

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 27**

**Дніпро**

**2024**

Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 27 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2024. – 107 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

**Блокоць 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

**Саснко 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 № 11 від 30.05.2024 р.). Видається 2 рази на рік.

© Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), 2024

## ЗМІСТ

<b>Іщенко А.О., Капустін С.В., Метляев І.О.</b> Комплексний підхід до підготовки дисків пил гарячого різання .....	6
<b>Черевко О.О., Щербаков С.В.</b> Комп'ютерна модель штучної нейронної мережі для автоматизованої системи контролю та діагностики технологічного процесу нагріву слябів у методичній печі .....	12
<b>Щербаков С. В., Черевко О. О.</b> Оптимізація роботи технологічного обладнання секцій вторинного охолодження МБЛЗ .....	18
<b>Лаврик В.П., Шишкін В.В., Суглобов В.В.</b> Монтаж головних балок мостових кранів за допомогою вакуумно-захватного пристрою .....	24
<b>Захарова І.В., Литвиненко Я.С., Сваявін В.І.</b> Застосування міжнародних стандартів при виконанні зварювальних робіт щодо виробництва контейнер-цистерни .....	31
<b>Івахненко Є.І., Воденнікова О.С., Парахневич Є.М., Воденніков С.А., Капустян О.Є.</b> Дослідження жаростійких сплавів в умовах високотемпературного абразивно-корозійного зношування .....	43
<b>Джуган О. А., Ольшанецький В. Ю., Капустян О.Є., Буліш С.О.</b> Можливість використання несферичних титанових порошоків для адитивних технологій .....	51
<b>Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Воленко І.В.</b> Процес аргондугового наплавлення засипних апаратів доменних печей на низькій погонній енергії .....	57
<b>Зусін А.М.</b> Вплив режимів термічної обробки на структуру та зносостійкість наплавленого металу розробленими порошковими дротами з азотом .....	67
<b>Остапенко А. О., Залевська Д. О.</b> Дослідження складних систем за допомогою імітаційного моделювання на основі системної динаміки .....	77
<b>П'ятикоп О. Є., Решетников А. О., Альошин С. В.</b> Підсистема контролю послідовності дій користувача для навчальної системи з віртуальною реальністю .....	85
<b>Азархов О. Ю., Яворський О. В., Сілі І. І., Єфременко Б. В.</b> Інтегрована система ультрафіолетової дезінфекції керована мікроконтролером .....	92
<b>Новини України та світу .....</b>	101
<b>Вимоги до публікацій .....</b>	105

## CONTENTS

<b>Ishchenko A.O., Kapustin S.V., Metlyaev I.A.</b> Complex approach to disc preparation for hot cutting saw.....	<b>6</b>
<b>Cherevko O., Shcherbakov S.</b> Computer model of an artificial neural network for the automated system for control and diagnostics of the technological process of slab heating in a method furnace.....	<b>12</b>
<b>S. Shcherbakov, O. Cherevko</b> Optimization of operation of technological equipment of secondary cooling sections of CCM	<b>18</b>
<b>Lavryk V.P., Shishkin V.V., Suglobov V.V.</b> Assembly of main beams of bridge cranes with the help of a vacuum suction device.....	<b>24</b>
<b>Zaharova I.V., Litvinenko Y.S., Svalyavin V.I.</b> The use of international standards in the welding process for the production of tank containers.....	<b>31</b>
<b>Ivakhnenko E.I., Vodennikova O.S., Parahnevich E.M., Vodennikov S.A., Kapustian O.Ye.</b> Research of heat-resistant alloys in conditions of high-temperature abrasive-corrosive wear.....	<b>43</b>
<b>Dzhugan O.A., Olshanetskiy V.E. , Kapustian O.Ye., Bulish S.O.</b> Possibility of using of non-spherical titanium powders for additive technologies.....	<b>51</b>
<b>Shetin S.V., Shetinina V.I., Volenko I.V.</b> Process of argon arc surfacing of blast furnace charging apparatus at low power consumption	<b>57</b>
<b>Zusin A.M.</b> Influence of heat treatment modes on the structure and wear resistance of welded metal by developed cored wires with nitrogen.....	<b>67</b>
<b>Ostapenko A. O., Zalevska D. O</b> Study of complex systems using simulation modeling based on system dynamics.....	<b>77</b>
<b>Piatykop O., Reshetnykov A., Alosyn S.</b> Subsystem of user action sequence control for educational system with virtual realit.....	<b>85</b>
<b>Azarkhov O. Yu., Yavorsky O.V., Sili I. I., Efremneko B. V.</b> Integrated ultraviolet disinfection system controlled by microcontroller.....	<b>92</b>
<b>News of Ukraine and the world</b> .....	<b>101</b>
<b>Requirements for publications</b> .....	<b>105</b>

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ПІДГОТОВКИ ДИСКІВ ПІЛ ГАРЯЧОГО РІЗАННЯ

*Розкрий заготовок на мірні довжини в технологічній лінії прокатного цеху є однією з важливих операцій процесу виробництва прокату. Якість торців прокату, що розрізається, безпосередньо залежить від стану ріжучого інструменту. Низька стійкість пильних дисків призводить до збільшення їх витрати на одну тонну готової продукції та підвищення простоїв прокатного обладнання за рахунок вимушених зупинок для заміни різального інструменту.*

*Процесу підготовки пильних дисків присвячена велика кількість робіт, зокрема виконувались неодноразові спроби створити обладнання для їх правки, яке дозволило би знизити торцеве биття диску і тим самим значно підвищити якість торців прокату, що розрізається. Тому створення у Приазовському державному технічному університеті (ПДТУ) конструкції такої правильної машини стало суттєвим етапом оптимізації технології підготовки дисків. Ще однією новою операцією, яка покращує характеристики дисків, є створення установки для зміцнення впадин зубів, яка дозволила зменшити вихід з ладу дисків за рахунок виключення тріщиноутворення у впадинах. Включення у комплекс технологічних операцій балансування дисків та закалювання зубів електроконтактним або індукційним способом завершує запропонований комплекс підготовки, що дозволяє наблизити існуючу технологію виготовлення дисків до кращих зарубіжних аналогів. Тому правильно обрана технологія та механізація підготовки пильних дисків може істотно підвищити стійкість ріжучого інструменту і вплинути на отримання якісної готової продукції.*

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

**Постановка проблеми.** Діскові пили гарячого різання прокату широко використовуються в прокатному виробництві, як при різанні суцільних профілів, так і при розкрій фасонних профілів. Однак їх використання поєднується з рядом проблем, зокрема з довговічністю ріжучого інструменту тобто пильних дисків.

Низька стійкість пильних дисків призводить до збільшення їх витрати на одну тонну готової продукції та підвищення простоїв прокатного обладнання за рахунок вимушених зупинок для заміни ріжучого інструменту. І тому підвищення якості підготовки дисків є актуальною задачею.

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

За останні роки в ПДТУ були розроблені конструкції машин, які дозволяють підвищити якість підготовки пильних дисків [1]. До них слід віднести машину для правки дисків, яка була виготовлена та впроваджена у практику підготовки пильних дисків [2], а також установку для зміцнення впадин зубів дисків, яка дозволила виключити передчасне утворення тріщин у впадинах зубів [3]. Ця установка також була виготовлена та пройшла промислові іспити у прокатному цеху МК «АЗОВСТАЛЬ». Паралельно з таким удосконаленням окремих етапів підготовки дисків в УкрНДІметс В.З. Аршавським, Л.І.Трішевським та іншими співробітниками була розроблена технологія закалювання зубів дисків.

Робилися спроби впровадження в технологію підготовки дисків операції шліфувки їх бокових поверхонь, як це робиться при виготовленні діскових пил холодного різання. Однак вони не отримали належного розвитку в силу ряду специфічних умов виготовлення дисків

## Машинобудування і зварювальне виробництво

безпосередньо на металургійних заводах. Хоча застосування дисків зі шліфованими боковими поверхнями могло б суттєво покращити як якість різання, так і стійкість пильних дисків, не дивлячись на їх значно вищу вартість.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка удосконаленої технології та механізації підготовки пильних дисків для підвищення продуктивності роботи пил гарячого різання та отримання більш якісної готової продукції.

**Основний матеріал дослідження.** В Приазовському державному технічному університеті розроблено вдосконалену технологію підготовки пиляльних дисків, суть якої полягає в модернізації застосовуваного обладнання та усуненні ручних операцій у технології підготовки дисків, що в кінцевому підсумку дозволяє підвищити продуктивність процесу та отримати різальний інструмент, що відповідає сучасним вимогам прокатного виробництва.

Удосконалена технологія виготовлення дисків пилок гарячого різання включає комплекс наступних операцій:

а) порізка ножицями листа на окремі карти, вирізка по зовнішньому діаметру і попередня розточування внутрішнього отвору під посадку на робочий вал (на карусельному верстаті) у кожному диску, остаточна розточування отвору пакета і наступне свердлювання кріпильних отворів по кондуктору, фрезерування зубів дисків на зубонарізному верстаті (у пакетах по 15-20 шт.), зачистка задирок на зубцях (напилком);

б) виправлення дисків;

в) зміцнення западин зубів методом поверхневого пластичного деформування;

г) балансування дисків;

д) зміцнення зубів за допомогою електроконтактного нагріву.

е) заточування (при повторному застосуванні диска).

В удосконаленій технології підготовки дисків, у порівнянні з існуючою, застосовуються більш досконалі верстати, механізовано процес виправлення дисків та введено додаткові операції зі зміцнення западин зубів.

Розглянемо детальніше обладнання, яке входить у склад ділянки підготовки дисків [2-4].

В удосконаленій технології підготовки дисків для виконання операції правки пил використовується правильна машина, яка була сконструйована та виготовлена співробітниками кафедри «Механічне обладнання заводів чорної металургії» (МОЗЧМ) ПДТУ. Нова машина має надійність, високу продуктивність (5-6 дисків на годину) і дає необхідну якість правки (неплощинність не більше 1 мм), дозволяє виправляти неплощинність і тарілчастість дисків [2].

Працює машина в напівавтоматичному режимі, не вимагає високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. Шум під час її роботи перебуває у межах норми. У результаті поліпшення якості правки потреба дисків у прокатних цехах знижується вдвічі (з 10 до 5 тис. штук на рік).

Правка диска здійснюється в наступній послідовності. Диск 1, що підлягає правці, встановлюється на дискоутримувач, виконаний у вигляді планшайби 2, при цьому його периферія вводиться між правильними роликками 3-7. На планшайбі диск вільно може переміщатися в осьовому напрямку і фіксується з одного боку буртом планшайби, а з іншого - швидкознімним кільцем. Машина готова до роботи. Потім включається привід обертання 8 роликків 4,6. Гідроциліндр 10 переміщає обойму з холостими роликками 3,5,7 і притискає



## Машинобудування і зварювальне виробництво

полотно диска 1 до приводних роликів 4,6, потім включається гідроциліндр 11 поздовжньої подачі. Диск 1 подається між роликками і при підході планшайби 2 до роликів 3-7 зупиняється і реверсується подача.

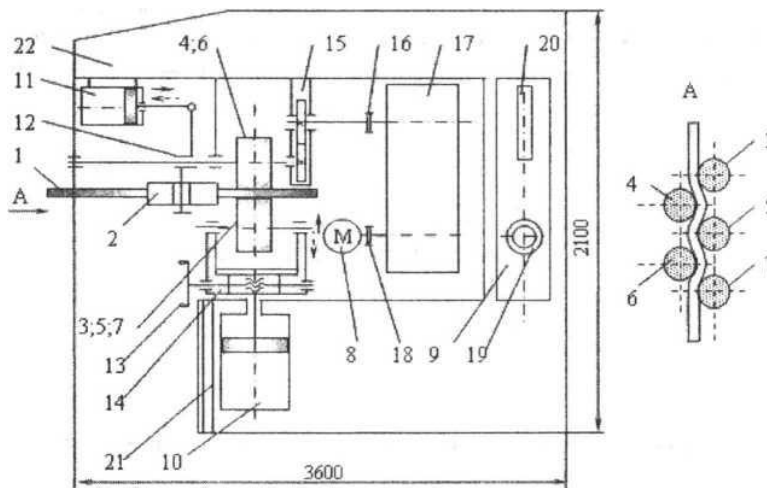


Рисунок 1 – Кінематична схема машини для виправлення пиляльних дисків:

1-пильний диск; 2-дискотримач (планшайба); 3,5,7 – невідводні роликки; 4,6 – відводні роликки; 8-електродвигун приводин роликків; 9-гидростанція; 10-гидроцилиндр затискача роликків; 11-гидроцилиндр подачі диска; 12- каретка дискоутримувача; 13-гвинтовий механізм налаштування; 14-клин; 15-шестеренна кліть; 16-зубчаста муфта; 17-редуктор цилиндричний; 18-муфта зубчаста; 19-ел.двигун гидронасоса; 20-гидропанель управління; 21-пульта управління; 22-станина

При зворотному ході швидкість подачі диска зменшується регулятором швидкості пропорційно пройденому шляху, а прогин диска між роликками зменшується рівномірно, починаючи з середини диска. При поверненні у вихідне положення, привід подачі диска стає, включається швидко відведення обійми з холостими роликками і потім привід обертання диска відключається. З планшайби знімаються швидкознімне кільце та виправлений диск. Час виправлення в залежності від діаметра диска та підготовчих операцій на зняття та встановлення диска становить 8-12 хвилин. При редагуванні в автоматичному режимі відбуваються такі процеси: при подачі диска вперед виправляються місцеві дефекти та його площинність. Диск набуває форми правильного усіченого конуса. При зворотній подачі диск виправляється і стає плоским. При дотриманні всіх технологічних вимог неплоскостність диска після виправлення не перевищує 0,5 мм на діаметрі 1 м.

Наступна операція - зміцнення западин зубів пильних дисків виконувалася за допомогою спеціально розробленої машини, виготовленої співробітниками кафедри МОЗЧМ ПДТУ та випробувана у промислових умовах [3]. Вона складається (рис. 2) із змонтованих на підставі 1 опори 2 з напрямними 3, на яких встановлена каретка 4 з планшайбою 5. Каретка 4 може переміщатися вздовж напрямних 3 для забезпечення зусилля притискання зубчастого пильного диска 6 до пальців 7 цівкового колеса 8 за допомогою передачі гвинт - гайка 9 вручну за допомогою рукоятки 10.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

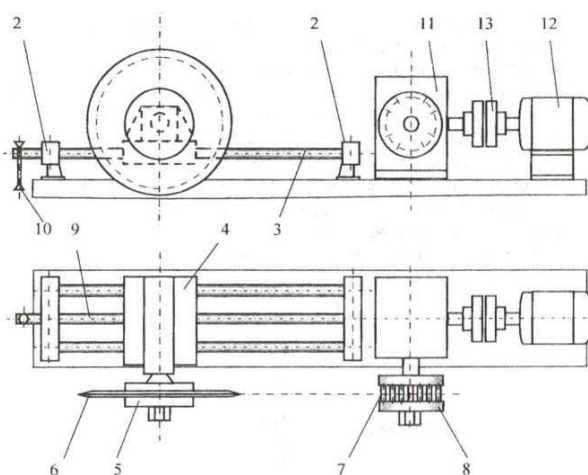


Рисунок 2 – Машина для зміцнення западин зубів пильних дисків

Передача гвинт-гайка передає рух через пружний елемент (поліуретан) чи пружину. Зусилля притискання контролюється пристроєм у вигляді лінійки та покажчика (на рис. 2 не показано). Розподіли на лінійці протаровані в тоннах. На підставі 1 встановлений редуктор I, електродвигун 12, за допомогою якого цевкого колеса 8 отримує обертальний рух. Крутний момент від двигуна 12 до редуктора 11 передається за допомогою муфти 13. Пристрій для зміцнення пильних дисків працює наступним чином. Зубчастий пильний диск 6 встановлюють на планшайбу 5, підводять до пальців цівкового колеса 8, з заданим зусиллям притискають западину зубчастого диска до пальця 7 цівкового колеса 8. Потім, за допомогою електродвигуна 12, муфти 13 і редуктора 11, приводиться у обертання. Диски, що мають торцеве биття  $\pm 2,5$  мм, що відповідає ручній правці, цілком задовільно витримують процес зміцнення не викликаючи надмірних навантажень у конструкції.

Балансування дисків здійснюється на установці, схема якої зображена на рис.3

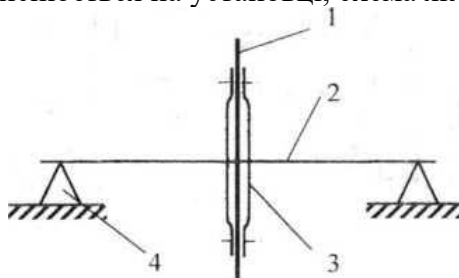


Рисунок 3 – Схема установки для балансування дисків: 1 – диск; 2 – вал; 3 – планшайба; 4 - призма

Диск, закріплений на осі та затиснутий планшайбами, встановлюється на дві призми (ножі). Потім поворотом диска від руки визначають дисбаланс і намічають місце накладання вантажу. Після цього в наміченому місці свердлять отвори під заклепки, які утримують додатковий вантаж на ріжучому диску. Балансування диска, безпосередньо закріпленого на робочому валу, показало кращі результати, тому що при цьому усувався небаланс не тільки на самому диску, але і на всьому робочому валу. Загартування зубів істотно підвищує стійкість дисків і покращує якість різки. Застосовувана на більшості заводів установка для електроконтактного гарту дозволяє піддати термообробці вершини зубів методом електроконтактного науглерожування графітовим електродом до твердості 55-60 HRC на глибину 2-3 мм (рис. 4).

## Машинобудування і зварювальне виробництво

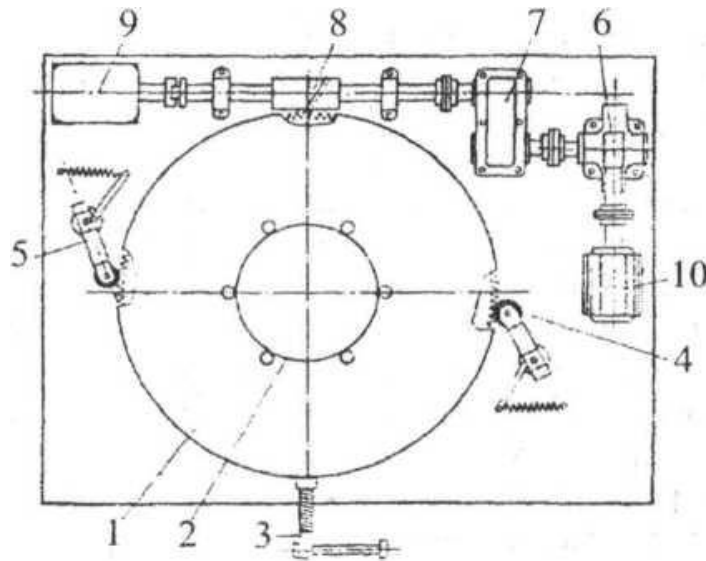


Рисунок 4 – Установа для електроконтактного загартування зубів пильних дисків

Аналіз робіт, присвячених питанням підвищення стійкості пильних дисків методом загартування [4] дозволив з'ясувати, що електроконтактне науглерожування найбільше ефективно для пильних дисків зі сталі 50 при розкрій дрібносортих профілів. Необхідність, що з'явилася останнім часом, у різанні суцільних заготовок великих розмірів призводить до розуміння зубів внаслідок їх перегріву і, відповідно, до відпустки загартованої вершини. Щоб збільшити зносостійкість зубів, у цьому випадку необхідно загартувати і вершину і бічну поверхню зуба, що неможливо виконати на існуючій машині. Запропонована замість колишнього верстата, установа для електроконтактного загартування зубів металургійних пилок, виготовлена УкрНДІметом (м. Харків) (рис. 4), дозволяє загартувати одночасно бічні поверхні та вершини зубів шляхом електроконтактного нагрівання та швидкого охолодження нагрітої зони за рахунок відведення тепла у тіло диска. Струмопідведення радіальне призначене для термообробки вершин зубів диска. Роликові електроди притискаються до зубів пили з таким розрахунком, щоб виключити іскріння між електродами та зубами диска. Попереднє підведення роликів проводиться вручну. Струм електрода проводиться від трансформатора, розміщеного на рамі установки. Струмопідвід бічний призначений для термообробки поверхні зуба диска, він розташований у верхній частині рами і складається з пневмоциліндра, двох важелів, стрижневих електродів. Матеріал загартованих електродів: радіальних – графіт, бічних – чавун. Установа за 1 хвилину обробляє 12 зубів. Встановлена потужність, споживана установкою 12 кВт. Заточення зношених дисків дає можливість використовувати їх повторно, що значно економить листовий метал, а також скорочує трудові витрати за рахунок виключення операцій з виготовлення диска. Для цього застосовується заточувальний верстат, який за допомогою качального руху шліфувального кола за один оберт диска дозволяє сформувати зуби. Висота зубів диска, що надходить на заточування, не буває однаковою. Практично ця нерівномірність зберігається і після заточування. Така нерівномірність при зміцненні зубів диска електроконтактним нагріванням призводить до порушення контакту між електродом та зубом, вершина якого при цьому оплавляється. Дане явище пояснює у певній мірі причину нижчої стійкості заточених дисків у порівнянні з новими. Щоб до певної міри усунути нерівномірність у висоті зубів диска, до нього після заточування підводиться заточний круг до зіткнення з вершиною нормального зуба, потім проворотом диска від руки зрізають вершини зубів, що найбільш виступають. Це практично покращує якість гарту зубів дисків за допомогою електроконтактного нагріву.

## ВИСНОВКИ

Запропонована технологія підготовки пильних дисків дозволяє не тільки істотно скоротити витрату дисків, але й докорінно покращує якісні показники процесу різання. Крім того, вона дозволяє знизити до мінімуму величину задирок на торці прокату і виключити викривлення прокату при різанні.

*Список використаних джерел:*

1. *Ищенко А. О., Лоза Є. А.* Пили гарячого різання прокату. Конструкції та розрахунок: Монографія // ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2012. – 251 с.
2. А.с. №1329010, СРСР. Спосіб виправлення пильного диска, *В.О. Корчагін* та ін - не публікується, 1987.
3. Патент 18029 А Україна, МКІЗ В23D 45/00. Пристрій для зміцнення зубчастих дисків / *А.О. Ищенко, В.О. Корчагін, О. А. Бережна*, 1997. .
- 4.. Підвищення ресурсу експлуатації дисків пилок гарячого різання металу шляхом термічної обробки / *О.В. Узлов, Г.В. Дрожжевська, О.В. Пучиков, О.А. Шпак, Ю.С. Слупська* // Металознавство та термічна обробка металів, № 1 (88), 2020, С. 70-80.

**Ishchenko A.O., Kapustin S.V., Metlyayev I.A.**

## **COMPLEX APPROACH TO DISC PREPARATION FOR HOT CUTTING SAW**

*The cutting of blanks into measured lengths in the technological line of the rolling shop is one of the important operations of the rolled steel production process. The quality of the ends of the rolled steel being cut directly depends on the state of the cutting tool. The low stability of saw blades leads to an increase in their consumption per ton of finished products and an increase in rolling equipment downtime due to forced stops to replace the cutting tool.*

*A large number of works have been devoted to the process of preparing saw blades, and repeated attempts have been made to create equipment for their straightening, which would allow the end beating of the blade and thereby significantly improve the quality of the ends of the rolled steel being cut. Therefore, the creation of the design of such a correct machine at the Technical University became an essential stage in the optimization of the disk preparation technology. Another new operation that improves the characteristics of the discs is the creation of a device for strengthening the tooth cavities, which has made it possible to reduce the failure of the discs due to the formation of cracks in the cavities. Inclusion in the complex of technological operations of disc balancing and teeth hardening by electrocontact or induction method completes the proposed training complex, which allows bringing the existing disc manufacturing technology closer to the best foreign analogues.*

*Therefore, the correctly chosen technology and mechanization of the preparation of saw blades can significantly increase the stability of the cutting tool and affect the production of high-quality finished products.*

**Key words:** cut, cutting, quality, reliability, productivity, graded rolled metal, saws, defects.

*Стаття надійшла 10.02.2024 р.*

## КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТИКИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ НАГРІВУ СЛЯБІВ У МЕТОДИЧНІЙ ПЕЧІ

*Для технологічного процесу прокатки металу в листопрокатних цехах актуальним є завдання підвищення якості нагріву заготовок у методичних печах. Контроль та оптимальне управління режимами нагріву металу дозволить істотно знизити втрати металу з окалиною та покращити процес прокатки.*

*Порівняльний аналіз існуючих систем контролю технологічних процесів, побудованих з використанням «традиційних» математичних моделей та методів штучного інтелекту, виявив переваги останніх, такі як наочність реалізації принципів послідовного прийняття рішень, висока достовірність розпізнавання, наявність алгоритмів навчання, що не вимагають зберігання великих обсягів інформації, відсутність необхідності перенавчання системи.*

*Запропоновано застосування штучних нейронних мереж для побудови системи контролю та діагностики процесу нагріву слябів у технологічних зонах методичної печі. У завдання створюваної системи входить стеження за вхідними параметрами, що характеризують перебіг технологічного процесу нагріву слябів та видача рекомендацій щодо коригування цього процесу.*

*Спроектвана нейронна мережа є одношаровою з прямою передачею сигналу та складається з чотирьох перцептронів, кожен з яких відповідає певній технологічній зоні печі. Навчання мережі відбувається за дельта-правилом. Алгоритм навчання та роботи мережі реалізований у математичному пакеті Matlab. Нейронна мережа діагностує відхилення технологічних параметрів від нормального режиму, що може призвести до перегріву слябів та їх пошкодження, а також до перевитрат газу, та може бути налаштованою і на діагностування недогріву металу.*

*Застосування системи передбачається у складі інтегрованої автоматизованої системи керування товстолистовим прокатним станом. Вихідний сигнал системи може бути використаний у системі автоматичного керування процесом нагріву металу в методичній печі.*

**Ключові слова:** інтегрована АСУ, товстолистовий прокатний стан, методична піч, режим нагріву, система контролю та діагностики, штучна нейронна мережа, комп'ютерне моделювання.

**Постановка проблеми.** Підвищення якості нагріву заготовок у методичних печах продовжує залишатися актуальним завданням при прокатуванні металу в листопрокатних цехах. Оптимізація процесу нагріву заготовок може істотно знизити втрати металу з окалиною та покращити процес прокатки.

*Вирішальну роль при цьому грає контроль за режимами нагріву металу. Дані контролю необхідні не тільки експлуатаційному персоналу, але й використовуються в системах управління методичними печами.*

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При виникненні порушень у роботі технологічної установки з інтегрованою автоматизованою системою управління (АСУ) обслуговуючому персоналу важко швидко виявити та встановити неполадки чи порушення ведення технологічного процесу. Для підтримки управління процесами та швидкого пошуку

## Машинобудування і зварювальне виробництво

порушень необхідна ефективна система контролю та діагностики (СКД). При ранньому виявленні порушень у ході процесу можуть бути проведені заходи, що запобігають аварійній ситуації або зупинці технологічного об'єкта.

Для поліпшення ідентифікації помилок в СКД широко використовуються математичні моделі процесів, що описують статичні і динамічні режими, застосовуються методи ідентифікації помилок на підставі оцінки параметрів, рівнянь паритетів та оцінки величин, що характеризують стан процесу [1].

Аналіз сучасних методів контролю та діагностики складних систем показує, що вони мають ряд істотних недоліків: низька достовірність розпізнавання, великий обсяг обчислень для досягнення прийнятної достовірності, складність при перенавченні системи, необхідність зберігання великої кількості навчальних послідовностей [2].

У той же час широкого поширення набули розпізнавальні системи, побудовані на принципах штучних нейронних мереж (ШНМ). Найбільш популярними для вирішення завдань розпізнавання образів є мережі прямого поширення (перцептрони) [3]. Основними перевагами нейронних мереж прямого поширення є: реалізація принципу послідовного прийняття рішень, здатність до шматково-лінійного, нелінійного та багатозв'язного поділу простору ознак, а також наявність алгоритмів навчання, що не вимагають зберігання великих обсягів інформації [3, 4].

За допомогою тренувальних даних нейронна мережа здатна вивчити бажане співвідношення входу/виходу. Для цієї мети необхідно в процесі навчання мережі змінювати її параметри, щоб отримати на виході бажаний результат. Помилки діагностуються шляхом порівняння даних реального об'єкта з еталонними величинами, виробленими моделлю процесу чи результатами статистичної обробки експериментальних даних.

**Метою роботи** є проектування штучної нейронної мережі для автоматизованої системи контролю та діагностики технологічного процесу нагріву слябів у семизонній методичній печі з крокуючими балками, яка працює у складі ІАСУ товстолистового прокатного стану.

Задачею створеної системи є контроль вхідних параметрів, що характеризують перебіг технологічного процесу. Система видає рекомендації щодо коригування процесу нагріву слябів. Вихідний сигнал системи може бути використаний в АСУ методичної печі.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонована ШНМ є одношаровою та складається з чотирьох нейронів, кожен з яких відповідає певній технологічній зоні печі – методичній (перша група пальників), першій зварювальній (об'єднує другу та третю групу пальників), другій зварювальній (об'єднує четверту та п'яту групу пальників) та томильній (об'єднує шосту та сьому групу пальників). На кожен із нейронів надходить чотири сигнали: витрати газу на зону (сума витрат газу груп пальників), витрати повітря на зону (сума витрат повітря груп пальників), температура в зоні (показання активної термопари) та середньомасова температура слябів на виході з зони.

У результаті статистичної обробки параметрів нагріву слябів по зонах для різних груп нагріву та марок сталі визначено діапазони значень, для яких режим нагріву відповідає опорним траєкторіям, а перепад температур по перетину сляба не перевищує норми, передбаченої технологічною картою. Так само в ході обробки даних визначено діапазони значень, по яких можна судити про порушення технології нагріву слябів у методичній печі. Отримані значення використані при проектуванні та навчанні нейронної мережі для системи контролю та діагностики нагріву.

Навчання ШНМ (визначення вагових коефіцієнтів на вході нейронів) відбувається за дельта-правилом із заданою точністю збіжності [3]. Вхідний вектор містить значення, близькі до діапазону, що характеризує порушення режиму нагріву у відповідних нейронах зонах. Як цільовий вектор



## Машинобудування і зварювальне виробництво

обраний 0 (нуль). Вихід нейрона (вихід активаційної функції) під час навчання прийнятий рівним вектору стану.

Алгоритм навчання реалізований у математичному пакеті Matlab.

У результаті роботи програми отримані вагові коефіцієнти для кожного з входів нейронів та графічне відображення швидкості збігу векторів стану нейронів та цільових векторів (рис. 1).

Спроектована мережа при вхідних значеннях, що відповідають початковій межі діапазону значень порушення технології нагріву, видає вектор стану рівний 0 (нулю), і близькі до нуля значення при будь-якому іншому вхідному векторі.

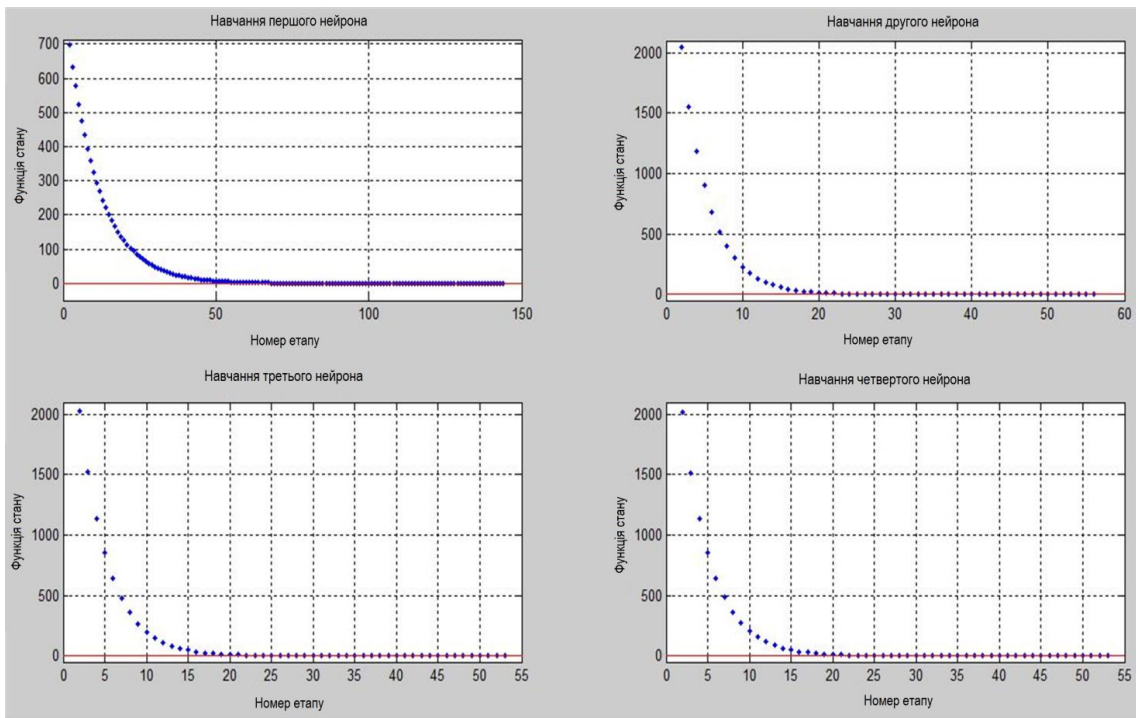


Рисунок 1 – Графічна візуалізація процесу навчання ШНМ

Для виконання діагностики порушень нагріву слябів необхідно вибрати активаційну функцію нейронної мережі. Враховуючи два можливі стани технологічного процесу – «нормальний режим» та «порушення режиму», як активаційну обрано одноступінчасту одиничну функцію, яка характеризується двома станами: 0 та 1. Для введення активаційної функції у програмі використовується імітатор роботи нейронної мережі, який дає можливість задати різні вхідні вектори для кожного з нейронів та отримати відповідні вектори стану.

Визначається ведучий параметр, за допомогою якого будуватиметься активаційна функція. Середньомасова температура слябів визначається температурою у зоні – цей параметр є веденим. Температура в зоні регулюється витратами газу та повітря на зону – цей параметр теж ведений. Витрати повітря на зону залежать від витрат газу. Тому, у якості ведучого параметра приймаються витрати газу на зону.

В імітаторі роботи ШНМ задається вектор з різним діапазоном значень витрат газу на зону, до якого входять як допустимі, так і недопустимі значення. У результаті отримується графічне відображення роботи імітатора – залежність значень вхідного вектора від вихідного вектора стану нейронів (рис. 2). Графічним методом визначається напрямок вектора стану нейронів. Метод полягає у визначенні напрямку відхилення вектора стану від цільового при



## Машинобудування і зварювальне виробництво

різних вхідних значеннях ведучого параметра.

Якщо елементи вхідного вектора знаходяться у діапазоні неприпустимих значень, вектор стану збільшується, тобто стає більше 0 (нуля). При допустимих значеннях ведучого параметра і значеннях, близьких до неприпустимих, вектор стану менше або дорівнює 0 (нулю). Виходячи з цього, на виходах  $Y_i$  встановлюється низький сигнал (0), рівнозначний нормальному (допустимому) режиму нагріву слябів у зоні, або високий сигнал (1) на виходах  $Y_i$ , рівнозначний порушенню режиму нагріву – виходу значень за допустимий діапазон. Налаштовується активаційна функція, враховуючи, що значення векторів стану нейронів, нижчі нуля або рівні йому, з деякою точністю сприймаються активаційною функцією як «низький сигнал». Виходи нейронів  $Y_i$  встановлюються в 0 (нуль). Значення вище нуля сприймаються як «високий сигнал», та виходи нейронів встановлюється в 1.

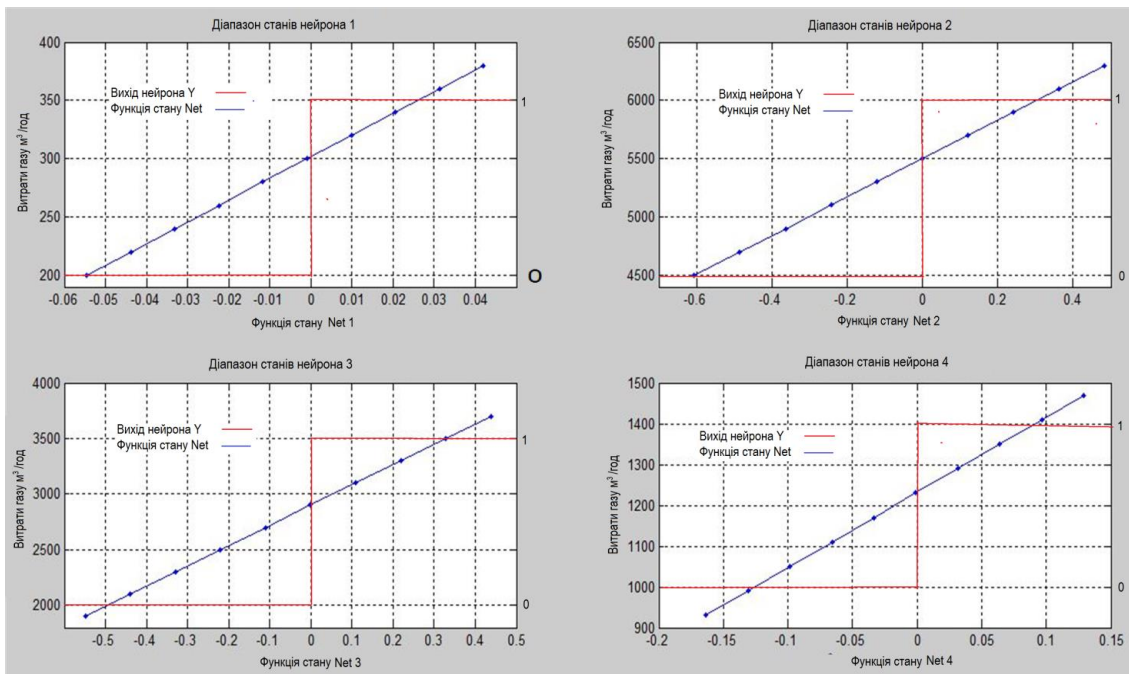


Рисунок 2 – Графічний метод визначення діапазону станів нейрона

У результаті отримана налаштована штучна нейронна мережа (рис. 3) з наступною логікою роботи:

1. При нормальному режимі нагріву, який характеризується відповідними вхідними параметрами нейронів, ШНМ видаватиме «низький сигнал», а при відхиленнях від нормального режиму – «високий сигнал». При цьому враховується, що кожен вхідний сигнал має свою вагу, що налаштовує чутливість нейрона.

2. При високих значеннях витрат газу і повітря, що виходять за допустимий діапазон, вони можуть вважатися допустимими, якщо температура в зоні та середньомасова температура слябів низька, і в цьому випадку необхідний форсований нагрів, щоб вийти на потрібну траєкторію нагріву відповідно до темпу видачі. У цьому випадку вихід нейрона не досягне «високого сигналу».

3. «Високий сигнал» буде досягнутий у випадку, якщо температура в зоні та середньомасова температура слябів знаходяться у діапазоні допустимих значень, і немає

## Машинобудування і зварювальне виробництво

необхідності у більш високих значеннях витрат газу або повітря, адже це призведе до їх перегріву. У цьому випадку можна діагностувати порушення режиму опалення зон.

4. «Високий сигнал» буде досягнутий у випадку, якщо витрати газу та повітря знаходяться у діапазоні допустимих значень, але температура в зоні зростає і виходить за допустимий діапазон. У цьому випадку можна діагностувати неповне завантаження зони слябами чи їх відсутність.

5. «Високий сигнал» буде досягнутий у випадку, якщо середньомасова температура слябів на виході з зони перевищує допустиму при допустимих значеннях інших параметрів. Тут також можна діагностувати порушення режиму нагріву слябів та їх перегрів.

Таким чином, ШНМ діагностує відхилення від нормального режиму, що може призвести до перегріву слябів та їх пошкодження (появи тріщин, оплавлення окалини), а також до перевитрат газу.

Можна налаштувати мережу таким чином, щоб контролювати і низькі значення параметрів, виходячи з яких діагностувати недогрів металу. Проте, це не є надто важливим, оскільки недогрів можна скомпенсувати у будь-якій з активних зон, і до моменту випуску сляба в прокат вивести його температуру на опорну траєкторію.

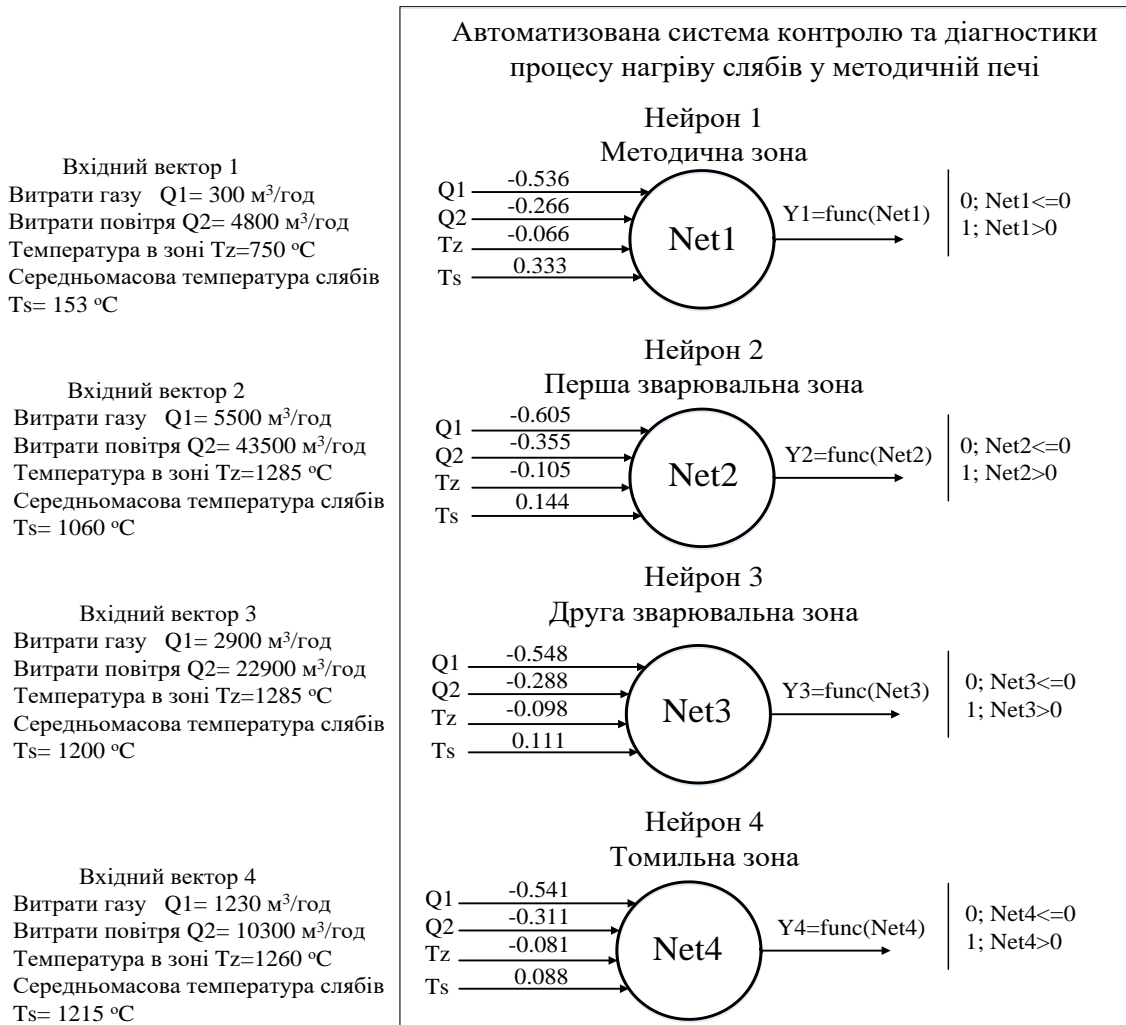


Рисунок 3 – Структурна схема ШНМ для системи контролю та діагностики технологічного процесу нагріву слябів

### ВИСНОВКИ

Технологія штучних нейронних мереж є цілком придатною основою для застосування в системах контролю та діагностики в умовах металургійної промисловості, проте її застосування має бути узгоджено як зі специфікою технології ШНМ, так і специфікою технологічного процесу, що підлягає контролю.

Запропонована стратегія побудови експертної системи з використанням технології ШНМ дозволяє досить просто та наочно реалізувати ідентифікацію процесу нагріву слябів у методичній печі. Доцільність використання запропонованої системи у складі класичної ІАСУ цілком виправдана в якості допоміжного засобу управління методичною піччю, акцентуючи увагу на технологічних параметрах, які є важливими для оптимального режиму нагріву.

#### *Список використаних джерел:*

1. *Грабовський, Г. Г.* Системи контролю та діагностики в інтегрованих АСУ товстолистовими станами / *Г. Г. Грабовський, М. Г. Ієвлев, С. Є. Мойсеєнко* // Математичні машини і системи. – 2021. – № 4. – С. 58–69.
2. *Нечипорук, О. П.* Недоліки сучасних технологій діагностування складних систем і завдання їх усунення / *О. П. Нечипорук* // Математичне моделювання. – 2013. – № 1 (28). – С. 10–13.
3. *Добровська, Л. М.* Теорія та практика нейронних мереж : навч. посіб. / *Л. М. Добровська, І. А. Добровська.* – К. : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2015. – 396 с.
4. *Субботін, С. О.* Нейронні мережі : теорія та практика: навч. посіб. / *С. О. Субботін.* – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с.

**Cherevko O., Shcherbakov S.**

### **COMPUTER MODEL OF AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK FOR THE AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF SLAB HEATING IN A METHOD FURNACE**

*For the technological process of metal rolling in sheet-rolling shops, the task of improving the quality of heating blanks in methodical furnaces is relevant. Control and optimal management of metal heating modes will allow to significantly reduce the loss of metal with scale and improve the rolling process.*

*A comparative analysis of existing control systems of technological processes, built using "traditional" mathematical models and artificial intelligence methods, revealed the advantages of the latter, such as the clarity of the implementation of the principles of consistent decision-making, high recognition reliability, the presence of learning algorithms that do not require the storage of large volumes of information, no need to retrain the system.*

*The use of artificial neural networks for the construction of a control and diagnosis system for the process of heating slabs in the technological zones of a methodical furnace is proposed. The task of the created system includes monitoring the input parameters that characterize the course of the technological process of heating slabs and issuing recommendations for adjusting this process.*

*The projected neural network is single-layer with direct signal transmission and consists of four perceptrons, each of which corresponds to a certain technological zone of the furnace. The network is trained according to the delta rule. The network training and operation algorithm is implemented in the Matlab mathematical package. The neural network diagnoses the deviation of*

*technological parameters from the normal regime, which can lead to overheating of slabs and their damage, as well as to gas overconsumption, and can be configured to diagnose underheating of metal.*

*The system is expected to be used as part of an integrated automated control system for a thick sheet rolling mill. The output signal of the system can be used in the automatic control system of the metal heating process in the methodical furnace.*

**Keywords:** *integrated control system, thick sheet rolling mill, methodical furnace, heating mode, control and diagnostic system, artificial neural network, computer modeling.*

*Стаття надійшла 15.03.2024 р.*

УДК 621.791.92

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303136](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303136)

Щербаков С. В., Черевко О. О.

### ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ СЕКЦІЙ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МБЛЗ

*Вирішення проблем із якістю слябів, виготовлених в умовах МБЛЗ, пов'язане з налагодженням і оптимізацією роботи системи автоматичного охолодження в секціях ЗВО та коригуванням роботи технологічного обладнання. Розрахунок оптимальних витрат води на секції зон вторинного охолодження є важливим завданням, що вирішується впровадженням комплексних підходів – від експериментальних досліджень до математичного моделювання із застосуванням сучасних програмно-технічних засобів аналізу.*

*В роботі розглянуто особливості розподілу щільності зрошення поверхні заготовки в зоні вторинного охолодження МБЛЗ. Сформульовано критерії оптимальної роботи обладнання зони вторинного охолодження, що впливають на якість готової продукції та ефективність технологічного процесу. Зроблено аналітичне дослідження потенційних можливостей використання математичного моделювання процесу охолодження заготовок в секціях ЗВО. Показано недостатню ефективність використання моделей на базі класичних рівнянь теплопровідності в зв'язку з певними труднощами та обмеженнями, обумовленими наявністю різних типів теплообміну між поверхнею заготовки, форсунками, зовнішнім середовищем, а також в зв'язку з неможливістю коректного врахування в моделюванні конструктивних особливостей обладнання, його технічного стану, поточних умов технологічного процесу.*

*Наведено альтернативні методики швидкої експериментальної оцінки роботи форсунок секцій вторинного охолодження, особливістю яких є можливість прямого отримання даних від об'єкту дослідження для подальшої обробки. Проведено аналіз ефективності методик та особливостей їх практичного застосування. Розроблено експериментальну установку та програмне забезпечення для оцінки стану форсунок та розрахунку статистичних характеристик якості охолодження поверхні заготовки з метою отримання рекомендацій щодо досягнення рівномірності тепловідведення та зменшення ймовірності утворення тріщин.*

**Ключові слова:** *безперервна розливка, секції зони вторинного охолодження МБЛЗ, форсунки, методики експерименту, програмне забезпечення, візуалізація, статистичний аналіз.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

**Постановка проблеми.** Охолодження форсунками на даний момент є єдиною контрольованою складовою процесу розливання сталі, що визначає максимальну продуктивність роботи МБЛЗ та оптимальну якість виробленої продукції.

Також слід враховувати, що при охолодженні високотемпературних поверхонь з використанням форсунок, виявляються суттєві залежності інтенсивності теплообміну від наступних факторів: типів форсунок та їх геометричних характеристик (наприклад, розгин вихідного отвору та конструкція, що формують відповідний факел), режимів охолодження (тиск води та повітря на вході в форсунку, висота встановлення над поверхнею тощо).

Всі ці фактори суттєво ускладнюють аналіз даних та їх узагальнення. В зоні вторинного охолодження якість та інтенсивність відведення тепла від сталевोї заготовки безпосередньо залежать від характеристик форсункового охолодження, взаємного розташування форсунок та інших конструктивних та технологічних параметрів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з головних проблем зони вторинного охолодження є нерівномірність відводу тепла з поверхні заготовки в секціях ЗВО в зв'язку з особливостями роботи форсунок. Істотний вплив на якість процесу охолодження мають технічні характеристики форсунок, їх взаємне розташування, відстань до поверхні заготовки, поточні витрати води [1]. Також відрізняються фізичні параметри відведення тепла, що обумовлюються конструктивними особливостями секцій. У зв'язку з цим можна виділити зону зрошення водою, зону контактного охолодження, зону конвекції та випромінювання.

На сьогодні проблемою є неможливість повного експериментального дослідження теплового стану заготовки та інтенсивності її охолодження. Тому в дослідженнях використовують методи математичного моделювання. Найбільш широко в даний час застосовуються математичні моделі, засновані на двовимірному рівнянні теплопровідності, в якому особливості переносу тепла в двофазній зоні враховані за допомогою ефективних величин теплоємності та теплопровідності [2]. Але розробка та використання подібних моделей обмежуються складнощами аналітичного опису роботи форсунок зони вторинного охолодження, пов'язаними з багатофакторністю фізичних процесів теплопередачі.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розробка експериментальної методики дослідження процесу охолодження безперервнолитих заготовок у ЗВО МБЛЗ та надання практичних рекомендацій щодо оптимізації роботи форсунок секцій вторинного охолодження.

**Основний матеріал дослідження.** В результаті аналізу математичних моделей теплового стану безперервнолитих заготовок зроблено висновок, що граничні умови для рівнянь теплопровідності задаються у вигляді фіксованих значень коефіцієнта тепловіддачі для кожної секції вторинного охолодження. Однак, характер теплообміну всередині секції не є однаковим через наявність різних способів тепловіддачі за рахунок безпосереднього зрошення факелом форсунки, контактного охолодження роликками, конвекції, випромінювання. Дані особливості обмежують застосування математичного моделювання у зв'язку з неможливістю повного та коректного аналітичного опису впливу на процес охолодження всіх вищезгаданих факторів.

Тому, з метою спрощення задач з оптимізації роботи обладнання секцій вторинного охолодження доцільно звернутися до експериментальних методів досліджень, що дозволяють отримати результати, які ґрунтуються на реальних характеристиках, отриманих безпосередньо від досліджуваного об'єкта із застосуванням різних методик.

Для оперативного експрес-аналізу (контролю) розподілу щільності рідини і властивостей форсунок серед перспективних методів можна виділити наступні:

- CFD-моделювання;
- механічний патернатор;
- лазерна візуалізація (LSI).



## Машинобудування і зварювальне виробництво

CFD-моделювання (Computational Fluid Dynamics modeling) являє собою програмне моделювання потоків [3]. З його допомогою на підставі фізико-хімічних характеристик об'єкта, що досліджується, можна обчислити характеристики поточкових процесів, використовуючи обчислювальні та фізико-математичні методи. Використання цієї методики дозволяє отримати практичні переваги фізичного моделювання з підвищеною точністю. Точність обчислень є однією з основних причин використання цього способу. Але суттєвими недоліками є складність обчислень, тривалий час проведення підготовчих етапів, необхідність чисельного розв'язання рівнянь, істотна вартість устаткування. Це робить цей спосіб недоступним для проєктів з малим бюджетом.

Механічний патернатор (вимірювач розподілу розпилення) є найбільш прямим методом оцінки розподілу рідини, що забезпечується форсункою або системою форсунок (рис. 1). Даний метод корисний для швидкої та точної оцінки зміни розподілу розпиленого матеріалу при використанні різних типів форсунок, при різних відстанях до об'єкта та між форсунками. Робота механічного патернатора полягає в збиранні об'ємного розподілу рідини. Рівномірність розпилення (щільність зрошення) визначається рівнями рідини в накопичувальних ємностях (трубках). Однією з головних переваг механічного патернатора є прямий та точний метод оцінки розподілу об'єму рідини у факелі розпилення форсунки. Відносна простота експлуатації дозволяє швидко отримувати дані. Труднощі в використанні даного методу викликані складністю локалізації середовища, що розпилюється, в вимірювальних ємностях [3].

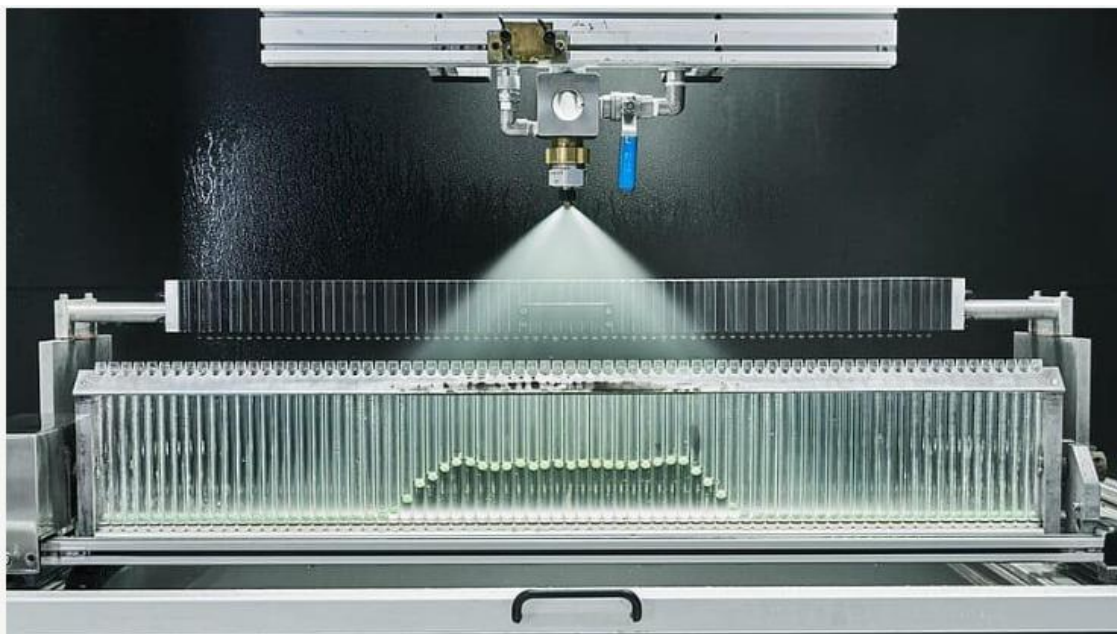


Рисунок 1 – Механічний патернатор

Лазерна візуалізація LSI (Laser Speckle Imaging) (рис. 2) заснована на вимірюванні інтенсивності світла, розсіяного крапельно-повітряним середовищем при пропусканні лазерного променя через факел форсунки. Інтенсивність розсіяного світла прямо пропорційна площі поверхні розпиленої рідини. Цю площу можна розглядати як узагальнений параметр диспергування. Завдяки LSI можна обробити довільну кількість зображень для подальшого дослідження перехідного процесу розпилення водної суміші. Також на основі декількох зображень розпилення можна виконати моделювання усередненого розпилення водної суміші [3].



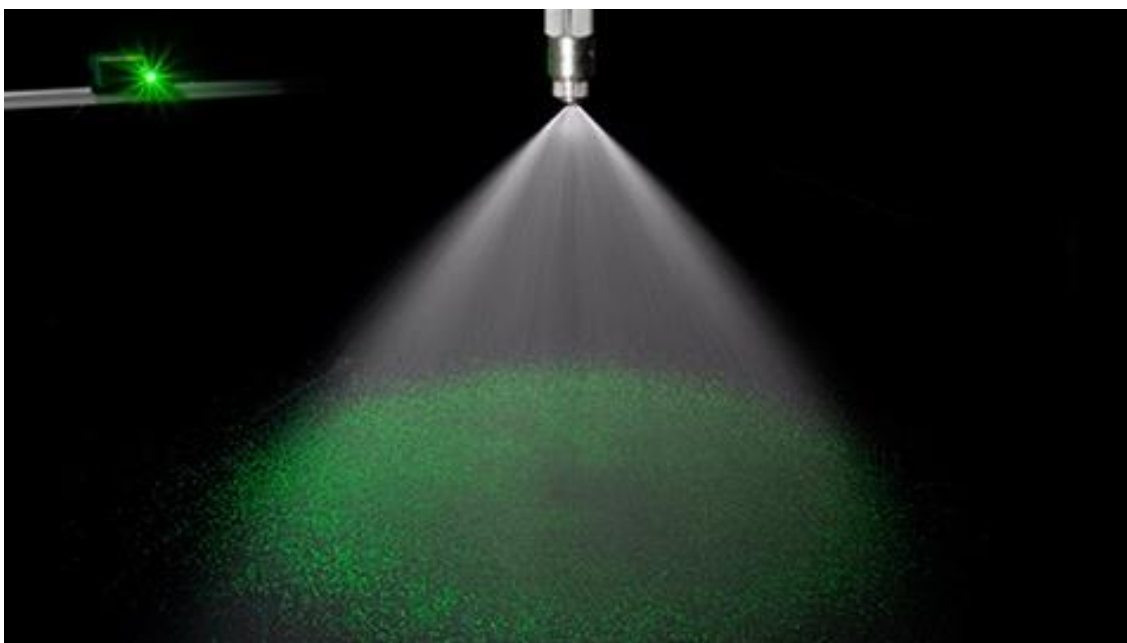


Рисунок 2 – Лазерна візуалізація LSI

Для проведення експерименту були проаналізовані представлені вище методи оперативного експрес-аналізу (контролю) площі розпилення рідини і властивостей форсунок. Врахувавши всі переваги і недоліки даних методів, був обраний оптимальний метод лазерної візуалізації LSI.

Через недоступність спеціалізованого лабораторного обладнання та неможливість його застосування в умовах протікання технологічного процесу запропоновано альтернативну методику проведення експерименту з використанням більш доступних та простіших оптичних пристроїв з не меншим функціоналом.

Основний елемент лазерного приладу – вузько направлений монохроматичний випромінювач з оптичним елементом у вигляді призми або двоопуклих лінз для формування плоского променя з великим кутом розгортки. Подібні прилади (нівеліри) є доволі розповсюдженими та використовуються, зокрема, у машинобудуванні, будівництві тощо.

Для проведення досліджень було спроектовано експериментальну установку [4], що реалізує принцип лазерної візуалізації LSI. Як джерело випромінювання був використаний монохромний лазерний нівелір з ширококутною розгорткою в горизонтальній площині. Аналіз роботи форсунок проводився на моделі, побудованій за принципом геометричної подоби.

Основна задача експерименту – дослідження інтенсивності (щільності) зрошення форсунками площини поверхні металу, що охолоджується. Даний параметр залежить від багатьох раніше встановлених факторів, а також від конструктивних особливостей форсунок, ступеня їх експлуатаційного зносу, кута повороту, схеми взаємного розташування відносно один одного, відстані до поверхні, що охолоджується.

Суть експерименту полягає в реалізації двох етапів. На першому етапі проводиться високоточна фото- відеозйомка факела форсунки при освітленні монохроматичним джерелом лазерного випромінювання для отримання зображення просторового розподілу часток середовища в плоскому перетині (рис 3, а). Ця зйомка проводиться в лабораторних умовах на експериментальній установці, що імітує роботу форсунок секції ЗВО.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

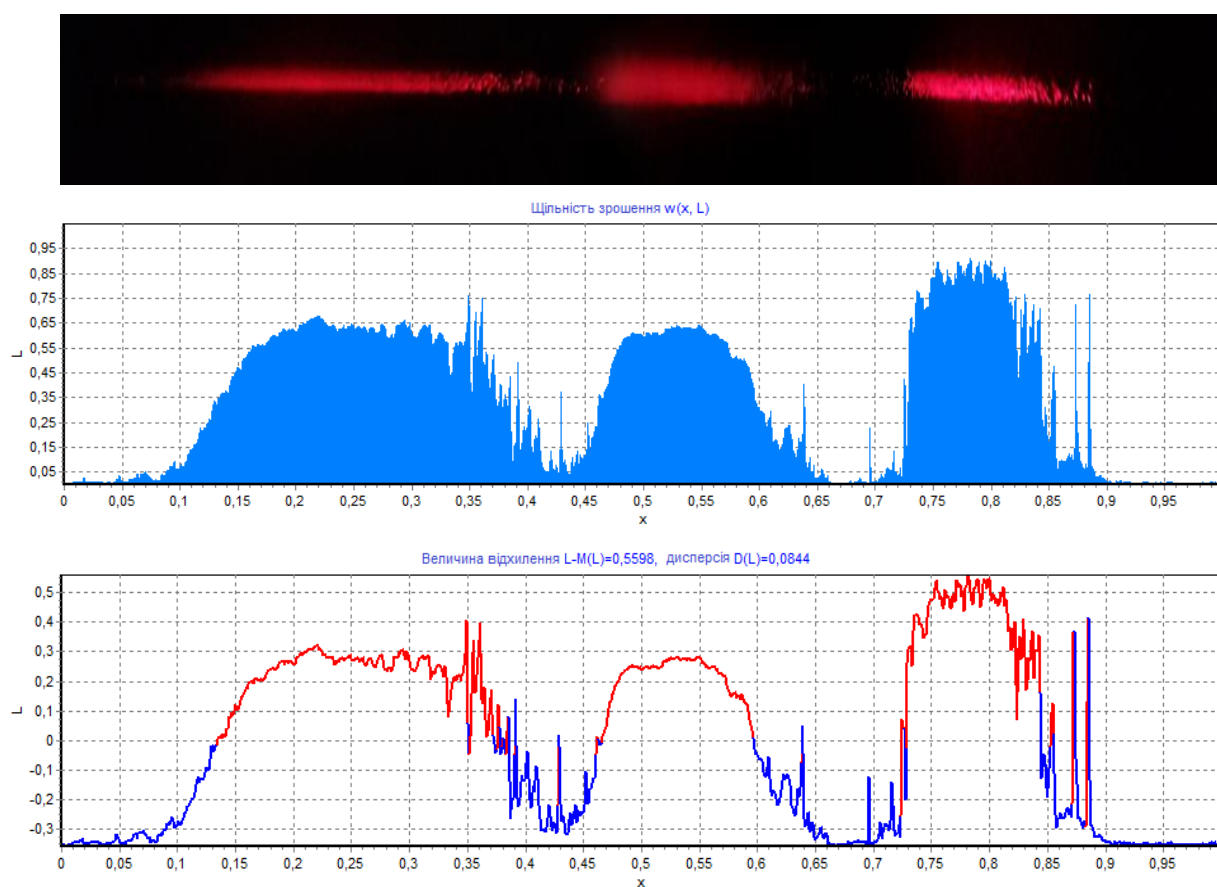


Рисунок 3 – Результати візуального та статистичного аналізу щільності зрошення

Другий етап експерименту полягає в програмному аналізі отриманих зображень для побудови графіків щільності розподілу часток у факелі з наступною статистичною обробкою (рис. 3, б). З цією метою розроблено спеціалізоване програмне забезпечення. В основі алгоритму послідовне зчитування кольору пікселів зображення у вибраному перетині з подальшим перетворенням кольору на сигнал яскравості та його масштабуванням. На основі отриманого масиву даних, що містить значення яскравості пікселів, виконується побудова графіка залежності  $L=f(x)$ , де  $L$  – яскравість пікселів в діапазоні  $[0 - 1]$ ;  $x$  – відносна ширина факелу розпилу, пкс. Ця залежність прямо пропорційна величині локальної щільності зрошення  $w=f(x, y)$ .

Можливості програмного забезпечення дозволяють виконувати багаторазовий аналіз растрових зображень у заданому форматі зі збереженням отриманих результатів. На рис. 3, б представлені результати експериментального дослідження одночасної роботи трьох форсунок з різними експлуатаційними характеристиками (налаштуваннями). Після програмної обробки зображення на підставі аналізу яскравості пікселів отримано графіки  $L=f(x)$ , величини відхилення  $\Delta=L-M(L)$  і дисперсії  $D(L)$ , що дозволяють зробити відносну оцінку величини щільності зрошення  $w(x, y)$ , а також розрахувати її точне значення з урахуванням коефіцієнта пропорційності  $w=f(\kappa, L)$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ . Після статистичної обробки на графіку відхилення та дисперсії зображено зони з підвищеною та недостатньою щільністю зрошення. Варіюючи даними параметрами, можна досягти оптимальних характеристик тепловідведення шляхом зниження величини дисперсії, зменшення градієнта та вирівнювання температурного поля при охолодженні поверхні металу.

### ВИСНОВКИ

Враховуючи складності аналітичного опису роботи форсунок зони вторинного охолодження, що пов'язані з багатофакторністю фізичних процесів теплопередачі, розроблена методика отримання та програмного аналізу експериментальних даних суттєво спрощує процес оптимізації роботи технологічного обладнання секцій ЗВО. Можливість візуалізації роботи форсунок дає змогу оцінити ефективність охолодження поверхні заготовки як наочно, так і за допомогою статистичних оцінок.

Так як на рівномірність охолодження поверхні заготовки прямий вплив має схема розміщення форсунок у секціях ЗВО, за допомогою запропонованих алгоритмів на підставі величини дисперсії температури, фізичних властивостей сталі та витрат води по контурах охолодження можна отримати рекомендації щодо вибору схеми розміщення роликів і форсунок у кожній секції зони вторинного охолодження. Таким чином, зменшуючи дисперсію температури в результаті оптимізації, за допомогою запропонованої моделі розрахунків можна досягти максимального дотримання вимог до технологічного процесу охолодження безперервних заготовок в умовах МБЛЗ.

#### *Список використаних джерел*

1. Федосов А. В. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовой заготовки МНЛЗ в зоне вторичного охлаждения / А. В. Федосов, Е. А. Казачков // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – С. 44–49.
2. Тутарова В. Д. Выбор рациональной схемы расстановки форсунок в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / В. Д. Тутарова, Д. С. Сафонов // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2013. – №1. – С. 76–81.
3. Инструменты и оборудование [Электронный ресурс] / Spraying Systems Co. – 2022. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.spray.com/>
4. Щербаков С.В. Оптимізація роботи технологічного обладнання секцій вторинного охолодження МБЛЗ / С.В. Щербаков, О.О. Черевко // Автоматизація та біомедичні і комп'ютерні технології: тези доповідей Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції. (Маріуполь/Дніпро, 20 березня 2023 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь/Дніпро, 2023. – С. 23-25.

**S. Shcherbakov, O. Cherevko**

### **OPTIMIZATION OF OPERATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT OF SECONDARY COOLING SECTIONS OF CCM**

*Solving problems with the quality of slabs produced in continuous casting machines is associated with debugging and optimizing the operation of the automatic cooling system in the sections of the cooling zone and adjusting the operation of process equipment. Calculation of optimal water flow rates for sections of secondary cooling zones is an important task, which is solved by introducing integrated approaches - from experimental studies to mathematical modeling using modern software and hardware analysis tools.*

*The paper examines the features of the distribution of irrigation density of the workpiece surface in the secondary cooling zone of the continuous caster. Criteria for the optimal operation of equipment in the secondary cooling zone are formulated, affecting the quality of the finished product and the efficiency of the technological process. An analytical study of the potential possibilities of using mathematical modeling of the cooling process of workpieces in air cooler sections was carried out. The insufficient efficiency of using models based on classical heat conduction equations is shown due to certain difficulties and limitations caused by the presence of various types of heat exchange between the surface of the workpiece, nozzles, and the external environment, as well as due to the impossibility of correctly taking into account in the modeling the design features of the equipment, its technical condition, current process conditions.*

*Alternative methods for rapid experimental evaluation of the operation of nozzles in secondary cooling sections are presented, a feature of which is the possibility of directly obtaining data from the object of study for further processing. An analysis of the effectiveness of the methods and features of their practical application was carried out. An experimental setup and software have been developed to assess the condition of the nozzles and calculate statistical characteristics of the quality of cooling of the workpiece surface in order to obtain recommendations for achieving uniform heat removal and reducing the likelihood of cracking.*

**Keywords:** *continuous casting, sections of the secondary cooling zone of a continuous caster, nozzles, experimental techniques, software, visualization, statistical analysis.*

*Стаття надійшла 15.03.2024 р.*

УДК 621.873.11

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303146](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303146)

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

### МОНТАЖ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТОВИХ КРАНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВАКУУМНО-ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ

*Запропоновано вантажозахоплювальний пристрій вакуумного типу який може бути застосовано у кранобудуванні, а саме, при виготовленні коробчастих конструкцій головних балок мостових кранів.*

*Вакуумно-захватний пристрій для монтажу головних балок мостових кранів включає маніпулятор з робочим органом у вигляді жорсткої траверси, вакуумні присоски, встановлені в отворах траверси з можливістю переміщення вздовж траверси, і джерело вакуумування, сполучене з порожнинами присосок. Траверса додатково забезпечена упорами, які встановлені в проміжках між присосками, в подовжніх отворах траверси, з можливістю переміщення вздовж отворів. Крім того, висота упорів відносно поверхні траверси дорівнює висоті присосок в їх робочому стані, тобто в стані їх максимального вакуумування.*

*Застосування пропонованого пристрою дозволить забезпечити в процесі виготовлення головної балки крана одночасне здійснення операцій встановлення листів у монтажне положення, виправлення листів і їх притискання до базових елементів конструкції, що суттєво скорочує час приєднання листів і робить виготовлення металоконструкції менш тривалим, більш зручним, простим і надійним.*

**Ключові слова:** *головні балки кранів, монтаж балок, вакуумний пристрій.*

**Постановка проблеми.** *При виготовленні коробчастих конструкцій головних балок мостових кранів доцільним може бути використання вантажозахоплювальних пристроїв вакуумного типу. Застосування таких пристроїв дозволяє забезпечити в процесі виготовлення*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

головної балки крана одночасне здійснення операцій встановлення листів у монтажне положення, виправлення листів і їх притискання до базових елементів конструкції. Це суттєво скорочує час приєднання листів і робить виготовлення металоконструкції менш тривалим, більш зручним, простим і надійним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вакуумні захватні пристрої утримують об'єкти за рахунок розрідження в камері, обмеженій з одного боку поверхнею об'єкта, що утримується. Основними елементами є одна або кілька присосок, що контактують з об'єктами, мають безліччю переваг. Вони можуть працювати з об'єктами з будь-якого магнітного чи немагнітного матеріалу. Маса присоски зазвичай порівняно невелика.

Підйомне зусилля у вакуумних захватних пристроях створюється за рахунок розрідження в камері між присоскою та об'єктом. При цьому сила тяжіння об'єкта пропорційна площі контакту вакуумної камери присоски та об'єкта.

У відомих конструкціях захоплювачів вакуумного типу є недоліки, які унеможливають їх широке використання при виготовленні коробчастих конструкцій головних балок мостових кранів. Так у пристрої /1/ необхідне для утримання вантажу розрідження створюється вагою траверси і вантажу. Це приводить до неможливості утримання листа, що транспортується, у вертикальному положенні, а також неможливості зміни відстані між присосками при зміні розмірів листа.

В пристрої /2/ також неможливі зміни відстані між присосками, що необхідно при застосуванні листів різних розмірів. Потреба в цьому може виникнути при монтажу кранових балок різних прольотів. В обох випадках неплоскощинність утримуваного пристроєм листа не дозволяє під час монтажу металоконструкції крана забезпечити щільне притискання листа до діафрагм моста в момент їх з'єднання зварюванням.

В пристрої /3/ можливість переміщення вздовж траверси присосок дозволяє його використовувати при монтажу головних балок кранів різних прольотів, де застосовуються листи різних розмірів. Але і тут неможливо забезпечення надійного притискання і гарантованого контакту листа, що монтується і має неплоскощинність, з діафрагмами моста крана в момент їх з'єднання зварюванням.

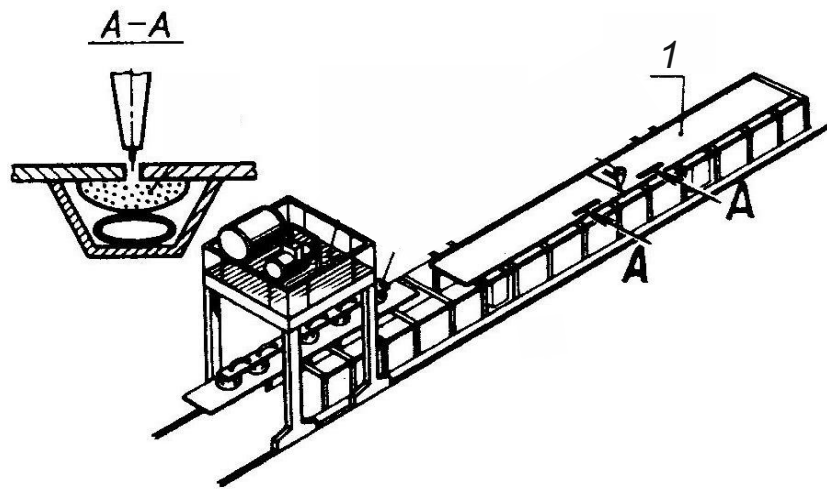
**Мета досліджень.** Метою роботи є розробка конструкції вакуумно-захватного пристрою для монтажу головних балок мостових кранів, яка дозволяє за рахунок зміни робочих параметрів забезпечити в процесі виготовлення балок одночасне здійснення операцій встановлення листів у монтажне положення, виправлення листів і їх притискання до базових елементів конструкції. Це дає змогу суттєво скоротити час приєднання листів і робить виготовлення металоконструкції менш тривалим, більш зручним, простим і надійним.

**Основний матеріал дослідження.** Технологічний процес виготовлення головної балки мостового крану коробчастої конструкції включає кілька операцій, які виконуються послідовно на окремих робочих місцях.

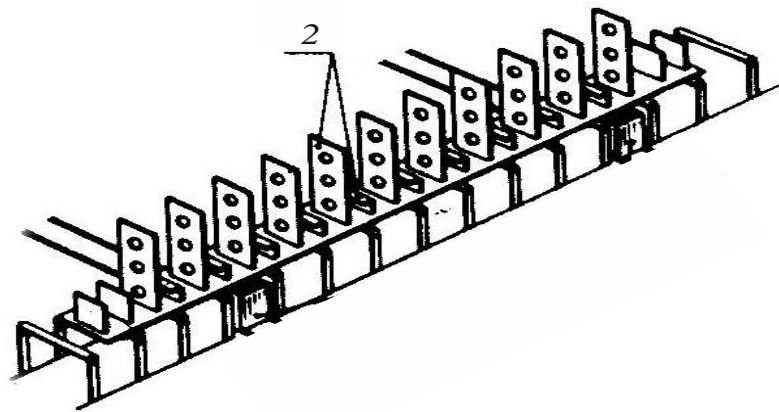
На першому робочому місці (рис. 1, а) виконують початкові операції складання металевої конструкції. Балку збирають у перевернутому (порівняно з робочим) положенні. Спочатку на стенді розкладають і зварюють листи 1 верхнього поясу. Далі (рис. 1, б), до верхнього поясу на відстані панелі Т-подібно закріплюють поперечні діафрагми 2, які з'єднують між собою в'язями - ребрами жорсткості. Закріплення здійснюється прихватками, тобто зварюванням у декількох точках.



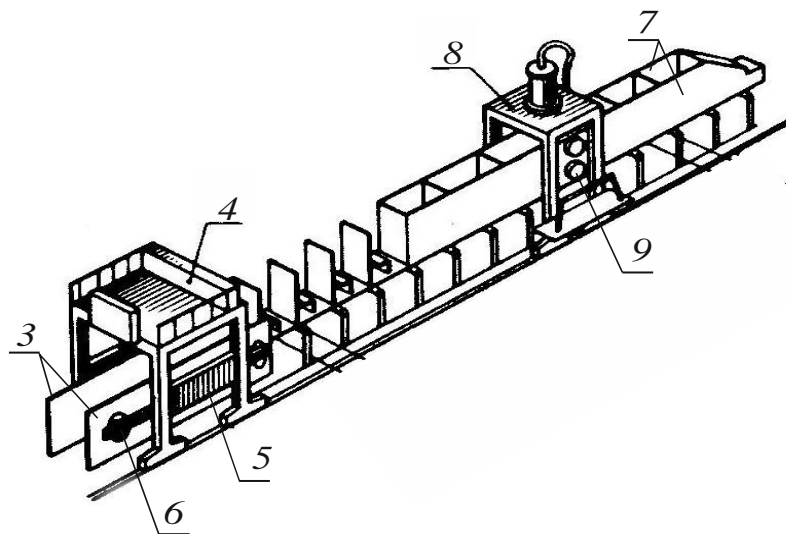
Машинобудування і зварювальне виробництво



a)



б)



в)

Рисунок 1 – Вакуумно-захватний пристрій для монтажу головних балок мостових кранів



## Машинобудування і зварювальне виробництво

На другому робочому місці (рис.1, в) до базової металоконструкції приєднують бічні вертикальні листи 3. (При збиранні промислових мостових кранів загального призначення з прольотами мостів 10,5...34,5 м для цієї операції використовуються листи з діапазоном розмірів: довжина  $L = 3000...6000$  мм, висота  $H = 800...1500$  мм, товщина  $h = 4...9$  мм). Операція приєднання листів є механізованою і виконується за допомогою двох самохідних порталів, які виконують різні технологічні функції. Портал-маніпулятор 4 має дві спрямовані назустріч траверси 5 з вакуумними захоплювачами (присосками 6). Він призначений для транспортування і встановлення в проектне (монтажне) положення двох листів 3, з яких виготовляють протилежні бічні стінки 7 головної балки. Після прикладання листів 3 до базової конструкції здійснюється їх попередня прихватка до діафрагм і верхнього поясу. Портал-обтискач 8, обладнаний гідравлічними циліндрами 9, призначений для виправлення неплоскостності бічних листів, їх притискання до діафрагм і ребер жорсткості і створення гарантованого контакту між ними. Щільний контакт між деталями дозволяє виконати більш якісне і надійне закріплення бічних листів до діафрагм і ребер жорсткості. Це здійснюється за допомогою додаткових прихваток в багатьох точках контакту.

Для вирішення поставленої задачі, в вакуумно-захватному пристрої для монтажу головних балок мостових кранів, що включає маніпулятор з робочим органом у вигляді жорсткої траверси, вакуумні присоски, встановлені в отворах траверси з можливістю переміщення вздовж траверси, і джерело вакуумування, сполучене з порожнинами присосок, траверса додатково забезпечена упорами. Упори встановлені в проміжках між присосками, в подовжніх отворах траверси, з можливістю переміщення вздовж отворів. Крім того, висота упорів відносно поверхні траверси дорівнює висоті присосок в їх робочому стані, тобто в стані їх максимального вакуумування.

В основу конструкції покладена ідея створення вакуумно-захватного пристрою, який при монтажу металоконструкції головної балки мостового крану виконує кілька технологічних операцій одночасно, що робить технологію виготовлення металоконструкції менш тривалою, більш зручною, простою і надійною.

У порівнянні з відомими конструкціями, наявність упорів в проміжках між присосками дозволяє, одразу після встановлення листа у проектне положення, виправити лист і притиснути його до базової конструкції для подальшого закріплення. На це витрачається значно менше часу, ніж при застосуванні двох пристроїв.

Упори встановлюються в подовжні отвори траверси з можливістю переміщення вздовж отворів, що дозволяє застосовувати пристрій при монтажу листів різних розмірів, тобто для виготовлення головних балок різних прольотів.

При цьому, висота упорів відносно поверхні траверси дорівнює висоті присосок в їх робочому стані, тобто в стані їх максимального вакуумування. Ця ознака дозволяє не витрачати додатково час на притискання упорів до листа після його прикладання до бази. Це може бути здійснене за рахунок переміщення в напрямі конструкції усієї траверси.

На рисунку 2 показана структура і принцип дії порталу-маніпулятора з позначеннями видів щодо інших креслень; на рисунку 3 ,а,б,в наведені загальний вид траверси з упорами (а), вид траверси у разі застосування одиночних присосок з кожного її боку (б) і вид траверси при використанні здвоєних присосок з кожного боку траверси (в).

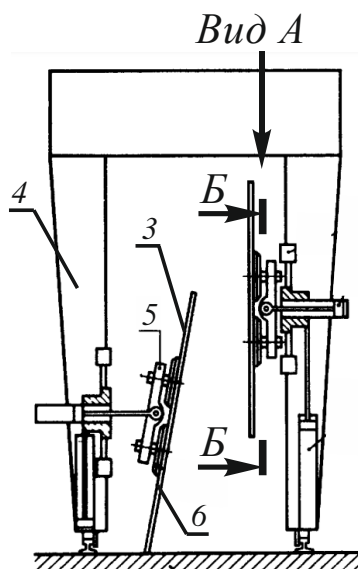


Рисунок 2 – Вакуумно-захватний пристрій для монтажу головних балок мостових кранів

Портал-маніпулятор 4 (рис.2) є двостороннім і має робочі органи у вигляді траверс 5, на яких розміщені присоски 6 на кожній стороні порталу. При створенні вакууму (джерелом вакуумування) присоски 6 притягують до себе лист 3, після чого рухами самого порталу і гідравлічних циліндрів порталу лист 3 транспортується і встановлюється в проектне положення. Останньою операцією порталу є натискання листа 3 до базової металевої конструкції з подальшим їх з'єднанням зварюванням.

Конструкція вузла захоплення більш детально показана на рисунку 3. На траверсі 5 (Рис. 3, а) встановлені присоски 6, які (у разі вакуумування їх порожнин) притягують до себе і утримують лист 3 (показаний пунктиром). При максимальному вакуумуванні висота присосок відносно поверхні траверси дорівнює С. Присоски 6 встанов-

лені в подовжні отвори траверси з можливістю переміщення вздовж траверси. Тобто, при зміні розмірів листа присоски можуть переміщуватись і фіксуватись у потрібному для цього положенні. В проміжках між присосками 6, в інших подовжніх отворах, змонтовані упори. Висота упорів відносно поверхні траверси дорівнює висоті присосок, тобто складає С. Упори також можуть переміщуватись вздовж своїх отворів і фіксуватись в положенні, що відповідає положенню елементів конструкції, до яких лист має бути приєднаним.

На рис.3, б,в показані траверси у разі використання однієї присоски з кожного боку траверси (б) або при здвоєних присосках (в).

Слід зазначити, що кількість одиночних присосок на траверсі, або їх пар може бути більшою, наприклад, три або ще більше. Це залежить від розмірів і ваги листів, що транспортуються порталом. При цьому, упори мають бути встановлені в кожному проміжку між присосками або їх парами.

Розроблений пристрій працює наступним чином. Два листа, призначені до монтажу металоконструкції, встановлюють між рейками порталу 4 (рис.2) в положення, близьке до вертикального. Портал встановлюють над листами, після чого рухами маніпулятора і вакуумуванням присосок 6 забезпечують захоплення листів 3 кожною з траверс 5. Далі, портал по рейках переміщують з зону розташування металоконструкції (рис.1, в). Рухами порталу і гідроциліндрів порталу обидва листи встановлюють в потрібне для подальшого закріплення положення. Після притискання листів до металоконструкції, завдяки упорам, отримують виправлення листів і щільний контакт листів з іншими елементами металоконструкції. Далі,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

листи закріплюють до діафрагм і ребер жорсткості прихватками зварювання. Застосування такого пристрою робить другий портал для притискання листів зайвим.

Прикладом реалізації запропонованого пристрою є використання вакуумного захвату нової конструкції при монтажу головних балок мостових кранів в умовах одного з заводів підйомно-транспортного устаткування.

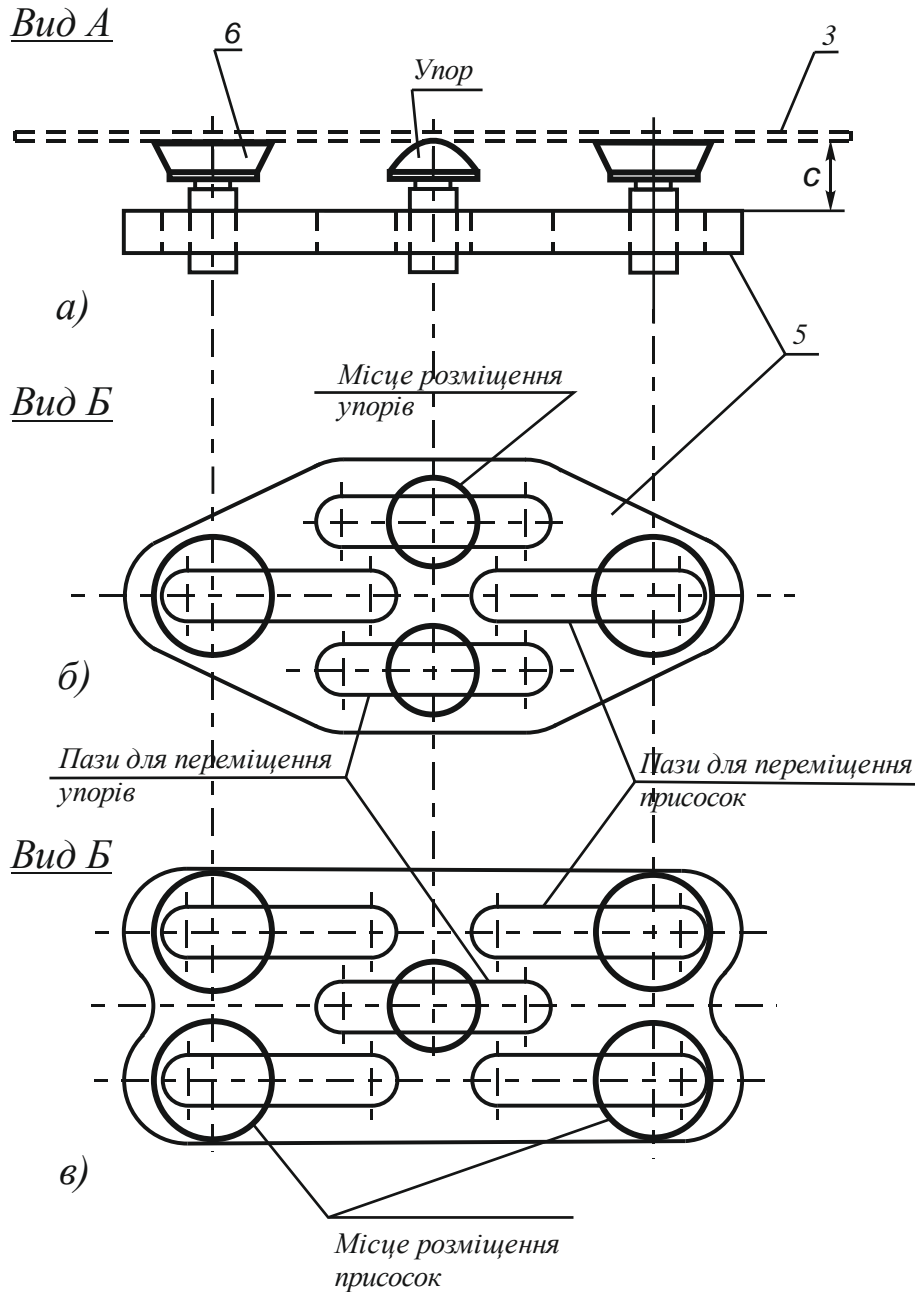


Рисунок 3 – Конструкція вузла захоплення

Головну балку мостового крану прольотом 34,5 м виготовляли із застосуванням порталів звичайної конструкції, тобто без проміжних упорів на траверсі. Після встановлення листів першим порталом, здійснювалось їх попереднє закріплення. Після цього, до листів під'їжджав другий портал, який виправляв листи і притискав їх до діафрагм. В момент

## Машинобудування і зварювальне виробництво

притиску здійснювалось додаткове закріплення листів. Процедура закріплення листа тривала близько 20 хвилин.

На сусідній ділянці виготовляли іншу головну балку того ж крану. Для монтажу бічних стінок мосту застосували один портал нової конструкції, тобто з упорами між присосками. За рахунок використання одного порталу, процес закріплення листів тривав близько 15 хвилин при тієї ж якості з'єднання. При цьому, процес приєднання листів став більш простим, зручним і надійним.

### ВИСНОВКИ

Застосування запропонованої конструкції вакуумно-захватного пристрою дозволяє забезпечити в процесі виготовлення головної балки крану одночасне здійснення операцій встановлення листів у монтажне положення, виправлення листів і їх притискання до базових елементів конструкції, що суттєво скорочує час приєднання листів і робить виготовлення металоконструкції менш тривалим, більш зручним, простим і надійним.

#### *Список використаних джерел*

1. Вакуумний захват: авт.свідоцтво СРСР. 1696302: В25J 15/06; № 4720166; заявл. 17.07.1989; опубл. 07.12.1991, Бюл. № 45, 1991 р.
2. Вакуумно-захватний пристрій / авт.свідоцтво СРСР № 1215999, В 25 J 15/06, Бюл. № 9 від 07.03.1986
3. С.А.Куркин, В.М.Ховов, А.М.Рыбачук. Технология, механизация и автоматизация производства сварочных конструкций. Атлас. /, М., Машиностроение, 1989.

**Lavryk V.P., Shishkin V.V., Suglobov V.V.**

### **ASSEMBLY OF MAIN BEAMS OF BRIDGE CRANES WITH THE HELP OF A VACUUM SUCTION DEVICE**

*A vacuum-type load-catching device is proposed, which can be used in crane construction, namely, in the manufacture of box structures of the main beams of bridge cranes.*

*The vacuum gripping device for mounting the main beams of bridge cranes includes a manipulator with a working body in the form of a rigid traverse, vacuum suction cups installed in the openings of the traverse with the possibility of movement along the traverse, and a vacuum source connected to the cavities of the suction cups. The traverse is additionally equipped with stops, which are installed in the gaps between the suction cups, in the longitudinal holes of the traverse, with the possibility of movement along the holes. In addition, the height of the stops relative to the surface of the traverse is equal to the height of the suction cups in their working state, that is, in their state of maximum vacuuming.*

*The use of the proposed device will allow to ensure, during the manufacturing process of the main beam of the crane, the simultaneous implementation of the operations of installing the sheets in the installation position, correcting the sheets and pressing them to the basic elements of the structure, which significantly reduces the time of joining the sheets and makes the manufacture of metal construction less time-consuming, more convenient, simple and reliable.*

**Key words:** *main beams of cranes, installation of beams, vacuum device.*

*Стаття надійшла 18.03.2024 р.*

## ЗАСТОСУВАННЯ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ ПРИ ВИКОНАННІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ ЩОДО ВИРОБНИЦТВА КОНТЕЙНЕР-ЦИСТЕРНИ

*Перевезення вантажів на сьогодні, в період військового стану та блокування кордонів, є надзвичайно важливим і критичним для економіки України.*

*Все частіше перевізники та власники обирають перевезення вантажів в контейнер-цистернах автомобільним та залізничним транспортом.*

*Застосовуючи контейнер-цистерни, можна проводити транспортування газів; рідких, порошкоподібних та гранульованих небезпечних вантажів, в яких для їх випорожнення періодично утворюється тиск вище 0,07 МПа та ін. як по території країни так і за її межами.*

*Міжнародні перевезення вантажів різного типу є наразі дуже необхідними для підтримки економіки країни, розвитку машинобудування та будування партнерських відносин з європейськими країнами.*

*Аналіз перевізників і власників України дає змогу зробити висновок, що в 2023-2024 роках з'явилась тенденція до оновлення парків контейнер-цистерн і у зв'язку з чим виникає необхідність у виробництві нової продукції. Основою для якісного виробництва контейнер-цистерн, окрім іншого, є кваліфікована технологія зварювання, яка відповідає вимогам міжнародних стандартів.*

**Ключові слова:** зварювання, міжнародні стандарти, контейнер-цистерна, якість, зварні з'єднання, матеріали.

**Постановка проблеми.** Для розробки нового складу наплавного матеріалу з метою отримання в наплавленому металі метастабільного зносостійкого покриття було визначено основні цілі: формування метастабільного аустеніту наплавленому металі; зниження витрат на легуючі елементи насамперед нікелю; регулювання властивостей наплавленого металу під час деформаційного мартенситного перетворення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Технологія зварювальних робіт у виробництві є досі вивченою науковою і практичною темою, і висвітлюється в роботах Маслова В.І., Биковського О.Г., Александрова О.Г., Пінковського І.В., а також на наукових конференціях, в монографіях та підручниках. Питання удосконалення конструкцій вагонів-цистерн в своїх роботах розглядав Павлюченко М.В.. Однак тема дослідження «Технологія зварювальних робіт при виробництві контейнер-цистерн» на 2024 рік не являє собою об'єкт загальних досліджень, основні вимоги до процесів розробляються виробниками контейнер-цистерн і викладаються у вигляді Технологічних інструкцій і Технічних умов на рівні практичного застосування. Однак, на думку авторів, ця тема повинна мати науковий підхід і практичний обмін, для можливості покращення виробничого прогресу в цій галузі.

**Мета дослідження.** Метою роботи є вивчення міжнародних стандартів при виконанні зварювальних робіт щодо виробництва контейнер-цистерн.

**Основний матеріал дослідження.** Основним показником якісної контейнер-цистерни є стандартизований підхід до технології зварювання. Найрозповсюдженіша контейнер-цистерна – представляє собою циліндричну цистерну, жорстко закріплену між двома торцевими рамами. У верхній частині знаходиться арматурний відсік контрольно-виміральної арматури, у нижній частині знаходиться арматурний відсік зливно-наливної арматури (див. рисунок 1). Котел, в свою чергу, є звареною циліндричною ємністю,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

виготовленою з листового прокату. З торців котла вварені днища. В одному з днищ встановлений люк-лаз діаметром 450-600 мм. У верхній та нижній частині обичайки вварені фланці та труби з фланцями для кріплення на них запірної, запобіжної, контроль-вимірювальної арматури.

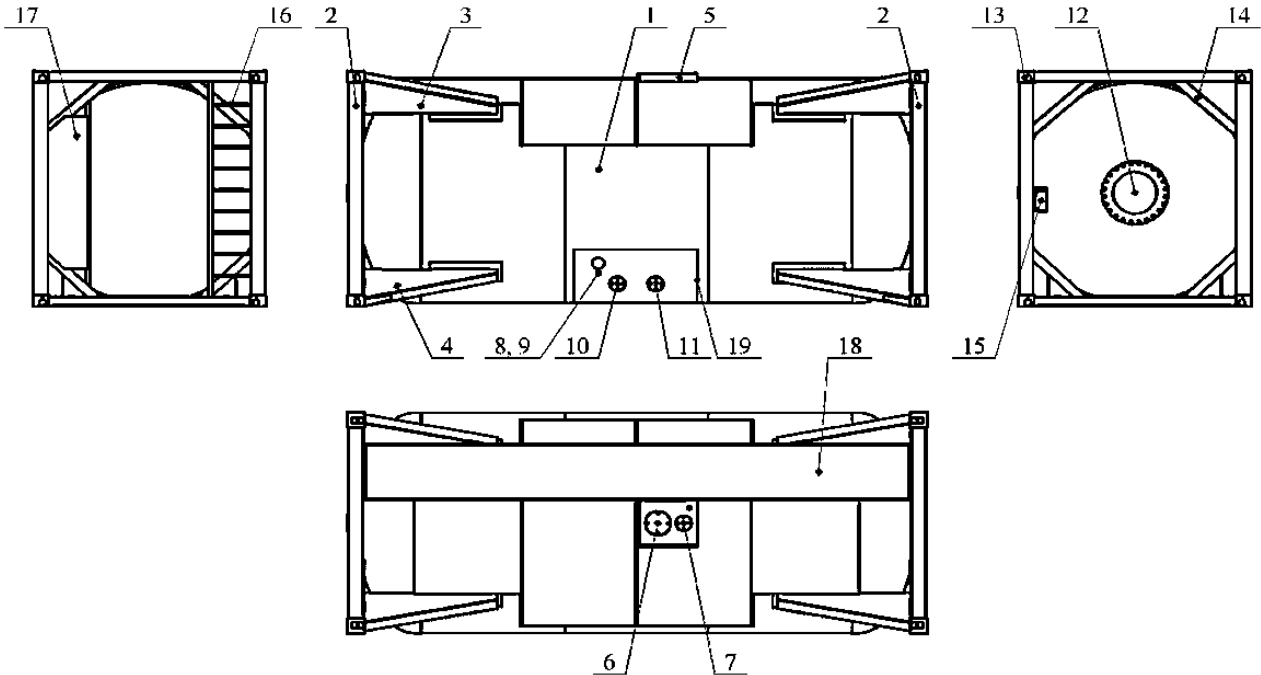


Рисунок 1 – Вигляд контейнер-цистерни

На рисунку 1 зображенні основні частини контейнер-цистерни, 1 – котел, 2 – торцеві рами, 3 – верхня опора, 4 – нижня опора, 5 – відсік контроль-вимірювальної арматури, 6 – клапан запобіжний, 7 – рівнемір, 8 – вентиль, 9 – манометр, 10 – пристрій зливу-наливу газової фази, 11 – пристрій зливу-наливу рідкої фази, 12 – люк-лаз, 13 – фітинг, 14 – розкіс, 15 – пенал, 16 – сходи, 17 – лист, 18 – площадка, 19 – нижній арматурний відсік [6].

При виготовленні контейнер-цистерни важливо розділяти дві основних складових виробу: ємність (резервуар) та рама. Для виготовлення ємності та рами можуть використовуватися різні марки сталі, відповідно до технологічної карти та процедури виробництва, що в свою чергу зобов'язує виробника, відповідно до міжнародних вимог, нормативних актів, та стандартів, використовувати різні методи зварювання. Рама виконується, в переважній більшості, із конструкційних марок сталі, наприклад S355J2+N. Рама контейнер-цистерни.

Обов'язковим етапом виробництва є незалежне підтвердження якості та присвоєння номера затвердження типу компетентним органом. Без виключення, виготовлення контейнер-цистерн відбувається під наглядом незалежного Сертифікованого органу (такого як Bureau Veritas, SGS, DNV GL та інші), далі СО, який в свою чергу контролює всі етапи виробництва, в тому числі і технологію зварювання [2].



## Машинобудування і зварювальне виробництво



Рисунок 2 – Підготовка рами до зварювальних робіт



Рисунок 3 – Зварювання рами

Технологічні процеси зварювання, зварювальні матеріали, механічні характеристики зварних з'єднань повинні бути погоджені з СО, відповідати вимогам нормативної, конструкторської документації, технологічних карт. Міжнародне зварювальне виробництво контейнер-цистерн є складним і багатоаспектним процесом, з чітким виконанням нормативних вимог стандартів (див. рисунок 4, додаток 1). Основні критерії до якісного зварювального виробництва, відповідно до вимог міжнародних стандартів, включають в себе[2]:

- вимоги до персоналу, залученого до зварювального виробництва;
- вимоги до якості зварювального виробництва;
- вимоги до процесу випробування зварних швів і готової продукції;
- вимоги до технологічних процесів зварювального виробництва.

## Машинобудування і зварювальне виробництво



Рисунок 4 – Міжнародні вимоги до якості зварювального виробництва контейнер-цистерн

Найпоширеніші методи зварювання: при виробництві контейнер-цистерн найпоширенішим методом зварювання є зварювання під шаром флюсу, на думку міжнародного фахівця Михайлова О.Є., міжнародного зварника Bureau Veritas, він має високу продуктивність процесу, необхідну якість і стабільність властивостей зварного з'єднання для виробництва контейнер-цистерн. При зварюванні під флюсом практично відсутні втрати на розбризкування електродного металу (не більше за 4%). Для утримання флюсу від зсипання при виконанні кільцевих швів необхідно використати спеціальні пристосування для утримання флюсу. Необхідно застосовувати ручне або напівавтоматичне зварювання із зворотної сторони для запобігання протіканню розплавленого металу в зазор.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Зварювання може бути використане для з'єднання нових компонентів з існуючими конструкціями під час модернізації об'єкта.

Ручне дугове зварювання – сучасні технології (рис 5. (ММА)) є найпоширенішим і універсальним методом, який застосовується. Він дозволяє зварювати різні типи металів та здійснювати ремонт різних деталей та конструкцій [4]. Дозволяє виконати зварювальний шов в важкодоступному місці навіть в стелевому положенні що найчастіше необхідно для уникнення аварійної ситуації [5].

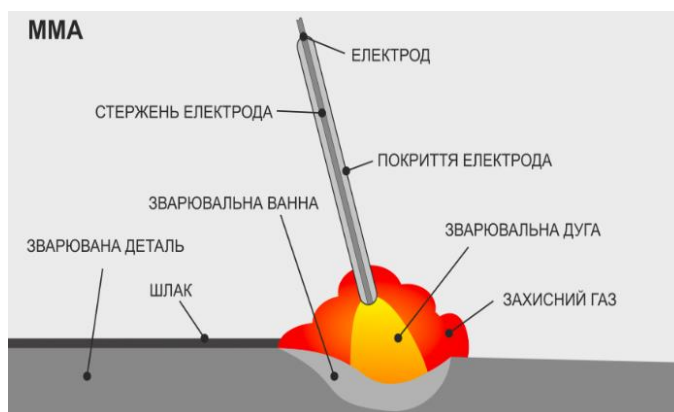


Рисунок 5 – ММА (ручне дугове зварювання)

Також в ході виробництва контейнер-цистерн використовують зварювання в захисних газах, цей метод, на думку Ніко Остхейзен, аудитора Welfit Oddy, потужного виробника контейнер-цистерн, має високу продуктивністю і в порівнянні зі зварюванням під шаром флюсу є більш чистим способом. В якості газів використовуються активні гази ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ , повітря), інертні гази ( $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ), а також їх суміші. Інертні гази в основному застосовуються при виробництві контейнер-цистерн для зварювання кольорових металів і сплавів, а також середньо- і високолегованих неіржавіючих, жароміцних сталей..

Напівавтоматичне зварювання в захисному газі (рис. 2 (MIG/MAG)) використовує електродний дріт, який подається автоматично, що забезпечує більш високу якість зварювання порівняно з ручним дуговим зварюванням [5].

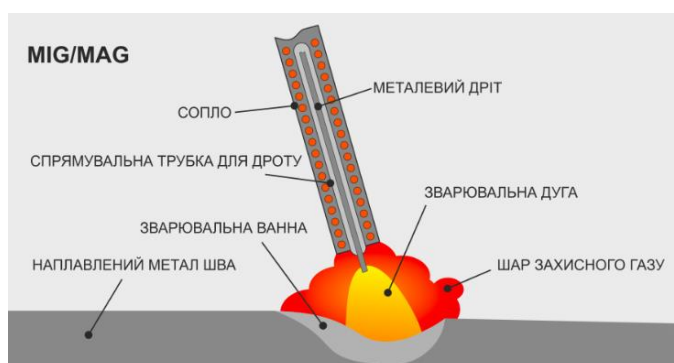


Рисунок 6 – MIG-MAG (напівавтоматичне зварювання)

Також слід відмітити, використання активних газів має важливий недолік – підвищене розбризкування розплавленого металу, доцільніше використати суміші активних і інертних

## Машинобудування і зварювальне виробництво

газів [3]. Проте практика заводів-виробників контейнер-цистерн показує, що для зварювання даної конструкції раціональніше використати зварювання в середовищі захисних газів, звертаємо увагу, що цим способом зварювання виконуються не тільки основні шви, але і робляться прихвати при складанні.

Емпіричний метод дослідження типів контейнер-цистерн показав, що найпоширенішим матеріалом для виготовлення ємності є нержавіюча сталь марки 316L. Аналіз технічної документації та процедур зварювального виробництва міжнародних виробників контейнер-цистерн показав, що найбільш поширенішими в зварюванні є наступні три види газу для зварювання нержавіючої сталі:

1) Аргон (група I: інертні гази та суміші інертних газів). Зварювання нержавіючої сталі напівавтоматом в середовищі аргону широко використовується через естетичність одержуваних швів, але має недоліки у вигляді великої кількості бризок, нестабільності дуги і високої вартості.

2) Вуглекислий газ (група C: високоокислювальний газ та сильноокислювальні суміші). Зварювання напівавтоматом нержавіючої сталі в середовищі вуглекислого газу - найдешевший варіант, але через ще більшу кількість бризок, ніж при аргоні, шви виходять дуже грубими.

3) Суміш аргону та вуглекислого газу (групи M1, M2 та M3: окисні суміші, що містять кисень та/або діоксид вуглецю;). В основному ці суміші містять 98% аргону та 2% вуглекислого газу, або 95% і 5% відповідно. Це найоптимальніший варіант, тому що він поєднує в собі і доступну вартість, і хорошу якість шва.

В залежності від типу зварювання використовують різні електроди або дріт, наприклад:

– **ER318Si** - дріт застосовується для зварювання нержавіючих Cr-Ni-Mo і Cr-Ni сталей, стабілізованих або нестабілізованих, наприклад: 316, 316L і 316Ti, також як 304, 304L, 321, 347, для температури експлуатації до 40. міжкристалітної корозії і піттингу;

– **ER317L** - дріт застосовується для зварювання нержавіючих Cr-Ni-Mo низьковуглецевих сталей, наприклад: 316L, 317L, для застосування в агресивних корозійних умовах, у т.ч. нафтохімічної та целюлозно-паперової промисловості;

– **AWS E-316** - рутиловий нержавіючий електрод призначений для зварювання сталей типу 1.4435 / 316L. Електроди BÖHLER AWS E316L-17 мають хороші зварювально-технологічні властивості при зварюванні як на постійному, так і на змінному струмі, високу допустиму щільність струму, мінімальне розбризування, гладкий і чистий наплавлений валик; вологостійке покриття та герметичну упаковку електродів, що перешкоджає утворенню пористості. Високолегований сердечник електрода забезпечує найбільш надійну корозійну стійкість. Стійкість до міжкристалітної корозії до + 400 ° C;




– **AS P 316L** - електроди для зварювання AS P 316L мають дуже малий вміст водню. Відмінно зарекомендували себе при зварюванні, коли до стійкості до міжкристалітної корозії передбачені підвищені вимоги. Початковий і повторний підпал комфортний, шлак легко видаляється без залишків, шов має дрібношуйчастий вигляд.

Після зварювання всі шви та навколошовні зони мають бути очищені від слідів шлаку та зварювальних бризок. Допускаються окремі зварювальні бризки, зварені з металом. Усі зварні шви цистерни підлягають тавруванню, що дозволяє встановити зварювальника, який виконав шви. Результати неруйнівного контролю зварних швів повинні зберігатися на підприємстві-виробнику протягом 15-20 років, це загально прийнятий термін життєдіяльності контейнер-цистерни. Для виготовлення деталей, що піддаються зварюванню, застосовується сталь із гарантією зварюваності. Всі матеріали, що застосовуються для виготовлення контейнер-цистерни, повинні мати сертифікати підприємств-постачальників з відміткою погодження СО [7-9].

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Основним методом підтвердження якості зварювального виробництва є підтвердження виконання вимог до процесу випробування зварних швів і готової продукції: неруйнівний контроль зварних стикових з'єднань котла, швів приварювання люка, штуцерів робиться в обсязі 100% після остаточного збирання котла під наглядом СО. При контролі зварних з'єднань котла на наявність дефектів перевіряється просвічуванням рентгенівськими або гамма-променями. Дефектні ділянки зварних швів, виявлені під час неруйнівного контролю, мають бути видалені, знову заварені і знов пройти неруйнівний контроль. Методи та якості усунення дефектів повинні забезпечувати необхідну надійність та безпеку роботи контейнер-цистерни. Приклади основних дефектів наведені в Таблиці 1, відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 6520-1 [10-16], міжнародні стандарти якості наведено у таблиці 2.

Таблиця 1 – Основні дефекти зварювання

Фото дефекту	Вид дефекту	Опис/шляхи усунення дефекту
	непровари	усувають за допомогою підвищення потужності дуги зварювання, збільшенням динаміки дуги, і зменшенням її довжини. Для уникнення необхідно стежити за швидкістю зварювання та готувати сполучні кромки для зварювання
	кратери	можуть проявитися при різкому обриві дуги.
	гарячі та холодні тріщини	з'являються при застосуванні невідповідного матеріалу для присадки, або неправильного зварювання кратера
	пори	відносяться до найпоширенішого дефекту зварювальних швів, можуть утворюватися через бруд, поганий захист ванни, масла, фарби або іржі. Усунувши ці причини, кількість цих дефектів буде зменшено в кілька разів.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Кожен контейнер-цистерна після складання та проведення контролю зварних з'єднань (фланці, патрубки та інші деталі та вузли, що працюють під тиском, а також штатні металовироби їх кріплень) підлягає зовнішньому та внутрішньому огляду, гідравлічним випробуванням під тиском (див. рисунок 7-8), випробовується на герметичність, на міцність та щільність металу та зварних швів випробувальним тиском відповідно до характеристики контейнер-цистерни та конструкторської документації.



Рисунок 7 – Гідравлічні випробування



Рисунок 8 – Зовнішній огляд під час гідравлічних випробувань

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 2 – Міжнародні стандарти якості зварювального виробництва

Назва міжнародних стандартів	Опис вимоги
EN ISO 9606-1:2017 Qualification testing of welders - Fusion welding - Part 1: Steels (Кваліфікаційні випробування зварників. зварювання плавленням. Частина 1. Сталі)	Встановлення вимог для персоналу, залученого до зварювального виробництва
ISO 9606-2:2004 Qualification test of welders Fusion welding Part 2: Aluminium and aluminium alloys (Кваліфікаційні випробування зварників. зварка плавленням. Частина 2. Алюміній та алюмінієві сплави)	
ISO 9606-3:1999 Approval testing of welders Fusion welding Part 3: Copper and copper alloys (Кваліфікаційні випробування зварників. зварка плавленням. Частина 4. Нікель і нікелеві сплави)	
ISO 9606-5:2000 Approval testing of welders Fusion welding Part 5: Titanium and titanium alloys, zirconium and zirconium alloys (Кваліфікаційні випробування зварників. зварка плавленням. Частина 5. Титан і титанові сплави, цирконій і цирконієві сплави)	
ISO 14732:2013 Welding personnel. Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials (Зварювальний персонал – кваліфікаційні випробування операторів зварки і налагоджувачів зварювального обладнання для механізованої і автоматичної зварки металевих матеріалів)	
ISO 9712:2021 Non-destructive testing Qualification and certification of NDT personnel (Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю)	
ISO 17660-1:2006 Welding. Welding of reinforcing steel. Part 1: Load-bearing welded joints (Зварювання. зварювання арматурної сталі. Частина 1. Несучі зварні шви)	
ISO 3834-1:2021 Quality requirements for fusion welding of metallic materials Part 1: Criteria for the selection of the appropriate level of quality requirements (Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 1. Критерії для вибирання відповідного рівня вимог до якості)	Вимоги якості до зварювального виробництва
ISO 3834-2:2021 Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 2: Comprehensive quality requirements (Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Комплексні вимоги до якості)	
ISO 3834-3:2021 Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 3: Standard quality requirements (Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 3. Типові вимоги до якості)	
ISO 3834-4:2021 Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 4: Elementary quality requirements (Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 4. Елементарні вимоги до якості)	

## Машинобудування і зварювальне виробництво

<p>ISO 3834-5:2021 Quality requirements for fusion welding of metallic materials. Part 5: Documents with which it is necessary to conform to claim conformity to the quality requirements of ISO 3834-2, ISO 3834-3 or ISO 3834-4 (Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 5. Документи на відповідність вимогам якості ISO 3834-2, ISO 3834-3 або ISO 3834-4)</p>	
<p>ISO 17639:2022 Destructive tests on welds in metallic materials Macroscopic and microscopic examination of welds (Руйнуючі випробування зварних швів металевих матеріалів-Макроскопічне і мікроскопічне дослідження зварних швів)</p>	
<p>EN ISO 22825:2017 Non-destructive testing of welds Ultrasonic testing. Testing of welds in austenitic steels and nickel-based alloys (Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Контроль зварних швів в аустенітних сталях і сплавах на основі нікелю)</p>	
<p>EN ISO 17636-2:2022 Non-destructive testing of welds - Radiographic testing - Part 2: X- and gamma-ray techniques with digital detectors (ISO 17636-2:2022, Corrected version 2023-02) (Неруйнівне випробування зварних швів. Радіографічне випробування. Частина 2. Методи рентгенівського та гамма-випромінювання з цифровими детекторами (ISO 17636-2:2022, виправлена версія 2023-02)</p>	<p>Випробування на перевірка зварних швів</p>
<p>EN ISO 5178:2019 Destructive tests on welds in metallic materials. Longitudinal tensile test on weld metal in fusion welded joints (Руйнівні випробування зварних швів металевих матеріалів. Випробування на поздовжній розтяг металу швів у зварних з'єднаннях оплавленням)</p>	
<p>ISO 5817:2023 Welding. Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded). Quality levels for imperfections (Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів)</p>	
<p>ISO 17639:2022 Destructive tests on welds in metallic materials. Macroscopic and microscopic examination of welds (Випробування на руйнування зварних швів металевих матеріалів. Макроскопічне та мікроскопічне дослідження зварних швів)</p>	
<p>EN 764-5:2014 Pressure equipment - Part 5: Inspection documentation of metallic materials and compliance with the material specification (Обладнання, що працює під тиском. Частина 5. Документи щодо контролювання металевих матеріалів і відповідності специфікації на матеріали)</p>	
<p>EN 10222-4:2017/FPRA1 Steel forgings for pressure purposes - Part 4: Weldable fine grain steels with high proof strength (Поковки сталеві для роботи під тиском. Частина 4. Зварювальні дрібнозернисті сталі з високою границею плинності)</p>	<p>Технічні умови та технологічні аспекти зварювального виробництва</p>
<p>EN 10222-5:2017 Steel forgings for pressure purposes - Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels (Поковки сталеві для роботи під тиском. Частина 5. Мартенситні, аустенітні та аустенітно-феритні неіржавкі сталі)</p>	
<p>EN 10253-2:2021 Butt-welding pipe fittings - Part 2: Non alloy and ferritic alloy steels with specific inspection requirements</p>	

## Машинобудування і зварювальне виробництво

(Фітинги для стикового зварювання. Частина 2. Нелеговані та феритні леговані сталі з вимогами особливого контролювання)	
ISO 14172:2023 Welding consumables Covered electrodes for manual metal arc welding of nickel and nickel alloys. Classification (Сварочные материалы. Электроды с покрытием для ручной дуговой сварки никеля и его сплавов. Классификация)	
EN ISO 14175:2008 Welding consumables - gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes (Зварювальні матеріали - гази та газові суміші для зварювання плавленням та суміжних процесів)	
EN ISO 9692-2:2024 Welding and allied processes - Joint preparation - Part 2: Submerged arc welding of steels (Зварювання та споріднені процеси. Підготовка з'єднання. Частина 2. Дугове зварювання під флюсом сталі)	

### ВИСНОВКИ

Технологія зварювальних робіт при виробництві контейнер-цистерн повинна відповідати сучасним вимогам зварювального виробництва, таким як міжнародні стандарти ISO 3834, ISO 15614, ISO 9606-1, ISO 17662 та інші, впроваджуючи прогресивне зварювальне обладнання і сучасні технології зварювання. На всіх етапах зварювального виробництва контейнер-цистерн повинний бути використаний принципово якісний підхід, який ґрунтується на вимогах міжнародних стандартів серії ISO 3834. Сучасний виробник повинен акцентувати увагу на поліпшенні якості виготовлення контейнер-цистерн. Оскільки навіть при добре відпрацьованій технології зварки можливі дефекти, що приводять до зниження надійності контейнер-цистерн, необхідна розробка та впровадження сучасних методів неруйнівного контролю, відповідно до вимог міжнародних стандартів EN ISO 9712, EN ISO 17637, EN ISO 17640 та інших. Практика сучасних заводів-виробників контейнер-цистерн світу, таких як VAN HOOL, WELFET ODDY, Nantong CIMC Tank Equipment Co. Ltd., MCC TianGong Equipment Ltd., показує, що правильна організація процесів, а також стандартизоване застосування та поєднання методів і технологій зварки при контролі, дозволяють з великою вірогідністю оцінити якість зварних з'єднань і виготовити якісну продукцію.

#### Список використаних джерел

1. ДСТУ ISO 668:2015 Вантажні контейнери серії 1. Класифікація, розміри та номінальні характеристики (ISO 668:2013, IDT).
2. ISO 3834-2:2021, Quality requirements for fusion welding of metallic materials - Part 2: Comprehensive quality requirements/  
URL: <https://i2.saiglobal.com/management/display/index/4/397513//c106273dee3d5f625fd46a40358159bf>
3. EN ISO 9692-1:2013, Welding and allied processes - Types of joint preparation - Part 1: Manual metal arc welding, gas-shielded metal arc welding, gas welding, TIG welding and beam welding of steels/  
URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=79480](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=79480)

## Машинобудування і зварювальне виробництво

4. Nalle, C. Y., Aditya, M. B., Putra, F. G. A. P., Nalle, M. N., & Sumarta, R. P. (2024, January). Analysis of Electric Current on Aluminum Plate Welding Using MMA (Manual Metal Arc) Method. In Proceeding of International Conference on Artificial Intelligence, Navigation, Engineering, and Aviation Technology (ICANEAT) (Vol. 1, No. 1, pp. 144-146). <https://ejournal.icpa-banyuwangi.ac.id/index.php/icaneat/article/view/222>
5. Main types of performance. <https://plasmatec-weld.com.ua/news/osnovni-vidi-zvaryuvannya>
6. EN 13314:2002 Tanks for transport of dangerous goods —Service equipment for tanks — Fill hole cover URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=88219](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88219)
7. EN 764-5:2014 Pressure equipment - Part 5: Inspection documentation of metallic materials and compliance with the material specification (Обладнання, що працює під тиском. Частина 5. Документи щодо контролювання металевих матеріалів і відповідності специфікації на матеріали) URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/b8fa8758-31c8-459e-a9b0-8629ab3d8978/en-764-5-2014>
8. EN 10222-4:2017/FPRA1 Steel forgings for pressure purposes - Part 4: Weldable fine grain steels with high proof strength (Поковки сталеві для роботи під тиском. Частина 4. Зварювальні дрібнозернисті сталі з високою границею плинності) URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/f0d218fb-4953-4150-926e-01548851438e/en-10222-2-2017-fpra1>
9. EN 10222-5:2017 Steel forgings for pressure purposes - Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels (Поковки сталеві для роботи під тиском. Частина 5. Мартенситні, аустенічні та аустенітно-феритні неіржавкі сталі) URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/5c45a4bd-c201-48a6-ab42-97aaa30bca39/en-10222-5-2017>
10. EN 10253-2:2021 Butt-welding pipe fittings - Part 2: Non alloy and ferritic alloy steels with specific inspection requirements (Фітинги для стикового зварювання. Частина 2. Нелеговані та феритні леговані сталі з вимогами особливого контролювання) URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/e108feee-036e-4a57-bec5-16fd0c22201d/en-10253-2-2007>
11. ISO 14172:2023 Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of nickel and nickel alloys. Classification (Сварочные материалы. Электроды с покрытием для ручной дуговой сварки никеля и его сплавов. Классификация) URL: <https://www.iso.org/standard/81939.html>
12. ISO 6520-1:2007 Welding and allied processes Classification of geometric imperfections in metallic materials. Part 1: Fusion welding URL: <https://www.iso.org/ru/standard/40229.html>
13. EN 13094:2020+A1:2022 Tanks for the transport of dangerous goods - Metallic gravity-discharge tanks - Design and construction URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/bf39ff47-dde2-4116-9dbc-6609465f5b70/en-13094-2020a1-2022>
14. ДСТУ EN 13317:2019 Цистерни для перевезення небезпечних вантажів. Устаткування для обслуговування резервуарів. Комплект кришки люка (EN 13317:2002, IDT) URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id\\_doc=88344](https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=88344)
15. EN 14025:2003 Tanks for transport of dangerous goods —Service equipment for tanks — Vapour transfer valve URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=88854](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88854)
16. EN 14432:2014, Tanks for the transport of dangerous goods —Tank equipment for the transport of liquid chemicals and liquefied gases —Product discharge and air inlet valves/ URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=88236](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88236)
17. EN 14564:2019 Tanks for transport of dangerous goods – Terminology URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/594e6465-d3b0-478c-b9cc-a1d6af60d8ab/en-14564-2019>



18. EN 14595:2005 Tanks for transport of dangerous goods —Service equipment for tanks — Pressure and Vacuum Breather Vent/ URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id\\_doc=88354](https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=88354)

19. ISO 17662:2016 Welding — Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities/ URL:<https://i2.saiglobal.com/management/display/index/0/422624//443373246712813cdf82ccb37bf67a4d>

Zaharova I.V., Litvinenko Y.S., Svalyavin V.I.

### THE USE OF INTERNATIONAL STANDARDS IN THE WELDING PROCESS FOR THE PRODUCTION OF TANK CONTAINERS

*The transportation of goods today, during the period of martial law and blocking of borders, is extremely important and critical for the economy of Ukraine.*

*More and more often, carriers and owners choose to transport goods in tank containers by road and rail transport.*

*Gas transportation can be carried out using tank containers; liquid, powdery and granular dangerous goods, in which a pressure higher than 0.07 MPa is periodically generated for their emptying, etc. both on the territory of the country and abroad.*

*International transportation of various types of cargo is currently very necessary to support the country's economy, develop mechanical engineering, and build partnerships with European countries.*

*The analysis of transporters and owners of Ukraine makes it possible to conclude that in 2023-2024 there is a tendency to update container-tank fleets and in connection with this there is a need for the production of new products. The basis for high-quality production of tank containers, among other things, is a qualified welding technology that meets the requirements of international standards.*

**Keywords:** *welding, international standards, tank container, quality, welded joints, materials.*

*Стаття надійшла 20.03.2024 р.*

УДК 669.018.44:[620.178.16+620.193]:669.017

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303149](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303149)

Івахненко Є.І., Воденнікова О.С., Парахнєвич Є.М.,  
Воденніков С.А., Капустян О.Є.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО АБРАЗІВНО-КОРОЗІЙНОГО ЗНОШУВАННЯ

*Основні процеси горно-металургійного виробництва пов'язані з термічною обробкою матеріалів. Найпоширеніше застосування в цих технологіях мають обертальні термічні печі (технології прокалювання, спікання, обпалювання, сушіння, агломерації та інші). Надійність роботи обладнання обумовлена стійкістю до руйнування окремих деталей обмеженої номенклатури (порогові упори, безболтові полки, колосники, броні та інші). Литі деталі виготовляються з високолегованих аустенітних і аустеніто-феритних сталей марок типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ згідно з ДСТУ 8781:2018.*

*Аналіз експлуатації литих деталей за високих температур (900–1200 °С) в складних умовах абразивно-корозійного зношування показав, що їх руйнування відбувається по місцях*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

розташування в структурі легкоплавких з'єднань нестехіометричного складу, що формуються на межах і в приграничних зонах зерен металевої матриці. В процесі тривалої високотемпературної експлуатації (на протязі більше 10000 годин) вони сприяють формуванню порожнеч і тріщин в структурі металу, які в умовах інтенсивного абразивного зношування (зусилля дії абразиву не більше 20 КПа) приводять до руйнування металу. Встановлено, що процеси руйнування металу починаються в зонах з аустенітною структурою, яка сприяє протіканню дифузійних процесів. Дослідження процесів, які виникають при руйнуванні жаростійких металів, дасть можливість визначити шляхи усунення негативних явищ в металі і дати рекомендації щодо розробки нових термостабільних сплавів.

Аналіз науково-технічної літератури, ДСТУ, AISI, DIN-стандартів показав на недостатність інформації щодо даних по зносостійкості та жаростійкості високотемпературних сплавів. У зв'язку з цим виникла необхідність розробки економнолегованих сплавів зі стійкою структурою, підвищеними фізико-хімічними, механічними та спеціальними властивостями за нормальних і високих температур в умовах інтенсивного зношування.

Встановлено, що при виборі типу металу для умов високотемпературного абразивно-корозійного зношування необхідно віддавати перевагу структурно стабільній феритній основі з високотвердими частками, які відповідають принципу Шарпі.

**Ключові слова:** жаростійкі сплави, зносостійкість, жаростійкість, корозійна стійкість, абразивне зношування, обертальні печі.

**Постановка проблеми.** Раціональне використання ресурсів – одна із основних умов стабільного існування та розвитку підприємств у сучасному конкурентному середовищі. Особливо гостро проблема ресурсозбереження проявляється там, де значні витрати матеріалів спричинені інтенсивним зношуванням деталей машин [1]. Зношування в різних його проявах є основною причиною відмови частин машини або машини в цілому [2].

Втрати від абразивного зношування становлять понад 50 % втрат, пов'язаних із зносом взагалі [3–5]. Для роботи в умовах абразивного зношування при високотемпературній дії необхідно застосувати високолеговані сплави (насамперед леговані хромом, кремнієм та нікелем). Вибір сплаву з високим ступенем стійкості до окислення необхідний, але недостатній для забезпечення тривалої експлуатації виробу, оскільки більшість деталей в умовах високих температур руйнуються, працюють з періодичним нагріванням і охолодженням, таким чином вони реагують на зміни температури. Такі деталі виходять з ладу переважно через появу тріщин, викликаних перепадами температури деталі та накопиченням теплових напружень, що перевищують допустимі для даних умов експлуатації. Крім того, продовження роботи термостійких деталей супроводжується зміною розмірів останніх [6].

Тому дослідження жаростійких сплавів в умовах високотемпературного абразивно-корозійного зношування (при температурах 900–1200° С) є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для умов малонавантаженого абразивно-корозійного зношування при дії високих температур доцільне використовувати зносостійкі та жаростійкі сплави зі стабільними і стійкими структурами. Високий рівень властивостей зносокорозійної стійкості сплавів для деталей устаткування спікання матеріалів забезпечується, перш за все, за рахунок оптимальних варіантів легування (хромом, кремнієм та нікелем).

Безпосередньо сплави, які містять вуглець у вільному стані (графіт), в умовах абразивної дії мають низькі показники зносостійкості, враховуючи його мінімальну твердість.

Широке застосування в промисловості знаходять сплави, де вуглець утворює дисперсні хімічні сполуки, що мають значну твердість, порівнянну з твердістю абразивних матеріалів, які використовуються в промисловості [7]. Зростаюча кількість вуглецю в сталі до 1,2 % збільшує міцність сплавів. Подальше підвищення вмісту вуглецю до 4 % призводить до зниження рівня твердості, при цьому сплави, будучи дуже крихкими, не знаходять застосування. Проте, у ряді матеріалів, що наплавляються, граничні концентрації вуглецю можуть досягати до 5,2 % [8]. Тому визначення концентрації вуглецю, що забезпечує оптимальне співвідношення абразивної зносостійкості і тривалої жаростійкості, є актуальним завданням науки і вимагає уточнення.

Хром вводиться в зносостійкі сплави для отримання необхідного рівня властивостей і термічно стійкої структури. З підвищенням вмісту хрому (до 32 %) розчинність вуглецю в матриці сплаву зменшується, що полегшує виділення карбідних фаз і збільшує ступінь стійкості твердого розчину високохромистого фериту.

У дисперсійно-твердіючих сталях, що зношуються при температурах 500–850 °С, вміст хрому рекомендується в межах 18–25 % при співвідношенні аустеніт-ферит 30/70; 50/50; 70/30 %.

Втрати маси металу при високотемпературному зношуванні мінімальні при вмісті 35 % хрому і 0,5–2,5 % вуглецю. Структура такого сплаву складається з легованого хромистого фериту і комплексних карбідів типу  $M_{23}C_6$  і  $M_7C_3$  [9]. При зношуванні деталей в умовах високих температур необхідно враховувати вплив чинників, що додатково діють (окислення, насичення продуктами корозії та інші).

Дослідження комбінованого абразивно-корозійного зношування сталей, які вміщують хром [10], показали, що при низькій частоті дії абразивних частинок підвищену стійкість мають сталі з пониженим вмістом хрому (до 14 %), при високій частоті – високохромисті сталі (до 30 %).

Кремній застосовують для зносостійких сплавів в широкому інтервалі концентрацій – 0,4–15,0 %. Будучи елементом, який одночасно підвищує міцність, твердість і покращує захисні функції при окисленні металу, кремній обмежено розчиняється в  $\alpha$  – і  $\gamma$  – залізі, активно звужує область аустеніту. При концентраціях більше 3% кремнію спостерігається тенденція до виділення інтерметалідних з'єднань, які із-за високої крихкості обмежують застосування матеріалів в промисловості і можуть використовуватися тільки в спеціальних сплавах (феросіліди, сілалі, сендасти).

Кремній утворює нестійкі карбіди і, як правило, концентрується в твердому розчині, дозволяє при легуванні в межах 0,8–2,5 % вирішувати проблеми міцності і зносостійкості металевої матриці [11].

У жаростійких, жароміцних, зносостійких сплавах з комплексами дисперсних карбідів концентрація кремнію складає 1,0–3,0 %. Збагачення кремнієм навколо карбідних зон затрудняє дифузію вуглецю, що перешкоджає коагуляції карбідів, які забезпечують опір зношуванню поверхні металу.

Відома здатність кремнію підсилювати схильність сталей до теплової крихкості [12, 13], в зв'язку з чим його вміст обмежується до 2,7 %. Кремній підсилює перерозподіл карбідної фази при тривалих високотемпературних витримках, де зосередження карбідів поблизу міжзерених зон приводить до втрат сплавами структурної стабільності. У зв'язку з цим питання оптимального вмісту кремнію при сумісному легуванні з вуглецем і хромом вимагає уточнення.

Так безпосередньо вміст нікелю в більшості зносостійких сплавів як українських, так і закордонних виробників знаходиться в межах 0,8–25,0 % (згідно даних ДСТУ, AISI, DIN-стандартів). Збільшення вмісту нікелю стабілізує аустеніт в сплавах, які при високій міцності

## Машинобудування і зварювальне виробництво

і пластичності після відповідної термічної обробки, що забезпечує дисперсійне твердіння, можуть рекомендуватися для умов абразивного зношування при температурах 550–850 °С. При температурах більше 850 °С зносостійкість сплавів знижується, що пов'язане з процесами зворотного розчинення дисперсних утворень (карбідів, інтерметалідів) і переходом їх в твердий розчин аустеніту.

Таким чином, при розробці високотемпературних абразивостійких сплавів застосування нікелю вельми перспективно при оптимізації складу багатокомпонентної системи Fe-C-Cr-Si-Ni.

**Мета досліджень.** Вивчення структурних складових литих сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ, які традиційно використовуються в промисловості для умов одночасної дії зношування і високих температур (900–1200° С); встановити особливості руйнування структурних складових сталей в процесі експлуатації деталей, які швидко зношуються, визначеної номенклатури.

**Основний матеріал дослідження.** Високотемпературну абразивну зносостійкість визначали із застосуванням сировини промислової переробки на установці прискорених випробувань ЗП-1 ТЛВ, розробленій в Національному університеті «Запорізька політехніка» [13]. Для металографічного аналізу використовували мікроскоп МІМ-8. При визначенні механічних властивостей матеріалів випробування зразків на розрив під час розтягування проводили на розривній машині типу УРМ-50 з зусиллям 5 тонн. Твердість визначали за Брінеллем згідно з ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М.

Одній з основних технологічних операцій при виробництві сировини в горно-металургійній промисловості є термічна обробка при температурах 900–1200°С. Ця технологія передбачає використання барабанних печей спікання, що обертаються, з холодильними пристроями, продуктивністю 150 тонн в годину. В печі сипкий матеріал рухається назустріч гарячому потоку газу, працюючого пальника, термооброблюється (обпалюється, спікається) і охолоджується. Частинки обробленого матеріалу переміщуються по нахилій поверхні за рахунок періодичного зсипання верхнього клину маси при досягненні їм кута скосу ( $\alpha=10-15^\circ$ ). Рухомі шари матеріалу (товщина 200–300 мм) печі, що контактують з стінками деталей, впливають із зусиллям до 20 КПа без ударних навантажень. Даний процес дії частинок матеріалу прийнято розглядати як малонавантажене абразивне зношування.

В роботі вивчали склади компонентів різних матеріалів: цементного клінкеру, бокситів, спеку глинозему, коксу, агломерату (масова частка елементів складає: 43–50 %  $Al_2O_3$ , 6–9 %  $Al_2O$ , 6–8 %  $Na_2O$ , 46 %  $CaO$ , 8,2–10,1%  $SiO_2$ , 17,4–21,6 %  $Fe_2O_3$ , 1,4–3,1 %  $MgO$ , 0,4–0,9 % S, 1,9–3,0 %  $CO_2$ , 3,6–4,4 %  $H_2O$ ). Як правило, ці матеріали містять комплекс високотвердих частинок. Показано, що мікротвердість частинок знаходиться в межах 9–11 ГПа. Частишки мають окатану форму (коефіцієнт форми –  $k_f = 8-10$ ) розміром 0,1–6,0 мм. Лужний модуль матеріалу дорівнює 1,0; вапняний модуль – 2,0; вологоємність складає 13 %, пористість – 20 %. Безперервна дія частинок сировини, що є хімічно агресивним середовищем, підсилює високотемпературну корозію металу деталей в результаті порушення щільності захисної оксидної плівки, а переміщення великих мас абразивних матеріалів протягом тривалого часу (більше 6000 годин) прискорює ці процеси.

При роботі за складних умов, зокрема високотемпературного абразивно-корозійного зношування, литі деталі трубчастих обертальних печей (порогові упори, броні, безболтові полки, футеровки та інші), виготовлені зі сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ та 35X23H7CЛ, мають низький термін служби (від 2 до 6 місяців) і відповідно піддаються значним несправностям (7 %).

Результати металографічних досліджень сталей типу 35X18H24C2Л та 40X24H12CЛ до



## Машинобудування і зварювальне виробництво

експлуатації та після експлуатації протягом 4000 годин при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлено на рис. 1–2.

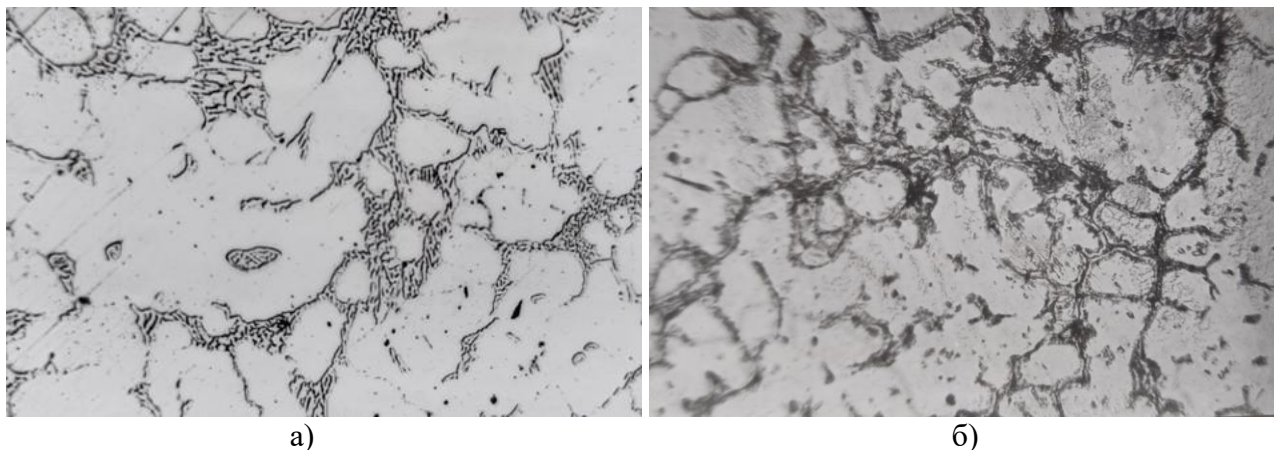


Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 35X18H24СЛ, х 500: а) до експлуатації; після експлуатації протягом 4000 годин при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

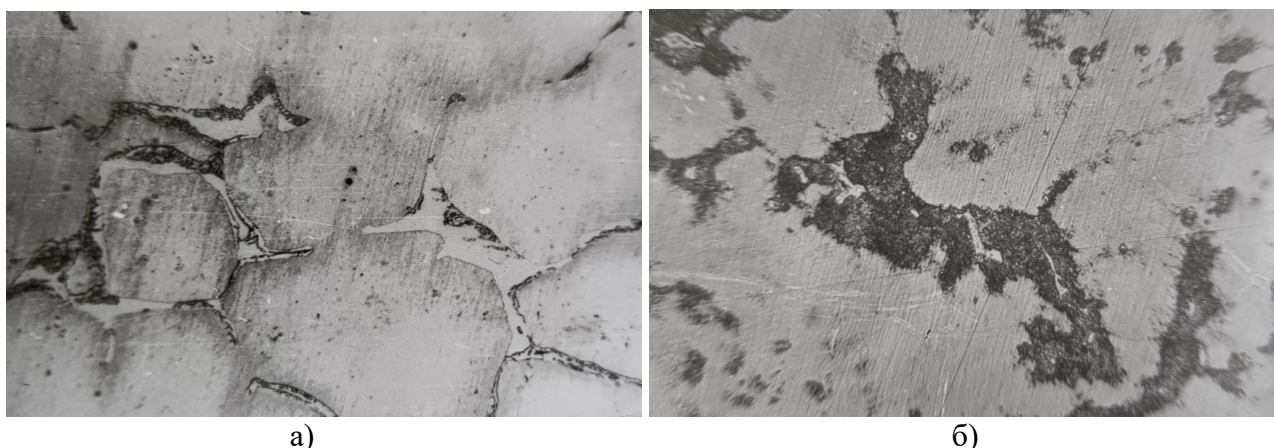


Рисунок 2 – Мікроструктура сталі 40X24H12СЛ, х 500: а) до експлуатації; б) після експлуатації протягом 4000 годин при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Аналіз механічних і спеціальних властивостей сталей, які відпрацювали номінальний термін служби (таблиця 1), показав, що значення межі міцності на розтягування, показники твердості після випробувань за нормальних (при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і високих температур (при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) відповідали вимогам ДСТУ 9781:2018. Проте при експлуатації деталей властивості металу значно знижувалися, що пов'язане з необоротними перетвореннями, які відбуваються в структурі металу. Жаростійкість ( $h_{\text{ум}}$ ) сталей змінювалася в широких межах від  $2,5$  до  $7,2 \cdot 10^{-6}$  м. При цьому структурні перетворення супроводжувалися виділенням з'єднань, що швидко окислюються, та кількість яких збільшувалася в структурі при тривалій роботі деталей.

Металографічним та петрографічним аналізами сталей встановлено виділення по межах грубозернистої (60–120 мкм) аустенітної матриці легкоплавкої фази. Ця фаза характеризується металевою складовою з розподіленими в ній дисперсними метастабільними карбідами (субкарбідами) типу  $[(\text{Me}_x\text{C}_y) (\text{Me}_x\text{O}_y)]$ .



## Машинобудування і зварювальне виробництво

Таблиця 1 – Механічні та спеціальні властивості сталей вживаних для відповідальних деталей обертальних печей

Марка сталі	Структура	Механічні та спеціальні властивості сталей				
		Межа міцності на розтягування, $\sigma_b$ , МПа при температурі		Твердість при $t=20\text{ }^\circ\text{C}$ , НВ, МПа	Жаростійкість (показник корозії), $h_{\text{ум}}$ , $10^{-6}$ м	Втрати маси металу при $t=1000\text{ }^\circ\text{C}$ , G, $\text{г/м}^2\cdot\text{год}$
		20 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$			
35X18H24C2Л	A+K	$\frac{538-541}{376-398}$	129–138	$\frac{1610-1630}{1350-1400}$	4,6–7,2	1,53–2,11
40X24H12CЛ	A+Ф+K	$\frac{490-503}{401-426}$	115–126	$\frac{1740-1760}{1500-1570}$	3,5–4,1	1,09–1,45
35X23H7CЛ	Ф+A+K	$\frac{540-548}{432-445}$	121–135	$\frac{1750-1780}{1620-1640}$	2,5–3,2	0,81–0,98

Примітка: Чисельник – значення параметрів до експлуатації; знаменник – значення параметрів після експлуатації; А – аустеніт, Ф – ферит, К – карбід.

Мікротвердість фаз марки 40X24H12CЛ визначалась згідно з загальноприйнятою методикою відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007. Аналіз даних таблиці 2 показує, що мікротвердість субкарбідів значно нижче за відомі з'єднання типу  $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$  та  $(\text{Fe,Cr})_7\text{C}_3$  (значення Н $\mu$  13,0 та 18,5 ГПа відповідно).

Таблиця 2 – Мікротвердість фаз сталі марки 40X24H12CЛ

Зона вимірювання	Мікротвердість, Н $\mu$ , МПа
Зерно аустеніту	$\frac{3390-2760}{3050}$
Межа зерна	$\frac{3780-3390}{3680}$
Прикордонна фаза	$\frac{4820-3390}{4010}$
Прикордонна фаза, що містить дисперсні з'єднання карбідів і оксидів	$\frac{6360-4260}{5510}$

Примітка: Чисельник – максимальні і мінімальні значення; знаменник – середні значення.

Разом з субкарбідами у складі сумішей виявлена присутність з'єднань нестехіометричного складу (субоксида):

– монооксид кремнію ( $\text{SiO}$ ), якому відповідають оптичні константи становлять  $N_o = 2,15$ ,  $N_e = 2,06$ ;

– монооксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}$ ), якому відповідають оптичні константи становлять  $N_o = 2,19$ ,  $N_e = 2,13$ , що істотно відрізняються від відомих з'єднань типу  $\text{SiO}_2$  ( $N_o = 1,53$ ,  $N_e = 1,55$ ) і  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $N_o = 1,76$ ,  $N_e = 1,78$ ). Визначення оптичних констант  $N_o$ ,  $N_e$  здійснювали з використанням стандартних імерсійних рідин згідно з табличними даними. Характерною особливістю цих фаз є відсутність в їх складі включень кристалічного окислу алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – звичайного продукту реакцій розкислювання. Наявність же нижчих оксидів в структурі металу свідчить про відновлювальне середовище внаслідок надлишку розкислювача, що вводиться.

Ці з'єднання помітно знижують міцність і пластичність сталей (див. таблицю 1). Крім того, низька температура плавлення досліджених фаз сприяє інтенсивному окисленню металу

## Машинобудування і зварювальне виробництво

і, як наслідок, абразивному зношуванню деталей при високих температурах.

Аналогічні особливості виявляються і у сталей типу 35X18H24C2Л та 35X23H7СЛ.

При нагріві металу до 1000 °С субкарбіди (кремнію, хрому, алюмінію та інші), що знаходяться у складі приграничної фази, стають газоподібними і поверхнево-активними. Частина з'єднань розчиняється в металі, а частина – піддається сублімації. У місцях руйнування з'єднань з'являються шпори, знеуглецьовані зони і тріщини, що виникають під впливом термонапружень. Руйнування і сублімація з'єднань змінюється окислювальними процесами з формуванням з'єднань вищих валентностей. При цьому стінки шпор, що утворилися, і знеуглецьовані зони також починають інтенсивно окислюватися. Поверхня металу і внутрішні ділянки перетворюються на суцільні оксидні плівки, які швидко віддаляються інтенсивним потоком абразивних частинок великої твердості.

## ВИСНОВКИ

1. При дослідженні жаростійких сплавів (на прикладі сталей типу 35X18H24C2Л, 40X24H12СЛ та 35X23H7СЛ) в умовах високотемпературного абразивно-корозійного зношування (при температурах 900–1200°С) визначено їх оптимальні показники: жаростійкість (глибинний показник корозії)  $h_{ум} \leq 4,0 \cdot 10^{-6}$  м; порівняльна зносостійкість  $\varepsilon \geq 1,0$  при  $t=1000$  °С; межа міцності на розтягування  $\sigma_B \geq 400$  МПа при  $t=20$  °С; межа міцності на розтягування  $\sigma_B \geq 100$  МПа при  $t=1000$  °С; твердість при  $2000 \leq HB \leq 3700$  при  $t=20$  °С і після витримки протягом 100 годин (при  $t=1000$ °С)  $1800 \leq HB \leq 4300$  МПа.

2. Встановлено, що при виборі металу для умов високотемпературного абразивно-корозійного зношування необхідно віддавати перевагу структурностабільній феритній основі з високо твердими частками, які відповідають принципу Шарпі.

### Список використаних джерел

1. Брыков М.Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании: научное издание / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко, А.В. Ефременко. – Херсон: Гринь Д.С., 2014. – 364 с.
2. Hesse O. Investigation on friction surface of high-carbon low-alloyed steel after abrasive wear / O. Hesse, Y. Kalinin, I. Petryshynets, M. Kunert, V. Efremenko, M. Andrushchenko, M. Osipov, M. Brykov // Problems of Tribology, 2019. – No 24(3/93). – pp. 22–28. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-93-3-22-28>
3. Natarajan K.A. Corrosive and erosive wear in magnetic taconite grinding / K.A. Natarajan, S.C. Reimer, I. Iwasaki // AIMMPE Transm. – 1984. – V.276. – pp.10–44.
4. Radziszewski P. Exploring Total Media Wear / P. Radziszewski // Minerals Engineering. – 2002. – V. 15 – pp. 1073–1087.
5. Rajagopal V. The properties and performance of cast iron grinding media / V. Rajagopal, I. Iwasaki // Miner. Process. Extr. metal. Rev. – 1992. – V. 11. – pp. 75–106.
6. Yamshinskij M. Heat-resistance of heat-resistant Cr-Al steels for work under extreme conditions / M. Yamshinskij // International Scientific and Practical Conference «WORLD SCIENCE». Proceedings of the IInd International Scientific and Practical Conference «Science and Education - Our Future» (November 22–23, 2015, Ajman, UAE). 2015. – No 4(4). –Vol.1. –pp. 55–57.
7. Мазур В.І. Сплави на основі заліза: підручник / В.І. Мазур, В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. – 500 с.
8. Ямшинський М.М. Термостійкість жаростійких сталей для роботи в екстремальних

## Машинобудування і зварювальне виробництво

умовах / М.М. Ямишинський, Г.Є. Федоров, К.С. Радченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2015. – № 3. – С. 33–37.

9. Андрущенко М.І. Спроможність до само зміцненню поверхні тертя в процесі абразивного зношування і зносостійкість сталей в залежності від вмісту вуглецю і хрому / М.І. Андрущенко, Р.А. Куліковський, М.Ю. Осипов, А.В. Холод, А.Е. Капустян // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №1. – С. 92–99.

10. Barker K. Synergistic abrasive-corrosive wear of chromium containing still / K. Barker, A. Ball // Brit. Corrosion, 1989. – No 3. – pp. 222–228.

11. Верховлюк А.М. Технології одержання металів і сплавів для ливарного виробництва: навчальний посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко // за ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – Київ: Видавничий дім «Вініченко», 2016. – 224 с.

12. Куцова В.З. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями: підручник / В.З. Куцова, М.А. Ковзель, О.А. Носко. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 348 с.

13. Більченко О.В. Леговані сталі: навч. посіб. / О.В. Більченко, О.І. Дудка, В.Г. Хижняк, С.М. Чернега. – Київ: Кондор, 2009. – 98 с.

14. Федьков В.О. Лабораторна установка для прискорених випробувань зносостійких сплавів при високих та низьких температурах: заводська лабораторія / В.О. Федьков, Є.І. Івахненко. 1992. – Т.58.– №12. – С. 55–56.

**Ivakhnenko E.I., Vodennikova O.S., Parahnevich E.M., Vodennikov S.A., Kapustian O.Ye.**

## RESEARCH OF HEAT-RESISTANT ALLOYS IN CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE ABRASIVE-CORROSIVE WEAR

*The main processes of mining and metallurgical production are related to heat treatment of materials. The most common application in these technologies are rotary thermal furnaces (calcining, sintering, firing, drying, agglomeration and other technologies). The reliability of the equipment is determined by the resistance to destruction of individual parts of a limited range (threshold stops, boltless shelves, grates, armor, and others). The cast parts are made of highly alloyed austenitic and austenitic-ferritic steels of the 35X18H24C2Л, 40X24H12CЛ and 35X23H7CЛ brands in accordance with DSTU 8781:2018.*

*Analysis of the operation of cast parts at high temperatures (900–1200 °C) in complex conditions of abrasive and corrosive wear showed that their destruction occurs at locations in the structure of low-melting compounds of non-stoichiometric composition, which are formed at the boundaries and in the border zones of the grains of the metal matrix. In the process of long-term high-temperature operation (for more than 10000 hours), they contribute to the formation of voids and cracks in the metal structure, which in conditions of intensive abrasive wear (abrasive action force no more than 20 KPa) lead to the destruction of the metal. It has been established that the processes of metal destruction begin in zones with an austenite structure, which facilitates diffusion processes. The study of the processes that occur during the destruction of heat-resistant metals will make it possible to determine ways to eliminate negative phenomena in the metal and give recommendations for the development of new heat-stable alloys.*

*The analysis of scientific and technical literature, DSTU, AISI, DIN standards showed insufficient information on data on wear resistance and heat resistance of high-temperature alloys. In this connection, there was a need to develop economically alloyed alloys with stable structure,*

*increased physico-chemical, mechanical and special properties at normal and high temperatures under conditions of intensive wear.*

*It has been established that when choosing the type of metal for conditions of high-temperature abrasive-corrosive wear, it is necessary to give preference to a structurally stable ferrite base with highly hard particles that comply with the Charpy principle.*

**Key words:** *heat-resistant alloys, wear resistance, heat resistance, corrosion resistance, abrasive wear, rotary furnace.*

*Стаття надійшла 25.04.2024 р.*

УДК 621.762.02:669.295

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303158](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303158)

Джуган О. А., Ольшанецький В. Ю., Капустян О.Є., Буліш С.О.

### МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ НЕСФЕРИЧНИХ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Аддитивні технології є перспективним напрямком у розвитку таких галузей промисловості як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування. Водночас висока собівартість процесу 3D-друку та відсутність альтернативної (сферичному порошку) сировини перешкоджає широкому розповсюдженню зазначених технологій. У даній роботі показано принципову можливість використання більш дешевих порошкових матеріалів на основі титану, що за хімічним складом відповідає марці сплаву VT1-0, з несферичною формою частинок, що отримують за технологією гідрування-дегідрування і призначених для виготовлення об'ємних виробів різними методами адитивних технологій. Методом профілювання насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів мінімальної товщини із застосуванням різних фракцій показано, що оптимальна зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів. Використання таких порошоків має забезпечити більш щільну та однорідну структуру у порівнянні з порошками сферичної форми. Розглянуто можливість застосування різних джерел енергії та способів для пошарового нарощування матеріалу при формуванні виробів – автоматичне електронно-променеве наплавлення та ручне аргонодугове наплавлення. Визначено оптимальні режими процесів покрокового сплавлення тонких шарів порошкових матеріалів. Описано перевагу запропонованих порошоків порівняно із порошками сферичної форми, що переважно застосовуються на сьогоднішній день. Проведено металографічні дослідження зразків, отриманих з несферичних порошоків, що показало високий рівень адгезії шарів без видимих несучільностей.*

**Ключові слова:** *адитивні технології; титан; порошок; частинка; форма; фракція; поверхня; шар; компактування; сплавлення; структура; властивості.*

**Постановка проблеми.** Застосування адитивних технологій є перспективним напрямком у розвитку різних галузей промисловості (особливо таких як високоточне машинобудування та авіадвигунобудування), що дає змогу одержувати готові вироби, а також виготовляти необхідне в промисловості технологічно складне оснащення. Найважливішим завданням при цьому є заміна наявних дорогих імпортованих порошкових матеріалів дешевшими аналогами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ці технології дають змогу об'єднати в собі головні переваги таких методів отримання виробів, як порошкова металургія, ливарне

## Машинобудування і зварювальне виробництво

виробництво та наплавлення. Зазначені технології передбачають виготовлення виробу за даними цифрової моделі (або САD-файлу) методом пошарового додавання матеріалу. Процес пошарового нарощування виробів різними методами адитивних технологій набуває дедалі більшої популярності, оскільки має низку значних переваг над наявними, традиційними методами виготовлення, обробки та ремонту деталей. Формування виробу відбувається покроково, відповідно до конфігурації перерізу цифрової моделі і з'єднання кожного наступного шару з попереднім, (замість існуючої технології обробки металів різанням, коли матеріал нібито "віднімається") [1–4]. Технології 3D-друку дали змогу об'єднати в собі не тільки переваги порошкової металургії, як-от високий коефіцієнт використання матеріалу, чого не вдається досягти методами лиття, а й переваги ливарного виробництва як от одержання деталей складної форми та різної конфігурації.

Сьогодні зазначені технології успішно застосовуються для виробництва виробів із пластику та металу, але вже ведуться активні роботи з використання як сировини для таких технологій різних інтерметалідних і керамічних порошоків. Однак викликані при цьому складнощі процесу зменшують номенклатуру металевих виробів, одержуваних за допомогою адитивних технологій [5–10]. Таким чином, розвитку адитивних технологій у секторі промисловості, безумовно, сприяло б істотне розширення номенклатури металопорошкових матеріалів різної морфології. Якщо на початку 2000-х років це був перелік із щонайбільше 5-6 найменувань, то сьогодні намагаються використовувати десятки видів різноманітних композицій: від звичайних конструкційних сталей до жароміцних сплавів і дорогоцінних металів здебільшого порошоків сферичної форми [2–4]. Водночас порошки зі спеціальних сплавів (наприклад титанові) мають дуже обмежену номенклатуру видів цих матеріалів.

До основних переваг адитивних технологій можна віднести наступні:

1. можливість виготовлення деталей складної геометрії та різної конфігурації;
2. можливість оперативно змінювати геометрію деталей;
3. високий коефіцієнт використання матеріалу;
4. різні методи 3D-друку дають змогу використовувати їх для відновлення і ремонту виробів, а також дають змогу виготовляти деталі із закритими порожнинами.

Незважаючи на всі переваги, які надає використання 3D-друку, залишається низка проблем, що стримують поширення цієї технології в промисловості. Однією з них є необхідність ретельних досліджень властивостей (механічних, фізичних) виробів, що одержують з різних порошкових матеріалів, залежно від таких чинників, як вплив фракційного складу і форми самих частинок, що безумовно дуже важливо в таких відповідальних галузях виробництва, як авіабудування. При цьому слід зазначити, що на сьогоднішній день вже існує низка деталей, виготовлених методами 3D-друку, які встановлюються на газотурбінні двигуни виробництва зарубіжних компаній. Ще однією важливою проблемою є дорожнеча обладнання для 3D-друку, хоча, виходячи з досвіду підприємств, які впроваджують у своєму виробництві технології пошарового вирощування виробів, можна зробити висновок, що головним стримуючим фактором на шляху до широкого застосування адитивних технологій є вартість сировини для об'ємного друку. Особливо це позначається при використанні порошоків титану, як легованих, так і нелегованих, і основну роль у ціноутворенні тут відіграє не стільки вартість легувальних елементів, скільки вартість самої технології одержання порошоків необхідної сферичної форми (яка складає близько 300–500 доларів за кілограм). Таким чином, існує необхідність розробки порошоків для адитивних технологій. Тому основним завданням, поставленим у даній роботі, було визначити можливість застосування титанових порошоків несферичної форми, які пройшли процеси гідрування та дегідрування, в адитивних технологіях для отримання готових виробів. Процес гідрування титану (губчастого) полягає в прямому насиченні воднем титану і проходить за температур 400...600° С. Гідрування титану губчастого проводиться з метою насичення і окрихчування вихідного матеріалу для



подальшого подрібнення. Процес дегідрування здійснюється за температур 700...900° С і полягає в дегазації гідриду титану за температур розкладання гідриду:  $TiH_2 \rightarrow Ti + H_2$ . Аналіз технологічних показників виробництва порошків, їх переваг і недоліків показав, що найперспективнішим матеріалом для 3D-друку є порошок, одержуваний за гідридною технологією. Такий матеріал має низькорозвинені поверхні граней частинок порошку, наближених за формою до сфероїдів. Він менш, ніж інші, забруднений домішками, оскільки водень сприяє очищенню титану при дегідруванні [11]. Сукупність технологічних рішень виробництва таких порошків титану дає змогу одержувати більш щільний матеріал із меншим вмістом шкідливих домішок, що підвищує якість порошку та покращує морфологію окремих його частинок. На рис. 1 показано зовнішній вигляд і структуру сферичних і несферичних порошків. Зазвичай вважають, що найкращими за формою частинками є сфероїди приблизно однакового розміру [1, 2], при цьому кожен шар таких частинок зазвичай компактують шляхом докладання незначних поверхневих зусиль (наприклад, за допомогою валика, що обертається). Оскільки подальша технологічна операція передбачає спікання або проплавлення шару з такого роду частинок [8–10], то необхідно від самого початку передбачити можливість використання суто термодинамічних підходів для отримання найкращих результатів як за часом завершення процесу спікання або сплавлення (адгезії) шарів, так і за якістю поверхні, що формується.

**Мета досліджень.** Оцінка можливості використання титанових порошків, які попередньо піддавали операціям гідрування та дегідрування в технологічному ланцюжку їх виробництва для подальшого отримання виробів різними методами адитивних технологій.

**Основний матеріал дослідження.** На рис. 1 наведено реальні частинки металічного порошку (сферичного титану та порошку титану, отриманого за технологією гідрування-дегідрування [11–14]), що відповідають спрощеним моделям, представленим у роботі [12–15], різних типів укладання гіпотетичних частинок тієї чи іншої форми.

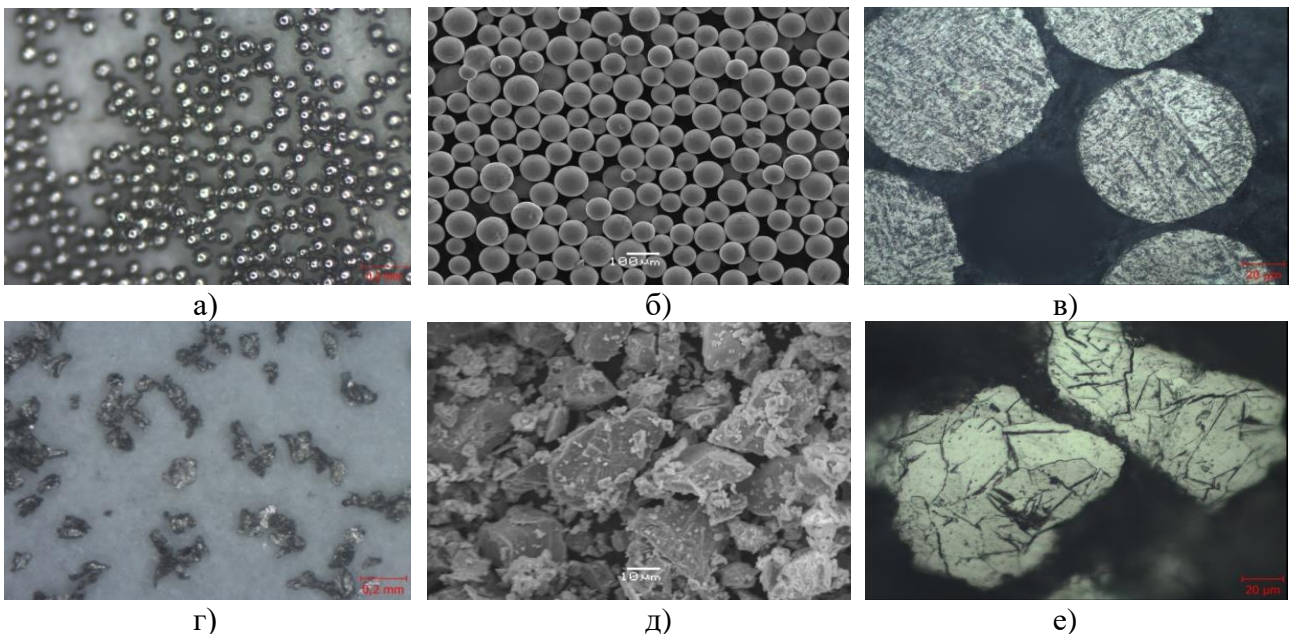


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд і структура сферичних (а, б, в) і несферичних (г, д, е) порошків титану (фракція – 100 мкм)

Питання про характер сполучення частинок на контактних поверхнях (точках і лініях у плоских моделях) можна приблизно розв'язати за допомогою прогону голівки профілометра-профілографа уздовж і впоперек насипаних і закріплених із підкладкою порошкових шарів

## Машинобудування і зварювальне виробництво

мінімальної товщини (одинарної укладки), тобто шарів, що мають мінімальну висоту. Для отримання зазначених об'єктів дослідження нами були використані скляні плоскі зразки, вкриті тонким шаром малов'язкої клейової основи. Попередні графічні результати експериментів із використанням зазначеного приладу наведено на рис. 2.

Вони свідчать про те, що у випадку порошоків різних фракцій "найбільш гладка" зовнішня поверхня отримується за умови використання порошкового матеріалу, в якому частинки мають форму багатогранників, умовно прийнятих за об'єкти, які за формою наближаються до частинок, у вигляді гексаєдрів та їхніх різновидів.

Це свідчить про те, що орієнтація на використання порошоків такого типу забезпечить, за умови використання адитивних технологій, достатнє і краще, у порівнянні із порошковими матеріалами зі сферичною формою частинок, вихідне ущільнення, що має сприяти отриманню щільніших та однорідніших шарів 3D зразків під час їх формування шляхом пошарового спікання або сплавлення [6, 7, 12].

На наведеній нижче (рис. 3) мікрофотографії багат шарового зразка з нелегованого титану (отриманого сплавленням за технологією електронно-променевого сплавлення) показано досить хороший рівень адгезії шарів без будь-яких видимих дефектів, типу несущільностей (раковин або непроплавів).

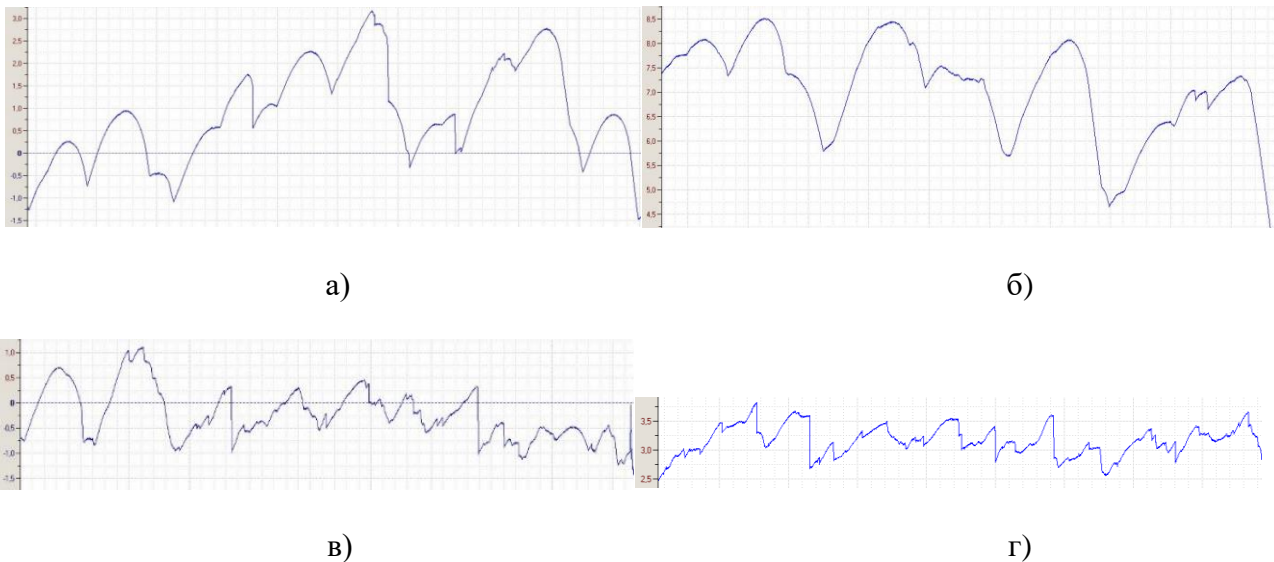


Рисунок 2 – Результати дослідження порошоків на профілометрі-профілографі:  
 а, б) сферичний порошок фракцією -200+100 мкм; в) несферичний порошок фракцією - 250+100 мкм; г) несферичний порошок фракцією -50 мкм.

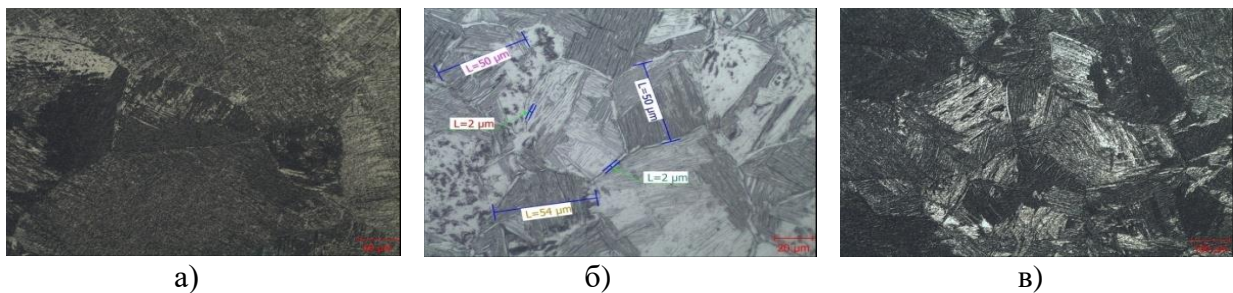


Рисунок 3 – Мікроструктура дослідних зразків отриманих за технологією пошарового нарощування з титанового порошку (фракція -250+100 мкм): а) метод електронно-променевого наплавлення б, в) метод аргонодугового наплавлення

Наплавлення порошку за хімічним складом, що відповідає марці сплаву ВТ1-0, здійснювали методом ЕПН (електронно-променевого наплавлення) на установці ЕПЗ-20, з попереднім насипанням порошку. Швидкість наплавлення становила 1,11 мм/с; струм наплавлення 40...50 мА; струм фокусування 605...610 мА. Аргонодугове наплавлення проводили вручну з пошаровим насипанням і оплавленням порошку в камері з контрольованим середовищем (інертний газ – аргон). Режим наплавлення був приблизно однаковий для всіх зразків (зварювальний струм до 30 А, джерело струму Fronius TT3000).

### ВИСНОВКИ

З наведених вище рисунків видно, що отриманий (сплавлений) шар матеріалу характеризується наявністю рівновісної, однорідної, щільної та безпористої структури без будь-яких видимих дефектів (у вигляді несущільностей або пор). При цьому, структура дослідних зразків наближена до структури заготовок, отриманих методами лиття. Таким чином, можна констатувати, що відносно дешевий порошок, отриманий за технологією гідрування-дегідрування, є перспективним з погляду заміни наявних дорогих порошків титану сферичної форми.

### Список використаних джерел

1. Джуган А. А. Получение качественных порошковых материалов с несферической формой частиц из деформированных заготовок / А.А. Джуган, В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – №2. – С. 114 – 116.
2. Джуган А.А. Аддитивные технологии и возможности их применения в современных условиях / А.А. Джуган, А.В. Овчинников, В.Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2014. – №2. – С. 96 – 101.
3. Балака Е.В. Основные факторы влияния на процесс формообразования деталей с помощью технологий послойного выращивания (rapid prototyping) / Е.В. Балака // Високі технології в машинобудуванні. – 2011. – №1. – С. 29 – 36.
4. Волхонский А.Е. Методы изготовления прототипов и деталей агрегатов различных изделий промышленности с помощью аддитивных технологий / А.Е. Волхонский, К.В. Дудков // Образовательные технологии. – 2014. – №1. – С. 127 – 143.
5. Bin Xiao Partial melting and resolidification of metal powder in selective laser sintering / Bin Xiao and Yuwen Zhang // Journal of thermophysics and heat transfer. – 2006. – Vol. 20, No. 3. – p. 439 – 448.
6. Овчинников А.В. Моделирование процесса 3-d печати с использованием несферических гидрированных-дегидрированных порошков титана / А.В. Овчинников, А.А. Джуган, А.В. Шевченко, [и др.] // Стародубовские чтения. Сборник трудов. – 2015. С. 222 – 228.
7. Овчинников А.В. Применение несферических гидрированных и дегидрированных порошков титана для получения изделий в аддитивных технологиях / А.В. Овчинников, В.Е. Ольшанецкий, А.А. Джуган // Вестник двигателестроения. – 2015. – №1. – С. 114 – 117.
8. Wei-Chin Huang Microstructure-controllable laser additive manufacturing process for metal products / Wei-Chin Huang, Chuan-Sheng Chuang, Ching-Chih Lin // Physics Procedia 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering LANE 2014, Vol. 56, 2014, pp 58–63.



9. *Cokmak G.* The processing of Mg-Ti for hydrogen storage; mechanical milling and plasma synthesis / *G. Cokmak, Z. Karoly, I. Mohai, T. Ozturk, J. Szepevolguy* // International journal of hydrogen energy. – 2010. – №35. – p. 118 – 125.
10. *D.D. Gu* Laser Additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms [Electronic resource]: / *D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe* / International Materials Reviews 57, 2012, No.3, pp.133–164 ISSN: 0950-6608, Access mode: <http://www.maneyonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000014>.
11. *Івасишин О.М.* Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану / *О.М. Івасишин, О.Б. Бондарчук, М.М. Гуменяк, Д.Г. Саввакін* // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, №4. — С. 900 — 907.
12. Уплотняемость порошковых материалов с различной формой частиц / *В.Е. Ольшанецкий, А.В. Овчинников, А.А. Джуган* [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2015. – №1. – С. 130 – 133.
13. *Джуган О.А.* Применение титановых порошков с несферической формой частиц при изготовлении изделий методами 3d печати / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 52 – 55.
14. *Джуган О.А.* Получение качественных порошковых материалов с несферической формой частиц из деформированных заготовок / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий, О.В. Овчинников* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – №2. – С.114 – 116.
15. *Джуган О.А.* Использование титановых порошков в методах 3d печати изделий / *О.А. Джуган, В.Ю. Ольшанецкий, О.В. Овчинников, Л.П. Степанова, О.А. Михайлютенко* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №2. – С. 77 – 81.
16. *Дурягіна З.А.* Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву ВТ6, отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду / *З.А. Дурягіна, А.М. Тростянчин, І.А. Лемішка, О.А. Джуган* // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – №2. – С. 26 – 28.

**Dzhugan O.A., Olshanetskiy V.E. , Kapustian O.Ye., Bulish S.O.**

### **POSSIBILITY OF USING OF NON-SPHERICAL TITANIUM POWDERS FOR ADDITIVE TECHNOLOGIES**

*Additive technology is a promising direction in the development of industries such as the high-precision engineering and Aircraft engine building. At the same time, the high cost of 3D printing process and the lack of alternative (spherical powder) raw materials prevents the wide dissemination of these technologies. In this paper, the possibility of using cheaper powder materials based on titanium, which in terms of chemical composition corresponds to the VT1-0 alloy brand, with particles of non-spherical shape, obtained by hydrogenation-dehydrogenation technology and intended for the three-dimensional products production by various methods of additive technologies is shown. The method of profiling poured and fixed powder layers of minimum thickness using various fractions shows that the optimal external surface is obtained under the condition of using a powder material in which the particles have the shape of polyhedra, conventionally taken as objects that are close to particles in shape, in in the form of hexahedra and their varieties. The use of such powders should provide a denser and more uniform structure compared to spherical powders. The possibility of using different energy sources to build layered material in the formation of products is considered – automatic electron beam welding and manual argon arc welding. The optimal modes of process of step fusing of thin layers of powdered materials are settled. Advantages of offered powders*

*in comparison with applied today powders of spherical shape are described. The results of metallographic investigation of samples derived from the experimental powders are presented, which showed a good level of layer adhesion without visible discontinuities.*

**Keywords:** additive technologies; titanium; powder; particles; shape; fractions; surface; layer; compaction; fusion; structure; properties.

*Стаття надійшла 25.04.2024 р.*

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303159](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303159)

Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Воленко І.В.

### PROCESS OF ARGON-ARC SURFACING OF BLAST FURNACE CHARGING APPARATUS AT LOW POWER CONSUMPTION

*The feeding apparatus, which ensures the loading of charge materials into the blast furnace, operates under high specific dynamic loads caused by ore, coke, sinter, abrasive and gas-abrasive wear, high temperatures and aggressive environments. Increasing the wear resistance of charging machines reduces production costs, improves the quality of pig iron and increases the efficiency of metallurgical production. Therefore, increasing the crack resistance and wear resistance of backfill machines is an important scientific and technical problem.*

**Keywords:** filling apparatus, argon arc surfacing, influence of arc concentration, microstructure grinding.

**Problem statement.** The cone of the backfill machine is made of steel 30L. However, the operating conditions, under the influence of abrasive and gas-abrasive wear, require that the hardness of the deposited metal should be at least 55 HRC, which is ensured by a high carbon content of 5.5%, chromium 20.2% and the formation of chromium carbides. Cracks are allowed when surfacing the protective surface of a cone with a width of no more than 1.5 mm and a contact surface of no more than 0.3 mm. Therefore, the study of the crack formation mechanism and the development of a high-speed surfacing process at low power consumption, which ensures an increase in crack resistance and wear resistance of blast furnace charging apparatus, is an important scientific and technical problem.

It is well known that the susceptibility to cracking increases with increasing carbon content. An effective way to increase crack resistance is high-speed surfacing at low power consumption, which reduces welding stresses, grinds the microstructure and increases interatomic bonds, the nature of which is electromagnetic.

**Analysis of recent research and publications.** The influence of arc concentration, energy, speed and surfacing energy on the crack resistance and wear resistance of the deposited metal under conditions of abrasive and gas-abrasive wear has been insufficiently studied [1-11].

**The object of the study.** To develop a process of argon-arc high-speed surfacing at low power consumption of blast furnace charging apparatus with high-carbon chromium cored wire.

**The main material of the study.** The automatic welding process is a nanoprocess, as the current flowing through the electrode creates a strong magnetic field and a pinch effect, i.e. compression under the influence of its own magnetic field. The pinch effect causes a chain reaction - the compression of the cathode spot under the influence of its own magnetic field reduces the spot diameter, which strengthens the magnetic field, which leads to a reduction in the spot diameter. The process continues until the arc breaks. The arc is re-excited at the point where the distance between the electrodes is smallest, according to the law of least resistance.



The magnetic field when current flows through a conductor was studied by R.M. White [6]. The presence of a strong magnetic field during welding in the area of the active spot is confirmed by the fact that the arc acts as a pump that sucks in air from the environment, which is diamagnetic and draws it into a heterogeneous magnetic field, heats it up and throws it towards the products in the form of powerful plasma streams, at a speed of up to 103 m/s [7]. Powerful plasma streams create welding arc pressure, which depends on the movement of the active spot by the electrode end. However, the magnetic field of the welding current has not been studied sufficiently.

At high-speed surfacing at low power output, due to cooling, the temperature of the outer layers of the column decreases and the current begins to flow in a narrow channel, the arc concentrates, and the arc diameter decreases.

To study the effect of arc concentration, deposition rate and power consumption on crack resistance, a methodology was developed to study the effect of wire diameter on the magnetic field of the welding current, which is as follows. A direct current of 300 A flows along a welding wire of different diameters (1.6, 2.8, and 3.6)·10<sup>-3</sup> m and measurements of magnetic field induction on the wire surface are made. The measurements are made with a teslameter EM4305.

As a result, it was found (Fig. 1. a, b, c) that, with a decrease in the diameter of the wire, the magnetic field induction increases, in accordance with the Bio-Savar law, according to which the induction B is directly proportional to the magnetic permeability of the medium  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Gn/m, current value I i inversely proportional to the distance from the conductor with current R [7]:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}, \text{ T} \tag{1}$$

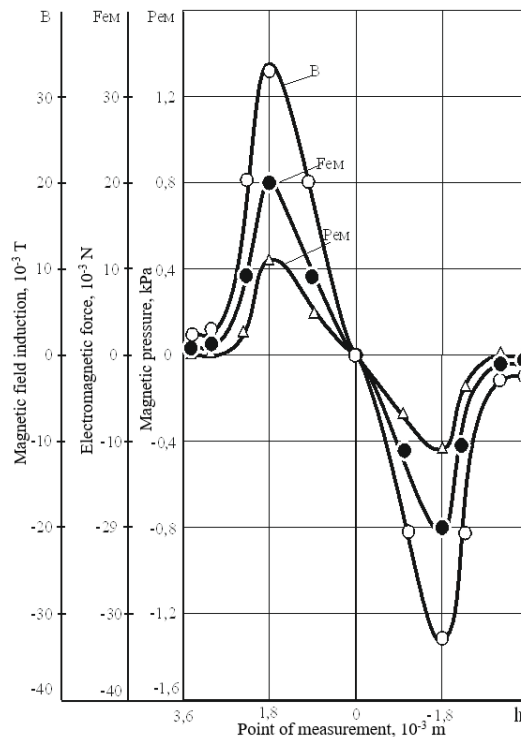


Figure 1 (a) – Magnetic field of a welding arc on a wire with a diameter of 3,6 · 10<sup>-3</sup> m, current value 300 A

Машинобудування і зварювальне виробництво

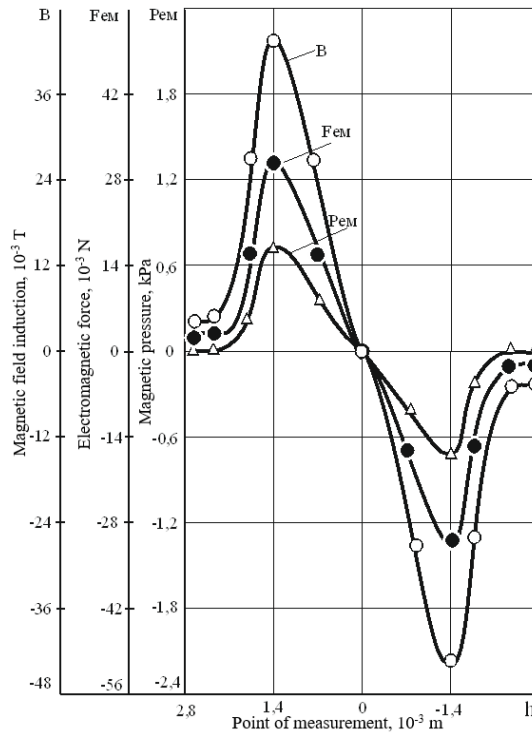


Figure 1 (b) – Magnetic field of a welding arc on a wire with a diameter of  $2,8 \cdot 10^{-3}$  m, current value 300 A

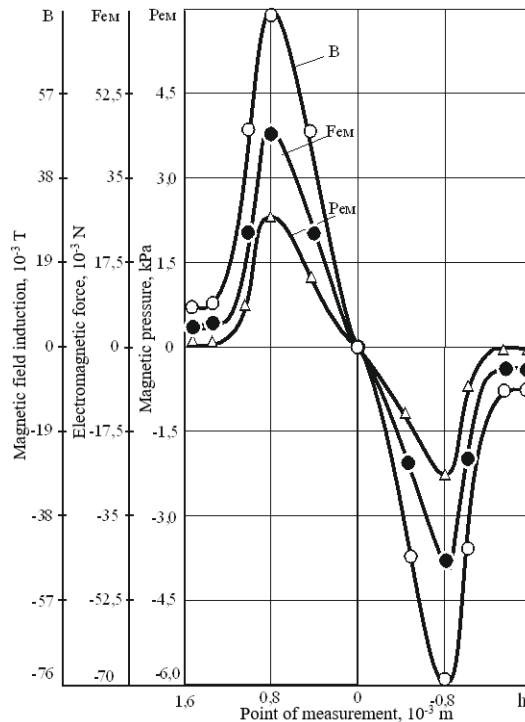


Figure 1 (c) – Magnetic field of a welding arc on a wire with a diameter of  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m, current value 300A

On the wire axis, the induction is zero, increases as it approaches the surface and reaches its maximum value on the wire surface. When the wire diameter decreased from  $3,6 \cdot 10^{-3}$  m to  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m, the maximum value of the magnetic field induction of the welding current increased from 0,033

T to 0,075 T. When moving away from the wire surface, the magnetic field induction initially decreases sharply and then less significantly. When moving from one arc surface to another, the induction changes direction to the opposite, in accordance with the direction of the magnetic field lines. The experimental data are in good agreement with the calculated values, which confirms the possibility of using the calculated values to determine the magnetic field induction of the welding arc.

The electromagnetic force changes in proportion to the induction, current I and arc length L [7]:

$$F = IBL, \text{ H} \tag{2}$$

Proportional to the induction, as the wire diameter decreased, the electromagnetic force increased from 0,02 H up to 0,045 H (Fig.1)

The magnetic pressure changes quadratically with induction [8], which is directly proportional to the square of the magnetic field induction B and inversely proportional to the magnetic permeability of the medium  $\mu$ :

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu}, \text{ Pa} \tag{3}$$

Magnetic pressure determines the pinch effect, which depends on the diameter of the welding wire and the area over which the arc moves, arc concentration and heat input. With a decrease in wire diameter, the magnetic pressure increased from 0,43 kPa to 2,24 kPa (Fig. 1).

As the pinch effect increases, the magnetic pressure increases and the droplet detachment from the electrode end increases, and the droplet transfer becomes fine-droplet and jet-like. Droplet transfer determines the layer thickness and the rate of crystallization of the weld pool liquid metal. The process of crystallization of liquid metal is periodic, the frequency of which is determined by the transfer of drops. As the pinch effect increases and the droplet size decreases, the thickness of the crystallization layer decreases and the crack resistance of the weld metal increases.

As established (Fig. 1, Fig. 2), the pinch effect increases with increasing welding current.

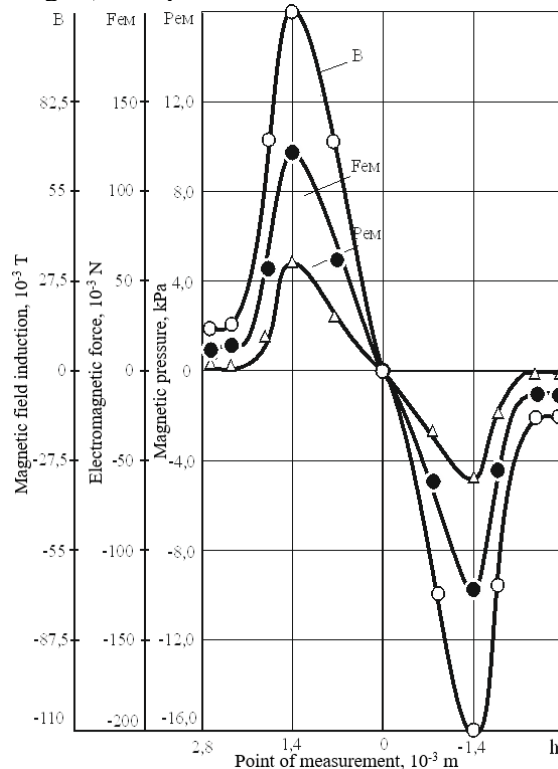


Figure 2 – Magnetic field of the welding arc on a wire with a diameter of  $2,8 \cdot 10^{-3}$  m, current value 750 A

When the welding current was increased from 300 A to 750 A, the maximum magnetic field induction increased from 0.043 T to 0.107 T, the electromagnetic force increased from 0,03 N to 0,16 N and the magnetic pressure increased from 0,736 kPa to 4,543 kPa. As a result, the fine-droplet transfer turns into jet and vapor transfer, which ensures the minimum thickness of crystallization layers, fine-scale formation and increased crack resistance.

As a result of heat input, during the surfacing process, the metal is exposed to a thermal deformation cycle that determines the microdistortion of the crystal lattice, microstresses, and dislocation density [1]. Under the influence of the thermal deformation cycle, the equilibrium of the liquid metal in the bath is disturbed and welding stresses occur [9]  $q_u/v$ , due to reduced heat input, deformation of the base metal and welding stresses are reduced [9]:

$$\sigma \geq \mu E \frac{q_u}{V_F}, \text{ Па} \quad (4)$$

To prevent the formation of cracks, the linear energy with increasing carbon content decreases (Fig. 3) to 0,5 MJ/m, which reduces heat input, welding stresses, microstructure refinement, reduction of the interatomic distance, increase of interatomic bonds and crack resistance of the deposited metal.

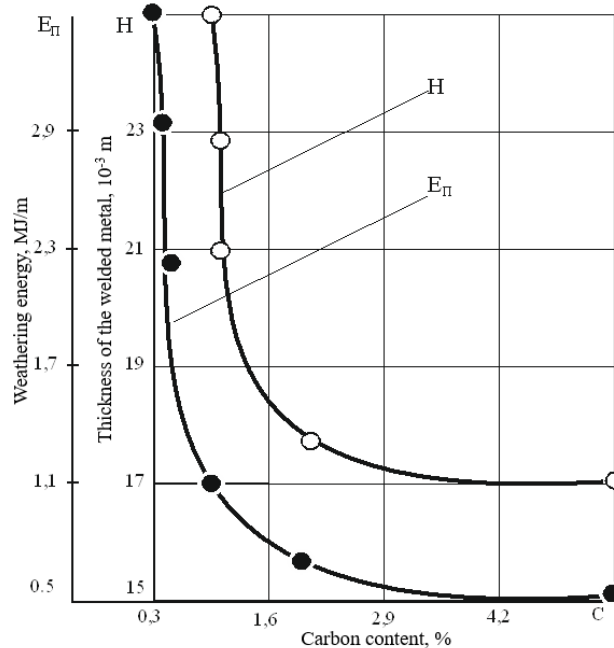


Figure 3 – Dependence of the running energy  $E_{\Pi}$  and the thickness of the deposited metal H as a function of carbon content

According to the superposition principle, as the amount of weld metal increases, the welding stresses increase. When welding stresses increase above the tensile strength, cracks form. Therefore, as the carbon content increases, the thickness of the deposited metal decreases (Fig. 3). When surfacing backfill machines with a high carbon content, the thickness of the deposited metal is limited to  $17 \cdot 10^{-3}$  m compared to the support rolls of  $25 \cdot 10^{-3}$  m.

To prevent the liquid metal from flowing out of the weld pool and impairing weld formation, it is necessary to reduce the weight and length of the weld pool.

The formation of welds is determined by the forces acting on the arc and the liquid metal of the weld pool, the size and weight of which is set by the liquid metal spilling out of the pool. In this case, a portion of the liquid metal is lost and it is difficult to estimate the mass of the weld pool.

To determine the size and weight of the weld pool liquid metal, a method has been developed that consists of the following. The flux cushion is pressed against the welding plates. At the end of the weld, the flux is loosely adjacent to the welding plates. One-sided submerged arc welding of plates

## Машинобудування і зварювальне виробництво

on a flux cushion is performed. After the established welding process in real conditions, when the arc approaches the place of loose flux fitting, where there is no upward pressure force of the flux cushion, the balance of forces is disturbed and under the influence of downward arc pressure, magnetic and hydrodynamic pressure, liquid metal (Fig. 4) flows out of the bath. The developed methodology makes it possible to estimate the shape, size, and weight of the weld pool. Due to the fact that one-sided welding with a composite electrode is carried out at high currents, the dimensions and weight of the weld pool are significant, so the error does not exceed 10%.

It was found that during one-sided welding with a composite electrode on a flux cushion from a current-carrying wire in the following mode: current 2000 - 2100 A, arc voltage 27 -29 V, welding speed 0,021 m/s, weld pool length 0.18 m, pool width 0.022 m, pool liquid metal mass 0,101 kg (Fig. 4). The calculated value of 0,099 kg is in good agreement with the experimental data.



a



б

Figure 4 – Weld pool crater (a) and metal (b)

The advantage of the developed technique, in comparison with the existing splash method, is as follows: in addition to measuring the size and weight of the weld pool, it allows to determine the area over which the active spot moves, the position of the arc during welding, the location of the electrode relative to the leading edge of the crater, and the size of the weld pool crater by the hole left (Fig. 4). However, an increase in welding current leads to an increase in the weld pool weight, liquid metal leakage, and impaired weld formation.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

To calculate the mass of the liquid metal of the weld pool, we used the dependence of the time of metal residence in the liquid state on the power consumption [10], mass and welding speed [11]:

$$t_B = \frac{q_{II}}{2\pi\lambda VT_{II}} = \frac{0,24IU\eta_{II}}{2\pi\lambda VT_{II}} \quad (5)$$

$$t_B = \frac{G_B}{\rho VF} \quad (6)$$

where  $G_B$  – weight of liquid metal, kg;  $\rho$  – density of metal, 7850 kg/m<sup>3</sup>;

$F$  – cross-sectional area of the weld metal, m<sup>2</sup>;

$V$  – welding speed, m/s.

Equating the time spent in the bath in the liquid state, using formulas (5) and (6), we obtain an expression for the mass of the liquid metal:

$$t_B = \frac{G_B}{\rho VF} = \frac{0,24IU\eta_{II}}{2\pi\lambda VT_{II}}$$

$$G_B = \frac{0,24IU\eta_{II}}{2\pi\lambda VT_{II}} \cdot \rho VF \quad G_B = \frac{0,24IU\eta_{II}}{2\pi\lambda T_{II}} \cdot \rho F \quad (7)$$

The calculation and experimental method established that with an increase in the current value, the mass of the liquid metal of the weld pool increases (Fig. 5), which leads to metal leakage and disruption of the formation of welds on the end surface, so it is necessary to reduce the current value and the cross-section of the weld metal.

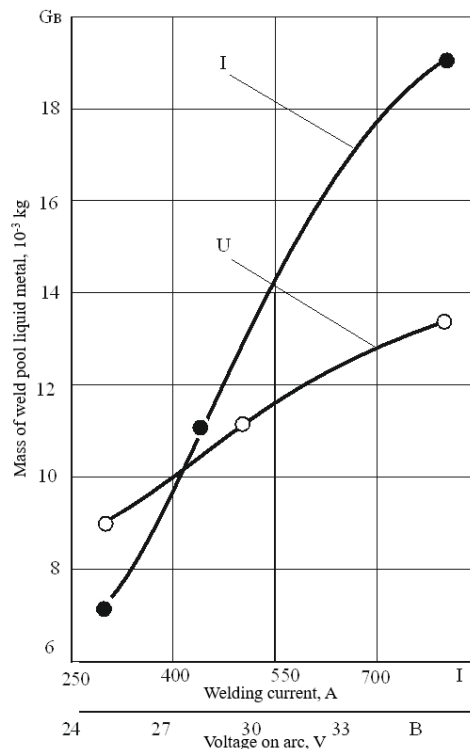


Figure 5 – Dependence of the mass of the liquid metal of the weld pool on the current  $I$  and arc voltage  $U$

The length of the weld pool, when surfacing a roller to a massive body, is determined for a powerful fast-moving heat source using the equation for the melting isotherm [10]

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$L = Vt_B = \frac{q_{II}}{2\pi\lambda T_{PL}} = \frac{0,24IU\eta_{II}}{2\pi\lambda T_{PL}} \quad (8)$$

o reduce the time spent by the bath in the liquid state and improve the formation of the deposited metal, it is necessary to perform high-speed surfacing at low power consumption, which increases the bath crystallization rate  $V_{kp} = V_{ce} \cos\alpha$  and the structure refinement, increases the resistance to the formation of crystallization and sub-solidus cracks and corrosion resistance of the deposited metal.

With an increase in current, the length of the weld pool (Fig. 6), which is directly proportional to the effective arc power  $q_{II}$ , current  $I$  and voltage  $U$  and inversely proportional to the thermal conductivity coefficient  $\lambda$ , and melting point  $T_{PL}$ , increases [10], which leads to the flow of liquid metal from the pool and disruption of weld formation.

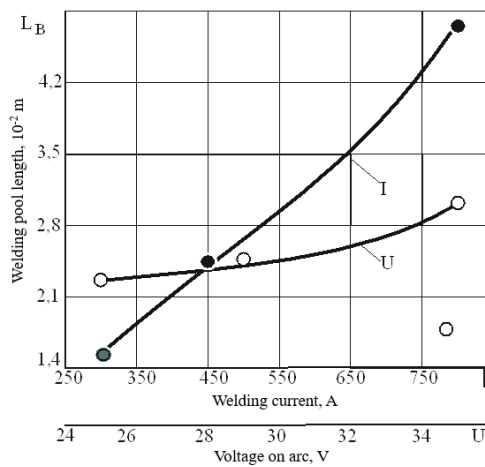


Figure 6 – Dependence of weld pool length on current  $I$  and arc voltage  $U$

An effective way to reduce the length of the weld pool is to reduce the welding current provided by argon arc welding by reducing the diameter of the electrode.

The most effective way to prevent liquid metal leakage from the weld pool and weld formation disruption is high-speed surfacing at low power consumption, which reduces the time the pool remains in the liquid state by increasing the welding speed and reducing the power consumption (Fig. 7).

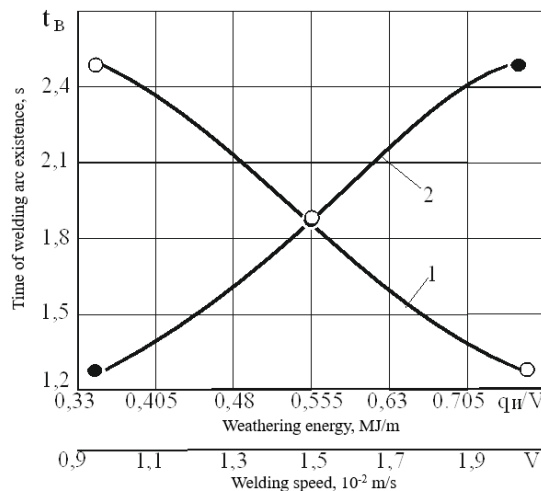


Figure 7 – Dependence of weld pool lifetime on deposition rate (1) and power consumption (2)

Based on the research and established patterns, a high-speed surfacing process was developed for low power consumption of backfill machines.

Surfacing is performed on a horizontally positioned plate, which makes it difficult to keep the liquid metal from flowing out of the weld pool on a conical surface. The metal is held by the pressure of the welding arc, due to the location of the electrode at an angle of  $90^0$  to the forming conical surface and  $95...100^0$  to the tangential conical surface. To prevent liquid metal from leaking out of the weld pool and to ensure high-quality weld formation, it is necessary to reduce the length of the weld pool and its residence time.

During argon arc high-speed surfacing of blast furnace charging apparatus, preliminary and accompanying heating is performed with gas burners up to  $100-150^{\circ}\text{C}$ . First, the protective surface is automatically surfaced with high-carbon chromium flux-cored wire with a diameter of 2,8 mm in the following mode: welding current 550-600 A, arc voltage 29 V, surfacing speed 75 m/h, and line energy 0,7 MJ/m. Surfacing is performed using direct current of reverse polarity. The angle of inclination of the torch to the forming conical surface is  $90^0$ , to the tangential conical surface is  $95...100^0$ . After surfacing, slow cooling to a temperature of  $50^{\circ}\text{C}$  is performed.

Then the hardfacing of the contact surface is performed. Prior to surfacing, preliminary and accompanying heating is performed to  $100 - 150^{\circ}\text{C}$ . The buffer layer is surfaced with chromium-nickel solid uranium wire Zv06Kh19N9T, 1.6 mm in diameter in argon in the following mode: welding current 350 - 400 A, arc voltage 28 - 29 V, deposition rate 75 m/h in two passes, linear energy 0,5 MJ/m.

Preliminary and concomitant heating to  $150-200^{\circ}\text{C}$  for hardfacing of the contact surface is performed. Surfacing is performed with high-carbon chromium flux-cored wire with a diameter of 2,8 mm in the following mode: welding current 550 - 600 A, arc voltage 29 - 30 V, surfacing speed 75 m/h, running energy 0,7 MJ/m. After surfacing, the process is followed by slow cooling to a temperature of  $50^{\circ}\text{C}$ . The hardness of the deposited metal on the protective and contact surfaces should be at least 55 HRC.

Chromium-nickel wire, the concentration of arc and energy, when surfacing the buffer layer, provides strong adhesion of the deposited metal to the base metal and no delamination.

## CONCLUSIONS

1. An effective way to increase crack resistance is to concentrate the arc and energy, which increases the efficiency of the surfacing process. Concentration of the arc, by reducing the diameter of the electrode, provides an increase in magnetic field induction, electromagnetic force, magnetic compression pressure, pinch effect, droplet grinding and microstructure, reduction of welding stresses, increase in the rate of crystallization of the weld pool metal, crack resistance and wear resistance of the deposited metal.

2. It was found that with an increase in carbon content, the energy per unit length decreases to 0,5 MJ/m, which reduces heat input, welding stresses, increases the rate of liquid metal crystallization, refines the microstructure, increases the interatomic compression pressure, crack resistance and wear resistance of the deposited metal.

3. According to the law of superposition, as the amount of deposited metal increases, the welding stresses increase, which leads to delamination of the deposited metal when the welding stresses become greater than the interatomic bonds. It has been found that with an increase in carbon content, the maximum thickness of the deposited metal decreases to reduce welding stresses. To prevent delamination, the thickness of the deposited metal when surfacing backfill apparatus should be 12-17 mm.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

4. To prevent metal leakage from the weld pool when surfacing a conical surface, a methodology for determining the pool weight and an argon arc surfacing process have been developed that ensures arc concentration, reduction of pool weight and power consumption, and increased crack resistance and wear resistance.

5. A process of argon-arc high-speed surfacing at low power consumption of blast furnace charging apparatus with high-carbon chromium cored wire has been developed, which provides concentration of arc and energy, reduction of heat input and welding stresses, increase in crystallization rate, microstructure refinement, reduction of interatomic distance, enhancement of pinch effect and interatomic compression pressures, increase in crack resistance and wear resistance of apparatus and metal quality.

### List of references

1. Прохоров Н.Н. Физические процессы в металле при сварке. – Т.П. – К.: Металлургия, 1976.– 600 с
2. К вопросу о саморегулировании дуги при сварке плавящимся электродом / Б.Е.Патон, С.Ю. Максимов, В.С. Сидорук, Ю.Н. Сараев // Сварочное производство. – 2014. – №12, С.3 – 11.
3. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О, Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой / И.К. Походня, В.Н. Шлепаков, С.Ю. Максимов, И.А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010, – №12, С. 34 – 42.
4. Максимов С.Ю. Особливості дуги з імпульсним саморегулюванням процесу плавлення електрода при ручному дуговому зварюванні / В.С. Сидорук, Д.М. Кражановський //Автоматичне зварювання. – 2019. – №12. – С.25 – 32.
5. Управление геометрией сварного шва аппаратными средствами при механизированной и автоматической дуговой сварке плавящимся электродом / В. А. Лебедев, С. Ю. Максимов, А. М. Жерносеков, Ю. Н. Сараев /Сварочное производство.–2015. – №5, С.
6. Уайт Р.М. Квантовая теория магнетизма.– К.: Мир, 1972.–306с.
7. Финкельбург В.,Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Изд- во иностр. лит. 1961. – 369 с.
8. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 824с.
9. Винокуров В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А.Винокуров, А.Г. Григорьянц. – К.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
10. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. – К.: Машгиз, 1951 . – 296 с
11. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин. – К.: Машиностроение, 1973. – 448 с.

Щетинін С.В., Щетиніна В.І., Воленко І.В.

### ПРОЦЕС АРГОНОДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ЗАСИПНИХ АПАРАТІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ НА НИЗЬКІЙ ПОГОННІЙ ЕНЕРГІЇ

*Засипний апарат, який забезпечує завантаження шихтових матеріалів в доменну піч, експлуатується в умовах високих питомих динамічних навантажень під дією руди, коксу, агломерату, абразивного і газоабразивного зносу, високих температур і агресивних середовищ. Збільшення зносостійкості засипних апаратів знижує собівартість, підвищує якість чавуну і ефективність металургійного виробництва. Тому, підвищення*

тріщиностійкості і зносостійкості засипних апаратів є важливою науково-технічною проблемою.

**Ключові слова:** засипний апарат, аргонодугове наплавлення, вплив концентрації дуги, подрібнення мікроструктури.

Стаття надійшла 28.04.2024 р.

УДК 621.179.92

[doi.org/10.31498/2522-9990272024303160](https://doi.org/10.31498/2522-9990272024303160)

Зусін А.М.

### ВПЛИВ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ РОЗРОБЛЕНИМИ ПОРОШКОВИМИ ДРОТАМИ З АЗОТОМ

Переривання роботи машин через пошкодження або знос компонентів, обмежує тривалість нормальної експлуатації та призводить до простоїв. Потрібні додаткові витрати на виготовлення та ремонт запасних частин. Експлуатаційна надійність та довговічність багатьох деталей машин залежить від їх міцності, зносостійкості [1].

Багато деталей машин піддаються поверхневому зміцненню для підвищення твердості, межі витривалості та зносостійкості поверхневого шару. Існує три основні методи поверхневого зміцнення: поверхнєве зміцнення, хіміко-термічна обробка та зміцнення пластичною деформацією [2].

У цій роботі досліджено можливість отримання залишкового аустеніту з використанням різних режимів термічної обробки, а також вплив мікроструктури та її метастабільності на зносостійкість. Фазовий склад, метастабільність аустеніту та механічні властивості цементованих карбідо-сталей можна контролювати шляхом регулювання температури відпуску.

В останні роки багато вчених продемонстрували позитивний вплив залишкового аустеніту, що утворюється в поверхневому шарі та самозміцнюється під навантаженням, на зносостійкість і втомну міцність [3].

Одним з найважливіших напрямків сучасного зварювання є створення наплавних матеріалів з метастабільними структурами, які здатні само організовуватися під впливом зовнішніх факторів.

Вони можуть адаптуватися до умов навантаження і мають значно вищі властивості. Дослідження в цій галузі розпочалися в середині минулого століття І.М. Богачовим та Р.І. Минцем. Вони висунули і реалізували надзвичайно плідну ідею використання мартенситного перетворення під навантаженням в процесі випробування механічних властивостей і працездатності спеціальних сталей.

Сплави з метастабільним аустенітом мають підвищену стійкість до гідроабразивного зносу, абразивного, ударного, сухого тертя та втомного навантаження. Ці сплави дозволяють досягти високих рівнів механічних властивостей. Це пов'язано з тим, що на виникнення мартенситного перетворення під навантаженням витрачається більша частина зовнішньої енергії і відповідно менша частка використовується на руйнування. Розвиток мартенситного перетворення призводить не тільки до зміцнення, але і до релаксації мікронапружень, що покращує мікро об'єм і характеристики сплаву. Цьому також сприяє динамічне деформаційне старіння. [4].

**Ключові слова:** порошковий дріт, аустеніт, азот, зносостійкість, легування, дугове наплавлення, карбіди, нітриди, термічна обробка, відпуск.



**Постановка проблеми.** Вивчена можливість підвищення зносостійкості наплавленого металу отриманого після наплавлення розробленими порошковими дротами 10X19H3Г10АТ за рахунок регулювання ступеня метастабільності  $A_{\text{зал}}$  і оптимізації кінетики  $\gamma_{\text{ост}} \rightarrow \alpha'$  ДМПЗ за рахунок варіювання температури відпуску після наплавлення .

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При вмісті вуглецю 0,1-0,7 % можна отримати необхідні технічні властивості та високу зносостійкість, що було підтверджено в попередніх дослідженнях [5]. З іншого боку, легування металу хромом, марганцем і кремнієм може ефективно впливати на формування металу і регулювати фазовий склад, співвідношення між мартенситом і метастабільним аустенітом. Хром зміцнює аустеніт і мартенсит за рахунок утворення карбідів, надаючи металу корозійну стійкість [6]. Марганець є аустенізуючим агентом, і збільшення його кількості може знизити собівартість замість нікелю[7].

З метою додаткового зміцнення наплавленого металу за рахунок утворення в ньому карбонітридів та нітридів [8,9] необхідно вводити в невеликих кількостях азот, який також стабілізує вплив на аустеніт.

**Мета дослідження.** Метою роботи є вивчення впливу режимів термічної обробки на структуру та зносостійкість наплавленого металу розробленими порошковими дротами з азотом.

**Основний матеріал дослідження.** На основі наведеного аналізу та необхідних властивостей наплавленого металу були запропоновані порошкові дроти наступних марок ПП-Нп-10X19H4Г10, ПП-Нп-10X19H3Г10АТ остання з різним вмістом азоту. В якості еталона для порівняння використовувався порошковий дріт ПП-Нп-Х20Н10Г6, даний дріт широко використовується в промисловості для відновлення та зміцнення деталей, що працюють в умовах абразивного та ударно-абразивного зношування. Склад наплавленого металу експериментальними дроти відповідає маркам наплавленого металу та його хімічному складу, наведеному в табл. 1. Азот введений до складу шихти порошкового дроту у вигляді азотованого феромарганцю.

Таблиця 1 – Результати хімічного аналізу наплавленого Fe-Cr-Mn-Ni-N металу

Зразки наплавленого металу	Вміст елементів, %								
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Ti	Al	V	N
X20H10Г6	0,05	19,49	0,75	5,79	8,55	0,04	0,15	0,02	-
10X19H4Г10	0,11	18,29	0,74	9,70	3,81	0,04	0,17	0,02	-
10X19H3Г10АТ	0,11	18,91	0,74	10,06	3,09	0,04	0,17	0,02	0,075
10X19H3Г10АТ	0,11	18,95	0,75	9,87	3,11	0,04	0,19	0,02	0,15

Примітка: Вміст сірки 0,03%; фосфору 0,03%;

Макроструктура металу шва в три шари показує чітке положення шарів металу шва, які відрізняються ступенем протравлюваності, що пояснюється різним хімічним складом шарів внаслідок їх змішування з основним металом, а також між собою у верхніх шарах зварного шва. Макроструктура наплавленого металу випробуваними порошковими дротами має більш світлий колір з дрібнозернистою структурою в перших шарах і в зоні термічного впливу, що можна пояснити процесами, пов'язаними з рекристалізацією металу при нагріванні за рахунок тепла, що виділяється при наплавленні наступних шарів металу (рис. 1).

## Машинобудування і зварювальне виробництво

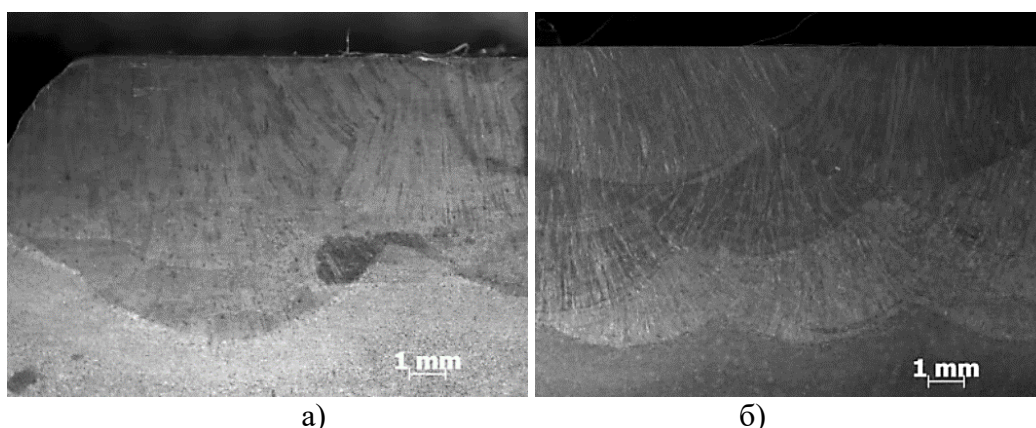


Рисунок 1 – Макроструктура наплавленого Fe-Cr-Mn-Ni металу (x8): а) X20H10Г6; б) 10X19H3Г10АТ

Макроструктура наступних шарів має стовпчасту дендритну структуру. Дендрити невеликі, витягнуті в бік, протилежний тепловіддачі. Результати макроаналізу не виявили дефектів металу шва, сплавлення роликів між собою хороше, дефектів в зоні сплавлення з основним металом немає.

Мікроструктура багат шарового металу шва без термічної обробки - аустеніт з дисперсними карбідами, це пов'язано з високим вмістом хрому і марганцю, розташованих всередині зерен, які мають витягнуту форму, що говорить про спрямоване відведення тепла в процесі кристалізації. Усередині деяких зерен видно лінії ковзання, що є наслідком деформації при виникненні внутрішніх напружень. Мартенсит має рейкову конструкцію партії, що обумовлено низьким вмістом вуглецю в металі зварного шва. У середній частині наплавлений метал має аустенітно-мартенситну структуру, що обумовлено меншим вмістом вищезгаданих речовин. Ближче до зони плавлення спостерігається переважно мартенситна структура, причина цього - ще менший вміст легуючих речовин за рахунок більшого змішування з основним металом, на якому проводилося наплавлення (09Г2С). Основний метал має феритно-перлітну структуру. У наплавленому металі відсутні мікротріщини. Плавлення з основним металом хороше, дефектів не виявлено (рис 1, рис 2).

Метал, наплавлений порошковим дротом ПП-Нп-10X19H3Г10АТ (0,15% Н), має більш високу твердість на відміну від металу, отриманого шляхом наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-X20H10Г6, це обумовлено більш високим вмістом карбонітридів.

Верхній шар - 24 HRC, середній шар - 28 HRC, перший шар - 34 HRC. Зона злиття - 14 HRC. Таким чином, за допомогою параметрів наплавлення можна регулювати хімічний склад наплавленого металу, структуру, ступінь метастабільності, це дозволяє регулювати експлуатаційні характеристики одержуваного шару.

При наплавленні порошковими проводами ПП-Нп-10X19H3Г10 і ПП-Нп-10X19H3Г10АТ (0,075% Н) характер зміни мікроструктури аналогічний зварюванню металу порошковим дротом ПП-Нп-10X19H3Г10АТ (0,15% Н).

Розроблені порошкові дроти, а також порошкові дроти порошкові ПП-Нп-X20H10Г6 піддавалися випробуванням на холодну пластичну деформацію в поверхневому шарі з метою визначення здатності металу шва до зміцнення (рис 3).

## Машинобудування і зварювальне виробництво

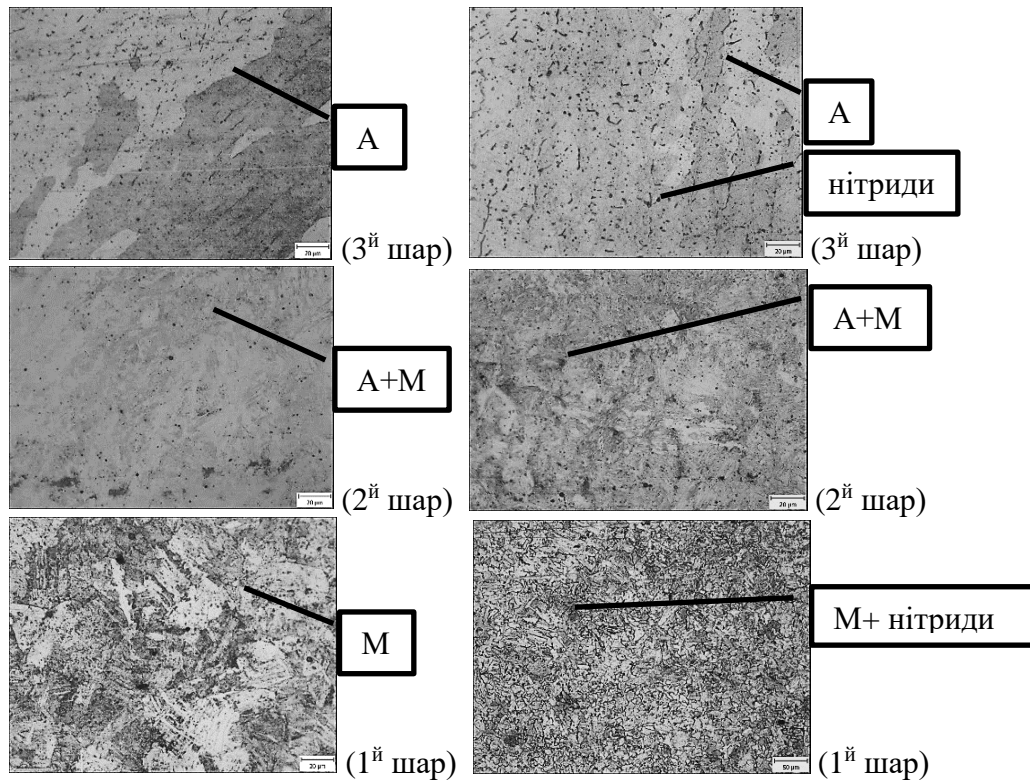


Рисунок 2 – Мікроструктура металу в наплавленому стані (панорамна зйомка), наплавлення ПП-Нп-Х20Н10Г6 (ліворуч), ПП-Нп-10Х19Н3Г10АТ (праворуч), х500

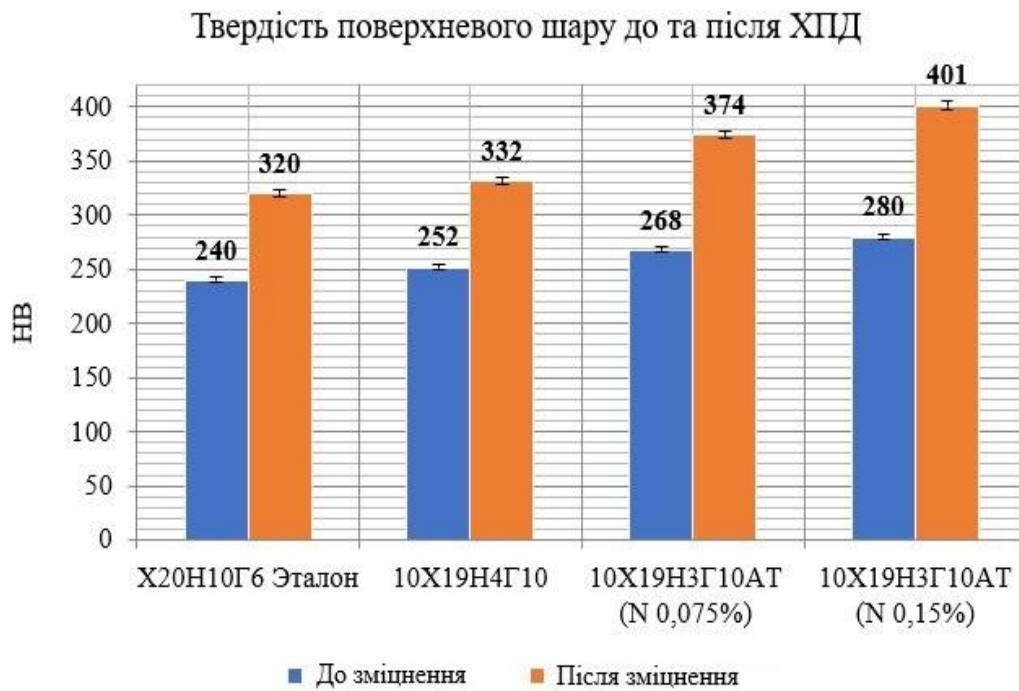


Рисунок 3 – Результати зміни твердості наплавлення випробуваними порошковими дротами до та після ХПД

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Отримані результати випробувань на холодну пластичну деформацію підтверджують здатність випробуваних наплавочних матеріалів до ефекту деформаційного мартенситного перетворення. Добре видно, що розроблений порошковий дріт ПП-Нп-10X19НЗГ10АТ з вмістом азоту 0,15% має високі показники зміцнення в процесі навантаження, це пов'язано з утворенням в металі шва поверхневого шару карбонітридів хрому, титану, алюмінію і ванадію, а також метастабільного аустеніту, який в процесі навантаження піддається деформаційному мартенситному перетворенню.

З метою визначення зносостійкості наплавленого металу були проведені випробування на абразивне ( $\epsilon_a$ ), ударно-абразивне ( $\epsilon_{y-a}$ ) і сухе тертя ( $\epsilon$ ). Результати комплексних випробувань зварного металу без термічної обробки на зносостійкість наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Зносостійкість і твердість металу шва без термічної обробки

Марка НМ	HRC	A,%	$\epsilon$	$\Delta M, \%$	$\epsilon_a$	$\Delta M_a, \%$	$\epsilon_{y-a}$	$\Delta M_{y-a}, \%$
X20H10Г6(Еталон)	23	100	1	0	1	4	1	7
10X19H4Г10	24	100	1,2	9	1,32	13	1,46	17
10X19HЗГ10АТ(N0,075%)	27	100	1,4	12	1,62	17	1,76	21
10X19HЗГ10АТ(N0,15%)	29	100	1,6	14	1,71	19	1,93	24

Таким чином, розглянуті марки зварних металів показали різну зносостійкість, в залежності від кількості, що утворюється при навантаженнях в поверхневому шарі карбонітридів. Зносостійкість самого наплавленого металу залежить від хімічного складу, отриманого в результаті зміцнення легуючими елементами. Додаткове додавання азоту в метал шва до 0,15% і зниження вмісту нікелю до 3% дозволяє підвищити зносостійкість металу шва і контролювати експлуатаційні властивості. Низький вміст нікелю виправдано з метою запобігання утворенню фериту за рахунок високого вмісту Cr.

Головною особливістю розроблюваного матеріалу є самозміцнення поверхневого шару наплавленого металу за рахунок енергії руйнування, більша частина якої витрачається на деформаційне мартенситне перетворення, тим самим менша її частина залишається на руйнування поверхні.

Структуру та властивості наплавленого металу можна ефективно змінювати за допомогою термічної обробки. Проведені раніше дослідження з вибору оптимального температурного режиму термообробки були використані для розроблених наплавочних матеріалів. Проводилися дослідження впливу відпуску на зносостійкість наплавленого металу. Низькотемпературний відпуск зазвичай використовується з метою зменшення термічних і структурних напружень у наплавленому металі, які були отримані в процесі наплавлення. Відпуск проводився безпосередньо після наплавлення наплавленого металу розробленими порошковими дротами. Наплавлений металу після наплавлення має переважно аустенітну структуру в поверхневому шарі.

Відпуск проводили за температур від 200 до 650°C з витримкою протягом 1 години і подальшим охолодженням на відкритому повітрі. Відпуск у температурному діапазоні від 400 до 650°C призводить до виділення карбідів на кордонах зерен і в їхньому обсязі. Структура наплавленого металу в поверхневому шарі переважно залишається без змін і відповідає аустенітній. Заміри твердості в поверхневому шарі наплавленого металу проводили на твердомірі за Роквелом, результати представлені на рис. 4.

Твердість верхнього наплавленого шару за температури відпуску, що дорівнює 650°C, становить HRC 27...35, що відповідає аустенітно-мартенситній структурі. Зі зростанням глибини наплавлення, зростає твердість HRC 33...35, що відповідає мартенситній структурі.



Машинобудування і зварювальне виробництво

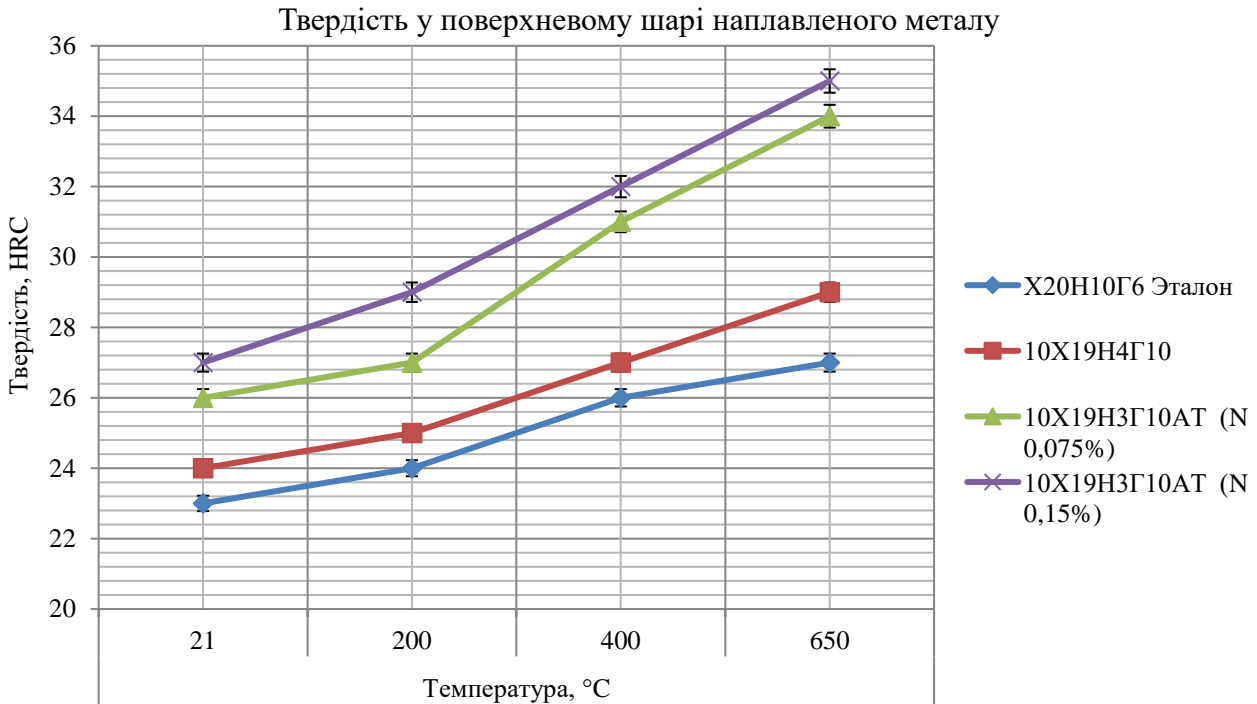


Рисунок 4 – Результати зміни твердості поверхнього шару наплавленого металу випробуваними порошковими дротами, що випробовуються

З підвищенням температури відпуску в досліджуваному інтервалі збільшується кількість карбідів у наплавленому металі, що, своєю чергою, призводить до збіднення аустеніту вуглецем і легуючими елементами, що містяться в наплавленому металі. Ці чинники сприяють зменшенню стабільності аустеніту в поверхневому шарі та більшому виділенню карбідів. Підвищена дестабілізація аустеніту сприяє інтенсивнішому динамічному мартенситному перетворенню в процесі навантаження і самозміцнення.

Метал наплавлений випробуваними порошковими дротами, що випробовуються, був підданий випробуванню на холодну пластичну деформацію з метою визначення схильності до самозміцнення під впливом деформаційного навантаження за допомогою металевої кульки. Потім в отриманому відбитку заміряли твердість за Брінелем. Результати замірів представлені на рис. 5.

У результаті випробувань зразків наплавленого металу на холодно-пластичну деформацію твердість наплавленого металу значно зростає, що свідчить про самозміцнення за рахунок динамічного мартенситного перетворення в поверхневому шарі металу. Наплавлений метал не підданий низькотемпературному відпуску має нижчі показники самозміцнення. Більш висока температура відпуску призводить до більшого ступеня дестабілізації аустеніту і більш інтенсивного підвищення твердості при навантаженні. Відпуск за 650°C призводить до підвищення зносостійкості наплавленого металу за різних видів зносу.



## Машинобудування і зварювальне виробництво

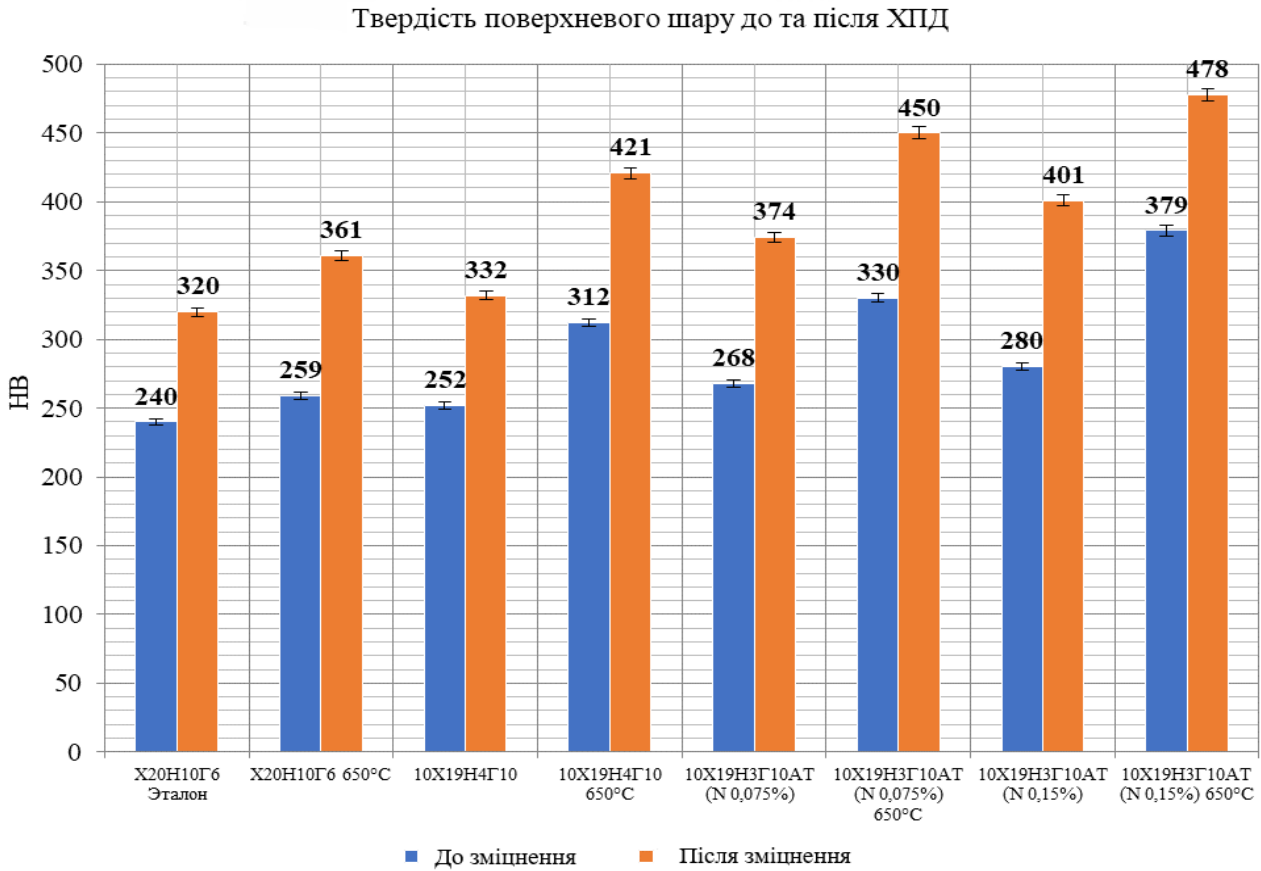


Рисунок 5 – Результати зміни твердості багатошарового наплавлення випробуваними порошковими дротами до і після ХПД

Для визначення зносостійкості наплавленого металу розробленими порошковими дротами були проведені випробування на абразивний ( $\epsilon_a$ ), ударно-абразивний ( $\epsilon_{y-a}$ ) і знос за сухого тертя ( $\epsilon$ ) після відпустки в температурному інтервалі 200...650°C. Приріст кількості мартенситу деформації при комплексних випробуваннях наплавленого металу після низькотемпературного відпуску на зносостійкість наведені в таблиці 3, за еталон узято наплавлений металу порошковим дротом ПП-Нп-Х20Н10Г6.

Таблиця 3 – Вплив відпуску на приріст мартенситу деформації під час комплексних випробувань на зносостійкість у наплавленому металі розробленими порошковими дротами

Марка НМ	Сухое трение, $\Delta M, \%$			Абразивный $\Delta M_a, \%$			Ударно-абразивный $\Delta M_{y-a}, \%$					
		200°C	400°C	650°C		200°C	400°C	650°C		200°C	400°C	650°C
X20H10Г6 (Эталон)	0	1	3	5	4	5	7	8	7	8	10	11
10X19H4Г10	9	10	12	15	13	14	17	19	17	15	20	23
10X19H3Г10АТ (N 0,075%)	12	13	17	21	17	19	22	25	21	19	24	27
10X19H3Г10АТ (N 0,15%)	14	15	20	25	19	20	25	30	28	23	31	40

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Проведені комплексні випробування на зносостійкість наплавленого металу розробленими порошковими дротами показали, що відпуск в інтервалі від 200...400°C призводить до мінімальної зміни зносостійкості в умовах абразивного та ударно-абразивного зносу, збільшення температури відпуску до 650°C призводить до значного зростання показників зносостійкості (рис. 6).

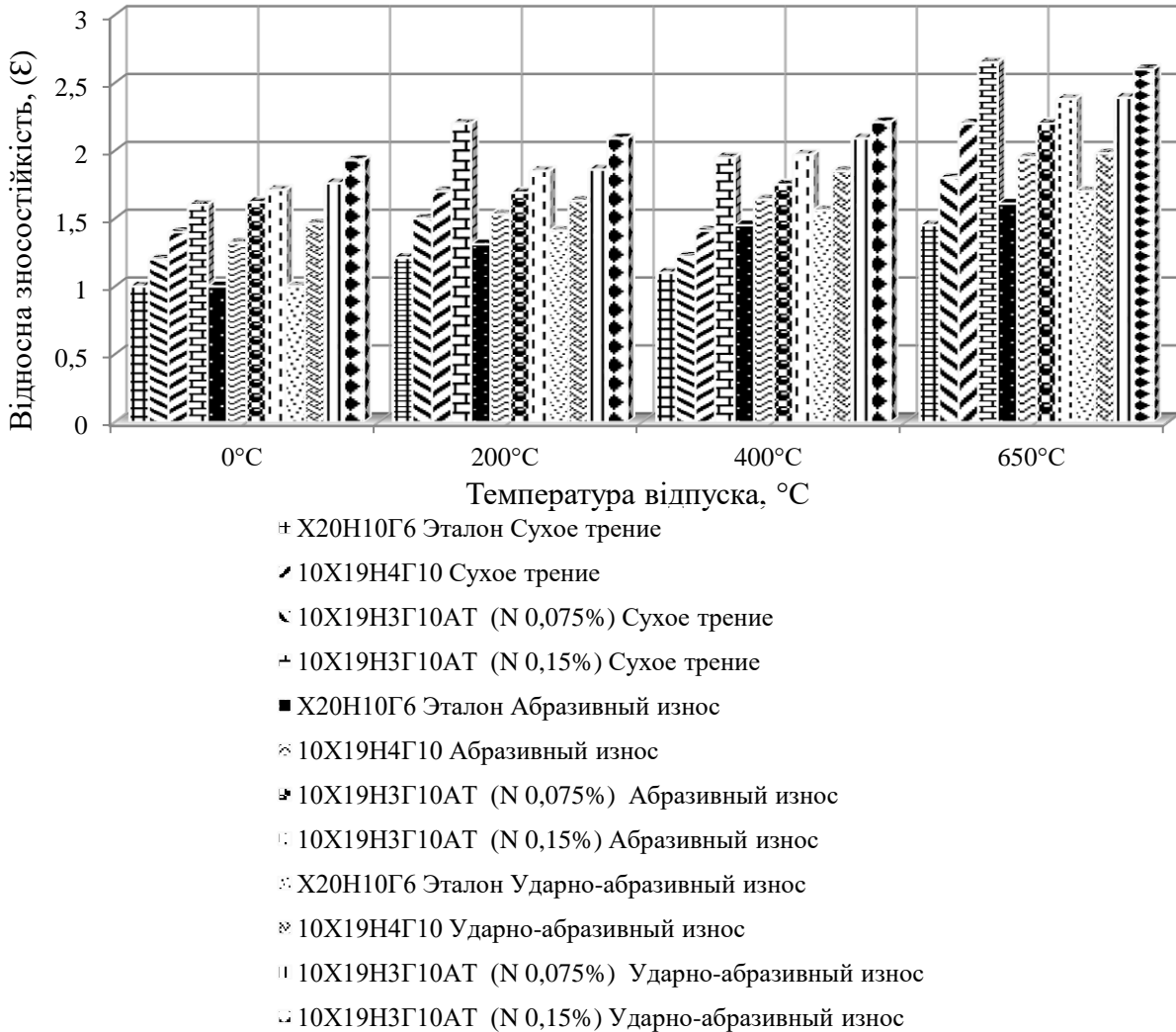


Рисунок 6 – Відносна зносостійкість наплавленого металу випробовуваними порошковими дротами при різних видах зношування до і після відпуску за різних температур

### ВИСНОВКИ

Найвищі показники зносостійкості продемонстрував наплавлений метал 10X19H3Г10AT (N 0,15%) порівняно з еталоном X20H10Г6. В умовах сухого тертя наплавлений метал розробленим порошковим дротом 10X19H3Г10AT (N 0,15%) в умовах відпуску за 650°C перевершує еталон у 2,65 раза. За абразивного та ударно-абразивного зносу простежується схожа закономірність, зносостійкість наплавленого металу новим порошковим дротом вища за еталон у 2,38 раза за абразивного та в 2,6 раза за ударно-абразивного зносу в разі відпуску, що дорівнює 650°C.

Таке значне підвищення зносостійкості можна пояснити дисперсним зміцненням внаслідок виділення карбонітридів, а також дестабілізацією аустеніту і подальшим

## Машинобудування і зварювальне виробництво

інтенсивнішим деформаційним мартенситним перетворенням у поверхневих шарах. Основною особливістю розробленого матеріалу є самозміцнення поверхневого шару наплавленого металу за рахунок енергії руйнування, більша частина якої витрачається на деформаційне мартенситне перетворення, тим самим менша її частина залишається на руйнування поверхні.

### Список використаних джерел

1. *Ematian A.* Study on Wear Resistance, Hardness and Impact Behaviour of Carburized Fe-Based Powder Metallurgy Parts for Automotive Applications / *A. Ematian* // *Materials Sciences and Applications*. – 2012. – № 3. – P. 519- 522.

2. *Петрова Л.Г.* Прикладное применение химико-термической обработки для разработки процессов поверхностного упрочнения / *Л.Г. Петрова* // *Вестник ХНАДУ*. – 2010. – Вып. 51. – С. 26-34.

3. *Малинов Л.С.* Получение метастабильного аустенита в поверхностном слое сталей и реализация эффекта самозакалки при нагружении для повышения их абразивной износостойкости / *Л.С. Малинов* // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 8. – С. 19-23.

4. *Чейлях А.П.* Повышение износостойкости цементованных сталей путем использования метастабильности остаточного аустенита / *А.П. Чейлях, Н.Е. Караваева* // *Кадры для региона – современная металлургия нового тысячелетия: 10-я Научно-практическая конференция, ЛГТУ, г. Липецк, декабрь 2013 г.* – Липецк: ЛГТУ, 2013. – Часть II. – С. 64-72.

5. *Чигарев В.В.* Повышение износостойкости хромомарганцевого наплавленного металла / *В.В. Чигарев, А.М. Зусин, В.Л. Малинов* // *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. Серія: Обробка матеріалів у машинобудуванні*. Миколаїв: НУК, 2014. №4. с.70-73.

6. *Чигарев В.В.* Влияние содержания углерода на износостойкость и свойства наплавленного металла, содержащего метастабильный аустенит / *В.В. Чигарев, В.Л. Малинов, А.М. Зусин* // *Сварочное производство: научно-технический и производственный журнал*. – М.: Изд. центр. «Технология машиностроения», 2015. – №8. – С.31-34.

7. *Малинов Л.С.* Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / *Л.С. Малинов* // *Сварочное производство*, 1995. №10, с. 22-25.

8. *Литвиненко В.Б.* Исследование влияния азота и нитридообразующих элементов на структуру и износостойкость наплавленного металла / *В.Б. Литвиненко* // *8-я Российская конф. молод. научн. сотр. и аспирантов. «Физико-химия и технология неорг. материалов»*, Москва, 1518 ноября 2011. М., 2011. с. 599-600.

9. *Петров Г.Л.* Сварочные материалы / *Г.Л. Петров* // Л.: Машиностроение, 1972. 280 с.

**Zusin A.M.**

### **INFLUENCE OF HEAT TREATMENT MODES ON THE STRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF WELDED METAL BY DEVELOPED CORED WIRES WITH NITROGEN**

*Interruption of machine operation due to damage or wear of components limits the duration of normal operation and leads to downtime. Additional costs are required for the manufacture and repair of spare parts. The operational reliability and durability of many machine parts depends on their strength and wear resistance [1].*

*Many machine parts are subjected to surface hardening to increase the hardness, endurance, and wear resistance of the surface layer. There are three main methods of surface hardening: surface hardening, chemical heat treatment, and plastic deformation hardening [2].*

*This paper investigates the possibility of obtaining residual austenite using different heat treatment regimes, as well as the effect of microstructure and its metastability on wear resistance. The phase composition, austenite metastability, and mechanical properties of cemented carbide steels can be controlled by adjusting the tempering temperature.*

*In recent years, many scientists have demonstrated the positive effect of residual austenite, which forms in the surface layer and self-reinforces under load, on wear resistance and fatigue strength [3].*

*One of the most important areas of modern welding is the creation of surfacing materials with metastable structures that can self-organize under the influence of external factors.*

*They can adapt to loading conditions and have significantly higher properties. Research in this area began in the middle of the last century by I.M. Bogachev and R.I. Mintz. They came up with and implemented the extremely fruitful idea of using martensitic transformation under load to test the mechanical properties and performance of special steels.*

*Alloys with metastable austenite have increased resistance to hydro-abrasive wear, abrasive, impact, dry friction and fatigue loading. These alloys make it possible to achieve high levels of mechanical properties. This is due to the fact that most of the external energy is consumed by the martensitic transformation under load, and, accordingly, a smaller proportion is used for fracture. The development of the martensitic transformation leads not only to strengthening but also to the relaxation of microstresses, which improves the micro-volume and characteristics of the alloy. This is also facilitated by dynamic strain aging. [4].*

**Keywords:** *flux-cored wire, austenite, nitrogen, wear resistance, alloying, arc surfacing, carbides, nitrides, heat treatment, tempering.*

*Стаття надійшла 28.04.2024 р.*

## ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОЇ ДИНАМІКИ

У роботі проведено аналіз методів та підходів імітаційного моделювання, розглянуті їх можливості, переваги, недоліки та області застосування. Визначено та описано два ключові підходи імітаційного моделювання, а саме системну динаміку та агентне моделювання. Розкрито їх сутність та області застосування, доцільність використання для прикладних задач. Звернено увагу на можливості поєднання цих методів, а також використання комбінованого підходу в контексті прикладного середовища моделювання, зокрема в рамках платформи AnyLogic. Такий підхід дозволяє розглянути поведінку системи, що складається з підсистем. Детально проаналізовано взаємодію системної динаміки та агентного моделювання, виявлено можливості оптимізації та удосконалення процесів моделювання. Розглянуто імітаційне моделювання прикладних задач економічного напрямку, особливості створення економічних моделей та їх перехід до математико-економічних структур. Визначено ключові проблеми, що виникають при моделюванні економічних систем, та сформульовано чіткі правила для їх усунення, сприяючи поліпшенню точності та адекватності моделей. В роботі наведено конкретний приклад моделювання економічної системи України на основі статистичних даних за період 2019-2022 років. Використана математична модель Солоу, а її коефіцієнти виведено на основі офіційних даних. Побудовано просторові системно-динамічні діаграми процесів в державній економіці, розроблено динамічні імітаційні моделі, використовуючи платформу AnyLogic. Здійснено формальний опис моделі економічного зростання, включаючи деталізований опис взаємозв'язків у моделі. Проведено експеримент для визначення оптимальної норми накопичення, враховуючи концепцію "золотого правила". Отримані результати експерименту важливі для розуміння та вдосконалення економічних стратегій.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, системна динаміка, агентне моделювання, модель Солоу, концепція золотого правила, економіко-математична модель, середовище AnyLogic, комп'ютерний експеримент.

**Постановка проблеми.** Проведення економічних експериментів, а також аналіз динамічних систем економічного напрямку є складним та ризикованим тому рідко застосовується на практиці. Тож на сьогодні актуальною є задача використання альтернативних способів дослідити вплив окремих факторів на динаміку економічних систем. До таких методів відноситься імітаційне моделювання, що дозволяє за розробленою математичною моделлю відтворити поведінку системи в часі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Математична школа зробила важливий внесок у моделювання ринкової економіки вже о 19-му столітті (Л. Вальрас, О. Курно, В. Парето, Ф. Еджуорт). Поняття моделі використовували Ф. Кене (1758, "Економічні таблиці") та Д. Рікардо (моделі міжнародної торгівлі) для ілюстрації та дослідження. Процеси моделювання набули широкого застосування, особливо у вивченні економічних процесів та явищ. Особливо широкого застосування процеси моделювання набули у вивченні економічних процесів та явищ у середині 20-го століття, коли виникло багато нових математичних напрямків та були розроблені інноваційні технології (комп'ютери).

Моделювання на сучасному етапі розвитку науки є одним із найдієвіших і перспективних інструментів вивчення складних явищ і процесів [1-2]. Моделюванням



## Інформаційні технології

економічних явищ та процесів займалися багато вчених. Зокрема, методи моделювання бізнес-процесів описані в працях з методології моделювання бізнес-процесів, багатокритеріального моделювання в прийнятті рішень, економетричне моделювання залежностей між макроекономічним станом України та обсягами залучених депозитів.

Моделюванню і прогнозуванню розвитку і функціонування соціально-економічної системи регіону присвячені численні наукові дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених. В рамках реалізації вони відображають теоретичні та методологічні основи підходи та методи прогнозування розвитку регіону [3]. Існують такі підходи до регіонального прогнозування як практичний підхід, заснований на моделях національного рівня та регіональний підхід [4-5]. Останнє безпосередньо пов'язане з розробкою просторових і метрологічних моделей економічних прогнозів для регіону. Автори зосереджують увагу на економічному розвитку країн, регіонів та організацій. Розглядаються інвестиції в людський капітал як можливість забезпечення сталого економічного зростання в країні; використовують вертикальний, горизонтальний та кореляційно-регресійний аналіз для оцінювання та моделювання корпоративної діяльності [6].

**Мета дослідження.** Метою роботи є огляд підходів та інструментів імітаційного моделювання, системно-динамічного та агентного підходу до моделювання та дослідження доцільності використання імітаційного моделювання в економіці.

**Основний матеріал дослідження.** Моделювання систем та підходи до симуляції, такі як моделювання динаміки систем на макрорівні та моделювання на основі агентів на мікрорівні, широко використовуються в природничих і суспільних науках для опису динаміки складних явищ. Це охоплює оцінку навколишнього середовища, екологічні та природні системи, біологію, економіку та інші соціальні науки. Загалом, системно-математичне моделювання, яке ґрунтується на звичайних диференціальних рівняннях, моделює систему на загальному рівні з фокусом на причинно-наслідкових відносинах та зворотному зв'язку, описуючи систему в термінах змінних стану та їхніх швидкостей зміни відносно часу. Натомість агентне моделювання розглядає систему не на загальному рівні, а на рівні її складових одиниць, або "агентів", та досліджує макро-поведінку, що виникає з мікрорівневих динамічних взаємодій між агентами.

Відповідно до системної динаміки, складні системи складаються з багатьох змінних, які взаємодіють один з одним через зворотний зв'язок петель, які в свою чергу можуть взаємодіяти між собою. Система визначається кордонами, всередині яких містяться всі важливими взаємодіючі елементи. Всередині системи визначаються всі петлі позитивного і негативного зворотного зв'язку. Для всіх циклів і взаємодій між ними вони описують кількісні та якісні характеристики. Система також визначає «точки застосування», в яких можна втручатися в процеси і змінювати поведінку системи.

Методологія системної динаміки включає якісні та кількісні етапи. На якісному етапі описується модель і визначаються характеристики взаємодій. На кількісному етапі під час комп'ютерного моделювання визначається, чи правильна модель, проводиться тестування гіпотез про поведінку системи.

У системній динаміці виділяють такі інструменти:

- причинно-наслідкові діаграми (діаграми казуальних петель зворотного зв'язку);
- імітаційні моделі (simulation) - математичні моделі систем, створені за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Серед недоліків системної динаміки визначається складність визначення основних складових системи та зв'язків між ними, адже при недостатній чи навпаки надмірній кількості залежних змінних ми ризикуємо втратити адекватність моделі. Для достовірного визначення про існування причинно-наслідкового зв'язку необхідно показати, що зміна одного фактору

## Інформаційні технології

(причини) неминуче тягне за собою зміну іншого (наслідок), тобто, що зміна першого фактору необхідна і достатня для зміни другого.

Важливо також пам'ятати, що відношення між змінними може бути неоднозначним - наприклад, нелінійним. При цьому інтенсивність реакції не завжди пропорційна інтенсивності впливу - наприклад, пропорційне збільшення заробітної плати не призводить до пропорційного збільшення мотивації персоналу. Наявність відкладених ефектів може ще більше ускладнити аналіз. Нарешті, багато явищ і подій є результатом взаємодії декількох причин. Все це важливо враховувати при побудові причинно-наслідкових діаграм.

Агентне моделювання (англ. agent-based model, АВМ) — один з класів обчислювальних моделей для цифрового моделювання дій або взаємодії автономних агентів. Агентами можуть виступати індивідуальні та колективні сутності, наприклад, групи або організації. Метою моделювання на основі агентів є оцінка їх впливу на систему в цілому. Методології оцінювання включають в себе елементи теорії ігор, складних систем, емерджентності, обчислювальної соціології, багатоагентної системи та еволюційного програмування. З теоретичних засад агентного моделювання можна відзначити теорію складності, складні системи (і складні адаптивні системи), штучне життя (та розподілений штучний інтелект), об'єктно-орієнтоване програмування, клітинні автомати, теорію графів та теорію категорій. В даний час не встановлено єдиного визначення для агента. Але нижче наведені деякі сталі з них:

- Агент - це програмний або апаратний об'єкт, який функціонує автономно для досягнення мети, поставленої користувачем;

- Агенти - це програмні об'єкти, які мають здатність сприймати вплив із середовища, визначати реакції на цей вплив і відповідно формувати поведінку. Такі агенти можуть взаємодіяти один з одним в мережі, "міркувати" і обмінюватися даними для формування індивідуальних або колективних рішень;

- Агент - це програмний об'єкт, який виконує певні профілактичні та коригувальні дії відповідно до завдань, делегованих людиною;

- Агент - знаходиться в деякому середовищі і розпізнає її за допомогою датчиків, отримує дані, що відображають події, що відбуваються в середовищі, інтерпретує ці дані і використовує їх в якості ефектора;

Перевагами агентного моделювання є можливість адаптації агентів до системних змін безпосередньо в процесі моделювання; можливість спостерігати за кожним окремим агентом незалежно один від одного. Агентне моделювання як правило застосовують для в масштабах окремого процесу (виробництво, обслуговування, тощо).

Основною метою економіки є забезпечення суспільства споживчими товарами та послугами, які створюють умови для життя та безпеки окремих осіб, сімей, громад та країни. У цьому контексті є сенс розглядати, вивчати та моделювати економічні системи. Практичними завданнями моделювання є:

- аналіз економічних об'єктів і процесів;
- економічне прогнозування, передбачення розвитку економічних процесів;
- розробка управлінських рішень на всіх рівнях господарської ієрархії управління.

Однак при побудові моделей виникає ряд труднощів, пов'язаних з динамічністю економічних процесів, що проявляється у зміні параметрів, а іноді і структури системи. Основною вимогою до моделі є відповідність модельованого процесу реальному світу. Динамізм не завжди адекватно відтворюється в математичній формі (в моделях), оскільки важко визначити найосновніші властивості об'єкта управління. Більше того, одні й ті ж властивості системи можуть бути важливими в один момент часу і неважливими в інший. На поведінку економічної системи сильно впливають суб'єктивні фактори, а також зовнішні

## Інформаційні технології

умови. Ці зв'язки та взаємодії називаються немодельованими граничними умовами або перехідними станами.

Таким чином, властивостями безперервності і динамічності володіють як самі об'єкти моделювання, так і умови функціонування модельованого об'єкта. Ці умови за прогнозований період можуть змінитися, тому відповідно, і поведінка об'єкта буде відрізнятись від передбаченого моделлю (інтерпретаційний аспект).

Наступною проблемою є значення інформації, а саме: наповнення розроблених моделей конкретно і якісною інформацією. Точність і повнота первинної інформації, реальні можливості її збору і обробки багато в чому визначають вибір типів моделей, які можуть отримати практичне застосування. Вона може бути розділена на дві категорії: інформація про минулий розвиток і сучасний стан об'єктів (фінансові спостереження та їх обробка) та інформація про майбутній розвиток об'єктів, що включає дані про очікувані зміни їх внутрішніх параметрів і зовнішніх умов (прогнози). Друга категорія інформації є результатом самостійних досліджень, які можуть виконуватись шляхом моделювання.

Тож, для початку роботи необхідно визначитись з основними необхідними вхідними даними, функціональними одиницями та залежностями між ними. Джерелом для всіх даних обрана державної служби статистики. Так візьмемо в якості головного показника валовий регіональний (національний) продукт, що буде визначатись функцією зростання. Зовнішньою рушійною силою є рівень інвестицій, що впливає на регіональну промисловість.

Зовнішній вплив включає в себе інші чинники що не можуть бути передбачені при моделюванні (такі як ризики пов'язані зі збитками від воєнних дій) тож його внесення робить модель стохастичною. Це дозволить знайти єдині правила для стійкого розвитку для різних ступенів впливу зовнішніх збитків. Причинно наслідкова діаграма економіки представлена на рис. 1.

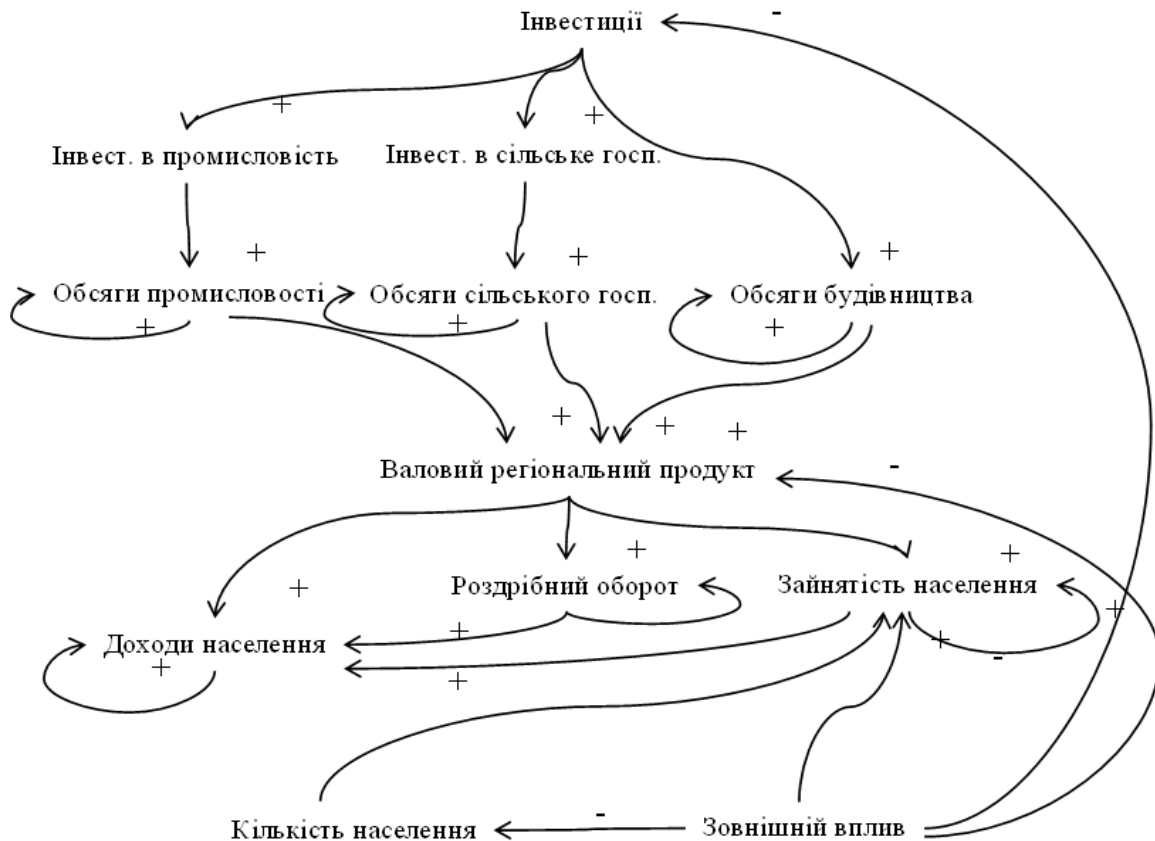


Рисунок 1 – Причинно наслідкова діаграма економічних процесів

Для подальшого моделювання було перенесено зібрані дані на існуючу перевірену модель Солоу. Основне завдання цієї моделі формулюється "золотим правилом". Згідно з цим правилом, оптимальний рівень пропозиції капіталу є таким, що гарантує найвищий рівень споживання. Щоб досягти цього рівня, необхідно збільшити інвестиції і таким чином зменшити споживання поточного покоління. Модель має кілька обмежень: По-перше, вона передбачає закриту економіку, що можливо прийняти як необхідне спрощення для побудови моделі.

По-друге, обмеженням моделі є те, що частка доходу, яка припадає на капітал (виведена з оцінок моделі), не збігається з даними національних рахунків. Одна зі спроб вирішити цю проблему полягає в тому, щоб розширити поняття капіталу, включивши до нього фізичний і людський капітал (останній включає освіту і, в деяких випадках, здоров'я).

По-третє, оцінена швидкість збіжності моделі є низькою. З використанням статистичних даних (табл. 1), адаптовані коефіцієнти еластичності виробництва за працею  $\alpha_1 = 0,353$  та еластичності виробництва за капіталом  $\alpha_2 = 0,647$ .

Таблиця 1 – Статистичні коефіцієнти для моделі по роках

рік	К - ВВП грн, млн.	L- кількість зайнятих, млн.	F основні фонди, млн. грн.
2019	3 977 198	16 578	4 301 474 677
2020	4 222 026	15 915	4 594 827 319
2021	5 450 849	15 610	4 891 300 904

При моделюванні в системі AnyLogic, за допомогою інструментів бібліотеки системної динаміки розроблено системно-динамічну діаграму, що описує модель Солоу (рис. 2).

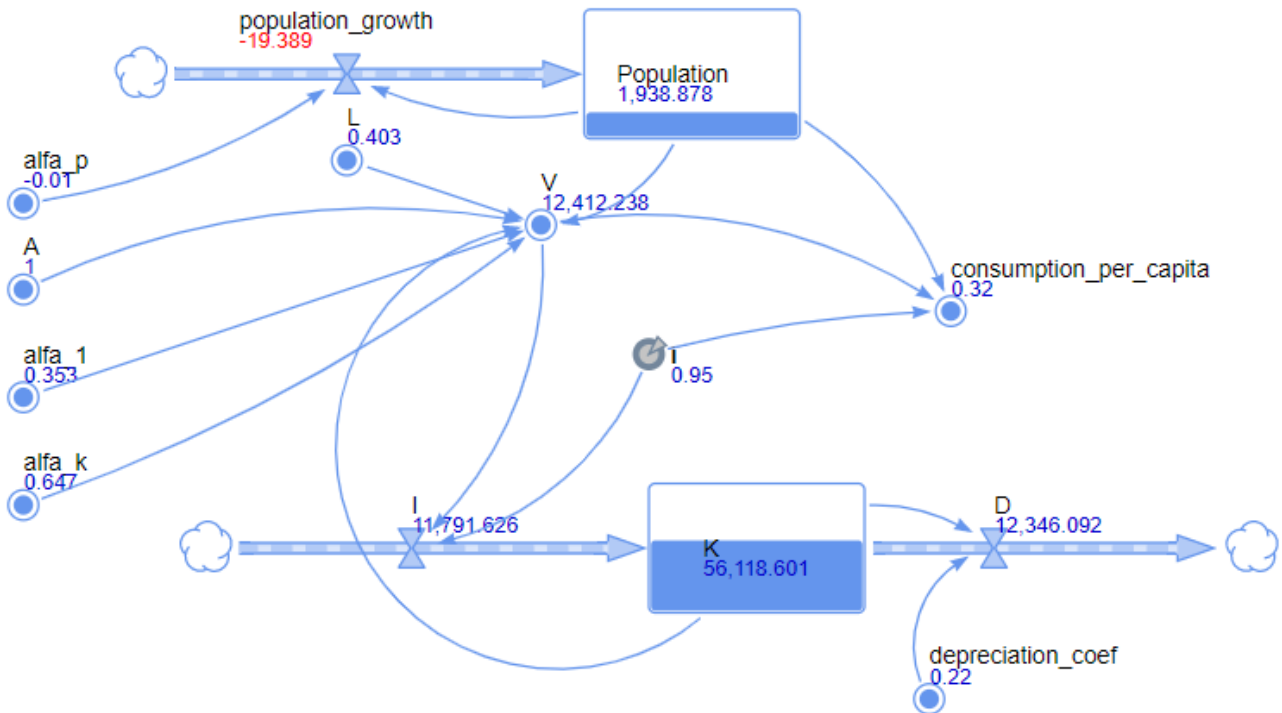


Рисунок 2 – Діаграма процесів моделі Солоу у середовищі AnyLogic

## Інформаційні технології

В результаті проведення імітаційного експерименту, діаграма процесів змінює показники накопичення, за якими можна проаналізувати її поведінку та побудувати відповідні графіки, наприклад, зміну споживання на душу населення (рис. 3).

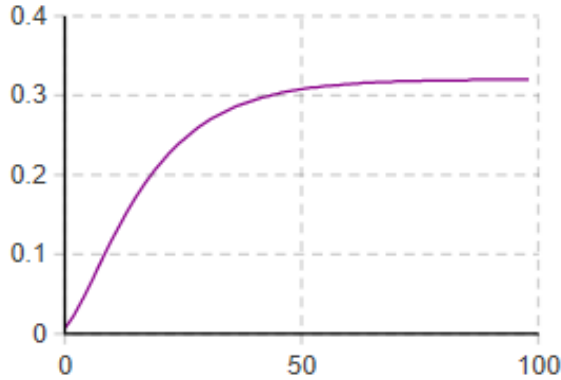


Рисунок 3 – Графік зміни споживання на душу населення з часом

За графіком на рис. 3 можна бачити, що споживання на душу населення має виражене S-подібне зростання, та досягає максимуму при значенні 0,32.

Рівноважне економічне зростання сумісне з різними значеннями норми заощаджень, що піднімає проблему оптимального вибору цієї норми. Якщо запас капіталу достатньо великий, то високий рівень виробництва гарантовано, але значна його частина буде використана на накопичення, а не на споживання, і суспільство не зможе скористатися плодами зростання. Якщо запас капіталу занадто малий, майже все вироблене буде споживатися, але й показники виробництва значно зменшуються. Зрозуміло, що десь між цими двома крайнощами знаходиться оптимальна точка для суспільства.

Проведемо імітаційний експеримент з варіюванням параметрів моделі Солоу та знайдемо таке значення частки валових інвестицій у ВВП ( $i$ ), щоб максимізувати споживання на душу населення. Варіюючи параметром ВВП проведено 161 ітерація комп'ютерного експерименту (рис. 4).

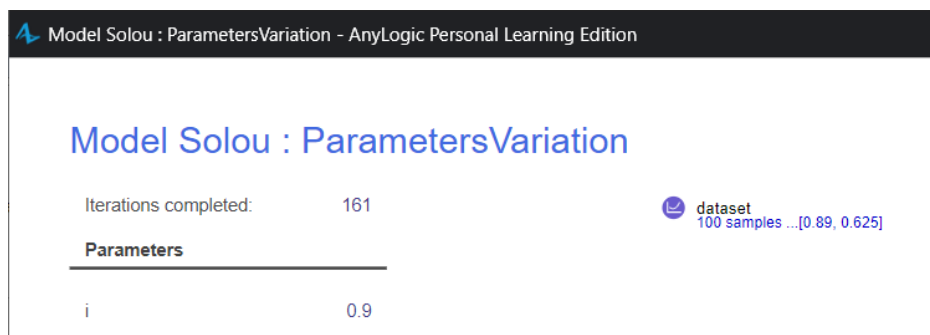


Рисунок 4 – Інтерфейс та дані імітаційного експерименту варіювання параметрів в середовищі AnyLogic

За результатами експерименту сформовані датасети та відповідні графіки (рис. 5). Можна спостерігати, що при нормі накопичення 0,65 досягається максимально можливе значення споживання на душу населення 1,12.



## Інформаційні технології

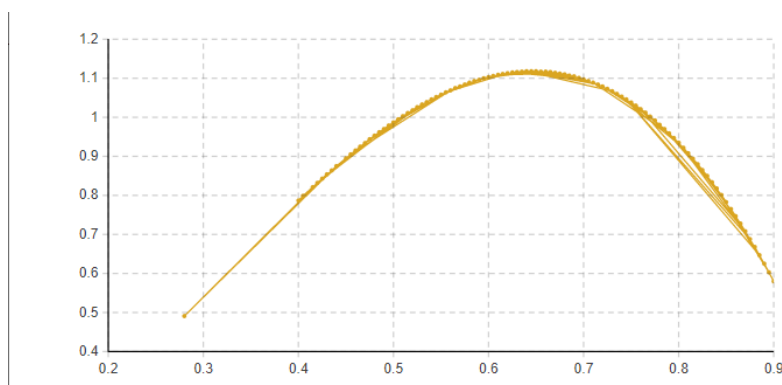


Рисунок 5 – Графік споживання на душу населення в залежності від значення ВВП

Отримані дані для реальної економіки, показують, що запаси капіталу є набагато нижчими від рівня «золотого правила». Для досягнення цього рівня вимагається збільшення інвестицій і, відповідно, зниження рівня споживання нинішніх поколінь. Оптимальний чисельний показник норми накопичення є бажаним але на практиці недосяжним для жодної економіки світу через певну спрощеність моделі.

## ВИСНОВКИ

Спираючись на проведений аналіз, можна зробити висновок, що моделювання є важливим компонентом процесу управління. Тому досить актуальним стає вивчення і всебічний аналіз моделювання при вирішенні економічних задач.

Отже, при розробці моделей економічних процесів необхідно приймати до уваги:

- мінливість (динамічність) економічних процесів;
- вплив навколишнього середовища на досліджуваний об'єкт;
- контроль за точністю і повнотою первинної інформації;
- однаковий ступінь агрегування вихідних даних;
- однорідну структуру одиниць сукупності;
- аналогію методів розрахунку показників у часі;
- однакову періодичність обліку окремих змінних;

Використання прикладних середовищ моделювання, таких як AnyLogic, якісно полегшує проведення моделювання та експериментів. За результатами моделювання досліджено характер динаміки споживання на душу населення а також проведено експеримент з визначення оптимальної норми накопичення користуючись «золотим правилом».

Результати економічного та математичного моделювання часто не є одразу доступними для прийняття управлінських рішень, а розглядаються як своєрідний консультативний інструмент.

Вони розглядаються як інструменти. Формальні методи є насамперед засобом підготовки науково обгрунтованого матеріалу для подальшої раціональної поведінки менеджерів у процесі управління. Вони дозволяють ефективно використовувати досвід, людську інтуїцію та здатність вирішувати проблеми, які важко піддаються формалізації.

### Список використаних джерел

1. Кравченко, Т. В. Методи прогнозування регіонального економічного розвитку / Т. В. Кравченко // Економічний аналіз : зб. наук. праць / Тернопільський національний економічний університет; редкол.: С. І. Шкарабан (голов. ред.) та ін. – Тернопіль: Видавничополіграфічний

центр Тернопільського національного економічного університету “Економічна думка”, 2013. – Том 13. – С. 88-94. – ISSN 1993-0259.

2. *Важинський, Ф. А.* Основні методи прогнозування соціально-економічного розвитку регіону / *Ф. А. Важинський, І. Ф. Коломієць* // Науковий вісник: зб. наук.-техн. пр. - Львів: Український державний лісотехнічний університет. – 2004. – Вип. 14.7. – С. 166-170.

3. *Фісун, К. А.* Методологія програмування розвитку регіонів України: монографія / *К. А. Фісун*. – Харків, 2007. – 401 с.

4. *Сауренко, Т. Н., Анисимов, В. Г.* Математические модели прогнозирования экологической угрозы техногенных аварий и катастроф в составе интегрированных систем безопасности региона. / *Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов* // *Civil SecurityTechnology*. – 2019. – Т. 16, №. 3 (61). – С. 62–67.

5. *Рамазанов С.К.* Моделювання соціально-еколого-економічної динаміки в нестабільному середовищі / *С.К. Рамазанов* // Інформатика та системні науки (ІСН-2015): матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, (м. Полтава, 19–21 берез. 2015 р.). – Полтава: ПУЕТ, 2015.

6. Моделі економічної динаміки для фахівців з інформаційних технологій: Навчальний посібник / *О. М. Гладка, І. М. Карпович, А. М. Сінчук*. – Рівне: РДГУ, 2019. – 158 с.

**Ostapenko A. O., Zalevska D. O**

### STUDY OF COMPLEX SYSTEMS USING SIMULATION MODELING BASED ON SYSTEM DYNAMICS

*The paper analyzes the methods and approaches of simulation modeling, considers their capabilities, advantages, disadvantages and areas of application. Two key approaches to simulation modeling are identified and described, namely system dynamics and agent-based modeling. Their essence and areas of application, the feasibility of using them for applied problems are revealed. Attention is drawn to the possibilities of combining these methods, as well as the use of a combined approach in the context of an applied modeling environment, in particular within the framework of the AnyLogic platform. This approach allows us to consider the behavior of a system consisting of subsystems. The interaction of system dynamics and agent-based modeling is analyzed in detail, and the possibilities of optimizing and improving modeling processes are identified. The simulation modeling of applied problems in the economic field, the peculiarities of creating economic models and their transition to mathematical and economic structures are considered. The key problems that arise in the modeling of economic systems are identified and clear rules for their elimination are formulated, which help to improve the accuracy and adequacy of models. The paper provides a specific example of modeling the economic system of Ukraine based on statistical data for the period of 2019-2022. The mathematical model of Solow is used, and its coefficients are derived on the basis of official data. Spatial system-dynamic diagrams of processes in the state economy are built, dynamic simulation models are developed using the AnyLogic platform. A formal description of the economic growth model is made, including a detailed description of the relationships in the model. An experiment was conducted to determine the optimal rate of accumulation, taking into account the concept of the "golden rule". The results of the experiment are important for understanding and improving economic strategies.*

**Keywords:** *simulation modeling, system dynamics, agent modeling, Solow model, golden rule concept, economic-mathematical model, AnyLogic environment, computer experiment.*

*Стаття надійшла 20.03.2024 р.*

## ПІДСИСТЕМА КОНТРОЛЮ ПОСЛІДОВНОСТІ ДІЙ КОРИСТУВАЧА ДЛЯ НАВЧАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ВІРТУАЛЬНОЮ РЕАЛЬНІСТЮ

*Віртуальна реальність дозволяє відтворити у цифровому тривимірному середовищі різноманітні процеси та забезпечити взаємодію з ними людини. Тому технології віртуальної реальності активно впроваджуються в навчальні системи. Завдяки цьому з'являється можливість безпечного й необмеженого повторення вправ з оволодіння практичними навичками. Але для ефективного використання навчальних систем з віртуальною реальністю, в них повинен бути компонент, що виконує контроль правильності виконання завдань користувачем та вірної послідовності виконання дій. Робота присвячена процесам створення, редагування, відображення, збереження та контролю виконання ланцюгів послідовних дій для користувача в навчальній системі з віртуальною реальністю. У роботі розглянуто аналіз останніх досліджень та публікацій, що підтвердив доцільність використання віртуальної реальності у навчанні. Визначено, що поширеним програмним засобом для розробки віртуальної реальності є міжплатформне середовище розробки Unity. Тому метою роботи є створення підсистеми для середовища Unity із можливістю інтеграції з бібліотеками для VR розробки, що автоматизує контроль за діями користувача під час навчання, а також зберігає дані про проходження сценаріїв навчання для подальшого контролю. Наведено опис основних розроблених класів підсистеми. Описано види користувачів підсистеми та загальний зміст її функціонування. Визначено перелік сутностей моделі даних для зберігання інформації про стан проходження завдань. Запропоновано склад модулів підсистеми контролю послідовності дій користувача. Описано процес налаштування підсистеми для використання. До переваг розробленої підсистеми можна віднести: стійкість до збоїв, простоту використання та широкий функціонал, а також можливість роботи на будь-якій платформі, що підтримується середовищем розробки Unity.*

**Ключові слова:** віртуальна реальність, Unity, VR, навчальна система, контроль дій

**Постановка проблеми.** Сьогодні спостерігається стрімкий розвиток технологій доповненої та віртуальної реальності. Віртуальна реальність (Virtual reality, VR) – це комп'ютерне тривимірне середовище, з яким може взаємодіяти людина за допомогою іммерсивних пристроїв – шоломів (окулярів), рукавичок, навушників. Ця технологія дозволяє перенести в цифровий простір велику кількість процесів, що до цього виконувалися лише вручну. Тому віртуальна реальність все більше знаходить застосування в різних сферах життя людини. Ця технологія охоплює вже не тільки коло розваг, але й навчання, бізнес та промисловість [1-10]. Основною перевагою перенесення навчального процесу в цифрове середовище є можливість повторення навчального курсу оволодіння певними практичними навичками необмежену кількість разів. Особливо актуальним це є для навчання виконанню операцій небезпечних для життя людини. При навчанні з віртуальною реальністю незалежно від складності сценарію людина не завдасть шкоди ні собі, ні іншим. Отже з кожним роком все більше вищих навчальних закладів впроваджують віртуальну реальність до процесу підготовки спеціалістів на різних рівнях. Але для цього необхідна розробка відповідного програмного забезпечення – навчальної системи. Особливістю навчальної системи з віртуальною реальністю є підсистема контролю правильності виконання завдань користувачем та вірної послідовності виконання дій, а також збереження даних про виконання для подальшого контролю з боку вповноважених осіб. Тому метою роботи є проектування та

розробка підсистеми контролю послідовності дій користувача для середовища Unity із можливістю використання як на проектах без розширення, так і інтеграції з технологіями VR та AR.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дуже актуальним є підхід до навчання з використанням технологій віртуальної реальності [1-10]. Наприклад, у роботі [6] описується досвід використання інтерактивного середовища тривимірної геовізуалізації в плануванні та управлінні ландшафтом. Віртуальне середовище реалізовано за допомогою ігрового движка Unity3D. У віртуальному середовищі студенти виконували завдання, пов'язані з геовізуалізацією та ландшафтним дизайном. Результати показали високе сприйняття 3D-середовища під час геовізуалізації в дев'яти проаналізованих підкатегоріях (відчуття присутності, залучення, занурення, потік, зручність використання, емоції, судження, вплив досвіду та впровадження технологій). А у роботі [7] описано VR тренажер для навчання робітників металургійних підприємств, який використовується перед початком ремонтних робіт зі складними механізмами. В основі тренажера авторами пропонується компонент, який може використовуватися для будь-якого обладнання віртуальної реальності.

У роботі [8] авторами надано використання віртуальної реальності як набір систем навчання студентів для трьох різних типів кранів. Результати дослідження на кафедрі архітектури та архітектурної інженерії Університета Йонсей показали, що система навчання роботі з VR краном значно підвищила самооцінку студентів під час управління краном та доведено, що VR підвищує рівень самоєфективності учнів.

Автори роботи [9] пропонують до уваги розробку морського тренажеру автоматичної ідентифікаційної системи в середовищі віртуальної реальності як додаткового навчального матеріалу для дистанційного використання. У цій статті описано розроблений віртуальний тренажер програми AIS у середовищі VR із застосуванням обладнання NComputing. Це дозволяє займатися вивченням системи AIS у вільний час та дистанційно.

Робота [16] присвячена наданню користувачам відчуття природи у віртуальній реальності. У цьому дослідженні запропоновано метод моделювання цифрових дерев на основі алгоритму процедурного графа розгалужень. Для оптимізації візуалізації в режимі реального часу автор пропонує метод, заснований на полігональній моделі гілок. Система віртуальної реальності розроблена на основі Oculus SDK і движка Unity3D. Поширеним програмним засобом для розробки віртуальної реальності є міжплатформне середовище розробки Unity [10].

Таким чином, на сьогодні технології віртуальної реальності дуже актуальні в галузі освіти. Тому розробка навчальних систем з використанням віртуальної реальності та їх оптимальна робота є актуальною задачею.

**Мета дослідження.** Метою роботи є створення підсистеми для середовища Unity із можливістю інтеграції з бібліотеками для VR розробки, що автоматизує контроль за діями користувача під час навчання, а також зберігає дані про проходження сценаріїв навчання для подальшого контролю знань.

**Основний матеріал дослідження.** Для підсистеми контролю дій користувача передбачено дві групи користувачів, а саме:

- розробник програмного забезпечення, який працює із вікнами інспектора середовища розробки, має доступ до створення нових об'єктів класів системи та видалення старих елементів, редагування тексту завдань, створення нових завдань, задання їх ієрархії, локалізації, тощо;
- користувач готового прикладення, який має доступ лише до перегляду інформації про прогрес виконання завдань та перегляду поточних та виконаних завдань, тобто працює лише із модулем відображення підсистеми.

## Інформаційні технології

Для реалізації підсистеми було обрано мову програмування C# бо вона найкраще підтримується в середовищі Unity та в порівнянні із Bolt надає вищу швидкість розробки. Нижче наведено перелік основних розроблених класів підсистеми та короткий опис їх функцій та змісту:

- клас QuestPrototype – є базовим класом для усіх видів завдань, як видно із назви, виступає прототипом, від якого відбувається наслідування, містить у собі базові поля для реалізації функціоналу завдання, представляє собою скриптовий об'єкт;
- клас QuestData – базове завдання, наслідує поля QuestPrototype, виконує функції контейнера та використовується іншими класами-обробниками для отримання інформації;
- клас QuestGroup – група завдань, містить у собі список завдань або груп завдань, реалізує функціонал перевірки завдань у контейнері на виконання;
- клас QuestItem – клас інспектора, що реалізує механізм відстеження виконання завдання та передає інформацію про виконане завдання у глобальну систему для обробки та винесення рішення про виконання або провал завдання;
- клас QuestItemScriptManager – клас-контейнер для інспектора, містить у собі список компонентів, скриптів або об'єктів, що мають бути вимкнені або увімкнені під час виконання та початку завдання;
- клас QuestItemManagerContainer – клас-контейнер для скриптів QuestItemScriptManager, використовується в тих випадках, коли необхідно інкапсулювати компоненти, що потрібно вимикати та вмикати, в межах одного ігрового об'єкта;
- клас QuestGroupScriptManager – аналогічний класу QuestItemScriptManager, але використовується для групи завдань, відрізняється нюансами реалізації, що зумовлені роботою середовища Unity;
- клас QuestSystem – система контролю послідовності, найважливіший скрипт підсистеми, надає функціонал по створенню послідовності, сигналізує про виконання або провал завдання або групи завдань, відстежує порядок виконання завдань;
- клас QuestSystemDebugger – клас для розробника, що надає функціонал для дебагу та контролю роботи підсистеми, знаходить усі квестові об'єкти на сцені та надає функціонал по графічному дебагу для VR шоломів;
- клас ClipboardManagerQuestSystemIntegrated – клас, що надає функціонал по представленню списку завдань користувачу готової системи у вигляді списку завдань із позначками про виконання або провал завдання, а також;
- клас QuestSystemDatabaseIntegration – клас для інтеграції квестової системи із базою даних, оновлює прогрес користувача при виконанні завдання;
- клас SQLite\_Engine – клас для підключення бази даних SQLite та роботи із нею, не має графічного інтерфейсу та є цілком статичним.

Загальний зміст функціонування підсистеми наступний. Користувач викликає тригер про виконання завдання, підсистема виконує валідацію завдання та дає сигнал в разі успішного виконання, а також оновлює дані про прогрес користувача в базі. В разі ж невірному порядку виконання система повідомляє про невірний порядок, якщо виконання завдання критичне у конкретний момент часу, система сигналізує про те, що завдання було провалене. Важливим є процес взаємодій між системою та квестовим об'єктом із боку квестового об'єкту. Спочатку об'єкт сигналізує системі про виконання завдання, потім очікує відповіді від системи, в разі, якщо система повертає відповідь, що завдання зараховано – об'єкт в разі наявності необхідності вносить зміни у стан інших ігрових об'єктів та їх компонентів.

Для зберігання даних для підсистеми було обрано СУБД SQLite. Вирішальними факторами вибору саме цієї СУБД стало те, що вона не потребує підключення до мережі, вага зібраного пакету та можливість використовувати її на більшості платформ, в тому числі



## Інформаційні технології

мобільних, таких як Android та iOS, тому файл для роботи із СУБД можна інтегрувати із підсистемою в один пакет, а потім зібрати разом із прикладенням, що позбавить кінцевого користувача необхідності самостійно ставити пакет на своє обладнання. Перелік сутностей необхідних для роботи підсистеми включає: «users» для збереження даних про користувачів, «scenarios» – збереження сценаріїв для проходження, «attempts» – збереження спроб проходження сценарію, «scenario\_steps» – збереження завдання до конкретного сценарію, «attempt\_steps» збереження кроків, що виконані під час спроби.

Підсистема, що розроблена в межах даної роботи, в загальному вигляді представляє собою сукупність бази даних та бібліотеки програмних кодів на мові C#, в складі якої розроблено наступні модулі:

- Модуль «Application» є базовим модулем, він запускається найпершим та запускає ініціалізацію підсистеми відстеження.
- Модуль «QuestSystem» надає функціонал по обробці запитів на виконання завдань.
- Модуль «Database» відповідає за поєднання та роботу із базою даних.
- Модуль «Output» відповідає за роботу виведення та форматування інформації про завдання для кінцевого користувача підсистеми у зрозумілому йому форматі, а також його стилізацію.
- Модулі «QuestInstance» та «QuestGroupInstance» відповідають за сигнали до системи та інтерпритацію її відповіді.
- Модулі «QuestContainer» та «QuestGroupContainer» відповідають за зберігання на менеджмент скриптів, компонентів та ігрових об'єктів, що пов'язані із поточним завданням.
- Модулі «Quest» та «QuestGroup» слугують контейнерами для інформації про завдання.

Інтерфейс підсистеми було реалізовано за допомогою Editor скриптів (спеціальних скриптів середовища Unity, що призначені для створення UI для розробників).

Для використання системи навчання необхідно у підсистемі контролю користувача створити об'єкту завдання. Для цього потрібно у середовищі Unity викликається команда «Create», потім у розділ QuestSystem обрається елемент Quest. Після того, як об'єкт завдання буде створено, заповнюються його поля. Далі виконується створення на сцені порожнього ігрового об'єкту та додання до нього компонента QuestSystem, що має номер початкового завдання та список завдань. Наступним кроком налаштовуються квестові предмети, для яких призначено завдання. Для цього на потрібний об'єкт із реалізованим функціоналом додається компонент QuestItem та QuestItemScriptsManager (або QuestGroupContainer) та виконується їх налаштування. Приклад налаштування компонента QuestItem наведено на рисунку 1.



Рисунок 1 – Налаштування компонента QuestItem

Варто зазначити, що передбачено використання декількох елементів підсистеми на одній сцені для розбиття завдань на великі незалежні блоки. Для цього існує можливість встановлювати конкретного скрипта QuestSystem як контролера, проте якщо на сцені мається лише один екземпляр цього компонента – його можна не встановлювати вручну.

У списки компоненту QuestItemScriptsManager, що мають відповідні змістовні назви, можна додавати елементи або компоненти (скрипти), що потрібно увімкнути або вимкнути на

## Інформаційні технології

початку або кінці виконання завдання, із полем «Disable after quest» та ігровим об'єктом CubeOne.

На цьому налаштування самої системи навчання можна вважати завершеним, вона зможе справно працювати та виконуватиме свої функції, буде записувати дані про прогрес у базу даних, якщо це потрібно, проте кінцевий користувач системи не буде бачити ніякої інформації.

Для налаштування виводу інформації для кінцевого користувача системи, необхідно створити об'єкт Canvas, в ньому створити об'єкт ScrollView та додати на нього компонент ClipboardQuestSystemIntegrated, після цього виконати його налаштування, як показано на рисунку 2.

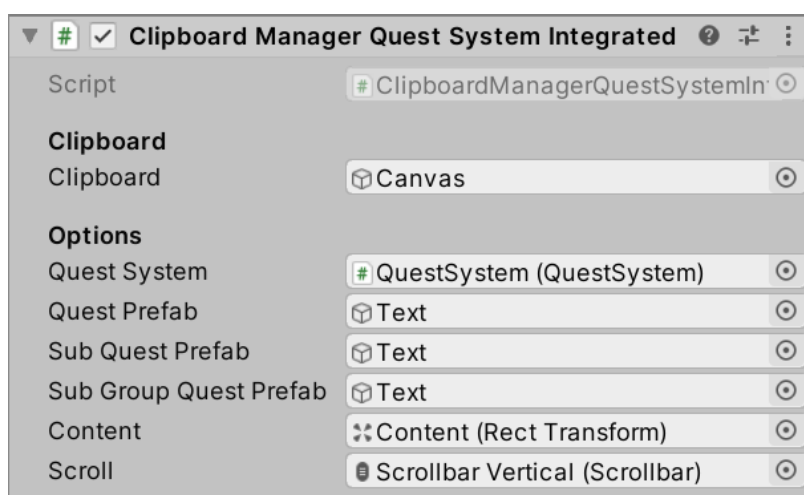


Рисунок 2 – Налаштування для модуля виводу інформації

На рисунку 2 поля «QuestPrefab», «SubQuestPrefab» та «SubGroupQuestPrefab» це заздалегідь налаштовані візуально компоненти для виводу інформації про конкретне завдання та групу завдань.

## ВИСНОВКИ

У сучасному світі, доповнена та віртуальна реальність все стрімкіше розвиваються та охоплюють все більшу кількість сфер нашого життя. З розвитком технологій, зростає інтерес щодо їх використання у повсякденності, навчанні та промисловості.

Аналіз публікацій показав, що використання навчальних систем з VR або AR є ефективним рішенням для використання в закладах вищої та спеціальної освіти. Це пояснюється тим, що використання технологій доповненої та віртуальної реальності, завдяки ефекту присутності та ефекту занурення в оточення, дозволяє досягти більших результатів у навчанні. Але впровадження віртуальної реальності у системи навчання потребує розробки контролюючих засобів, що забезпечать чіткого дотримання здобувачем освіти методології навчального процесу та виконання здобувачем поставлених завдань у послідовності, що задана правилами виконання робіт. Тому було розроблено підсистему контролю послідовності дій користувача для прискорення розробки навчальних модулів в середовищі Unity та автоматизації контролю за діями здобувача. Розроблена підсистема також надає можливість передивлятися результати виконання завдання здобувачем із боку вповноважених осіб (викладачів, інструкторів, тощо). Застосування підсистеми на практиці показало, що функціонал працює в повному обсязі, також у високонавантажених системах із великою кількістю завдань. Це дозволить використати розроблену підсистему у великих проектах.

## Інформаційні технології

### Список використаних джерел

1. *Melnyk, I.* Augmented reality and virtual reality as the resources of pupils' educational activity" / I. Melnyk, N. Zaderei, and G. Nefodova //in Proceedings of the International Scientific Conference "Information Technology and Computer Modeling", 2018. – pp. 61-64.
2. *Osipova, N.* Technologies of virtual and augmented reality for high education and secondary school/ N. Osipova, H. Kravtsov, O. Gnedkova, T. Lishchuk, K. Davidenko // in: Proceedings of the 15th International Conference on ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer, volume II: Workshops, 2393, CEUR Workshop Proceedings, Kherson, Ukraine, 2019. – pp. 121–131.
3. *Семеріков, С. О.* Впровадження курсу з розробки програмних засобів віртуальної та доповненої реальності для майбутніх викладачів STEM-дисциплін / С. О. Семеріков, С. Г. Литвинова, М. М. Мінтій // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2020. – Вип. 57. – С. 55-63.
4. *Маятіна, Н.* Віртуальна та доповнена реальність у сучасному освітньому процесі / Н. Маятіна, Н. Ханикіна// Актуальні питання гуманітарних наук. Вип 36, том 2, 2021 – С. 241-247.
5. *Величко С. П.* Віртуальна реальність як складова освітнього середовища по формуванню особистості студента/ С. П. Величко, І. О. Мороз // Наукові записки. Серія : Педагогічні науки. – Кіровоград : РВВ КДПУ ім. В. Винниченка, 2014. – Вип. 125. – С. 3–6.
6. *Carbonell-Carrera, C.* User VR Experience and Motivation Study in an Immersive 3D Geovisualization Environment Using a Game Engine for Landscape Design Teaching/ C. Carbonell-Carrera, J.L. Saorin, D. Melián Díaz//. Land, 10, 492. 2021. doi:10.3390/land10050492
7. *Saravas V.* The Development of Educational Application with Virtual Reality Placing Objects System Using Snap Zone Technology / V. Saravas, E. Pahalchuk, A. Molchan and Y. Kampov// 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), pp. 416-421, 2020. doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125023.
8. *Nesenbergs, K.* Use of augmented and virtual reality in remote higher education: A systematic umbrella review/ K. Nesenbergs, V. Abolins, J. Ormanis, A. Mednis// Education Sciences 11 (2020) 8. doi:10.3390/educsci11010008.
9. *Хандусь, Б. С.* Розробка тренажера автоматичної ідентифікаційної системи в середовищі віртуальної реальності на базі програмного забезпечення unity та unreal engine 4 для операційних систем Android та IOS./ Б. С. Хандусь, О. В. Маранов// Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. – К.: ДУІТ, 2020. – Випуск 2(30). – С. 88-95.
10. Unity Real-Time Development Platform \_ 3D, 2D VR & AR Engine <https://unity.com/>
11. SQLite [Електронний ресурс] // Вікіпедія.– Електрон. дан. – Режим доступу : <https://ru.wikipedia.org/wiki/SQLite>, вільний. – Загол. з екрану

**Piatykor O., Reshetnykov A., Aloshyn S.**

## **SUBSYSTEM OF USER ACTION SEQUENCE CONTROL FOR EDUCATIONAL SYSTEM WITH VIRTUAL REALITY**

*Virtual reality allows you to reproduce in a digital three-dimensional environment a variety of processes and human interaction with them. Therefore, virtual reality technologies are actively being introduced into educational systems. Thanks to this, it becomes possible to safely and unlimitedly repeat exercises to master practical skills. But for the effective use of training systems with virtual reality, they must have a component that controls the correctness of the tasks performed by the user*

*and the correct sequence of actions. The work is devoted to the processes of creating, editing, displaying, saving and monitoring the execution of chains of sequential user actions in a training system with virtual reality. The paper considers an analysis of recent studies and publications, which confirmed the feasibility of using virtual reality in education. It has been determined that a common software tool for developing virtual reality is the Unity cross-platform development environment. Therefore, the goal of the work is to create a subsystem for the Unity environment with the ability to integrate with libraries for VR development, automating control over user actions during training, as well as storing data on the passage of training scenarios for further control. The description of the main developed classes of the subsystem is presented. The howls of users of the subsystem and the general content of its functioning are described. A list of data model entities has been defined to store information about the state of task completion. The composition of the modules of the subsystem for monitoring the sequence of user actions is proposed. Describes the process of setting up a subsystem for use. The advantages of the developed subsystem include: failure resistance, ease of use and wide functionality, as well as the ability to work on any platform supported by the Unity development environment.*

**Keywords:** *virtual reality, Unity, VR, learning system, action control*

Азархов О. Ю., Яворський О. В., Сілі І. І., Єфременко Б. В.

## ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА УЛЬТРАФІОЛЕТОВОЇ ДЕЗІНФЕКЦІЇ КЕРОВАНА МІКРОКОНТРОЛЕРОМ

Ультрафіолетова дезінфекція – ефективний метод знищення мікроорганізмів за допомогою УФ-випромінювання. Цей процес стає все більш популярним у багатьох галузях, включаючи медицину. Особливість методу в тому, що знищуючи ДНК мікроорганізмів, він завдає шкоди всьому їхньому життєвому циклу. Розвиток ультрафіолетової дезінфекції охоплює вдосконалення технологій, збільшення потужності ультрафіолетових джерел, вдосконалення системи безпеки та автоматизації. Інновації включають в себе мобільні пристрої, розроблені для дезінфекції поверхонь у громадських місцях, а також ультрафіолетові системи для очищення повітря. Бактерицидні бокси вважаються інноваційними пристроями, які використовують ультрафіолетове випромінювання для дезінфекції різноманітних предметів та поверхонь. Бактерії та віруси, які можуть бути присутні на предметах, попадають під вплив ультрафіолетового світла і знищуються. Ці бокси ефективно борються з патогенами, забезпечуючи безпечне середовище для користувачів. В даній роботі розроблено та запропоновано пристрій бактерицидної ультрафіолетової дії який складається з трубчастої ультрафіолетової лампи, що випромінює ультрафіолетове випромінювання типу UVC у діапазоні 253 нм протягом 25 хвилин. Процес дезінфекції управляється мікроконтролером Arduino Uno. Запроектовано блок живлення пристрою, до складу якого входять понижуючий трансформатор напруги, випрямляч, ємнісні фільтри, регулятори напруги 12В та 5В. За допомогою цієї системи було досягнуто ефективного і безпечного знищення патогенних мікроорганізмів. Результати дослідження свідчать про перспективність використання інтегрованої системи ультрафіолетової дезінфекції, як ефективного та надійного інструменту для забезпечення безпеки та гігієни в різних галузях.

**Ключові слова:** : ультрафіолетове випромінювання, бактерицидна лампа, дезінфекція, Ардуіно, регулятор напруги, понижуючий трансформатор, діодний міст, ємнісний фільтр, прототип.

**Постановка проблеми.** Антисептик - це речовина, який знищує або дезактивує небезпечні патогени (такі як віруси, бактерії, гриби, водорості, і т.д.). Антисептики на основі хімічних речовин, такі як санітайзери, широко використовуються для дезінфекції мікробів. Зазвичай санітайзери містять спирт та використовуються лише для особистої гігієни.

Ультрафіолетові (УФ) стерилізаційні бокси можуть бути використані для стерилізації різних предметів, наприклад контактних лінз або окулярів. Для цих типів стерилізаторів, як правило, використовується лише одне джерело випромінювання, тому на об'єкті, який потрібно стерилізувати, часто є області, які захищені від УФ-випромінювання, що генерується з одного джерела. Крім того, під час процесу стерилізації часто необхідно поміщати стерилізований об'єкт на підставку, яка вже не є прозорою для УФ-випромінювання. В даному випадку підставка також допомагає захистити предмети, які потрібно дезінфікувати, від УФ-випромінювання.

Використовуються різноманітні методи для дезінфекції поверхонь за допомогою УФ-світла. Один із прикладів - це метод мобільного стерилізаційного пристрою, описаний для стерилізації перегоронок і стелі кімнати [1]. Бактерицидна лампа розміщується близько до стіни та/або стелі для дезінфекції обраної поверхні. Ще один метод описує дезінфекцію



повітря за допомогою УФ-випромінювання [2]. Деякі інші технології пропонують візок з колесами, який дозволяє оператору переміщати обладнання по підлозі для стерилізації [3].

Раніше бактерицидні бокси на основі ультрафіолету використовувалися лише в мікробіологічних лабораторіях для знищення мікробів. При досить високій ефективності знищення мікроорганізмів, час дезінфекції таких пристроїв становить більше 4 хвилин. Широке розповсюдження та спалах пандемії COVID-19, призвів до збільшення поверхонь вкритих небезпечними вірусами, в результаті здорова людина, яка контактує з поверхнею, має високу ймовірність заразитися. Тому, наряду з особистою гігієною, санітарна обробка поверхонь стає більш актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** УФ-промені - це один із типів електромагнітного випромінювання, довжина хвилі яких коротша, ніж видиме світло, і довша, ніж рентгенівські промені. УФ-промені було відкрито в фіолетовому частині видимого світла. Загалом, природне ультрафіолетове світло походить від сонячної енергії. УФ-промені поділяються на UVA, UVB та UVC [4]. Тоді як UVA випромінювання має довші хвилі та вони не поглинаються шарами атмосфери Землі, 95% UVB-променів і всі UVC-промені не доходять до земної поверхні.

Було помічено, що сонячне світло проявляє бактерицидні властивості [4]. Пізніше було виявлено, що короткі довжини хвиль УФ-променів мають схильність дезінфікувати мікроорганізми, такі як бактерії [5]. Крім того, було доведено, що короткі довжини хвиль УФ-променів можуть безпосередньо руйнувати ДНК мікробів [6]. Серед трьох типів ультрафіолетового випромінювання антимікробну активність найчастіше спостерігають в діапазоні UVC при 253,7 нм [7] (максимальне поглинання нуклеїнових кислот при 265 нм), яке зазвичай отримується за допомогою бактерицидних ламп. Однак виявлені ризики для здоров'я, пов'язані з впливом цих ламп, передусім пошкодженням очей та шкіри [8]. Тим не менш, недавні дані свідчать, що UVC при 222 нм теж проявляє бактерицидну активність [9], але не завдає шкоди очам та шкірі мишей [10]. Ці дані є попередніми, і для визначення безпеки ультрафіолетового випромінювання при 222 нм, особливо його можливих довгострокових впливів на здоров'я людини, потрібні подальші дослідження. Для потреб медицини була винайдена та знайшла своє застосування УФ-лампа з електричною розрядною частиною для лікування деяких захворювань [11]. При використанні даних ламп при поточному рівні ефективної дози (3 мДж/см<sup>2</sup>/год), UVC випромінювання може інактивувати приблизно 90% вірусів за 8 хвилин, 95% - за 11 хвилин та 99,9% - за 25 хвилин [4]. Пізніше була введена система очищення води на основі УФ для очищення забрудненої питної води шляхом вбивання до 99% мікробів. Паралельно з індустріальною революцією, багато водних ресурсів продовжують забруднюватися, і захворювання які передаються водним шляхом щороку зростають. Згідно з наявною статистикою, близько 2,3 мільярда людей по всьому світу страждають від різних захворювань, і близько 2,2 мільйонів людей помирають щороку від вживання забрудненої води [12]. Серед них досить великий відсоток дітей до 7 років. Крім того, обробка води методом оберненої осмоси сама по собі повільна і не ефективна у видаленні небезпечних речовин.

Отже, для підвищення ефективності дезінфекції патогенів потрібна нова інтегрована система на основі UVC випромінювання. Вплив ультрафіолетового бактерицидного опромінення зможе дезінфікувати повітря від наявних шкідливих мікроорганізмів. Найбільш широко використовуються розрядні люмінесцентні лампи з низьким ртутним тиском, які випромінюють короткі хвилі з довжиною хвиль між 100 і 280 нм [7]. Хоча UVC може бути використане для дезінфекції повітря, воно має певні обмеження. Для подолання цих обмежень потрібне додаткове світопоглинальне захисне обладнання, на відміну від звичайного УФ-випромінювання типу UVA.

**Мета дослідження.** Мета наукової статті полягає у розробці прототипу та дослідженні ефективності інтегрованої системи ультрафіолетової дезінфекції, що використовує мікроконтролер для керування та моніторингу процесу. Основними завданнями дослідження є розробка апаратного забезпечення для мікроконтролера, яке забезпечить точне регулювання параметрів ультрафіолетового випромінювання, а також безпеку та автоматизацію процесу. Дослідження спрямоване на визначення оптимальних параметрів роботи системи з метою максимальної ефективності ультрафіолетової дезінфекції при мінімальному використанні ресурсів.

**Основний матеріал дослідження.** Пропонований пристрій бактерицидної ультрафіолетової дії складається з трубчастої ультрафіолетової лампи TUV, що випромінює ультрафіолетове випромінювання типу UVC у діапазоні 253 нм протягом 25 хвилин [4]. Мікроконтролерний ультрафіолетовий бактерицидний пристрій включає в себе блок живлення, до складу якого входить понижуючий трансформатор напруги для зниження напруги з 230В до 12В змінного струму (рис.1). Далі, вихід 12В змінного струму підключений до випрямляючого мосту на 4-х діодах для перетворення 12В змінного струму в 12В постійного струму. За допомогою інтегральної мікросхеми регулятора напруги типу 7812 забезпечено живлення 12В постійного струму (рис. 2) для лампи, а також 5В постійного струму за допомогою інтегральної мікросхеми регулятора напруги типу 7805 для живлення мікроконтролера, електромагнітного реле та 16x2 ЖК-дисплея з інтерфейсом I2C. В пристрої запропоновано використати мікроконтролер Arduino Uno, оскільки він найбільше підходить для поставлених в роботі задач [10].

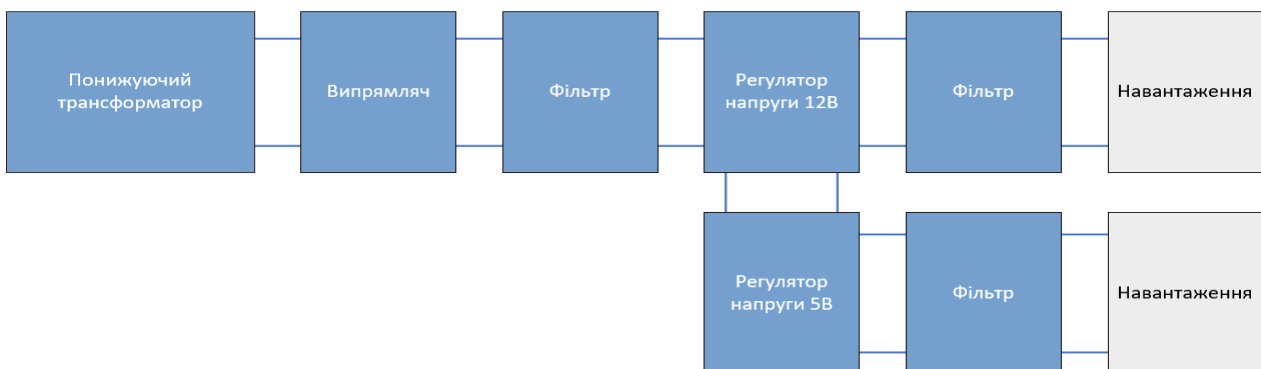


Рисунок 1 – Блок-схема випрямлення та зниження напруги 230В/12В/5В

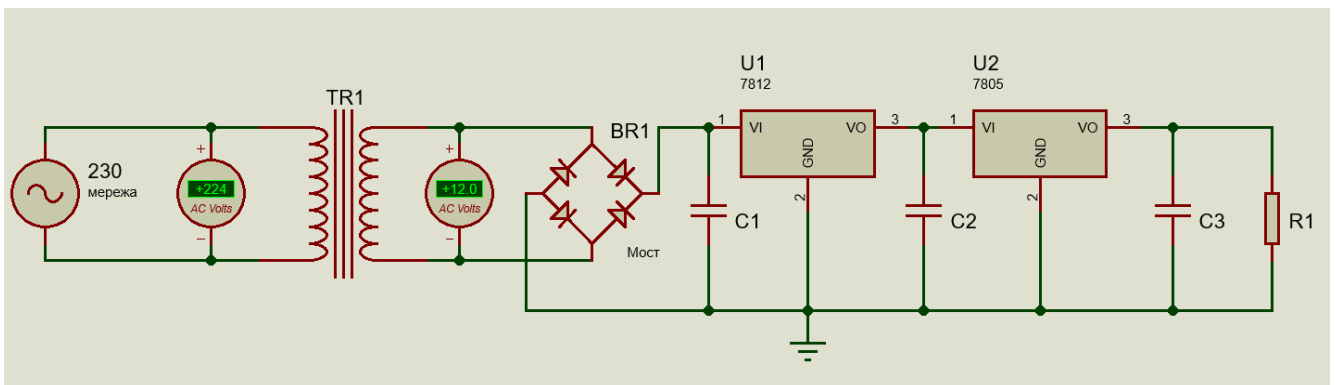


Рисунок 2 – Принципова електрична схема блоку живлення УФ бактерицидного пристрою розроблена в програмному середовищі Proteus

Понижуючий трансформатор 230В на 12В є ключовим компонентом в електричних системах, що використовується для забезпечення безпечного живлення низьковольтних пристроїв. Цей пристрій здатен знизити стандартну мережеву напругу 230 Вольт (рис.3) до значення 12 Вольт, що є ідеальним для живлення різноманітних електронних пристроїв, наприклад таких як бактерицидні лампи. Понижуючі трансформатори забезпечують стабільну та безпечну роботу пристроїв, зменшуючи ризик пошкодження через високу напругу. Використання понижуючих трансформаторів сприяє стабільності роботи пристроїв та їх безпеці.

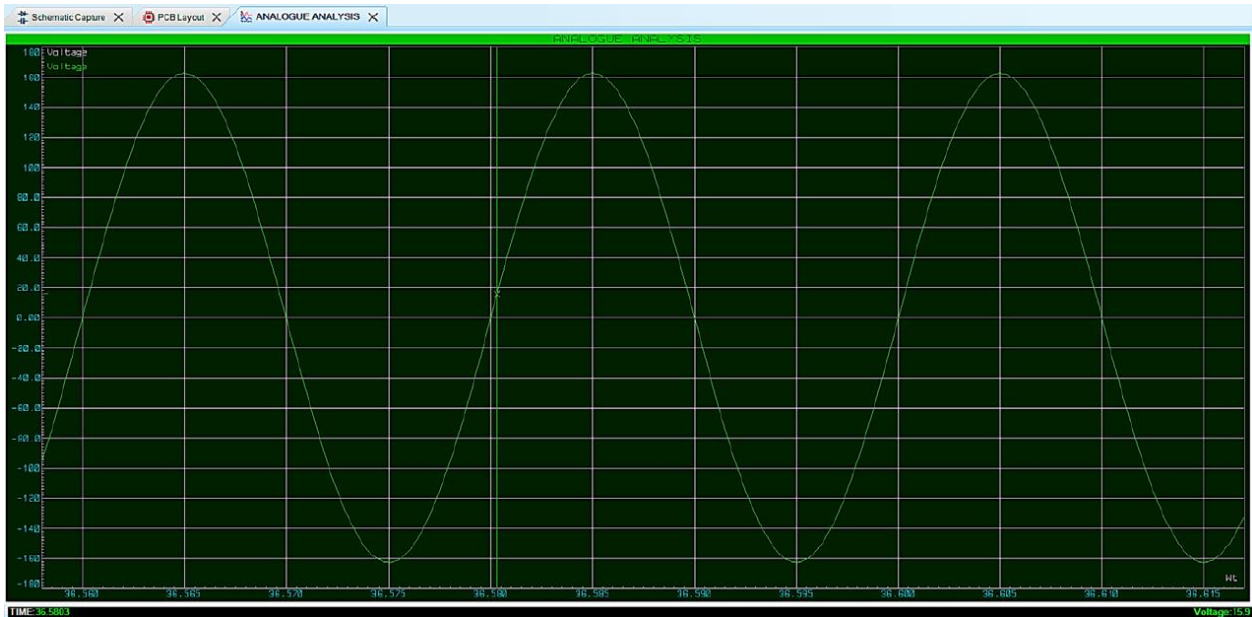


Рисунок 3 – Осцилограма вхідної напруги поданої на понижувальний трансформатор

$$V_{\max} = 325 \text{ B}, V_{\text{rms}} = 325 / \sqrt{2}, V_{\text{rms}} = 220 \text{ B}$$

Для випрямлення змінного струму (рис.4) нами було обрано діодний міст типу KBU1010

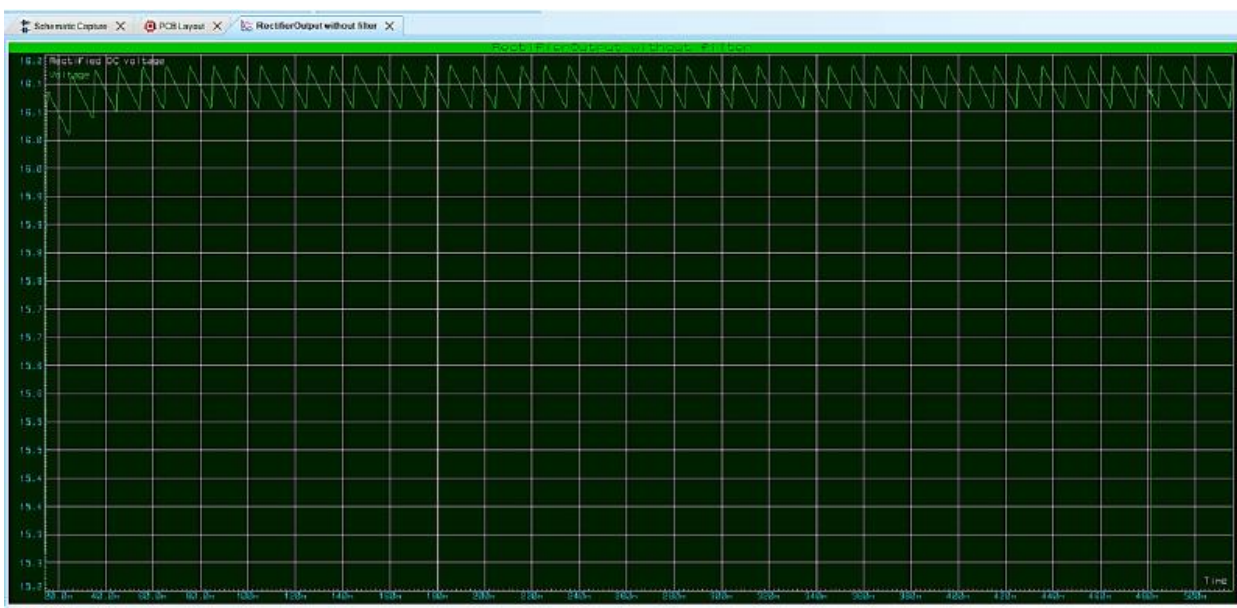


Рисунок 4 – Осцилограма випрямленої напруги без застосування ємнісних фільтрів

для живлення бактерицидного пристрою з кількох причин. По-перше, діодний міст є ефективним та надійним методом перетворення змінного струму на постійний. По-друге, діодні мости мають високу ефективність випрямлення, що дозволяє зменшити втрати енергії під час конвертації напруги. Крім того, вони мають компактну конструкцію, що робить їх ідеальними для використання в пристроях з обмеженими розмірами. Діодні мости також забезпечують стабільний вихідний струм, що є важливим для правильної роботи бактерицидного пристрою.

На першому етапі фільтрації, використовується електролітичний конденсатор ємністю 1000 мФ і напругою 25 В підключеного на вихід випрямляча. На другому етапі фільтрації, на виходах від регуляторів напруги 7812 та 7805 використовуються електролітичні конденсатори ємністю 100 мФ і напругою 25 В для усунення непотрібних коливань.

Конденсатори використані для фільтрації випрямленої пониженої напруги живлення бактерицидного пристрою з кількох причин. Конденсатори відмінно поглинають високочастотний шум та сприяють згладжуванню вхідного напругового сигналу, що допомагає забезпечити стабільне живлення пристрою; допомагають уникнути коливань вихідного струму, що особливо важливо для бактерицидного пристрою, оскільки він може вимагати постійної та стабільної напруги для ефективної роботи. Крім того, конденсатори допомагають захистити пристрій від перешкод та сприяють підвищенню його надійності та тривалості служби. Їх легко встановлювати та підтримувати, а також вони є відносно недорогими, що робить їх ефективним вибором для фільтрації напруги в бактерицидних пристроях.

Для забезпечення стабільної постійної напруги живлення 12В використовується мікросхема 7812IC (рис. 5). Мінімальна вхідна напруга до мікросхеми становить +14В, щоб забезпечити необхідні 12В на виході. Мікросхема має можливість налаштування вихідної напруги за допомогою двох зовнішніх резисторів. 7812IC має захист від перевантажень та короткого замикання, що забезпечує надійну роботу під час експлуатації.

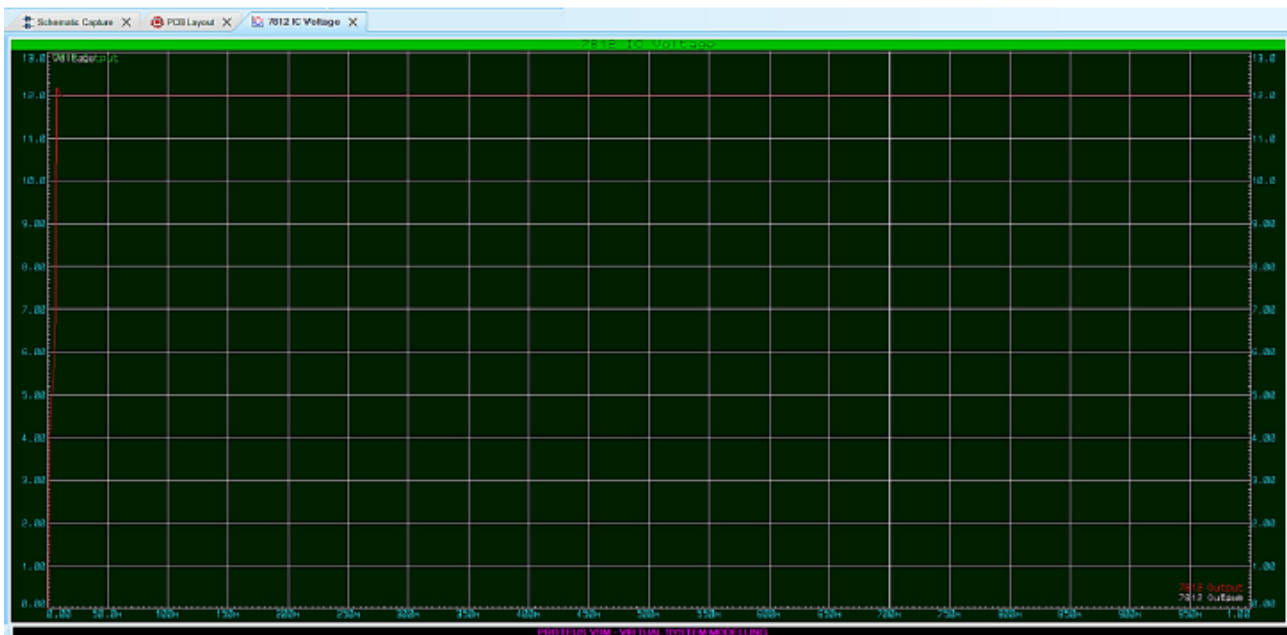


Рисунок 5 – Осцилограма випрямленої фіксованої вихідної напруги 12В від мікросхеми 7812 з ємнісним фільтром

Стабілізатор напруги LM7805 - це інтегральна мікросхема, призначена для забезпечення стабільної вихідної напруги 5В постійного струму. Вона працює на принципі автоматичного регулювання вихідної напруги незалежно від змін вхідної напруги або навантаження. LM7805 забезпечує захист від перевантажень та коротких замикань, що робить його надійним компонентом для живлення бактерицидного пристрою (рис. 6). Ця мікросхема широко використовується у різних застосуваннях, де потрібна стабільна постійна напруга 5В, наприклад для мікроконтролерів.

На рисунку 7 зображена лампа TUV потужністю 16 Вт. Ультрафіолетові лампи TUV – це низькотискові ртутні розрядні лампи, які використовуються в професійних системах очищення повітря та води. Трубчасте скляне тіло використовується для випромінювання коротких довжин хвиль UVC діапазону приблизно на рівні 253 – 254 нм, коли через два електроди пропускається електричний струм, що збуджує ртутний філамент, який в свою чергу генерує випромінювання енергії.

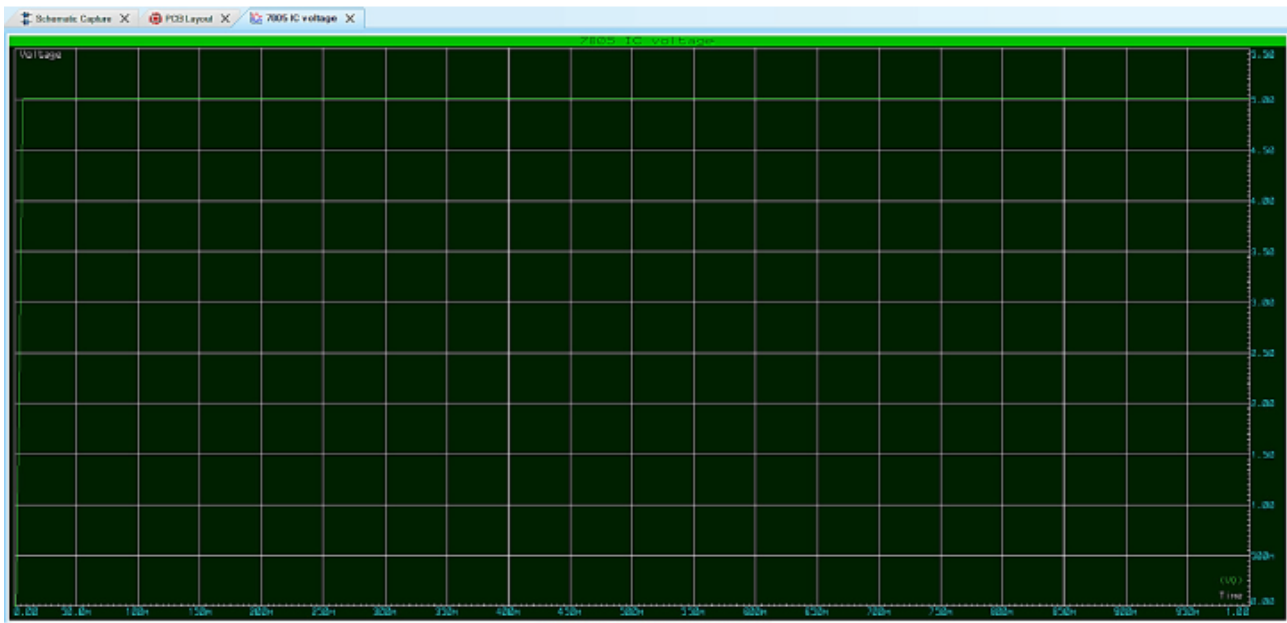


Рисунок 6 – Осцилограма випрямленої фіксованої вихідної напруги 5В від мікросхеми 7805 з ємнісним фільтром

Використання цієї лампи в пропонованому пристрої полягає у генерації ультрафіолетового опромінення UVC для бактерицидної дії. Ці лампи TUV оснащені двосторонньою базовою кришкою (G5) з матеріалу, стійкого до високих температур та УФ-випромінювання. У цій базовій кришці є два електроди (штифти), один з яких є анодом, а інший - катодом.



Рисунок 7 – Ультрафіолетова лампа TUV TL 16

Проектований пристрій працює наступним чином (рис. 8):



## Біомедична інженерія

- Етап 1: Об'єкт для дезінфекції поміщається всередину бактерицидного пристрою (камери). Після ввімкнення живлення, замок постійного струму 12 В за допомогою попередньо встановленого таймера, налаштованого на мікроконтролері Ардуіно, закриває дверцята з акрилу.
- Етап 2: Вмонтована лампа TUV (для генерації ультрафіолетового опромінювання UVC) та аксіальний вентилятор (для відведення очищеного повітря) вмикаються за допомогою електромагнітного реле.
- Етап 3: Повітря всмоктується всередину пристрою через мікроскопічні отвори, розташовані безпосередньо під аксіальним вентилятором.
- Етап 4: Внутрішня поверхня камери вкрита алюмінієвою фольгою, завдяки якій ультрафіолетове світло UVC відбивається всередині камери та не потрапляє назовні.
- Етап 5: Таймер починає відлік часу та відображає його на ЖК-дисплеї для відслідковування часу дезінфекції (25 хв).
- Етап 6: Після того, як обчислювальний таймер досягне нуля, замок постійного струму вимикається автоматично, і дверцята готові для відкривання вручну; дезінфікований об'єкт витягають з камери.

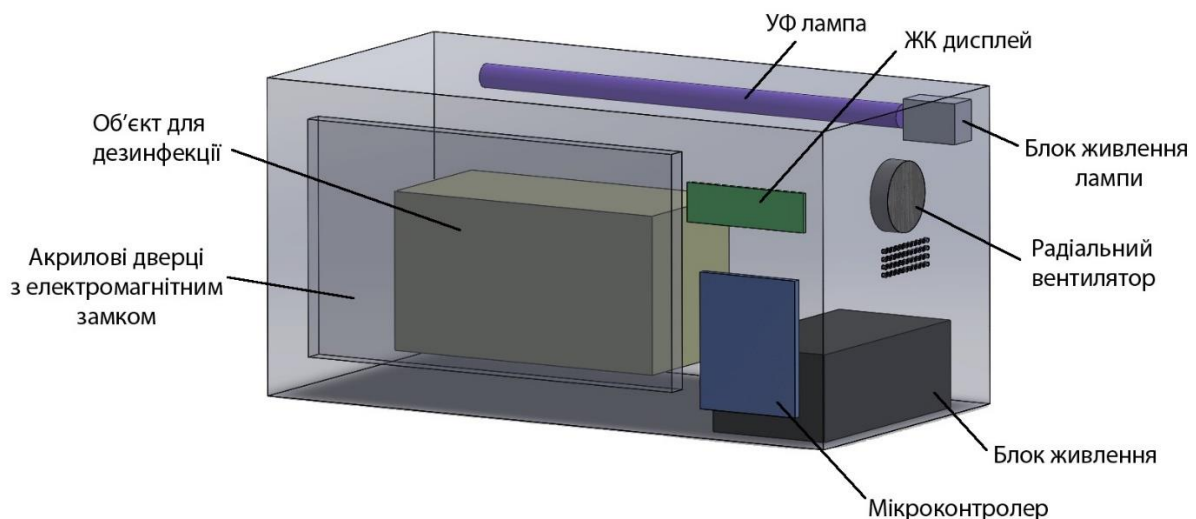


Рисунок 8 – Загальний вигляд 3Д моделі пропонованого бактерицидного ультрафіолетового пристрою дезінфікуючої дії

Пристрій використовує ультрафіолетове випромінювання для усунення бактерій, вірусів, грибків та інших патогенних мікроорганізмів. УФ промені здатні ефективно знищувати мікроорганізми на поверхнях та у повітрі, що робить пристрій ефективним засобом дезінфекції. Процес дезінфекції ультрафіолетовим світлом відбувається швидко, що дозволяє швидко очищувати приміщення або поверхні від шкідливих мікроорганізмів. УФ промені, які використовуються в пристрої, зазвичай не випромінюються на людину під час роботи за рахунок фольгєвої обкладинки, що робить його безпечним для використання в присутності людей. Пристрій не вимагає використання хімічних засобів дезінфекції, тому є екологічно чистим способом боротьби зі шкідливими мікроорганізмами. Бактерицидні пристрої УФ дезінфекції можуть бути використані в різних сферах, не тільки в медицині, а і у громадських місцях, продуктових закладах, готелях, офісах тощо.

## ВИСНОВКИ

У даній науковій статті розглянуто та розроблено прототип інтегрованої системи ультрафіолетової дезінфекції, керованої мікроконтролером Arduino Uno. За допомогою цієї системи досягнуто ефективного і безпечного знищення патогенних мікроорганізмів за допомогою ультрафіолетового випромінювання в діапазоні 253 нм. Використання мікроконтролера дозволило автоматизувати процес управління дезінфекційними процедурами та задати час опромінення на рівні необхідних 25 хвилин. Це призвело до підвищення точності та надійності процесу дезінфекції. Система продемонструвала добру енергоефективність, що робить її економічно вигідною для застосування в різних галузях, включаючи медицину. Інтегрована система ультрафіолетової дезінфекції, керована мікроконтролером, має значний потенціал для використання в умовах, де вимагається високий рівень гігієни та безпеки. Результати дослідження свідчать про перспективність використання інтегрованої системи ультрафіолетової дезінфекції, як ефективного та надійного інструменту для забезпечення безпеки та гігієни в різних галузях.

### Список використаних джерел

1. Fairand, B. P. Radiation sterilization for health care products: X-ray, gamma, and electron beam. / Fairand, B. P. // CRC Press. 2001. 160 p. <https://doi.org/10.1201/9781482286205>.
2. Rutala, W. A. Infection control: The role of disinfection and sterilization. / Rutala, W. A., Weber, D. J. // Journal of Hospital Infection, 43(1), S43eS55. 2009. [https://doi.org/10.1016/S0195-6701\(99\)90065-8](https://doi.org/10.1016/S0195-6701(99)90065-8).
3. Han Z. Environmental cleaning and disinfection of hospital rooms: A nationwide survey. / Z. Han, E. Pappas, A. Simmons, J. Fox, C. J. Donskey, A. Deshpande // American Journal of Infection Control. Volume 49, Issue 1, January 2021, Pages 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2020.08.008>.
4. Hadi J. Control measures for SARS-COV-2: a review on light-based inactivation of single-stranded rna viruses / J. Hadi, M. Dunowska, S. Wu, G. Brightwell // Pathogens, 9 (9). 2020. pp. 1-30, <https://www.mdpi.com/2076-0817/9/9/737>.
5. Thurston-Enriquez J.A. Inactivation of feline calicivirus and adenovirus type 40 by UV radiation / J.A. Thurston-Enriquez, C.N. Haas, J. Jacangelo, K. Riley, C.P. Gerba // Appl. Environ. Microbiol., 69 (1). 2003. pp. 577-582, <https://journals.asm.org/doi/10.1128/aem.69.1.577-582.2003>.
6. Rastogi R.P. Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair / R.P. Rastogi, A.K. Richa, M.B. Tyagi, R.P. Sinha // J. Nucl. Acids. 2010. <https://www.hindawi.com/journals/jna/2010/592980/>.
7. Buonanno M. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses / M. Buonanno, D. Welch, I. Shuryak, D.J. Brenner // Sci. Rep., 10 (1). 2020. pp. 1-21, <https://www.researchsquare.com/article/rs-25728/v1>.
8. Zaffina, S. Accidental exposure to UV radiation produced by germicidal lamp: Case report and risk assessment. / Zaffina, S.; Camisa, V.; Lembo, M.; Vinci, M.R.; Tucci, M.G.; Borra, M.; Napolitano, A.; Cannatà, V. // Photochem. Photobiol. 2012, 88, 1001–1004. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1751-1097.2012.01151.x>.
9. Welch, D. Far-UVC light: A new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. / Welch, D.; Buonanno, M.; Grilj, V.; Shuryak, I.; Crickmore, C.; Bigelow, A.W.; Randers-Pehrson, G.; Johnson, G.W.; Brenner, D.J. // Sci. Rep. 2018, 8, 1–7. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-21058-w>.
10. Narita, K. Chronic irradiation with 222-nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses. / Narita, K.; Asano, K.; Morimoto, Y.; Igarashi,

T.; Nakane, A. // PLoS ONE 2018, 13, e0201259. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0201259>.

11. Grimes D. R. Ultraviolet radiation therapy and UVR dose models. / Grimes D. R. // Medical Physics, 42(1), 440e455. 2015. <https://doi.org/10.1118/1.4903963>.

12. Khan, S. T. Engineered nanomaterials for water decontamination and purification: From lab to products. / Khan, S. T., Malik, A. // Journal of Hazardous Materials, 363, 295e308. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.091>.

13. Сілі І.І. Аналіз сучасних мікроконтролерів для вирішення біоінженерних задач та використанням інтернету речей / Сілі І.І., Азархов О.Ю., Єфременко Б.В. // Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 26 / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2023. – 79 – 87 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294299>.

Azarkhov O. Yu., Yavorsky O.V., Sili I. I., Efremneko B. V.

## INTEGRATED ULTRAVIOLET DISINFECTION SYSTEM CONTROLLED BY MICROCONTROLLER

*Ultraviolet disinfection is an effective method of eliminating microorganisms using UV radiation. This process is becoming increasingly popular in various fields, including medicine. The uniqueness of the method lies in its ability to damage the DNA of microorganisms, thereby disrupting their entire life cycle. The development of ultraviolet disinfection involves improving technologies, increasing the power of ultraviolet sources, and enhancing safety and automation systems. Innovations include mobile devices designed for surface disinfection in public places, as well as ultraviolet air purification systems. Bactericidal boxes are considered innovative devices that utilize ultraviolet radiation for disinfecting various objects and surfaces. Bacteria and viruses present on objects are exposed to ultraviolet light and destroyed. These boxes effectively combat pathogens, providing a safe environment for users. This paper presents the development and proposal of a bactericidal ultraviolet device consisting of a tubular ultraviolet lamp emitting UVC ultraviolet radiation at 253 nm for 25 minutes. The disinfection process is controlled by Arduino Uno microcontroller. A power supply unit for the device has been designed, including a step-down voltage transformer, rectifier, capacitive filters, and 12V and 5V voltage regulators. This system has achieved effective and safe destruction of pathogenic microorganisms. Research results indicate the potential of using the integrated ultraviolet disinfection system as an effective and reliable tool for ensuring safety and hygiene in various fields.*

**Keywords:** ultraviolet radiation, bactericidal lamp, disinfection, Arduino, voltage regulator, step-down transformer, diode bridge, capacitive filter, prototype.

Стаття надійшла 14.03.2024 р.

## Новини України та світу

### ЩО СТОІТЬ ЗА НИНІШНІМИ ПОКАЗНИКАМИ ЗРОСТАННЯ ГАЛУЗІ МЕТАЛУРГІЇ

За підсумками I кварталу 2024 року виробництво чавуну в Україні зросло порівняно з аналогічним періодом 2023-го на 32,1%, прокату – на 35,5%, сталі – на 36,6%. Такі дані наводить об'єднання «Укрметалургпром». Однією з головних причин такого зростання є низькі обсяги виробництва галузі на початку 2023 року. Тоді металургам доводилося стикатися з численними наслідками нестабільного енергопостачання, тож зимові місяці мало показові порівняння. Але у березні-2023 ситуація покращилася. Однак і в окремо взятому березні цього року у річному вимірі зафіксовано двозначні темпи зростання: чавун – 15,7%; прокат – 12,1%, сталь – 15,8%.



### Зовнішня торгівля продукцією металургії

Показники експорту значно покращали. У січні – березні морський експорт для металургів було закрито. Залізничні перевезення були не в спроможності задовольнити потреби металургів. Після початку роботи українського морського коридору з портів Великої Одеси «металеві» зовнішньоторговельні потоки попрямували туди.

У той час як імпорт металопрокату протягом січня –

березня збільшився на 20,7% (до 250,4 тис. тонн), його експорт зріс на 161,8%, досягнувши 1029 тис. тонн, перевищивши імпорт більш ніж у чотири рази (минулого року – у 1,9 рази).

### Місце України у світовому металургійному виробництві

За даними Worldsteel, у січні – березні 2024 року металургійні підприємства світу виробили 346 млн т чавуну, на 0,7% нижче за показник 2023-го.

Перше місце належить Китаю – 213,39 млн т чавуну, що на 2,9% нижче за показник січня – березня 2023 року. Частка китайського чавуну у світовому виробництві становить 61,7%.

Україна (1,59 млн т, або 132,1% до січня – березня 2023-го) піднялася з 16-ї на 15-ту позицію серед 40 країн.

Світова виплавка сталі у першому кварталі 2024 року становила 469 млн т, що на 0,5% вище за минулорічний показник.

Лідером тут також є КНР – 256,6 млн т, що на 1,9% менше у річному вимірі. Частка Китаю у світовому виробництві сталі становить 54,7%.

Україна (1,69 млн т, або 136,6% до минулого року) залишилася на 23-му місці серед 71 країни.

### Виробництво та споживання металопрокату в Україні у I кварталі 2024 року

У січні – березні українські металурги виробили 1389 тис. т металопрокату (135,5% до аналогічного періоду 2023-го). З них, за інформацією Державної митної служби, експортовано

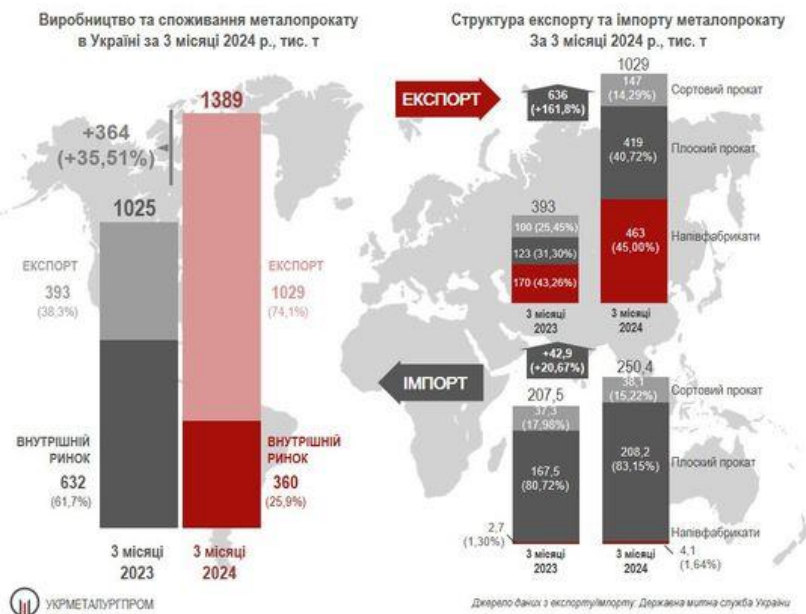


1029 тис. т, або 74%. Рік тому частка експорту становила 38,3% (393 тис. т). Частка напівфабрикатів в експортних поставках становить 45%, що дещо вище за показник 2023 року (43,3%).

У I кварталі ємність внутрішнього ринку становила 610 тис. т металопрокату, з яких 250 тис. т, або 41%, посідає імпорт. 2023 року ємність становила 840 тис. т при частці імпорту 24,8%. Тобто ринок за рік скоротився на 28% за одночасного збільшення частки імпорту на 16%. Багато в чому це пов'язано з наслідками бойових дій та руйнувань підприємств.

Основними експортними ринками українського металопрокату у січні – березні були країни Європейського Союзу (81,6%), Південна Америка (5,8%) та інші країни Європи (5,4%).

Основними джерелами імпорту є: інші країни Європи (42,9%), ЄС-27 (40,4%), країни Азії (15,8%).



## Підсумки роботи найбільших металургійних підприємств «Запоріжсталь»

З січня до березня на «Запоріжсталі» (група «Метінвест» Ріната Ахметова) виробили 785 тис. тонн чавуну, 731 тис. тонн сталі, відвантажили 615 тис. тонн прокату.

2023 року комбінат працював у середньому на 70% своєї потужності. За 2023 рік він виробив 2,7 млн. тонн чавуну, 2,5 млн. тонн сталі, відвантажив 2 млн. тонн прокату.

## «Дніпровський металургійний завод»

У березні Дніпровський металургійний завод (група ДСН Олександра Ярославського) скоротив виробництво прокату в порівнянні з аналогічним періодом минулого року на 41%, до 6,2 тис. тонн. При цьому виробництво металургійного коксу зросло на 52% – до 24,4 тис. тонн.

За три місяці виробництво прокату скоротилося на 60,6%, до 11,5 тис. тонн, коксу зросло на 52,2%, до 70 тис. тонн.

## «АрселорМіттал Кривий Ріг»

У березні комбінат «АрселорМіттал Кривий Ріг» збільшив виробництво всіх основних видів продукції. Порівняно з березнем 2023 року виробництво залізородного концентрату зросло на 52% (до 651 тис. тонн), коксу доменного – на 50% (до 84 тис. тонн), чавуну – на 27% (до 138 тис. тонн), сталі – на 61% (до 124 тис. тонн) та прокату – на 57% (до 116 тис. тонн). Обсяги виробництва зросли й у порівнянні з минулим місяцем: залізородного концентрату виробили на 14% більше, коксу доменного – на 9%, чавуну – на 19%, сталі та прокату – відповідно на 61 та 59%. Цих результатів вдалося досягти попри російські атаки, спрямовані проти вітчизняної енергетичної інфраструктури, та спричинені ними перебої з енергопостачанням.



У першому кварталі порівняно з четвертим кварталом 2023 року зростання виробництва становило від 50% до 94% залежно від виду продукції.

На підприємстві розраховують наблизитися до 50% використання своїх потужностей з металургійного виробництва.

<https://thepage.ua/ua/economy/stan-galuzi-metallurgiyi-u-2024-roci>

### **У 2023 РОЦІ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» СПЛАТИЛА 4,1 МЛРД ГРН ПОДАТКІВ І ЗБОРІВ**

У 2023 році компанія «АрселорМіттал Кривий Ріг» надіслала до бюджетів усіх рівнів 4,1 млрд грн податків і зборів. Із них 243 млн грн надійшли до державного бюджету та 2,2 млрд грн – до місцевих бюджетів.

Про це пише пресслужба компанії.

Також підприємство перерахувало майже 751 млн грн єдиного соціального внеску та 856 млн грн податку на додану вартість при імпорті сировини та матеріалів.

У структурі податків та зборів 2023 року найбільшою є сума сплаченого земельного податку. Так, у розпорядження місцевої громади Кривого Рогу від підприємства надійшло понад 1,4 млрд грн земельного податку, що на 280 млн грн більше у порівнянні з 2022 роком. Цей податок став головним компонентом збільшення платежів до місцевих бюджетів.

У вересні 2023 року комбінат «АрселорМіттал Кривий Ріг» придбав великі кар'єрні самоскиди CAT 785D вантажопідйомністю 136 тонн. Коштували вони \$8,3 млн.

<https://thepage.ua/ua/news/u-2023-roci-arselormittal-krivij-rig-splatila-41-mlrd-grn-podatki>

### **УКРЗАЛІЗНИЦЯ ЗА БЕРЕЗЕНЬ ПЕРЕВЕЗЛА НАЙБІЛЬШЕ ВАНТАЖІВ З ПОЧАТКУ ВЕЛИКОЇ ВІЙНИ**

«Укрзалізниця» встановила черговий рекорд з перевезення. У березні компанією перевезено 16 млн тонн вантажів, що найбільше з початку повномасштабної війни.

Про це пише Мінінфраструктури.

Це й на 10% більше теж рекордних показників лютого 2024-го, коли обсяг перевезень сягнув 14,5 млн тонн. Зростання вантажних перевезень «Укрзалізниця» демонструє третій місяць поспіль.

Через припортові станції було перевезено 5,3 млн тонн вантажів, з них — 2,7 млн тонн зернових. Через західні прикордонні переходи — 3,4 млн тонн, включаючи 484 тисячі тонн зернових.

На експорт у березні 2024 року залізницею було перевезено 8 млн тонн вантажів, з них 3,2 млн тонн — зернові. Загалом на експорт перевезено 51% від усіх вантажів. Обсяг експорту збільшився порівняно з березнем 2023 року більш ніж наполовину.

У внутрішньому сполученні було перевезено 7 млн тонн, що на 11% більше березня 2023 року. Імпорتنі перевезення зросли на 65% до березня 2023 року і становили 808,3 тис. тонн.

Нагадаємо, що «Укрзалізниця» вперше продемонструвала медичний евакуаційний поїзд. Всього держкомпанія створила 62 медичних вагони.

<https://thepage.ua/ua/news/ukrzaliznicya-za-berezen-2024-r-perevezla-16-mln-tonn-vantazhiv>

## У СІЧНІ-ЛЮТОМУ ВАЛЮТНА ВИРУЧКА ВІД ЕКСПОРТУ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ ЗРОСЛА НА 46%

У перші два місяці 2024 року українські металургійні підприємства продемонстрували значне зростання експортної виручки від продажу чорних металів у порівнянні з аналогічним періодом 2023 року. Вони зросли на 46,3% та становили \$522,519 млн.

Про це пише "Інтерфакс-Україна".

Згідно з повідомленням, це склало 7,67% від загального експортного виторгу країни проти 5,53% роком раніше. У лютому 2024 року експортна виручка від чорних металів сягнула \$248,443 млн.

Водночас, за два перші місяці Україна наростила на 35,6% й дохід від імпорту чорних металів - до \$221,529 млн, у лютому імпорт становив \$112,114 млн.

Крім того, у січні-лютому 2024 року Україна збільшила експорт металовиробів на 3,7% - до \$152,383 млн, імпорт цієї продукції зріс на 33,4% - до \$144,769 млн.

Для порівняння, у 2023 році експортні надходження від чорних металів скоротилися на 41,59% у порівнянні з 2022 роком - до \$2,648 млрд, їхня частка у товарному експорті впала з 10,26% до 7,32%. Імпорт же аналогічної продукції зріс на 37% - до \$1,307 млрд.

Крім того, минулого року Україна знизила експорт металовиробів на 16,6% порівняно з попереднім роком - до \$877,916 млн. Водночас імпорт металовиробів за цей період зріс на 40,3% - до \$902,565 млн.

Отже, у 2024 році спостерігається суттєве поживлення експортно-імпортних операцій з металургійною продукцією після торішнього спаду.

### В якому стані українська металургія

Як пише "Економічна правда", у 2023 році українські металурги змогли утримати виробництво сталі на рівні минулого року, виготовивши 6,2 млн тонн, що на 0,6% менше за показники 2022 року. При цьому, виключивши початок 2022 року, обсяги виробництва сталі збільшилися на 26,9%.

Така ж тенденція спостерігається і в секторі сталевого прокату, випуск якого склав 5,37 млн тонн, зростання на 0,4%, а без урахування перших місяців 2022 року – на 31,2%. У порівнянні з 2021 роком, після втрати маріупольських металургійних заводів (ММК ім. Ілліча та МК "Азовсталь"), виробництво сталі та прокату знизилося в 3-3,5 раза.

ММК ім. Ілліча та "Азовсталь", виплавляли 40% сталі в країні, але були зруйновані в ході боїв за Маріуполь.

Зникнення з ринку спеціалізованих видів сталевого прокату, що вироблялися на маріупольських заводах, спричинило дефіцит на українському ринку такої продукції, як оцинкований плоский прокат, плоский прокат середньої та високої товщини, сортовий прокат будівельного профілю, залізничні рейки.

Прогнозується, що у 2024 році українські металурги за прогнозами експертів зможуть збільшити виплавку сталі до 7-8 млн тонн проти 6,2 млн тонн у 2023. Водночас, відсутність на ринку продукції, що раніше вироблялися маріупольськими заводами, разом із зростаючим попитом буде спонукати до збільшення імпорту. Протягом 2024 року обсяги імпорту можуть досягти 1,3-1,6 млн тонн із збільшенням витрат на імпорт до 1,5-1,8 млрд дол. США.

<https://delo.ua/industry/u-2024-roci-valyutna-virucka-vid-eksportu-cornix-metaliv-zrosla-na-46-vidnosno-minuloricnogo-pokaznika-430279/>

## 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 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 та російською мовою –*файлан.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](mailto:zusin_a_m@pstu.edu) Тел. +38(096)122-22-74.

Підписано до друку 08.12.2022 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.