванням засобів безпеки, автоматизації та контролю за процесами керування ТЗ та мінімізації наслідків ДТП, як для пасажирів так і для пішоходів; посилення привабливості певних видів транспорту; удосконалення велосипедної та пішохідної інфраструктури; посилення відповідальності водіїв за порушення правил ПДР; посилення просвітницької роботи серед населення, особливо дітей, щодо Правил дорожнього руху для пішоходів
	Середньорічна кількість ДТП в яких постраждали діти (до 18 років) складає 3427 випадків (15,4%). В результаті яких щорічно травмується – 3892 дітей (14,2%), кількість загиблих дітей – 163 особи (5,4%).	
Великий показник кількості ДТП з постраждалими з вини водіїв ліцензованого АТ	Кількість ДТП за участю водіїв ліцензованого автомобільного транспорту щорічно складає 10,8% від загальної кількості, причому 6,1% випадків з вини водіїв цих ТЗ	Стимулювання перевізників щодо оновлення транспортного парку та його оснащення системами безпеки, допомоги водію при русі, системами контролю за поведінкою водія; посилення контролю за роботою водіїв ліцензованого автомобільного транспорту; посилення контролю за видачою ліцензій на право проведення діяльності з перевезення пасажирів та вантажів; використання інтелектуальних систем планування оптимальних маршрутів доставки вантажів з урахуванням дорожньої обстановки; реформування мережі міського громадського транспорту; планування оптимальних маршрутів доставки вантажів з урахуванням дорожньої обстановки; сформування мережі міського громадського транспорту
Зіткнення є основним видом ДТП з постраждалими	40,6% всіх ДТП з постраждалими відбувається в результаті зіткнення	Розширення мережі автоматизованих інтелектуальних систем за контролем дорожнього руху; впровадження автоматизованих систем контролю та допомоги водію при русі; перехід до безпілотних ТЗ; посилення ступеня автоматизації існуючих ТЗ, задіяних у перевезеннях вантажів та пасажирів

## Транспортні технології

*Продовження табл. 2.*

<b>Виклики</b>	<b>Короткий опис</b>	<b>Можливості</b>
Зіткнення та наїзд на пішохода є основними видами ДТП, що характеризуються високою смертністю та травмуванням людей	Відсоток смертності в результаті зіткнення складає 33,5%, при наїзді на пішохода – 30,9% всіх випадків ДТП з постраждалими. Відсоток травмованих в результаті зіткнення складає 49,3%, при наїзді на пішохода – 20,5% всіх випадків ДТП з постраждалими	Впровадження на ТЗ безпеки направлених на мінімізацію наслідків ДТП, як для пасажирів так і для пішоходів; посилення відповідальності водіїв за порушення правил ПДР; посилення просвітницької роботи серед населення, особливо дітей, щодо Правил дорожнього руху для пішоходів; удосконалення транспортної інфраструктури задля безпеки пішоходів, людей з обмеженими можливостями, дітей
П'ятниця – характеризується найбільшою кількістю ДТП з постраждалими	15,7% ДТП з постраждалими стається у п'ятницю	Зменшення кількості заторів на дорогах, особливо в дні тижня, які характеризуються великим потоком ТЗ; впровадження автоматизованих систем регулювання дорожнім трафіком особливо у великих містах; зменшення кількості ТЗ у місті у години пік; введення системи оплати за в'їзд до центру міста, або частин проїзної частини з низькою пропускнуною спроможністю; стимулювання переходу громадян від індивідуального транспорту до громадського; переформатування всієї системи міського громадського транспорту; впровадження систем контролю за поведінкою водія на ТЗ
Найбільш аварійними годинами доби є період часу з 16:00 до 20:00 години	Найбільша кількість ДТП з постраждалими стається о 17:00 – 1830 випадків, найменша о 4:00 – 159 випадків (за досліджуваний період)	
Основною причиною виникнення ДТП з постраждалими є перевищення безпечної швидкості	Перевищення безпечної швидкості призводить до 39,7% всіх ДТП, в результаті якого травмуються – 39,9% осіб від усіх травмованих; загиблі – 52,7% осіб від усіх загиблих в ДТП з постраждалими)	Широке оснащення дорожньої інфраструктури системами контролю за швидкістю руху ТЗ; впровадження автоматизованих систем контролю та допомоги водію при русі; перехід до безпілотних ТЗ; посилення ступеня автоматизації існуючих ТЗ, задіяних у перевезеннях вантажів та пасажирів, посилення відповідальності водіїв за перевищення швидкості
Населені пункти характеризуються найбільшою кількістю ДТП з постраждалими	78,3% ДТП з постраждалими відбуваються у населених пунктах. У столиці щорічно фіксується 8,2% всіх випадків ДТП з постраждалими в цілому по країні.	Розвантаження міських транспортних шляхів у години пік, особливо з великою кількістю населення; впровадження систем оплати за користування автошляхами у місті, за днями тижня, годинами доби; стимулювання переходу власників ТЗ від індивідуального транспорту до громадського; впровадження автоматизованих систем для контролю та регулювання трафіку; перехід до альтернативних ТЗ для пересування в межах міста

### ВИСНОВКИ

В результаті проведеного аналізу зрозуміло, що сучасний стан безпеки автомобільного транспорту в Україні є незадовільним, характеризується високим ступенем травматизму та потребує пошуку нових можливостей та інструментів для його покращення. Транспортна галузь повинна працювати над проблемою підвищення безпеки та якості транспортних послуг, доведення відповідності їх до європейських стандартів, зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та підвищення соціальної відповідальності.

#### Список використаних джерел

1. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Схвалена постановою КМУ України від 30 травня 2018 р. № 430-р. Електронний ресурс: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> (дата звернення 03.11.2024 р.)
2. Мельниченко О.І. Аналіз стану забезпечення безпеки на автомобільному транспорті/ О.І. Мельниченко, Ю.М. Магомаєв // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К.:НТУ, 2017. – Вип. 1 (37). С. 275-281.
3. Осипов В.О. Підвищення ефективності управління процесами у сфері безпеки руху за ознаками додаткових критеріїв /В.О. Осипов// Просторовий розвиток: Науковий збірник / Головн. ред. О. Ковальчук. – К., КНУБА, 2023. – Вип.6. С. 203-213. DOI: 10.32347/2786-7269.2023.6.203-213
4. Абрамова Л.С. Аналіз методів проведення камеральних та польових досліджень аудиту безпеки дорожнього руху/ Л.С. Абрамова, І.С. Наглюк, О.С. Левченко, // Вестник ХНАДУ, вып. 75, 2016. С. 182-189.
5. Придатко О.В. Застосування методів регресійного аналізу для прогнозування аварійності на регульованих перехрестях міста Львів / О. В. Придатко, І. В. Паснак, М. В. Гречка // Науковий вісник НЛТУ України: Зб.наук.-тех. праць. Львів: РВВ НЛТУУ, 2015. – №25.9. – С.239-246.
6. Руденко Д.В. Оцінка впливу дорожніх умов на аварійність із застосуванням багатофакторної моделі /Д.В. Руденко, А.А. Ренкас, В.І. Товарянський// Вісник ЛДУБЖД, №24, 2021. С. 33-39. DOI: 10.32447/20784643.24.2021.04
7. Статистика ДТП в Україні за 2022 рік. Електронний ресурс: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (дата звернення 10.11.2024 р.)
8. Статистика ДТП в Україні за 2023 рік. Електронний ресурс: <https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/> (дата звернення 10.11.2024 р.)
9. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2022 рік Електронний ресурс: [https://old.dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka\\_DTP/2023/analiz\\_avariynosti\\_2022\\_1.pdf](https://old.dsbt.gov.ua/sites/default/files/imce/Bezpeka_DTP/2023/analiz_avariynosti_2022_1.pdf) (дата звернення 10.11.2024 р.)
10. Аналіз стану безпеки руху та аварійності на наземному транспорті в Україні за 2023 рік Електронний ресурс: [https://dsbt.gov.ua/images/public\\_information/analiz\\_stanu\\_avariynosti\\_na\\_nazemnomu\\_transporti.pdf](https://dsbt.gov.ua/images/public_information/analiz_stanu_avariynosti_na_nazemnomu_transporti.pdf) (дата звернення 10.11.2024 р.)

**Karashchuk V. O., Hladchenko M.A., Romanovskaa S.V., Kletska O.V., Dzhus O.V.**

## **ANALYSIS OF ACCIDENTS IN ROAD TRANSPORT WITH THE PURPOSE OF SEARCHING FOR POSSIBILITIES TO IMPROVE ITS SAFETY**

*The paper analyzes accidents in road transport in order to find ways to improve its safety. The study analyzed the number of accidents with casualties in Ukraine for the period 2021-2023. The analysis determined the average annual number of accidents with casualties, the number of injured and fatalities. The rates of child injuries as a result of road accidents were determined. The analysis showed that 6.1% of all accidents occur annually due to the fault of drivers of licensed vehicles. The distribution of road accidents by type showed that collisions are the main type of accidents characterized by high mortality and injury to people. The work also examined accident cases by days of the week and hours of the day. In the process of analyzing the prerequisites for the occurrence of accidents with casualties, it was found that most of such cases are the result of exceeding the safe speed. According to the territorial feature, 78% of accidents occur in populated areas. Based on the results of the analysis, it is clear that the current state of road transport safety in Ukraine is unsatisfactory, characterized by a high level of injuries and requires searching for new opportunities and tools to improve it. The authors of the work identified the challenges that exist for the transport industry in terms of its accident-free operation and transportation safety and proposed ways to overcome them.*

**Keywords:** *transport safety, road traffic accidents, accident rate, injured, fatal, motor transport.*

*Стаття надійшла 11.12.2024 р.*

Монін В. Л., Хлестова О. А., Бурко В. А., Єлістратова Н. Ю.

## ПРИЧИНИ ТА НАСЛІДКИ РІЗЬКИХ АТИПОВИХ КОЛИВАНЬ РІВНЯ ВОДИ В ТАГАНРОЗЬКІЙ ЗАТОЦІ АЗОВСЬКОГО МОРЯ

*У статті наведено дослідження впливу різних факторів на явище атипових коливань рівня води на Азовському морі, аналіз причин виникнення таких хвиль, їх вплив на прибережні зони. На підставі даних мореграфів, метеостанцій, даних аеро - та фото фіксажу представлено аналіз події 19 липня 2017 року, коли в Білосарайській затоці спостерігалось аномальне відходження води, що можна кваліфікувати як явище атипових коливань рівня води.*

*Проведено аналіз геологічної будови дна Азовського моря щодо виявлення природи явища атипових коливань рівня морської води на досліджуваній ділянці. Визначено складність прогнозування явища атипових коливань рівня води через їхню локальність та залежність від багатьох факторів, відсутність чіткої уяви їх походження. Однак, використання сучасних технологій, таких як мореграфи та супутникові знімки, дозволяє підвищити точність прогнозів та оцінити екологічні ризики від явища атипових коливань рівня води.*

**Ключові слова:** *явище атипових коливань рівня води, згінно-нагінні явища, мореграф, фотофіксація, геологічні процеси.*

**Постановка проблеми.** В результаті різких змін атмосферного тиску і сильних вітрів може утворитися потужний потік атипових хвиль, що обрушуються на берег. При цьому виникають відносно невеликі, але потужні хвилі, які можуть спричинити значні руйнування в прибережних зонах. Виявляються такі небезпечні природні явища у результаті сильних вітрів. На відміну від великих хвиль, викликаних підводними землетрусами, атипові коливання рівня моря можуть бути спровоковані як місцевими течіями в результаті взаємодії припливних і вітрових течій, що посилюють хвилювання мас води, так і при зсуві великих мас ґрунту під водою, підводних зсувів, що викликають локальне хвилювання поширюється як атипові коливання рівня моря.

Основні відмінності атипових коливань рівня моря від звичайних хвиль полягають у тому, що досліджувані коливання мають значно більшу довжину хвилі, ніж звичайні хвилі, що дозволяє їм долати великі відстані. При цьому швидкість розповсюдження атипових коливань рівня моря може досягати десятків кілометрів на годину. Крім того, ці явища мало вивчені та їх поведінка не може бути достатньо передбачуваною через вплив різних факторів, на відміну від звичайних хвиль. Незважаючи на свої відносно невеликі розміри, атипові коливання рівня моря можуть завдати серйозної шкоди прибережним районам.

Вивчення та розуміння механізмів виникнення та поширення атипових коливань рівня води на Азовському морі дозволяє розробляти більш точні системи раннього попередження, ефективні заходи щодо захисту прибережних зон, такі як будівництво хвилерізів, зміцнення берегів та створення систем дренажу та, що важливо, оцінити ризики для населення та інфраструктури ймовірності виникнення атипових коливань рівня води у конкретних регіонах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В історії Азовського моря зафіксовано кілька випадків сильних нагонів води, які за своїми характеристиками можна зарахувати до атипових коливань рівня води. Особливо сильні нагони спостерігалися у 1969, 1978, 1985 та 2017 роках. Останнє природне явище 2017 року опинилося під пильним дослідженням вчених ДВНЗ «ПДТУ».

19 липня 2017 р., у період з 17-30 до 18-15, на березі Азовського моря в Білосарайській затоці спостерігалось рідкісне явище – сгон води та оголення дна на значну відстань. Час початку процесу визначити не вдалося, тому що відхід води був помічений лише при помітному падінні рівня моря о 17-38, досягнувши максимуму о 18-02. Надалі вода прибувала видимими потоками через осушені ділянки дна, досягнувши початкового рівня 18-15. Перший вал здався о 17-49, найбільшого розміру досягнув в 17-52.

**Мета дослідження.** Вивчення та розуміння механізмів виникнення та поширення атипових коливань рівня води на Азовському морі.

**Основний матеріал дослідження.** Треба сказати, що взагалі-то на Азовському морі звичайні місячно-сонячні припливи-відливи не спостерігаються (так зване безприливне море), зате часто бувають згінно-нагінні явища пов'язані з сильними вітрами або перепадами атмосферного тиску, які можуть зганяти або наганяти великі маси води, тимчасово суттєво змінюючи рівень моря. Згінно-нагінні явища досить докладно описані та вивчені. Особливо потужні такі явища спостерігаються в мілководній Таганрозькій затоці і на виході з неї (де і знаходиться Білосарайська коса та затока).

На Рис. 1 зафіксовано досить типовий вітровий згін у Білосарайській затоці в районі с. Юр'ївка при сильному східному вітрі, коли берегова лінія відійшла в середньому на 2-3 м. Буруни вдалині вказують на наявність підводних валів. Зрідка, раз на 20-30 років, у цьому районі трапляються екстремальні згінно-нагінні явища, коли берегова лінія може відходити на десятки або навіть сотні метрів (на мілководді), а рівень моря відчувати коливання більше метра, а в глибині Таганрозької затоки навіть кількох метрів. Але треба ще раз наголосити, що це явище (вітровий згін-нагін) охоплює дуже великі ділянки узбережжя.

У північній частині акваторії Азовського моря катастрофічні нагони води викликаються сильним вітром із півдня, південного заходу чи південного сходу, якщо вітер дме кілька днів поспіль. Відбувається підйом рівня моря на 1,5 - 2,5 м, затоплюються пляжі та низькі береги, руйнуються будови. Розмив берега за таких умов буває в масштабах, що перевищують величину середньорічного розмиву у кілька разів. Катастрофічні нагони води спостерігалися 12 - 15 липня 1969 р., 12 - 15 травня 1978 р. і 5 - 6 липня 1985 р. Найбільш значним був нагін води в 1978 р. Рівень моря в районі м. Маріуполь піднявся на 2 м, в районі м. Таганрог – на 2.5 м. Вимірювання в абразійних створах показали, що за чотири дні було розмито стільки ж матеріалу, скільки за попередні три роки разом узяті.

5 - 6 липня 1985 р. на Білосарайській косі, сила шторму досягала 7 - 8 балів, рівень моря піднявся на 1,6 м. Вода затопила більшу частину коси, присадибні ділянки, пансіонати. Відпочиваючі з багатьох пансіонатів були терміново евакуйовані. Розмив південно-східного берега коси за дві доби повсюдно досяг 1,5 - 2,5 м. У трьох місцях південно-східний піднесений край коси був розмитий і вода бурхливими потоками прямувала на основну низовину коси, покривши її шаром 0,3 - 0,5 м.

Подібні різкі згінно-нагінні коливання рівня раніше були зафіксовані Азовською науково-дослідною станцією (АНДС) у Білосарайській затоці (31.08.97р.). При проходженні атмосферного фронту протягом півгодини значення рівня збільшилися на 60 см, а потім протягом наступної години знизилися на 110 см. У момент згінно-нагінних коливань рівня, швидкості течії досягали, за нашими спостереженнями, досить високих значень (3,5 м/с). При цьому оголилися вершини підводних валів. Коливання рівня моря спостерігалось і в інших місцях узбережжя, наприклад, у м. Маріуполі, що відповідає екстремальному, але типовому згінно-нагінному явищу.

Особливість екстремального явища 19 липня 2017 р. в тому, що воно відбувалося тільки в Білосарайській затоці і не відзначалося ні в м. Маріуполь, ні в м. Бердянськ. Причому, за свідченням співробітників Ялтинської рятувальної станції (яка знаходиться в глибині затоки – найвужчої її частини), коливання рівня моря досягло 1,5 метрів.

## Екологічна безпека

На рисунку 1- е та рисунку 2, де наведено профіль підводного схилу, чітко проглядаються п'ять основних підводних валів.



а)



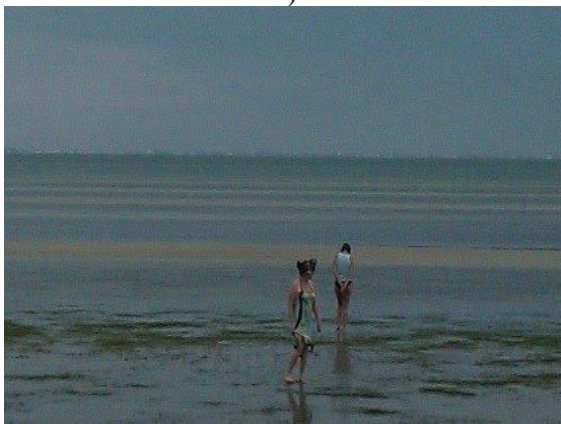
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1 – Спостереження ділянки від станції АНДС “ПДТУ”: а - під час звичайного вітрового згону; б) - під час розвитку нетипичного згону води; в) - дослідження дна затоки, при нетипичному згону води; в) - перший підводний вал з пляжу, що проглядається при вітровому згоні (вигляд у бік Білосарайської коси); г) - підводні вали, що проглядаються з висоти корінного берега незалежно від згону-нагону; д) під час явища з берега у бік Білосарайської коси проглядалися всі п'ять підводних валів; е) початок оголення першого підводного валу.



## Екологічна безпека

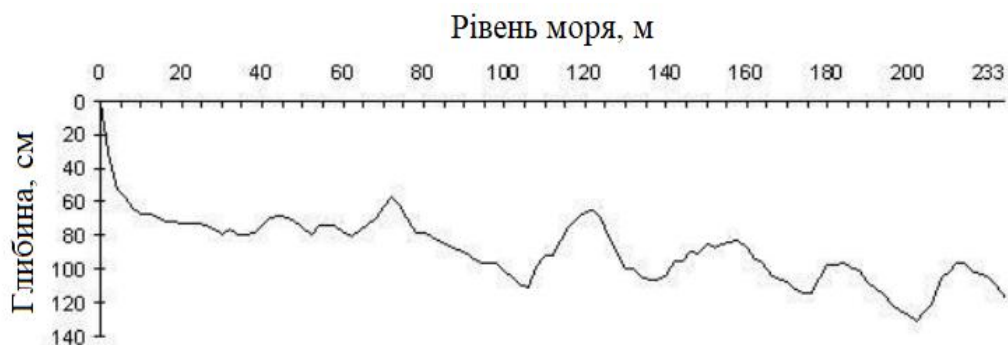


Рисунок 2 – Усереднений профіль підводного схилу на ділянці Азовської науково-дослідної станції (АНДС)

При аерофотозйомці підводні вали спостерігаються за будь-якої погоди незалежно від згінно-нагінних явищ.

Потім море повернулося до своїх берегів з характерним гуркотом бурунів на мілинах – все це відбувалося протягом 30-40 хвилин за свідченням очевидців.



Рисунок 3 – Аерофотозйомка ділянки узбережжя, що спостерігається в Білосарайській затоці

Ще раз наголосимо, особливість екстремального явища 19 липня 2017 р. у тому, що воно відбувалося лише у Білосарайській затоці та не відзначалося ні в м. Маріуполь (свідчення маріупольської гідрометеостанції), ні у м. Бердянськ (свідчення співробітників місцевої рятувальної станції).

Це дозволяє стверджувати, що це явище не відноситься до типових згінно-нагінних процесів Азовського моря, а швидше має тектонічне походження.

Геологічна будова дна та тектонічне походження Азовського моря відіграють важливу роль в утворенні та поширенні атипових коливань рівня морської води. Оскільки Азовське море є відносно мілководним і має складну геологічну історію, ці фактори значно впливають на його гідродинаміку та реакцію на зовнішні впливи. Рельєф дна може створювати умови для резонансу хвиль, що може збільшувати їхню амплітуду в певних точках. Підводні банки і пагорби можуть фокусувати хвильову енергію, збільшуючи її вплив на берегову лінію. Взаємодія хвиль з різними елементами рельєфу дна може спонукає до виникнення вторинних хвиль, які можуть бути більш руйнівними, ніж первинні, а рельєф дна може змінювати напрямок руху хвиль, що може викликати несподіване затоплення певних ділянок узбережжя. Так геоморфологічний аналіз берега і підводного берегового схилу дослідної ділянки

показує, що на заході місцевості у напрямку штучно створеного мису пляж звужується і в місці зчленування мису з берегом вклинюється. Штучний виступ берега має відносну висоту 2,5 – 3 м і є відсипанням, укріпленим з морського боку бетонними плитами та начерком гранітних брил в основі. Максимальна кількість брил зосереджена в прикореневій частині берегового виступу, там, де хвильове навантаження на берег при пануючому східному вітрі буде найбільшим. Поверхня морської акумулятивної тераси, складеної піщаними відкладеннями, зайнята сосновими посадками. Ширина її коливається від 150 до 200 м. Поверхня нерівна і має сліди еолової переробки. Ще ближче до моря смуга закріплених дюн змінюється субгоризонтальною поверхнею шириною 40-50 м, складеною світло-сірими дрібнозернистими пісками, місцями заросла трав'янистою рослинністю. Так як поверхня тераси постійно піддається антропогенній переробці в рельєфі, її неявно простежуються 2–3 стародавніх берегових валів. У східній частині експериментальної ділянки тераса обривається у морі уступом сучасного розмиву. Висота його не стала і коливається від 0,8 до 1,1 м. Розглянута ділянка розташовується на узбережжі Білосарайської затоки між селищами Ялта на сході та Юрїївка на заході. Безпосередньо в районі дослідження створу висота берегового уступу досягає 20-25 м. Зсувні процеси, характерні для стрімких берегів північного берега Азовського моря, на даній ділянці не виявляються. Дві стародавні зсувні тераси, добре виражені в рельєфі, задерновані і густо поросли чагарником та окремими деревами. Нижче зсувних терас розташовується слабо нахилена поверхня у бік моря. На рисунку 4, наведено карти дослідної ділянки, що вказують на особливості геологічної будови дна та тектонічного походження Азовського моря.



Рисунок 4 – Картографічні дані досліджуваної ділянки: а) Азовського моря; б) Білосарайської затоки; в) Середземноморського басейну

Геологічна будова дна Азовського моря та прилеглої суші визначається насамперед наявністю двох великих структурних елементів (Рис.5). У північній частині розглянутої площі розташована окраїнова зона Російської платформи (Східно-Європейська платформа СЕП) з допалеозойською складчастою основою. Кордон між Російською та Передкавказькою епігерцинською платформами проходить північним берегом Азовського моря від Сивашів до Таганрозької затоки, огинає Єйський півострів і простежується у напрямку Сальська.

У межах окраїнної частини СЕП біля Азовського моря, як структурний елемент першого порядку виділяється південний схил Українського щита. Він входить у межі моря лише у його крайній північній частині. У структурному відношенні цей елемент є, монокліналь, що занурюється в південному напрямку. Глибина занурення докембрійського фундаменту досягає 1000-1200 м. Схили щита ускладнені значними амплітудою (до сотень метрів) диз'юнктивними порушеннями субширотного і субмеридіонального напрямів.



Рисунок 5 - Глибинні розломи Азовського моря.

Важлива тектонічна одиниця регіону, що розглядається, — Скіфська плита-СП (або Скіфська епіорогена зона, яка в межах України включає Передпідруджинський прогин, північно-західний шельф моря, Кримський півострів, обмежений на південному сході Кримськими горами, і більшість Азовського моря. На півночі СП межує з СЕП, відбувається субдукція СЕП під СП у південному напрямку та їх колізії. На південь від СП глибоководна частина Чорного моря складається з двох суббасейнів із тонкою високошвидкісною субокеанічною корою та глибиною до кордону Мохо (М) 20-30 км.

Азовське, також як і Чорне, відноситься до Середземноморського басейну, в якому в період, що спостерігається, відбувалися значні тектонічні явища (землетруси в Туреччині та Греції). Субмеридіональний глибинний активний розлом уздовж Білосарайської коси, що проходить через все море до Керченської протоки і далі колінеарний подіям на Азовському морі в Білосарайській затоці і є відлунням раннього (15 липня) та попереднього руйнівного землетрусу в Егейському морі в ніч на 21 липня [1,2] Згідно з повідомленням сейсмологів, в результаті землетрусу утворилося невелике цунамі в Егейському морі. Внаслідок землетрусу є постраждалі.

Згідно з повідомленням Геологічної служби США 15 липня о 20:30 за Грінвічем на острові Крит, Греція, стався землетрус. Таким чином, між 15 та 21 липнем у Середземномор'ї сталася серія сильних землетрусів.

Найближчі землетруси 19 липня 2017 р. за часом та місцем (повний список) [3,4].

<http://zempl.info/online/>

#	Час	МАГНІТУДА	МІСТО	ГЛИБИНА	ШИРОТА	ДОВГОТА
1547	18:21:22 UTC	2.5ML 2.5	WESTERN TURKEY	5 км	38.69	27.61
1548	18:11:20 UTC	2.2ML 2.2	WESTERN TURKEY	3 км	38.92	26.33
1554	16:53:24 UTC	3.8ML 3.8	WESTERN IRAN	10 км	31.54	49.69
1557	15:29:37 UTC	2.1ML 2.1	SOUTHERN GREECE	11 км	37.88	23.16
1558	15:17:58 UTC	2.9ML 2.9	EASTERN TURKEY	10 км	37.54	38.50
1559	15:16:12 UTC	2.9ML 2.9	WESTERN TURKEY	2 км	38.78	27.81
1561	14:51:46 UTC	2.ML 2.7	ROMANIA	118 км	45.35	26.39
1564	14:00:22 UTC	2.3ML 2.3	GREECE	13 км	39.25	21.03
1570	13:19:29 UTC	3.6ML 3.6	CAUCASUS REGION	10 км	43.57	44.43
1571	12:47:24 UTC	2.5ML 2.5	CRETE, GREECE	1 км	34.81	25.35
1573	12:42:41 UTC	2.9ML 2.9	WESTERN TURKEY	10 км	38.83	27.79

Для виявлення та дослідження таких явищ, як припливи, відпливи, шторми та, зокрема, атипові коливання рівня морської води використовується мореограф (або мареограф), який

## Екологічна безпека

безперервно фіксує зміни тиску, які виникають при коливаннях рівня води в морі та записує їх. Сучасні мореографи часто оснащені датчиками, які вимірюють не тільки висоту хвилі, але й температуру води, солоність та інші параметри [5]. Мореограф дозволяє зафіксувати навіть незначні, але аномальні коливання рівня води. Дані, зібрані мережею мореографів, використовуються для створення баз даних, які дозволяють проводити статистичний аналіз і розробляти моделі прогнозування атипових коливань.

Данні маріографа на станції в порту м. Маріуполя зафіксували короткочасне коливання рівня моря (Рис. 6), нетипове для звичайних вітрових процесів (Рис. 7, 8).

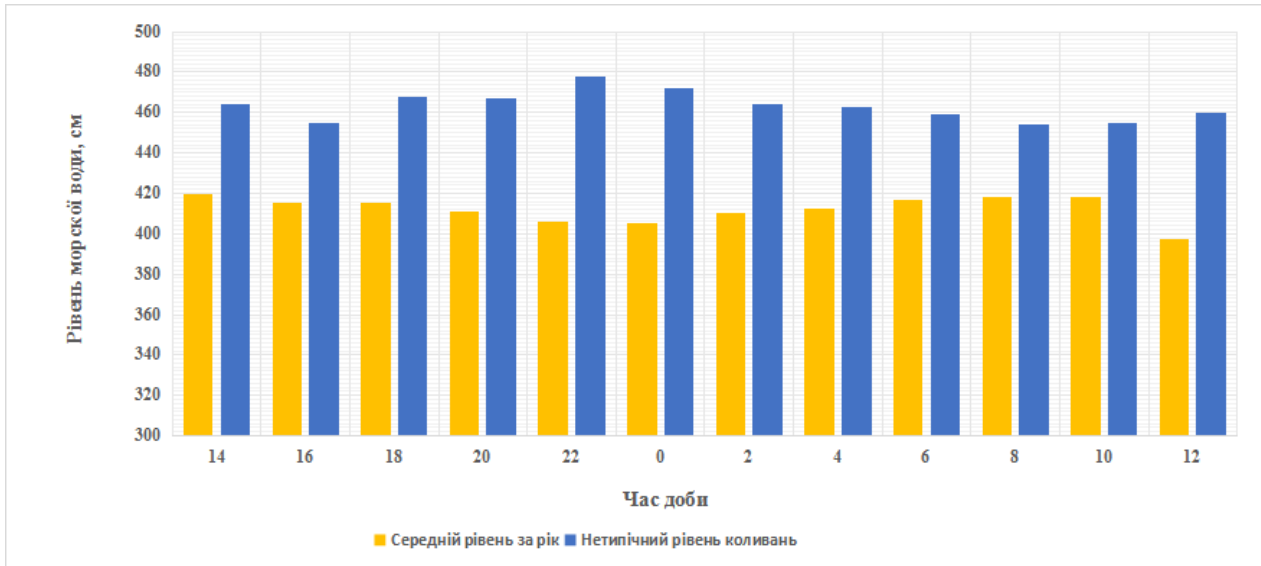


Рисунок 6 – Покази маріографа на станції у порту м. Маріуполя 19 липня 2017р.

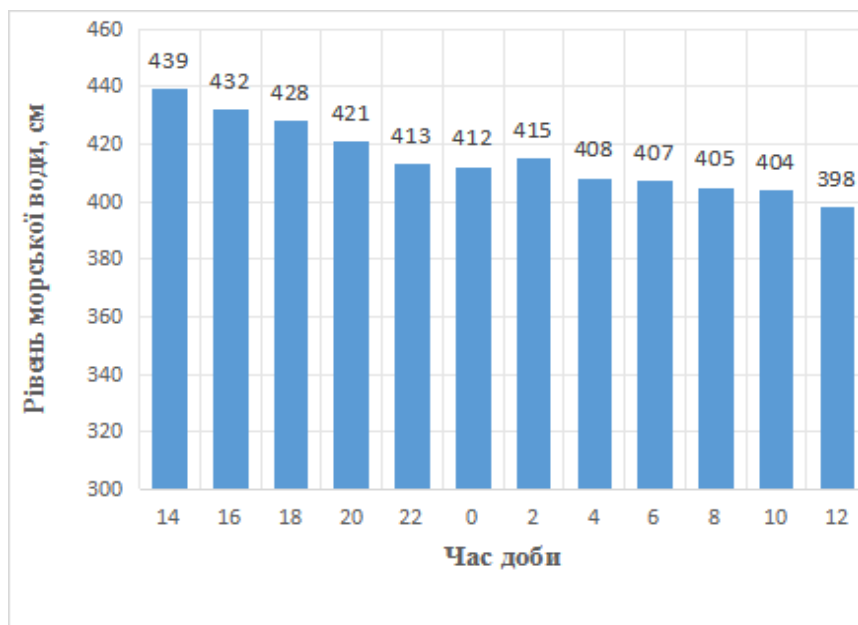


Рисунок 7 – Показання маріографа на станції порту м. Маріуполя при типово вітровому згоні.

Екологічна безпека

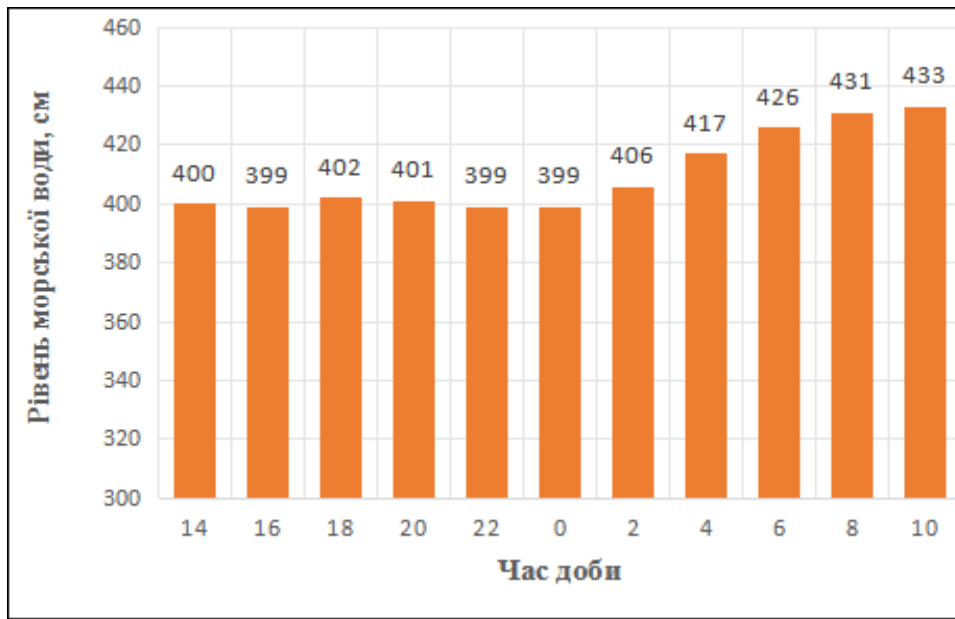


Рисунок 8 – Показання маріографа на станції порту м. Маріуполя при типово вітровому нагоні.

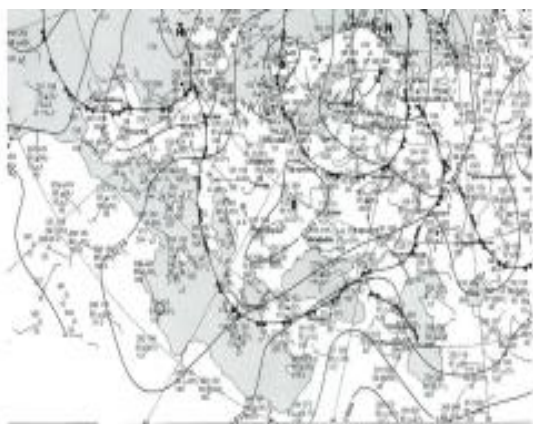
Метеодані та синоптичні дані відіграють ключову роль у дослідженні атипових коливань рівня морської води. Вони допомагають виявити причинно-наслідкові зв'язки між атмосферними процесами та утворенням небезпечних явищ, а також прогнозувати їх появу. Для цього визначаються умови, що сприяють утворенню атипових коливань рівня морської води, а саме: метеодані дозволяють виявити райони з сильними і постійними вітрами, які можуть викликати значні хвилювання на поверхні води. Метеорологічні супутники та радари дозволяють відстежувати розвиток штормів і ураганів, які часто супроводжуються утворенням атипових коливань рівня морської води. Досліджене природне явище супроводжувалося метеоумовами що наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Метеорологічні умови (19 липня 2017 р. Донецька область)

Параметр	Значення параметру
Вітер північної чверті (ПЗ-ПС), м/с	до 11,0
Температура повітря, °С	max 29,6; min 19,2 сер. 24,4;
Температура води по часах, °С	06 <sup>00</sup> - 23,44 ; 12 <sup>00</sup> -24,6 ; 18 <sup>00</sup> - 23,5 ; (середня 23,5 )
Солоність, ‰	11,82
Щільність, г/см <sup>3</sup>	1,0050

Аналіз синоптичних карт допомагає ідентифікувати атмосферні фронти, які можуть спричинити різкі зміни атмосферного тиску та, як наслідок, утворення атипових коливань рівня морської води. Для цього використовуються синоптичні карти атмосферного тиску, ізобари, фронти, ізотерми, дані про хмарність, що впливає на теплообмін між атмосферою і

океаном, та дані про опади, що можуть змінювати щільність води і впливати на утворення атипових коливань (Рис. 10).



а) Синоптична карта 19.07.2017 на 00<sup>00</sup>



б) Синоптична карта 19.07.2017 на 12<sup>00</sup>

Рисунок 10 – Синоптичні карти 19.07.2017

Таким чином, встановлені фактори впливу на утворення атипових коливань рівня морської води показують, що прогнозування атипових коливань - це завдання, яке значно складніше, ніж прогнозування великих хвиль, тому що атипові коливання мають відносно невелику висоту хвилі, що ускладнює їх виявлення та точний вимір. Крім того виникнення атипових коливань часто пов'язане з локальними геологічними особливостями та метеорологічними умовами, що робить їхню поведінку менш передбачуваною. А існуючі глобальні системи спостереження, для атипових коливань морської поверхні розвинені набагато слабше. Однак, незважаючи на складності можливо прогнозування атипових коливань за допомогою комп'ютерних моделей, що симулюють їх виникнення та розповсюдження, враховуючи різні фактори, такі як рельєф дна, форма берегової лінії та метеорологічні умови з використанням аналізу сейсмічних даних та супутникових даних. Прогнозування атипових коливань морської поверхні є складним завданням, що потребує подальших досліджень та розвитку технологій. Однак, існуючі методи дозволяють підвищити точність прогнозів та знизити ризик, пов'язаний із цими природними явищами.

## ВИСНОВКИ

1. Дослідження закономірностей виникнення атипових коливань рівня моря та факторів, що впливають на їх утворення може бути використано для зниження наслідків атипових коливань рівня моря таких як: затоплення особливо вразливих низовинних ділянок узбережжя, загибелі людей та плавзасобів навіть на мілководді, порушення донної екосистеми.

2. Визначення екологічних ризиків як результату дії атипових коливань рівня моря, може бути використано при будівництві в небезпечних зонах й навіть сприяти забороні на будівництво в зонах, схильних до максимального ризику коливань.

3. Однозначно встановити, які з перелічених факторів, що впливають на атипових коливання рівня моря на даний час встановити неможливо. Це потребує подальших науково-експериментальних досліджень.

*Список використаних джерел*

1. П. В. Анахов. Збудження землетрусів у літосфері азово-чорноморського басейну сейшовим деформації дна/Геодинаміка 1(20)/2016 [https://www.researchgate.net/publication/321248321\\_GEODYNAMICS](https://www.researchgate.net/publication/321248321_GEODYNAMICS)
2. Matishov G. G., Inzhebeikin Y. I. Numerical Study of Azov Sea Level Seiche Oscillations. *Oceanology*, 2009, Vol. 49, iss. 4, pp. 445–452. doi: 10.1134/S0001437009040018.
3. Konikov E. Fluctuations of the Black Sea level in Neoeuxine-Holocene versus catastrophic flood hypothesis / E. Konikov, S. Fashevsky, G. Pedan // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2009. – № 3. – С. 55–69.
4. Gupta H. K. Artificial Water Reservoir Triggered Earthquakes / *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics*. Editor: Gupta H. K. – Springer, 2011. – P. 15–24.
5. King, M. A., Padman, L., Nicholls, K., Clarke, P. J., & Gudmundsson, G. H. "Ocean tides in the Weddell Sea: New observations on the Filchner-Ronne and Larsen C ice shelves" \Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011 \DOI: 10.1029/2011JC006949.

**Monin V.L., Khlietova O.A., Burko V.A., Yelistratova N.Yu.**

## **CAUSES AND CONSEQUENCES OF SHARP ATYPICAL WATER LEVEL FLUCTUATIONS IN THE TAGANROZ BAY OF THE SEA OF AZOV**

*The influence of various factors on the phenomenon of atypical water level fluctuations in the Sea of Azov, the analysis of the causes of such waves, and their impact on coastal zones are investigated. An analysis of the event on July 19, 2017, when anomalous discharge of water was observed in the Bilosaray Bay, which can be qualified as a phenomenon of atypical fluctuations in the water level, was conducted on the basis of data from tide gauges, weather stations, data from aerial and photo capture.*

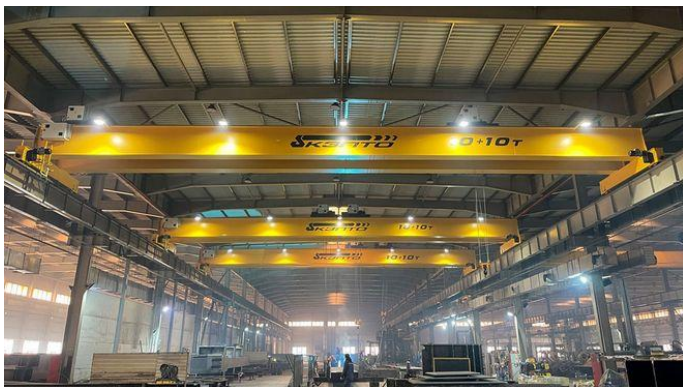
*An analysis of the geological structure of the bottom of the Sea of Azov was carried out in order to identify the nature of the phenomenon of atypical fluctuations of the sea water level in the studied area. The difficulty of forecasting the phenomenon of atypical fluctuations of the water level due to their locality and dependence on many factors, the lack of a clear idea of their origin was determined. However, the use of modern technologies, such as sea charts and satellite images, makes it possible to increase the accuracy of forecasts and assess environmental risks from the phenomenon of atypical water level fluctuations.*

**Keywords:** *Phenomenon of atypical water level fluctuations, contraction-expansion phenomena, marigraph, photographic fixation, geological processes.*

*Стаття надійшла 24.10.2024 р.*

## Новини України та світу

### КИЇВСЬКИЙ ЗАВОД ПТО УСПІШНО ВИГОТОВИВ ТРИ СУЧАСНІ МОСТОВІ КРАНИ ДЛЯ ЛІДЕРА З ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ



Київ, листопад 2024 року – Київський завод ПТО (КЗПТО), провідний український виробник вантажопідйомного обладнання, нещодавно завершив виготовлення трьох спеціальних мостових кранів для одного з найбільших українських виробників важких металоконструкцій.

Завданням КЗПТО було розробити та виготовити крани, які могли б безпечно та ефективно переміщати та кантувати (провертати) великогабаритні металеві конструкції. Кожен кран обладнаний двома вантажними візками 10+10т, що в тандем-режимі сумарно забезпечують вантажопідйомність 40 тон.

Після детального аналізу потреб замовника КЗПТО запропонував наступні рішення:

Три електричні двобалкові мостові крани вантажопідйомністю 10+10т кожен.

Сучасна система управління крановою технікою на базі комплектуючих Schneider Electric.

Можливість керування двома візками одночасно або окремо, з опцією тандем-режиму, що забезпечує синхронне переміщення на двох кранах.

Автоматична функція кантування переміщуваних вантажів, яка забезпечує плавне перевертання конструкцій навколо горизонтальної осі.

Функція мікрошвидкості для точного позиціонування вантажу, що значно підвищує точність переміщення та запобігає ударним навантаженням, збільшуючи термін служби кранового обладнання.

Переваги нового кранового обладнання:

Підвищення продуктивності та ефективності виробничих процесів.

Покращення безпеки праці.

Оптимізація витрат на внутрішні логістичні процеси.

Підвищення конкурентоспроможності замовника на ринку.

Технічні характеристики кранів:

Маркування: КМ-10,0+10,0-22,5-10,0-А5

Вантажопідйомність: 10+10 т

Висота підйому: 10,0 м

Прогін крана: 22,5 м

Швидкість підйому-опускання: 0...1...4 м/хв.

Швидкість пересування візка: 0...5...20 м/хв.

Швидкість пересування крана: 0...10...40 м/хв.

Група режиму роботи: А5 (середній)

Виконання: загальнопромислове

Монтаж, навчання та вигідне відтермінування оплати

Після виготовлення нові крани було доставлено на місце експлуатації, де досвідчена монтажна бригада КЗПТО здійснила їх складання та пусконаладжувальні роботи. Завдяки попередньо розробленому проекту виконання робіт і досвіду спеціалістів монтаж трьох кранів було виконано в найкоротші терміни.



Після успішного завершення статичних та динамічних випробувань проведено навчання операторів замовника з безпечної експлуатації кранової техніки. Нові мостові крани КЗПТО значно спрощують складні технологічні операції та забезпечують безпечне виробництво великогабаритних металоконструкцій, оптимізуючи технологічну логістику замовника.

Крани були виготовлені та поставлені з відтермінуванням оплати. Замовники вже успішно користуються обладнанням, а платежі за нього розділені на 12 місяців.

<https://thepage.ua/ua/news/kiyivskij-zavod-ptovigotoviv-tri-suchasni-mostovi-krani-dlyazamovnika>

## **ПАДІННЯ ПО РУДІ, ЗБІЛЬШЕННЯ ПО ВУГІЛЛЮ: «МЕТІНВЕСТ» ОГОЛОСИВ РЕЗУЛЬТАТИ ЗА 9 МІСЯЦІВ 2024-ГО**

За 9 місяців 2024 року група «Метінвест» виробила 1610 тис. тонн сталі та 12 239 тис. тонн залізорудного концентрату, що більше ніж у 2023-му на 5% та 63% відповідно. Водночас вугільного концентрату виробили на 25% менше, ніж торік.

Скільки чавуну та сталі виробили підприємства «Метінвесту» у 2024 році

Як зазначила компанія, за 9 місяців цього року виробництво чавуну становило 1367 тис. тонн. Це на 2% більше аналогічного періоду минулого року.

Водночас у 3-му кварталі 2024 року виробництво чавуну та сталі на МК «Камет-Сталь» залишилось майже на рівні попереднього кварталу і склало 483 тис. тонн та 568 тис. тонн, відповідно.

Також за 2024 рік підприємства «Метінвесту» виробили 1610 тис. тонн сталі, що на 5% більше, ніж торік. Як пояснила компанія, це пов'язано зі збільшення портфеля замовлень на сталеву продукцію.

**Скільки плоского прокату виробили підприємства «Метінвесту» у 2024 році**

Як йдеться у звіті «Метінвесту», за 9 місяців поточного року виробництво готової продукції знизилось на 3% проти аналогічного періоду 2023 року і становило 1678 тис. тонн.

Зокрема, виробництво плоского прокату зменшилося на 14% – до 729 тис. тонн. За словами групи, це пов'язано з несприятливими умовами на європейському ринку, які призвели до відсутності маржинальних замовлень на гарячекатаний рулон та зменшення портфеля замовлень на гарячекатаний товстий лист.

Водночас виробництво оцинкованого холоднокатаного рулону збільшилося на 65%. Як пояснила компанія, обсяги виробництва збільшилися внаслідок відновлення роботи 4-го індуктора на «Юністіл» в Україні після його зупинки на капітальний ремонт у 2-му кварталі 2023 року.

Також у 2024 році підприємства «Метінвесту» виробили 949 тис. тонн довгого прокату, що на 8% більше, ніж торік. Зміни пов'язані зі збільшенням портфеля замовлень на продукцію «Каметсталі» та Promet Steel.

**Скільки вугільного та залізорудного концентрату виробили підприємства «Метінвесту» у 2024 році**

За 9 місяців 2024 року підприємства групи виробили 3220 тис. тонн вугільного концентрату. Це на 25% менше, ніж минулого року.

Як пояснила компанія, зменшення обсягів виробництва пов'язано з:

- оптимізацією робіт на Покровській вугільній групі, через що підприємства виробили 1860 тис. тонн вугільного концентрату (-23%),
- припиненням видобутку на шахтах Carter Roag та зменшенням видобутку на деяких шахтах Wellmore, що призвело до скорочення виробництва United Coal Company на 28%.

Разом з тим, за 9 місяців 2024-го «Метінвест» наростив виробництво залізрудного концентрату. За цей період підприємства виробили 2239 тис. тонн, що на 63% більше, ніж минулого року.

На це вплинуло розблокування українських чорноморських портів та збільшення портфеля замовлень на окатки.

Нагадаємо, у жовтні 2024 року пресслужба «Метінвесту» повідомила, що група за 9 місяців 2024 року збільшила сплату податків і зборів до бюджетів усіх рівнів в Україні на 38% проти аналогічного періоду у 2023-му. Це близько 15,2 млрд грн.

<https://thepage.ua/ua/news/metinvest-zbilshiv-obsyag-virobnictva-zalizadorudnogo-koncentratu-na-63percent-u-2024>

## 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 MicrosoftWord (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 рисунками 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, Донецька обл., м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», каф. «Будівництва, технічної експлуатації і реконструкції». Тел. (0629) 44-66-23; 44-66-73; 44-65-49. 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 08.12.2024 р.

Папір тип №2. Умов. друк. ар. 10,69. Тираж 400. Формат 60x84 1/8.  
Замовлення №110. Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу.

Ціна договірна.

Надруковано у видавничо-поліграфічному центрі ДВНЗ «ПДТУ»  
87500, Україна, Донецька обл., м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.

Свідоцтво внесення суб'єкта видавничої діяльності

ДК № 3729 від 15.03.2010 р.