

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

The Ministry of Education and Science of Ukraine
The Ukrainian State University of Science and Technologies

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ
НАУКОВІ ВІСТІ

MODERN PROBLEMS OF METALLURGY
SCIENTIFIC BULLETIN

№ 28

Дніпро 2025

Dnipro 2025

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №28, (2025). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2025. – 390с.

ISSN 1991-7848 (Print)

ISSN 2707-9457 (Online)

Відповідальний редактор: д.т.н., проф. Селівьорстов В.Ю.

Заступник відповідального редактора: д.т.н., доц. Селівьорстова Т.В.

Відповідальний секретар редакції: к.т.н., с.н.с. Власова Т.Є.

Редакційна колегія збірника:

Балакін В.Ф. д.т.н., проф.,
Гасик М.М. д.т.н., проф. (Фінляндія),
Губінський М.В. д.т.н., проф.,
Гуда А.І., д.т.н., доц.,
Єрьомін О.О., д.т.н., проф.,
Критська Т.В., д.т.н., проф.,
Пінчук В.О., д.т.н., проф.,
Пройдак Ю.С. д.т.н., проф.,
Саричев О.П., д.т.н., проф.,
Светличний Д.С. д.т.н., проф. (Польща),
Селівьорстов В.Ю., д.т.н., проф.,
Тараканов А.К. д.т.н., проф.,
Фролов Я.В., д.т.н., проф.

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 29.01.2025 р., № 7

Адреса редакції збірника:
49005, м. Дніпро, пр. Науки, 4,
Український державний університет науки і технологій
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
кафедра Інформаційних технологій і систем,
e-mail: st@nmetau.edu.ua
+3 8 (097) 685 45 25

© Український державний університет науки і технологій
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2025.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.01

УДК 669.295:669.046.516

О.Б.Галенкова, В.С.Єфанов, О.В.Завгородній, В.І.Бронецька, В.Г.Шевченко

КОМПЛЕКСНИЙ ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ γ-СПЛАВУ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДУ ТИТАНУ

Анотація. *Методом планування повнофакторного експерименту досліджено вплив модифікуючих елементів Y, Re та B на властивості сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. Отримано регресійні рівняння, що дають можливість розрахувати хімічний склад сплаву у відповідності до заданого рівня властивостей матеріалу авіаційного виробу.*

Ключові слова: *алюмінід титану, повнофакторний експеримент, модифікуючі елементи, регресійні рівняння, параметри оптимізації, функція відгуку, механічні властивості.*

Постановка проблеми.

Сплави на основі алюмініду титану завдяки високим питомим характеристикам міцності, жароміцності та жаростійкості на сьогоднішній день є найбільш перспективним класом матеріалів для виготовлення деталей сучасних авіаційних двигунів, зокрема, лопаток турбіни, робоча температура яких знаходиться в діапазоні 700...900°C, і заміни жароміцних сплавів на основі нікелю, що володіють значно більшою щільністю.

Головною технологією отримання деталей з алюмініду титану є технологія лиття [1-3], завдяки якій формується крупнозеренна структура, що поступається за властивостями матеріалам, що отримані, зокрема, шляхом деформації [4].

Одним із шляхів подрібнення зерна литої структури для підвищення рівня механічних властивостей γ-сплавів є модифікування поверхнево активними елементами, що адсорбуються на поверхні зерен та сприяють зміні поверхневої активності кристалів швидкості дифузії і призводить до зміни форми та розмірів кристалів [5]. Згідно принципів комплексного легування доцільним є застосування сумісного легування модифікуючими елементами.

При вивченні сумісного впливу модифікаторів на властивості сплаву на основі алюмініду для зменшення кількості експериментів використовують методи планування експерименту. Планування експерименту дозволяє варіювати одночасно усі фактори і отримувати кількісні оцінки основних ефектів взаємодії [6].

На сьогоднішній день найбільша кількість досліджень по вивченню впливу параметрів і типу структури на механічні властивості здійснюється стосовно сплавів алюмініду титану четвертого покоління [7-9]. Тому в якості сплаву для досліджень обрано сплав четвертого покоління типу TNM (Titanium-Niobium-Molybdenum) системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. На основі аналізу впливу різних модифікуючих елементів на структуру та властивості γ -сплавів елементами-модифікаторами обрано В, У та Re.

Мета роботи – забезпечення рівня властивостей в γ -сплавах за рахунок оптимального вмісту модифікуючих елементів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для визначення індивідуального та комплексного впливу обраних модифікаторів дослідження проводили у відповідності з методом планування повнофакторного експерименту 2^3 .

Інтервали варіювання модифікаторів обирали наступним чином. Для визначення індивідуального впливу модифікаторів їх нижній рівень приймали рівним нулю. Верхній рівень вмісту модифікаторів обирали виходячи з фізичних та хімічних особливостей властивостей кожного з елементів.

Беручи до уваги дані літературних джерел максимальний вміст модифікуючих елементів приймали на рівні 0,2% кожен [10-12].

З метою визначення впливу концентрацій модифікуючих елементів на структуру та властивості проводили дослідження впливу У, Re, В у складі дослідного сплаву системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. Дослідження реалізовували за матрицею планування експерименту.

В якості факторів (незалежних змінних) при виборі хімічного складу експериментального сплаву використовували відсотковий вміст модифікуючих елементів:

$$X_1 - \text{У, \%}; X_2 - \text{Re, \%}; X_3 - \text{В, \%}.$$

Сумісний вплив даних елементів враховували в регресійних рівняннях. Роботу проводили з використанням методу математичного планування експерименту при припущенні лінійної залежності механічних властивостей від хімічного складу.

В якості функції відгуку обрані механічні властивості матеріалу: границя міцності σ_B і пластичність δ , що обумовлюють технологічні властивості та визначають можливість використання сплаву для виробів авіаційного призначення.

На підставі приведених даних в роботі реалізовано ортогональний повнофакторний експеримент 2^3 (таблиця 1).

Таблиця 1

Кодування факторів ортогонального центрального плану експерименту 2^3

Інтервали варіювання та рівні факторів	Фактори, що вивчаються		
	$X_1(Y), \%$	$X_2(Re), \%$	$X_3(B), \%$
Нульовий рівень: $X=0$	0,1	0,1	0,1
Інтервал варіювання, Δ	0,1	0,1	0,1
Верхній рівень: $X=+1$	0,2	0,2	0,2
Нижній рівень: $X=-1$	0	0	0

Матриця планування експерименту в кодовому масштабі показана в таблиці 2. Параметрами оптимізації є механічні властивості експериментального сплаву. Для виключення помилки експерименту кожен дослід на заданому рівні повторювали три рази. Результати дублюючих дослідів усереднювали.

Для реалізації розробленого плану експерименту необхідно отримати 8 складів сплаву за основним планом і 1 склад в центрі плану. Необхідно провести 9 плавок з трьома повторами по кожному зі складів. Для цього виплавляли по три злитка кожного сплаву.

Беручи до уваги великі об'єми плавок, не менше 27, роботу проводили з використанням лабораторної установки вакуумно-дугового переплаву, що

забезпечує виплавку невеликого об'єму металу в достатній кількості. Отримані злитки експериментальних складів діаметром Ø90мм та висотою 15мм є достатнім об'ємом металу для відбору проб для визначення хімічного аналізу, виготовлення зразків для механічних випробувань, аналізу макро- та мікроструктури матеріалу.

Таблиця 2

Ортогональний центральний план експериментів 2³

№ досліду	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	+	+
2	+	+	-
3	+	-	-
4	-	-	-
5	-	-	+
6	-	+	+
7	+	-	+
8	-	+	-
9	0	0	0

Для визначення впливу мікродобавок Y, Re та B на рівень механічних характеристик сплавів експериментальних складів виготовлені зразки в поперечному напрямку кожного з злитків. Результати механічних випробувань в залежності від рівня модифікаторів – факторів варіювання зведені в таблицю 3.

Таблиця 3

Механічні властивості сплавів експериментальних складів

Склад сплавів в кодовому масштабі				Фактичний склад, срд, %мас			Механічні властивості, срд	
№ сплаву	X ₁	X ₂	X ₃	Y	Re	B	σ _в , МПа (Y ₁)	δ, % (Y ₂)
1	+	+	+	0,21	0,20	0,19	615	0,6
2	+	+	-	0,21	0,19	0	551	0,8
3	+	-	-	0,19	0	0	507	0,6
4	-	-	-	0	0	0	285	0,4
5	-	-	+	0	0	0,21	500	0,6
6	-	+	+	0	0,19	0,21	527	0,4
7	+	-	+	0,20	0	0,21	446	0,4
8	-	+	-	0	0,19	0	610	0,6
Нульовий рівень (9)	0	0	0	0,10	0,09	0,11	800	1

Шляхом регресійного аналізу отримано ряд рівнянь, які показують залежність механічних властивостей титанового сплаву від вмісту факторів варіювання Y, Re та B. Після аналізу коефіцієнтів регресії на значимість та відкидання незначимих коефіцієнтів отримані рівняння у кодовому масштабі мали наступний вигляд:

$$Y_1 = 807,8365339 + 30,765198X_1 - 370,462485X_1^2 + 105,605891X_2^2 + 109,09515X_2 - 15,655536X_3^2 + 21,7347749X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 0,6 + 0,1X_2 - 0,1X_3 - 0,1X_2X_3 + 0,1X_1X_2X_3 \quad (2)$$

Перевірка адекватності моделей за критерієм Фішера показала, що вони можуть бути використані для прогнозування значень функцій відгуку для будь-яких значень факторів між верхнім і нижнім рівнями.

Після переведення рівнянь в натуральний масштаб отримані залежності, що описують вплив відсоткового вмісту за масою модифікуючих елементів Y, Re та B на механічні властивості експериментального сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo:

$$\sigma_b = 365,729281 + 7716,90168Y - 1021,16632Re + 530,458469B - 37046,2485Y^2 + 10560,5891Re^2 - 1565,5536B^2; \quad (3)$$

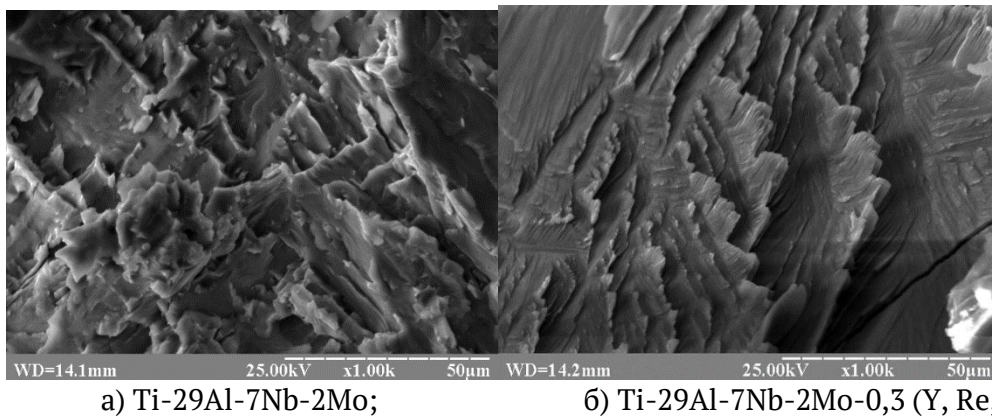
$$\delta = 0,40 + 0,98B + 3,12Re + 0,99Y - 20,27BRe - 9,64BY - 10,26ReY + 100,11BReY; \quad (4)$$

Використовуючи отриманні регресійні моделі розраховані значення в усіх точках плану експерименту. Аналіз отриманих розрахункових масивів у порівнянні з фактичними значеннями механічних властивостей виявив високий кореляційний зв'язок. Коефіцієнт кореляції функції $\sigma_b = f(Y, Re, B)$ склав $R = 0,92$, а для функції $\delta = f(Y, Re, B)$ відповідно $R = 0,998$.

Механізм дії модифікуючих елементів у складі сплаву полягає у адсорбції на поверхні зерен, що сприяє зміні поверхневої активності кристалів та швидкості дифузії і приводить до зміни форми та розмірів кристалів [5].

З використанням металографічного аналізу зразків дослідних сплавів встановлено, що введення ітрію призводить до фрагментації пластинок $(\alpha_2 + \gamma)$ -фаз, додавання ренію значно потоншує пластинки структурних складових сплавів, а введення бору сприяє формуванню пластинчастої структури з малим розміром колоній.

Аналіз зламів після механічних випробувань показав, що поверхня руйнування зразків вихідного сплаву без модифікаторів характеризується крихкими фасетками, що обумовлює низький рівень механічних властивостей (рисунок 1а). На поверхні руйнування зразків сплаву з комплексним модифікуванням спостерігаються однорідні дрібні ямки (рисунок 1б), наявність яких відповідає більш енергоємному процесу руйнування, а отже більшим значенням механічних властивостей.



а) Ti-29Al-7Nb-2Mo;

б) Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B)

Рисунок 1 – Фрактограми поверхні руйнувань зразків після механічних випробувань, x1000

Таким чином, при плануванні за схемою повного факторного експерименту реалізуються всі можливі комбінації факторів на всіх обраних для дослідження рівнях. При підстановці факторів варіювання, тобто вмісту модифікуючих елементів, у регресійні рівняння можна спрогнозувати результати механічних властивостей сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo.

Також в залежності від умов використання тієї чи іншої деталі двигуна висуваються різні вимоги до властивостей сплаву на основі алюмініду титану. Отриманні рівняння дають можливість розрахувати хімічний склад сплаву у відповідності до необхідного рівня властивостей матеріалу авіаційного виробу. Для лопатки 2 ступеня вільної турбіни, стосовно якої проведені розрахунки у роботі, вимогами за механічними властивостями є забезпечення рівня міцності $\geq 800 \text{ МПа}$ та пластичності $\delta \geq 1\%$. Задані властивості, згідно отриманих

рівнянь, досягаються при введенні у склад сплаву системи Ti-28Al-7Nb-2Mo близько 0,1% кожного з модифікуючих елементів.

Тобто оптимальний склад сплаву на основі алюмініду титану, що забезпечує значення механічних властивостей $\sigma_b \geq 800 \text{ МПа}$ та пластичності $\delta \geq 1\%$, відповідає системі Ti-29Al-7Nb-2Mo-0,3 (Y, Re, B).

ЛІТЕРАТУРА

1. С.В. Ахонін, В.О. Березос, О.М. Пікулі та ін. Отримання жароміцних титанових сплавів системи Ti-Al-Zr-Si-Mo-Nb-Sn способом електронно-променевої плавки. Сучасна електрометалургія, 2022, #2, с.3-9. <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>.
2. Патон Б. Е., Саенко В. Я., Помарин Ю. М., Медовар Л. Б., Григоренко Г. М., Федоровский Б. Б. Дугошлаковый переплав - современное состояние и перспективы развития// Проблемы спецэлектрометаллургии. – 2002. – №1. – С.3. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/2002/01>.
3. Chen, B.; Ma, Y.; Gao, M.; Liu, K. Changes of Oxygen Content in Molten TiAl Alloys as a Function of Superheat during Vacuum Induction Melting. J. Mater. Sci. Technol. 2010, 26, 900–903. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60144-2](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60144-2).
4. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520с. <https://i.twirpx.link/file/4038331/>.
5. Мальцев М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. – М.: Металлургиздат, 1964. – 214с. <https://i.twirpx.link/file/2189122/>.
6. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях /М.С. Винарский, М.В. Лурье – К.: Техника, 1975. – 168 с.
7. Reith M., Franke M., Schloffer M., Körner C. Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing—characterization of microstructure and mechanical properties. Materialia 2020, 14. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100902>.
8. Wimler, D.; Lindemann, J.; Reith, M.; Kirchner, A.; Allen, M.; Vargas, W.G.; Franke, M.; Klöden, B.; Weißgärber, T.; Güther, V. et al. Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing. Intermetallics 2021, 131. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107109>.
9. Klein, T.; Usategui, L.; Rashkova, B.; Nó, M.L.; San Juan, J.; Clemens, H.; Mayer, S. Mechanical behavior and related microstructural aspects of a nano-lamellar TiAl alloy at elevated temperatures. Acta Mater. 2017, 128, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.050>.
10. Хорев А.И. Комплексное легирование и микролегирование титановых сплавов / А.И. Хорев // Сварочное производство. – 2009. – № 6. – С.21–30.
11. Р.А.Гайсин, В.М.Имаев, Р.М.Имаев, Э.Р.Гайсина. Влияние модифицирования бором на рекристаллизационное поведение технически чистого титана при горячей деформации/Письма о материалах 5 (2), 2015, 124-128. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-2-124-128>
12. Н.М.Улякова. Влияние редкоземельных металлов на механические свойства и структуру жаропрочного титанового α -сплава/ Металловедение и термическая обработка металлов, №3, 1994.

REFERENCES

1. S.V. Akhonin, V.O. Berezos, O.M. Pikuly et al. Obtaining heat-resistant titanium alloys of the Ti–Al–Zr–Si–Mo–Nb–Sn system by electron beam melting. *Modern Electrometallurgy*, 2022, #2, p.3-9. <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.01>.
2. Paton B. E., Saenko V. Ya., Pomarin Yu. M., Medovar L. B., Grigorenko G. M., Fedorovsky B. B. Arc slag smelting - modern state and development prospects// *Problems of special electrometallurgy*. – 2002. – #1. – P.3. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/2002/01>.
3. Chen, B.; Ma, Y.; Gao, M.; Liu, K. Changes of Oxygen Content in Molten TiAl Alloys as a Function of Superheat during Vacuum Induction Melting. *J. Mater. Sci. Technol.* 2010, 26, 900–903. [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(10\)60144-2](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(10)60144-2).
4. Ilin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svojstva. Spravochnik*. – M.: VILS-MATI, 2009. – 520s. <https://i.twirpx.link/file/4038331/>. (In Russian).
5. Malcev M.V. *Modificirovaniya struktury metallov i splavov*. – M.: Metallurgizdat, 1964. – 214s. <https://i.twirpx.link/file/2189122/>. (In Russian).
6. Vinarskij M.S. *Planirovanie eksperimenta v tehnologicheskikh issledovaniyah* /M.S. Vinarskij, M.V. Lure – K.: Tehnika, 1975. – 168 s. (In Russian)
7. Reith M., Franke M., Schloffer M., Körner C. Processing 4th generation titanium aluminides via electron beam based additive manufacturing–characterization of microstructure and mechanical properties. *Materialia* 2020, 14. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100902>.
8. Wimler, D.; Lindemann, J.; Reith, M.; Kirchner, A.; Allen, M.; Vargas, W.G.; Franke, M.; Klöden, B.; Weißgärber, T.; Güther, V. et al. Designing advanced intermetallic titanium aluminide alloys for additive manufacturing. *Intermetallics* 2021, 131. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107109>.
9. Klein, T.; Usategui, L.; Rashkova, B.; Nó, M.L.; San Juan, J.; Clemens, H.; Mayer, S. Mechanical behavior and related microstructural aspects of a nano-lamellar TiAl alloy at elevated temperatures. *Acta Mater.* 2017, 128, 440–450. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.050>.
10. Horev A.I. *Kompleksnoe legirovanie i mikrolegirovanie titanovykh splavov* / A.I. Horev // *Svarochnoe proizvodstvo*. – 2009. – № 6. – S.21-30. (In Russian).
11. R.A.Gajsin, V.M.Imaev, R.M.Imaev, E.R.Gajgina. Vliyanie modificirovaniya borom na rekristallizacionnoe povedenie tehnikheski chistogo titana pri goryachej deformacii/Pisma o materialah 5 (2), 2015, 124-128.<https://doi.org/10.22226/2410-3535-2015-2-124-128> (In Russian).
12. N.M.Ulyakova. Vliyanie redkozemelnykh metallov na mehanicheskie svojstva i strukturu zharoprochnogo titanovogo a-splava/ *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, №3, 1994. (In Russian)

Received 10.04.2025.

Accepted 25.04.2025.

UDC: 669.295:669.046.516

Olha Halienkova, Volodymyr Yefanov, Olexandr Zavgorodny, Viktoriia Bronetska,
Volodymyr Shevchenko

COMPLEX EFFECT OF MODIFICATION ON THE PROPERTIES OF γ -ALLOY BASED ON TITANIUM ALUMINIDE

Abstract. *Titanium aluminide-based alloys are a promising class of materials, the range of effective use of which is 600-800°C. The advantages of γ -alloys are low density, high structural stability, and heat resistance. The main forming technology for producing parts based on aluminides is casting, which forms a coarse-grained microstructure of the ingot with low values of strength and ductility characteristics. One of the practically feasible ways to improve the properties of γ -alloys is modification. The mechanism of action of modifying elements is adsorption on the surface of grains, which contributes to a change in the surface activity of crystals and the rate of diffusion and leads to a change in the shape and size of crystals. The effect of modifying elements Y, Re, and B on the properties of an alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo system was investigated using the full-factorial experimental design method. In accordance with the experimental planning matrix using a laboratory vacuum arc furnace with a copper water-cooled crystallizer, ingots of various compositions were melted. A study of the chemical composition, metallographic analysis of the macro- and microstructure, determination of mechanical properties, and analysis of the fracture surface of the samples after testing were carried out. The mechanical properties of the alloy – ultimate strength and ductility – were chosen as optimization parameters. The obtained regression equations make it possible to calculate the chemical composition of the alloy in accordance with the required level of material properties of the aviation product. Also, by substituting the content of modifying elements into the equation, it is possible to predict the results of the mechanical properties of an alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo system. The optimal composition of the titanium aluminide-based alloy was determined, which provides the value of mechanical properties $\sigma_s \geq 800\text{MPa}$ and plasticity $\delta \geq 1\%$.*

Keywords: *titanium aluminide, full-factor experiment, modifying elements, regression equations, optimization parameters, response function, mechanical properties.*

Галєнкова Ольга Борисівна, аспірантка кафедри енергетики УДУНТ, інженер 2 категорії АТ «Івченко-Прогрес», E-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-0008-6007-1931>.

Єфанов Володимир Сергійович, PhD, старший науковий співробітник, докторант кафедри енергетики УДУНТ, E-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6363-4081>

Завгородній Олександр Васильович, аспірант кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій» Національного університету «Запорізька політехніка», E-mail: a.zav9009@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7198-1557>.

Бронецька Вікторія Ігорівна, аспірантка УДУНТ, Акціонерне товариство «Інститут Титану», E-mail: victoria.ihorevna@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4275-8260>.

Шевченко Володимир Григорович, к.т.н, завідувач кафедрою «Теоретична та прикладна механіка» НУ «Запорізька політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>.

Olha Halienkova, PhD student of the Department of Energy USUNT, 2nd category engineer, JSC "Ivchenko-Progress", E-mail: olya.galenkova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0009-0008-6007-1931>.

Volodymyr Yefanov, PhD, senior researcher, doctoral student Department of Energy USUNT, E-mail: vsyefanov@gmail.com, ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-6363-4081>.

Olexandr Zavgorodny, graduate student Department of "Integrated technologies of welding and modeling of structures" National University "Zaporizhzhia Polytechnic", E-mail: a.zav9009@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7198-1557>.

Viktoriia Bronetska, PhD student of USUNT, joint stock company "Titanium institute", E-mail: victoria.ihorevna@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4275-8260>.

Volodymyr Shevchenko, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical and Applied Mechanics National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.02

УДК 621.763. 623.78.632.64

С.В. Аджамський, Т.В. Балаханова, О. Є. Барановська,
Р.В.Подольський, С.І. Бадюк

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ДЕФЕКТУ KEY HOLE В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗА LPBF-ТЕХНОЛОГІЄЮ

Анотація. У процесі LPBF формування деталі відбувається через локальне плавлення порошку лазером, що створює ванну розплаву. Її стабільність визначає якість поверхні. Одним з критичних дефектів процесу LPBF є пористість, оскільки вона погіршує втомну міцність та надійність конструкцій. У роботі досліджено вплив параметрів лазерного плавлення порошкового матеріалу 316L на морфологію розплавленої ванни та утворення пористості, зокрема дефектів типу «Key Hole». Матеріалом для досліджень слугували дослідні зразки, що виготовленні з нержавіючої сталі аустенітного класу 316L з хімічним складом в % по масі: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016, з розміром частинок: 45 ± 15 μm . Експериментальні дослідження виконувалися на установці з одномодовим волоконним ітербієвим лазером з профілем енергії Flet-top, який характеризується рівномірним розподілом енергії за перерізом променя лазера. Параметри процесу включали змінну потужність лазера (80–270 Вт), швидкість сканування (200–1050 мм/с) і діаметр лазерного променя (75–175 мкм). Проаналізовано 808 треків, із яких у 46 випадках зафіксовано пористість цього типу. Встановлено, що вона не виникає при швидкості сканування понад 600 мм/с, а збільшення щільності енергії сприяє її утворенню. Встановлено, що зменшення кількості дефектів зі збільшенням потужності лазера пов'язано з покращенням плинності розплаву та його здатністю ефективніше поглинати енергію випромінювання. За таких умов газові включення встигають вийти на поверхню до моменту закриття «Key Hole», що знижує ймовірність утворення пористості. Експериментальні дослідження показали, що порогове значення наближається до 0,8, проте воно не є фіксованим і залежить від інших параметрів процесу сканування, таких як потужність лазера, швидкість переміщення променя та фізико-хімічні властивості матеріалу.

Ключові слова: адитивне виробництво, пористість, дефект «Key Hole», режим плавлення, ванна розплаву.

Вступ

У процесі лазерного плавлення порошкового шару (LPBF) поверхня деталі формується завдяки послідовному плавленню порошкового матеріалу під дією лазерного променя. Взаємодія променя з матеріалом створює ванну розплаву, де кількість розплаву та стабільність процесу безпосередньо впливають на якість кінцевої конструкції. Недостатній проплав або надмірне нагрівання можуть призводити до утворення дефектів, що вимагає детального вивчення цих взаємодій на рівні ванни розплаву та їх впливу на якість. Серед основних дефектів, які виникають у процесі LPBF, можна виділити неповне сплавлення, пористість, гарячі тріщини, нерівномірне нанесення порошку та кулькоутворення. Як відомо [1], наявність значної кількості пор у матеріалі негативно впливає на його втомну міцність та інші механічні властивості, що є критичним для застосування таких конструкцій у промисловості.

Аналіз останніх досліджень

Пористість розрізняють за трьома основними видами: газова, пористість через несплавлення та «Key Hole» (рис. 1). Неповне сплавлення виникає через недостатню потужність лазера, що не дозволяє повністю розплавити матеріал. Пори типу «Key Hole» – утворюються через надмірну енергію лазера, яка випаровує матеріал і залишає газові бульбашки. Порожнечи виникають через швидке охолодження матеріалу та залишкові напруження, що призводять до утворення пор [2].

На відміну від пор, що виникають через несплавлення, пори у вигляді «Key Hole» важко усунути шляхом повторного плавлення верхніх шарів, оскільки вони знаходяться занадто глибоко. Тому найважливішим є попередження утворення пор «Key Hole» на ранніх етапах виробничого процесу. На початкових етапах формування структури важливу роль відіграє однопрохідна ванна розплаву, яка є основною структурною одиницею для багатопохідних і багат шарових конструкцій у LPBF. Морфологія та розміри одиничного сліду плавлення мають значний вплив на мікроструктуру, пористість і властивості виготовлених деталей [3]. Забезпечення високої якості виробів залежить від точного контролю та моніторингу ванни розплаву – локалізованої області, в

якій металевий порошок плавиться та твердне під впливом направленої джерела енергії. Аналіз характеристик розплавленої ванни є важливим, оскільки численні дослідження встановили чітку залежність між особливостями цієї ванни та різними типами дефектів готового металевих виробу [4].

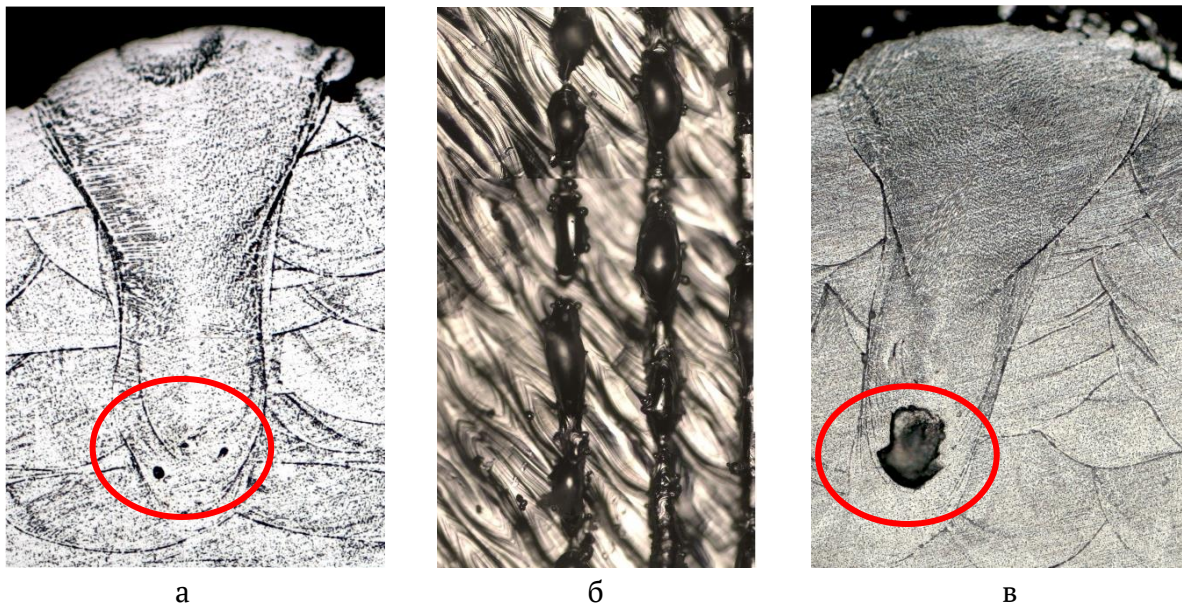


Рисунок 1 - Мікрофотографії дефектів, виявлених у LPBF:

а – газова пористість, б – дефект несплавлення, в – пористість «Key Hole»

Газова пористість і пористість у вигляді «Key Hole» виникають у розплавленій ванні в режимі «Key Hole». Пористість, що з’являється через несплавлення, утворюється в режимі провідності розплавленої ванни [5].

Перехід від одного режиму плавлення до іншого є одним з важливих аспектів, однак він залишається однією з основних проблем у моделюванні процесу LPBF [6]. Поріг «Key Hole» значною мірою залежить від типу машини та параметрів процесу [7], що ускладнює точне прогнозування її утворення. Існує кілька підходів до визначення параметрів процесу, зокрема на основі нормалізованої ентальпії або режиму плавлення [8]. Перехід між режимами плавлення визначають зазвичай через пікову температуру, яка своєю чергою залежить від основних параметрів процесу – потужності та швидкості сканування [9]. Висока потужність лазера і низька швидкість сканування збільшують глибину ванни розплаву, що підвищує ймовірність утворення

дефектів. Для загальної характеристики найчастіше використовують такий параметр як «щільність енергії». Щільність енергії лазера може бути оцінена за кількома параметрами: LED – енергія на одиницю довжини (Дж/мм), AED – враховує площу лазерного променя (Дж/мм²), VED – енергія на одиницю об’єму (Дж/мм³), враховує відстань між штрихами та товщину шару [27]. І хоча VED – найпоширеніший параметр для цієї технології, при дослідженні поодиноких треків найчастіше використовують LED або AED. Незважаючи на велику кількість досліджень у цій галузі [10], думки щодо переходу від режиму проводимості до режиму «Key Hole» різняться, що вказує на необхідність подальших розробок і уточнень.

Мета дослідження

Метою статті є дослідження особливостей кристалізації ванни розплаву та встановлення умов утворення дефектів типу «Key Hole» в поодиноких треках.

Методика проведення досліджень

Ця стаття поділяється на два основні розділи: перша частина присвячена аналітичному дослідженню, а друга – вивченню форм плавильної ванни та умов утворення пористості типу «Key Hole» в поодиноких треках, отриманих з порошку 316L в % по масі: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016, розподіл частинок становив від 15 до 45 мкм.

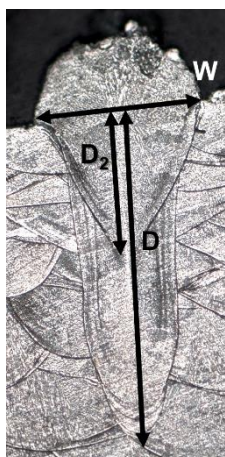
Експериментальні дослідження виконувалися на установці з одномодовим волоконним ітербієвим лазером з профілем енергії Flet-top, який характеризується рівномірним розподілом енергії за перерізом променя лазера [12]. Параметри процесу включали змінну потужність лазера (80–270 Вт), швидкість сканування (200–1050 мм/с) і діаметр лазерного променя (75–175 мкм). Усього досліджено 808 цільних треків, з яких у досліджених режимах зафіксовано 46 випадків пористості типу «Key Hole». Аналіз поперечних перерізів треків використовували для оцінки геометричних параметрів ванни плавлення на мікроструктурному рівні: ширини, глибини та загальної форми. Підготовку зразків для аналізу мікроструктури проводили за стандартною методикою шліфування та полірування, для травлення застосовано реактив Каллінга №2.

Результати досліджень

Глибина зони плавлення та характеристики плавильної ванни визначаються тепловим полем та механізмом теплопередачі [11]. Формування ванни розплаву в режимі «Key Hole» відбувається при високій інтенсивності лазерного нагріву, коли парціальний тиск металу, що випаровується, утворює поглиблення в розплаві. Зі збільшенням енерговкладення геометрія зони розплаву змінюється від мілкої напівсферичної форми до глибокої циліндричної. Однак поширене припущення про напівсферичну форму плавильної ванни є спрощенням, яке може не завжди відповідати експериментальним даним [12-13]. Перехід від плоскої ванни до режиму «Key Hole» зумовлений кількома фізичними процесами: збільшенням потоку металевих парів; підвищенням локального тиску парової віддачі; взаємодією капілярних сил та термокапілярної конвекції [13]. Утворення пор відбувається через локальні холодні зони з високим поверхневим натягом і недостатнім тиском парової віддачі. Частина пор може виходити на поверхню металу або розчинятись у зворотному потоці.

Як вже було показано, при дослідженні переходу від режиму плавлення до режиму «Key Hole» зазвичай використовують геометричні характеристики ванни розплаву як глибина (D) та ширина (W) (рис. 2). Додатково в даній роботі звернули увагу на глибину залягання перших чітких границь ванни розплаву D_2 , оскільки нижче них найчастіше відбувається зміна морфології та форми поперечного перерізу поодинокого трека.

Морфологія розплавлених поодиноких треків може значно відрізнятись навіть за подібної геометрії (рис. 3). Зокрема, чашоподібна форма ванни розплаву з нерівномірним звуженням углиб може спричиняти утворення пористості.



W – ширина, D – глибина, D2 – глибина залягання перших чітких границь
Рисунок 2 – Приклади вимірювання геометричних характеристик ванни розплаву треків



а



б



в

Рисунок 3 - Мікроструктури треків з близьким значенням глибини до ширини ванни розплаву ≈ 1 , $\times 200$: а – Р 270Вт, V 800 мм/с, AED 76,39 Дж/мм²; б – Р 110 Вт, V 400 мм/с, AED 62,25 Дж/мм²; в – Р 150 Вт, V 400 мм/с, AED 84,88 Дж/мм²

Аналіз впливу основних параметрів процесу – швидкості та потужності сканування – показав, що пористість частіше виникала не при максимальному відношенні глибини до ширини ванни розплаву. Розподіл значень має гаусівський характер із середнім значенням 1,44. Також встановлено, що пористість спостерігалася в усьому дослідженому діапазоні потужності. Водночас при швидкості сканування понад 600 мм/с пористість типу «Key Hole» не утворювалася (рис. 4).

Тенденція до збільшення пористості спостерігається зі зростанням щільності лінійної та площинної енергії, що узгоджується з літературними даними. Однак утворення дефектів не можна пов'язувати виключно з розплавленими ваннами, де відношення глибини до товщини менше 1. При відношенні глибини до ширини менше 1 значення глибини є стабільнішими та легше контрольованими. Коли ж це відношення наближається до 1, глибина може суттєво змінюватися навіть у межах одного положення на платформі.

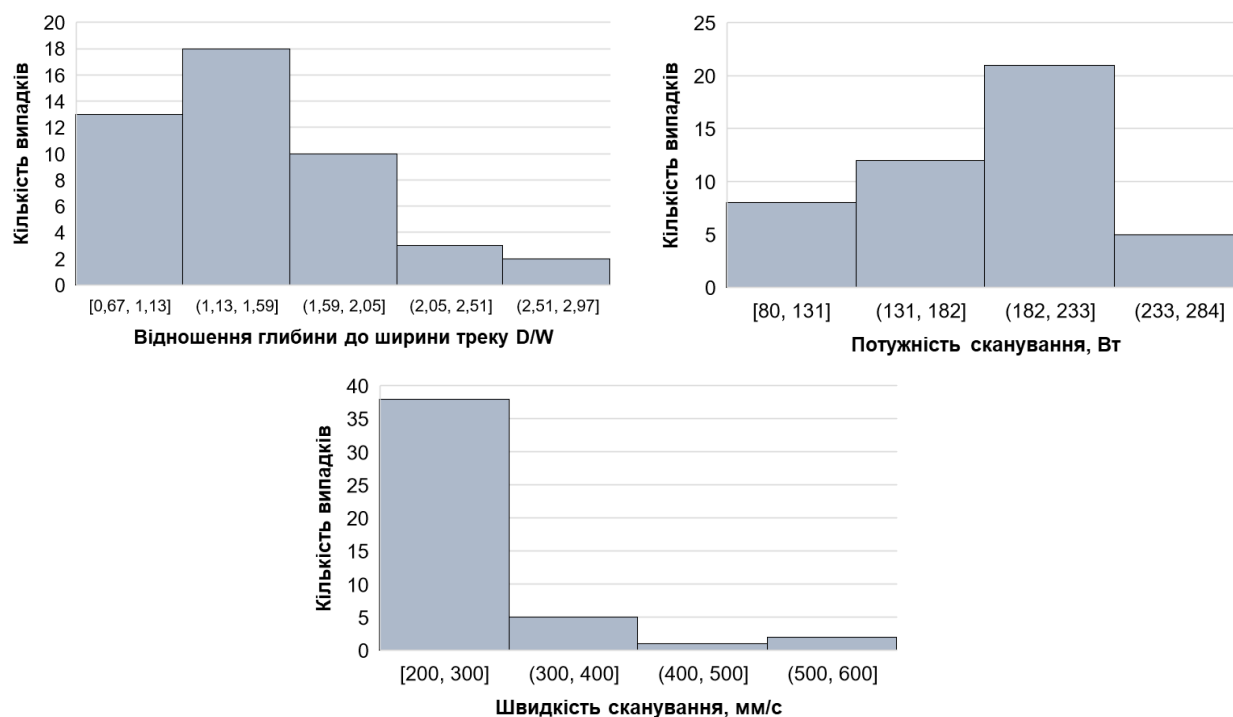


Рисунок 4 - Випадки виникнення пористості за типом «Key Hole» при різних значеннях: а – відношення глибини до товщини треків, б – потужності сканування, в – швидкості сканування

Прискорення сканування суттєво зменшує глибину ванни та відповідне відношення глибини до товщини – приблизно до швидкості 500 мм/с. Подальше збільшення швидкості майже не впливає на ці параметри. Водночас на порогову швидкість можуть впливати й інші технологічні фактори. Потужність також має лінійний, хоча й менш виражений вплив. У зразках поодиноких треків часто спостерігається чітка границя контуру ванни розплаву, а також більш груба дендритна структура. Було виявлено, що

швидкість сканування майже не впливає на утворення так званого «подвійного дна» – глибина залишається на рівні плато, що відображається у загальній залежності між швидкістю сканування та глибиною треків. Вплив потужності є більш рівномірним, оскільки вона лінійно змінює як товщину, так і глибину треків, хоча при малих значеннях відношення глибини до товщини спостерігається менша варіативність. Середнє значення відношення глибини проміжної ванни розплаву до товщини треків становило 0,68 (максимум – 1,24), тоді як середнє відношення основної глибини треків до товщини складало 0,9, а максимальне – 3,24.

Висновки

1. Експериментальні дослідження показали, що порогове значення дефекту Key Hole наближається до 0,8, проте воно не є фіксованим і залежить від інших параметрів процесу сканування, таких як потужність лазера, швидкість переміщення променя та фізико-хімічні властивості матеріалу.

2. Наявність чітко вираженої межі між основною та малою ванною розплаву свідчить про значну різницю температур у різних ділянках зони плавлення. Імовірно, початкова мала ванна розплаву з глибиною D2 утворилася за механізмом теплопровідності (конвекції), а подальше збільшення глибини відбувалося вже за механізмом «Key Hole». Структура, що охарактеризована, як зона D не завжди має чіткі контури, але в тій чи іншій мірі присутня у всіх треках, особливо в тих випадках, коли ванна розплаву набуває чашоподібної форми.

3. Спостерігається тенденція до зменшення кількості дефектів зі збільшенням потужності лазера, що, ймовірно, пов'язано з покращенням плинності розплаву та його здатністю ефективніше поглинати енергію випромінювання. За таких умов газові включення встигають вийти на поверхню до моменту закриття «Key Hole», що знижує ймовірність утворення пористості.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Miner J., Ngo A., Gobert C., Reddy T., Lewandowski J., Rollett A., Beuth J., Narra S. Impact of melt pool geometry variability on lack-of-fusion porosity and fatigue life in Powder Bed Fusion - Laser Beam Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. 2024. Vol. 95. P. 104506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104506>
2. Gordon J., Narra S., Cunningham R., Liu H., Chen H., Suter R., Beuth J., Rollett A. Defect structure process maps for laser powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 36. P.101552. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101552>
3. Wang J.-C., Zhu R., Liu Y.-J., Zhang L.-C. Understanding melt pool characteristics in laser powder bed fusion: An overview of single and multi-track melt pools for process optimization. *Advanced Powder Materials*. 2023. Vol. 2. P. 100137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2023.100137>
4. Yang A., Zhao Z., Zhang X. A bidirectional prediction framework for melt pool size and process parameters in LPBF. *Engineering Research Express*. 2025. Vol. 7 P. 015549. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adb0a2>
5. Wang T., Wang Y., Chen C., Zhu H. Relationships between the characteristics of porosity, melt pool and process parameters in laser powder bed fusion Al-Zn alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 68. P. 1236-1244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.027>
6. Naderi M., Weaver J., Deisenroth D., Iyyer N., McCauley R. On the fidelity of the scaling laws for melt pool depth analysis during laser powder bed fusion. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2023. Vol. 12. P. 11–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40192-022-00289-w>
7. Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., de Formanoir C., Witvrouw A., Hooreweder B. On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. P. 161-169. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.006>
8. Bergmüller S., Gerhold L., Fuchs L., Kaserer L., Leichtfried G. Systematic approach to process parameter optimization for laser powder bed fusion of low-alloy steel based on melting modes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 126. P. 4385–4398. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11377-2>
9. Cunningham R., Parab N., Kantzos C., Pauza J., Fezzaa K., Sun, T., Rollett A. Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging. *Science*. 2019. Vol. 363. P. 849-852. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aav4687>
10. Agrawal A., Rankouhi B., Thoma D. Predictive process mapping for laser powder bed fusion: A review of existing analytical solutions. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2022. Vol. 26. P. 101024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2022.101024>
11. Johnson G., Dolde M., Zaugg J., Quintana M.J., Collins P. Monitoring, modeling, and statistical analysis in metal additive manufacturing: A review. *Materials*. 2024. Vol. 17. P. 5872. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17235872>
12. Galbusera F., Caprio L., Previtali B., Demir A.G. The influence of novel beam shapes on melt pool shape and mechanical properties of LPBF produced Al-alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 85. P. 1024-1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.12.007>
13. Kasperovich G., Haubrich J., Gussone J., Requena G. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*. 2016. Vol. 105. P. 160-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.070>

Received 08.04.2025.

Accepted 28.04.2025.

UDC 621.763. 623.78.632.64

Sergey Adzhamsky, Tetana Balakhanova, Olena Baranovskaya,
Rostyslav Podolsky, Sergey Baduk

**STUDY OF THE FEATURES OF KEY HOLE DEFECT FORMATION
DEPENDING ON THE TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF
MANUFACTURING USING LPBF TECHNOLOGY**

In the LPBF process, the part is formed by local melting of the powder by a laser, which creates a melt pool. Its stability determines the surface quality. One of the critical defects in the LPBF process is porosity, as it worsens the fatigue strength and reliability of structures. The work investigated the effect of laser melting parameters of the 316L powder material on the morphology of the molten pool and the formation of porosity, in particular, defects of the “Key Hole” type. The material for the research was experimental samples made of austenitic stainless steel 316L with a chemical composition in wt%: Cr=17.79; Ni=12.63; Mo=2.35; Mn=0.78; Si=0.64; C=0.016, with a particle size: $45 \pm 15 \mu\text{m}$. Experimental studies were performed on a single-mode fiber ytterbium laser with a Flet-top energy profile, which is characterized by a uniform energy distribution across the laser beam cross-section. The process parameters included variable laser power (80–270 W), scanning speed (200–1050 mm/s), and laser beam diameter (75–175 μm). 808 tracks were analyzed, of which 46 cases recorded porosity of this type. It was established that it does not occur at scanning speeds above 600 mm/s, and an increase in energy density contributes to its formation. It was established that the decrease in the number of defects with increasing laser power is associated with improved melt fluidity and its ability to more effectively absorb radiation energy. Under such conditions, gas inclusions have time to reach the surface by the time the “Key Hole” closes, which reduces the likelihood of porosity formation. Experimental studies have shown that the threshold value is close to 0.8, but it is not fixed and depends on other parameters of the scanning process, such as laser power, beam speed, and physicochemical properties of the material.

Keywords: additive manufacturing, porosity, key hole defect, melting mode, melt pool.

Аджамський Сергій Вікторович – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна

Балаханова Тетяна Валеріївна - канд.техн.наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Барановська Олена Євгенівна - канд.техн.наук, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Подольський Ростислав Вячеславович – докт. філ., в.о зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна

Бадюк Сергій Іванович – канд.техн.наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна

Adjamskiy Sergey – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Balahanova Tetana - Cand. technical science, senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Baranovska Olena - Cand. technical science, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Podolskyi Rostyslav – PhD, Acting Head of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Structural Steels of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Senior Researcher at the Institute of Applied Control Systems NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Baduk Sergey – Cand. technical science, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Process engineer LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.03

УДК 629.58. 633.79.623.84

О.І. Бабаченко, Г.А. Кононенко, Т.В. Кімстач, Р.В. Подольський, О.А. Сафронова

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР КРИТИЧНИХ ТОЧОК ЕКОНОМНОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

Анотація. *Кінцевий рівень механічних та експлуатаційних властивостей легованих сталей багато в чому забезпечують параметри термічної обробки для проведення якої необхідно знати величини критичних температур фазових перетворень A_{c1} і A_{c3} , також температур бейнітного (BS) та мартенситного (MS) перетворень. Експериментальне визначення витратне, тому актуальною є потреба у використанні розрахункових методів. Мета роботи – з числа відомих математичних моделей визначити найбільш придатні для прогнозування температури критичних точок багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталей.*

Дослідження проводили шляхом порівняльного аналізу результатів розрахунків за відомими математичними моделями, які використовують для визначення температур критичних точок фазових перетворень в багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталях, та експериментальних даних для досліджуваних сталей і сталі-прототипу. Хімічний склад досліджуваних сталей визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Досліджувані сталі виплавляли в лабораторних умовах з шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційному модулі ІТПЕ-0,01. Плавку проводили методом переплаву без примусового окислення домішок. Для виявлення структурних і фазових перетворень сталі-прототипу був використаний метод диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА) який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C Jupiter.

Приведено результати порівняльного аналізу математичних моделей, що застосовують для прогнозування температур критичних точок фазових перетворень в економнолегованих конструкційних сталях. Проаналізовано вплив легуючих елементів на значення критичних температур, а також розглянуто умови застосування різних математичних моделей. Встановлено, що досліджені математичні моделі дозволяють встановити величини критичних точок сталей

© Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Подольський Р.В., Сафронова О.А.

з відносно невеликою точністю відносно фактичних, визначених експериментально. Тим не менше, виходячи з того, що на практиці для призначення температури під загартування найбільш значущою є температура A_{c3} , а реальна температура загартування, з технологічної точки зору та обладнання, що використовується для проведення термічної обробки, може перевищувати температуру точки A_{c3} на 30...100 °C, то з достатньо високим рівнем точності розрахунок величини температури A_{c3} для економнолегованих конструкційних сталей рекомендовано проводити за математичними моделями програмного комплексу Jmat PRO або ІЧМ.

Ключові слова: сталь, математична модель, критичні точки, термічна обробка, легуючі елементи.

Вступ

Листовий сталевий прокат складає майже половину від загальної кількості прокату, що виробляють на металургійних підприємствах, і потреба в ньому щорічно зростає. Застосування сучасних технологічних процесів штампування та зварювання замість лиття, кування та різання обумовлює широке використання листового прокату в різних галузях промисловості.

Найбільшими споживаючими галузями товстолистого металу є: суднобудування – для виготовлення елементів корпусу та надбудови, деталей фундаменту, для обшивки судна, при виробництві судових приладів, механізмів, понтонів, причалів та інших конструкцій:

- будівництво та мостобудування - для виготовлення двотаврових балок, зварних колон коробчастого перерізу та інших несучих профілів, одержуваних шляхом різання та зварювання елементів з листової сталі; перекриттів будівель, елементів прогонової будови мостів, естакад, галерей; труб середнього та великого діаметра, які можуть служити як для організації комунікацій (трубопроводи, димарі, кабельні комунікації тощо), так і як несучі опори споруд і мостів;

- машинобудування (автотракторне, вагоно- та тепловозобудівне виробництво) – кузова самоскидів та фронтальних навантажувачів, ківші екскаваторів, дробарки, бетономішалки, різні елементи добувного обладнання, вузли сільськогосподарських машин та інше;

- хімічне виробництво – для виготовлення труб, котлів, посудин та резервуарів для транспортування та зберігання рідких та газоподібних речовин тощо;

- верстатобудування та інших виробничих сферах і напрямках.

Товстий лист у значній кількості також є заготовкою для отримання тонких листів. Завдяки необхідному рівню механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей гарячекатаний лист є кращим на сьогодні вихідним матеріалом при виготовленні зварних металевих конструкцій, деталей і з'єднань, наприклад, зварних нафтогазопровідних труб великого діаметра.

Товстолистову трубну сталь широко застосовують для виготовлення офшорних конструкцій - морських споруд для видобутку та зберігання нафти і газу, для генерації та акумулювання електроенергії, що отримується від поновлюваних джерел, несучих конструкцій, глибоководних платформ тощо.

Кожен із перелічених сегментів пред'являє свій комплекс вимог до листового металу відповідно до умов його експлуатації.

Якість товстолистової сталі залежить від багатьох факторів і зі збільшенням товщини листа погіршується. Це обумовлено меншим ступенем обтискання серединних шарів листа при прокатці, більш розвиненою ліквациєю вуглецю, сірки та фосфору, меншою швидкістю охолодження і, як наслідок, грубозернистою структурою. В свою чергу, збільшення товщини листа призводить до зменшення порога холодноламкості, що неминуче пов'язано з необхідністю поліпшення показників ударної в'язкості. Конкретні вимоги до товстого листа залежать від його подальшого використання. З числа відомих важелів впливу на характеристики товстого листа є його термічна обробка, температурно-часові режими якої призначають з урахуванням результатів визначення температур критичних точок.

Стан питання. Конструкційна придатність матеріалу виробів визначається комплексом механічних і експлуатаційних властивостей, оптимальне поєднання яких забезпечує надійність їх експлуатації. Для сталі це, перш за все, показники міцності, а також ударна в'язкість, пластичність, тріщиностійкість і ряд інших параметрів. Їх кінцеві значення багато в чому

забезпечують параметри термічної обробки для проведення якої, перш за все для легованих сталей, треба знати величини температур критичних точок фазових перетворень A_{c1} і A_{c3} , також точок бейнітного (BS) та мартенситного (MS) перетворень.

Така необхідність визначення температур критичних точок викликана тим, що легуючі елементи в сталях значно впливають на їх величину. Зокрема, легуючі елементи та домішки в сталі можуть значно підвищувати або знижувати температуру її точки A_{c1} .

Подібний характер впливу легуючих елементів пов'язаний з двома наступними факторами. Як відомо, критична температура A_{c1} в вуглецевій сталі відповідає перетворенню евтектоїдної суміші перліту $\alpha + Fe_3C$ в аустеніт шляхом фазового переходу $\alpha \rightarrow \gamma$, дисоціації карбиду і розчинення вуглецю в γ -залізі. З одного боку, легуючі елементи змінюють температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення для фериту, що входить до складу евтектоїду (перліту), а з іншого боку легуючі елементи впливають на температуру дисоціації евтектоїдних карбідів і подальше розчинення вуглецю та легуючих елементів в γ -залізі. Як правило карбідоутворюючі елементи підвищують температуру дисоціації карбідів. При цьому, якщо карбідоутворюючі елементи також підвищують температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -перетворення, то їх вплив на зміщення температури точки A_{c1} посилюється ще більше.

Некарбідоутворюючі елементи, розчиняючись у цементиті, знижують температуру дисоціації карбиду. При цьому нікель і марганець знижують температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу, а отже, знижують точку A_{c1} . В цілому вплив елементів на критичні точки зберігається і в сталях, що містять одночасно декілька легуючих елементів.

Вплив хрому на точку A_{c1} має складний характер. Збільшення вмісту хрому до 12-13% порівняно слабо підвищує точку A_{c1} , а при збільшенні його вмісту понад 14% спостерігається різке підвищення температури A_{c1} . Подібний вплив пояснюється тим, що при вмісті до 12-13% хром знижує температуру $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходу, і підвищення точки A_{c1} обумовлено більш сильним впливом підвищених температур дисоціації евтектоїдних карбідів.

Багатокомпонентне легування сталей значно ускладнює процес прогнозування та знижує його точність щодо визначення температур критичних точок. Тому, для надійного визначення критичних температур фазових перетворень застосовують експериментальні методи (метод пробних загартувань, дилатометричний, диференціальний, термічний, вимірювання електроопору тощо).

У зв'язку з тим, що експериментальні визначення критичних точок потребують значних часових, матеріальних та фінансових витрат наразі для визначення значень критичних точок все частіше використовують математичні моделі - емпіричні рівняння, які отримують шляхом зіставлення та вирішення системи лінійних рівнянь за експериментальними даними, або отриманими за результатами використання феноменологічного підходу.

В більшості відомих математичних моделей для розрахунку температур фазових перетворень вміст елементів виражено у масових відсотках, температура – у градусах Цельсія. В числі таких математичних моделей є:

- модель Е. Гюнтера, Г. Радомськи та Б. Охайм [1]:

$$Ac_1 = 723 - 9,2 \cdot Mn + 30,4 \cdot Si + 19,0 \cdot Cr - 15,8 \cdot Ni + 23,6 \cdot V + 24,3 \cdot Al. \quad (1)$$

$$Ac_3 = 924,8 - 231,1 \cdot \sqrt{C} + 53,7 \cdot Si - 15,9 \cdot Ni + 23,2 \cdot Mo + 88,7 \cdot V + 78,6 \cdot Al - 439,2 \cdot Zr. \quad (2)$$

- модель К. Ендрюса [2]:

$$Ac_1 = 723 - 10,7 \cdot Mn + 29,1 \cdot Si + 16,9 \cdot Cr - 16,9 \cdot Ni + 6,38 \cdot W + 290 \cdot As. \quad (3)$$

$$Ac_3 = 910 - 203 \cdot \sqrt{C} + 44,7 \cdot Si - 15,2 \cdot Ni + 31,5 \cdot Mo + 13,1 \cdot W + 104 \cdot V + (-30 \cdot Mn - 11 \cdot Cr - 20 \cdot Cu + 400 \cdot Al + 400 \cdot Ti + 700 \cdot P + 120 \cdot As). \quad (4)$$

$$Ms = 539 - 423 \cdot C - 30,4 \cdot Mn - 12,1 \cdot Cr - 17,7 \cdot Ni - 7,5 \cdot Mo \quad (5)$$

$$Ms = 512 - 453 \cdot C + 217 \cdot C^2 + 15 \cdot Cr - 16,9 \cdot Ni - 9,5 \cdot Mo - 71,5 \cdot C \cdot Mn - 67,6 \cdot C \cdot Cr. \quad (6)$$

- модель Р. Грейнджа [3]:

$$Ac_1 = 723 - 13,9 \cdot Mn + 22,2 \cdot Si + 23,3 \cdot Cr - 14,4 \cdot Ni. \quad (7)$$

$$Ac_3 = 854 - 179,4 \cdot C - 13,9 \cdot Mn + 44,4 \cdot Si - 1,7 \cdot Cr - 17,8 \cdot Ni. \quad (8)$$

- модель Т. Кунітаке [4]:

$$Ac_1 = 727,0 - 32,7 \cdot C + 2,0 \cdot Mn + 14,9 \cdot Si + 17,8 \cdot Cr - 14,2 \cdot Ni + 25,6 \cdot Mo - 17,0 \cdot Cu. \quad (9)$$

$$Ac_3 = 912,0 - 230,5 \cdot C - 20,4 \cdot Mn + 31,6 \cdot Si - 14,8 \cdot Cr - 18,1 \cdot Ni + 16,8 \cdot Mo - 39,8 \cdot Cu. \quad (10)$$

$$Ms=560,5-407,3\cdot C-37,8\cdot Mn-7,3\cdot Si-19,8\cdot Cr-19,5\cdot Ni-4,5\cdot Mo-20,5\cdot Cu. \quad (11)$$

- модель Т. Кунітаке та Т. Като [5]:

$$Ac_1=754,83-32,25\cdot C-17,76\cdot Mn-23,32\cdot Si+17,13\cdot Cr+4,51\cdot Mo+15,62\cdot V. \quad (12)$$

$$Ac_3=930,21-394,75\cdot C-14,40\cdot Mn+54,99\cdot Si+5,77\cdot Cr+24,49\cdot Mo+83,37\cdot V. \quad (13)$$

- модель Дж. Елдіса [6]:

$$Ac_1=712-17,8\cdot Mn+20,1\cdot Si+11,9\cdot Cr-19,1\cdot Ni-9,8\cdot Mo. \quad (14)$$

$$Ac_3=871-254,4\cdot C+51,7\cdot Si-14,2\cdot Ni. \quad (15)$$

$$Ms=531-391,2\cdot C-43,3\cdot Mn-16,2\cdot Cr-21,8\cdot Ni. \quad (16)$$

- модель О.Г. Касаткіна, Б.Б. Вінокура та В.Л. Пилюшенко [7, 8]:

$$Ac_1=723-7,08\cdot Mn+37,7\cdot Si+18,1\cdot Cr-8,95\cdot Ni+44,2\cdot Mo+3,18\cdot W+50,1V+21,7\cdot Al+ \\ +297\cdot S-830\cdot N-11,5\cdot C\cdot Si-5,28\cdot C\cdot Ni-57,9\cdot C\cdot Mo-27,4\cdot C\cdot V-14,0\cdot Mn\cdot Si- \\ -6,0\cdot Mn\cdot Ni-15,5\cdot Mn\cdot Mo-3,1\cdot Si\cdot Cr+6,77\cdot Si\cdot Ni-0,8\cdot Cr\cdot Ni+30,8\cdot Mo\cdot V-0,84\cdot Cr^2- \\ -0,46\cdot Ni^2-3,46\cdot Mo^2-28\cdot V^2. \quad (17)$$

$$Ac_3=912-370\cdot C-27,4\cdot Mn+27,3\cdot Si-6,35\cdot Cr-32,7\cdot Ni+5,57\cdot W+95,2\cdot V+ \\ +72,0\cdot Al+70,2\cdot Ti+64,5\cdot Nb+276\cdot P+332\cdot S-485\cdot N-900\cdot B+16,2\cdot C\cdot Mn+ \\ +32,3\cdot C\cdot Si+15,4\cdot C\cdot Cr+48,0\cdot C\cdot Ni+4,8\cdot Mn\cdot Ni+4,32\cdot Si\cdot Cr-18,6\cdot Si\cdot Ni- \\ -17,3\cdot Si\cdot Mo+40,5\cdot Mo\cdot V+174\cdot C^2+2,46\cdot Mn^2-6,86\cdot Si^2-0,322\cdot Cr^2+1,24\cdot Ni^2+ \\ +9,9\cdot Mo^2-60,2\cdot V^2. \quad (18)$$

- модель В.І. Зюзіна, В.Д. Садовського та С.І. Баранчука [9]:

$$Ms=520-320\cdot C-45\cdot Mn-5\cdot Si-30\cdot Cr-20\cdot Ni-20\cdot Mo-5\cdot Cu. \quad (19)$$

- модель У. Стівена та А. Хейнса [10]:

$$Ms=561-474\cdot C-33\cdot Mn-17\cdot Cr-17\cdot Ni-21\cdot Mo. \quad (20)$$

$$Bs=830-270\cdot C-90\cdot Mn-70\cdot Cr-37\cdot Ni-83\cdot Mo. \quad (21)$$

- модель Л. Карапелли [11]:

$$Ms=513,9\cdot(1-0,620\cdot C)\cdot(1-0,092\cdot Mn)\cdot(1-0,033\cdot Si)\cdot(1-0,070\cdot Cr)\cdot(1- \\ -0,045\cdot Ni)\cdot(1-0,029\cdot Mo)\cdot(1-0,013\cdot W)\cdot(1+0,120\cdot Co)-18. \quad (22)$$

- модель П. Пейсона та К. Севіджа [12]:

$$Ms=499-317\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-27,8\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo-11,1\cdot W. \quad (23)$$

- модель О. Роуленда та С. Лайла [13], яка уточнює формулу [12]:

$$Ms=499-333\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-27,8\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo-1,1\cdot W. \quad (24)$$

- модель Р. Грейнджа та Г. Стюарта [14]

$$Ms=538-361\cdot C-38,9\cdot Mn-38,9\cdot Cr-20\cdot Ni-27,8\cdot Mo. \quad (25)$$

- модель І. Артінгера [15]:

$$Ms=520-(360-C)\cdot C-33\cdot Mn-11\cdot Si-22\cdot Cr-17\cdot Ni-11\cdot Mo-11\cdot W+6\cdot Co+17\cdot Al. \quad (26)$$

- модель Т. Кунітаке та Я. Окади [16]:

$$Bs=732-202\cdot C-85\cdot Mn+216\cdot Si-47\cdot Cr-37\cdot Ni-39\cdot Mo. \quad (27)$$

- модель А. Кульмбурга [17]:

- для сталей великих поковок:

$$Ac_1=747-17,4\cdot Mn+13,3\cdot Cr-24,8\cdot Ni+18,4\cdot Mo \quad (28)$$

$$Ac_3=880-204\cdot C+19,5\cdot Si-17,2\cdot Ni+83,5\cdot V. \quad (29)$$

$$Ms=572-386\cdot C-69\cdot Mn-43\cdot Cr-26\cdot Ni. \quad (30)$$

$$Bs=813-303\cdot C-86\cdot Mn+107\cdot Si-68\cdot Cr-37\cdot Ni-108\cdot Mo. \quad (31)$$

для корозійностійких сталей:

$$Ac_{1H}=765-30,2\cdot C-19,5\cdot Mn+134\cdot Si-67\cdot Ni+20,5\cdot Mo-64\cdot V. \quad (32)$$

- модель А. Неренберга [18], що є уточненням моделі роботи [12] має наступний вигляд:

$$Ms=499-300\cdot C-33,3\cdot Mn-11,1\cdot Si-22,2\cdot Cr-16,7\cdot Ni-11,1\cdot Mo. \quad (33)$$

До числа розрахункових моделей також відносять математичну модель, яка розроблена Інститутом чорної металургії (ІЧМ, м. Дніпро) для прогнозування температур фазових перетворень. Ця модель створена на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку з використанням інтегральних параметрів міжатомної взаємодії [19]:

$$Ac_1=10^3\times[5,538-61,831\text{tg}\alpha-0,188\Delta ZY+0,187\text{pl}] \quad (34)$$

$$Ac_3=10^3\times[7,430+0,521d-83,547\text{tg}\alpha-0,559ZY] \quad (35)$$

де d – середньостатистична між'ядерна відстань, 10-1нм; $\text{tg}\alpha$ – градієнт зміни радіусу іона при зміні його заряду; ZY – фізико-хімічний еквівалент зарядового стану та його мікронеоднорідності – ΔZY , е; pl – параметр спрямованої зарядової щільності, е/нм.

Крім зазначених вище моделей та методів, на сьогодні існує модель для визначення фазових перетворень в програмному комплексі JMatPro, яка основана на математичній моделі Кіркалді.

Я було зазначено вище, використання розрахункового методу дозволяє значно скоротити час та витрати на визначення температур критичних точок, необхідних для розробки температурно-часових режимів термічної обробки. Тим не менше, наразі відсутні відомості щодо придатності будь-якої математичної моделі для її використання стосовно економнолегованих сталей в умовах зі зміненою концентрацією легуючих компонентів відносно концентрацій в відомих сталях. Виходячи з цього, робота, що спрямована на встановлення рівню точності існуючих математичних моделей прогнозування температур критичних точок для економнолегованих конструкційних сталей є актуальною.

Мета роботи. З числа відомих математичних моделей визначити найбільш придатні для прогнозування температур критичних точок багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталей

Методика досліджень. Дослідження проводили шляхом порівняльного аналізу результатів розрахунків за відовими математичними моделями, які використовують для визначення температур критичних точок фазових перетворень в багатокомпонентних економнолегованих конструкційних сталях, та експериментальних даних для досліджуваних сталей і сталі-прототипу, хімічний склад яких приведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей та сталі-прототипу

Сталь	Вміст елементів, % мас.															
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	Ca	Nb	S	P	N	Cu	B
Прототип	0,313	0,35	0,384	2,86	2,54	0,451	0,0057	0,0031	0,014	<0,0001	<0,004	0,018	0,011	0,012	0,03	0,002
Склад 1	0,329	0,74	1,68	2,26	1,92	0,455	0,153	0,0024	0,024	0,0004	<0,001	0,007	0,004	0,007	0,03	0,001
Склад 2	0,321	0,54	0,368	0,81	2,26	0,356	0,148	0,026	0,043	0,003	0,002	0,022	0,02	0,0035	0,03	0,002
Склад 3	0,251	0,65	0,284	0,98	1,84	0,317	0,133	0,0012	0,026	0,0003	0,029	0,022	0,022	0,0071	0,271	0,002

Хімічний склад досліджуваних сталей визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L.

Досліджувані сталі виплавляли з шихтових матеріалів технічної чистоти в індукційному модулі ІТПЕ-0,01. Плавку проводили методом переплаву без

примусового окислення домішок. Введення легуючих елементів в рідку сталь проводили шляхом занурення в неї захисного металевго контейнера де розміщували наважки необхідних легуючих елементів.

Для виявлення структурних і фазових перетворень сталі-прототипу був використаний метод диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА), який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C Jupiter.

Результати досліджень. Проблема вибору оптимального хімічного складу та технологічного режиму обробки будь-якої легованої сталі передбачає необхідність визначення впливу вмісту окремих хімічних елементів на температурні інтервали існування фаз, а також положення критичних точок. При цьому, визначальними параметрами для розробки технологічного регламенту термічної обробки виробів з таких сталей при їх нагріванні (охолодженні) є критичні температури фазових перетворень (A_{c1} і A_{c3}). Тобто, відповідно до величин температурних значень A_{c1} і A_{c3} і призначають режими термічної обробки для надання сталям необхідних експлуатаційних властивостей.

Виходячи з того, що будь яка математична модель для розрахунку температур критичних точок була розроблена їх авторами для відповідних меж змін хімічного складу сталі, провели аналіз умов (див. таблицю 2) щодо можливості використанні представлених вище математичних моделей.

Таблиця 2

Умови використання математичних моделей за хімічним складом сталей

Модель	Вміст хімічних елементів, % мас. (Fe - залишок)							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Інші
[1]	0,03-0,96	0,17-2,10	0,04-1,90	≤ 3,3	≤ 4,2	≤ 1,0	≤ 0,75	≤0,15 Zr; ≤ 0,1 Al
[2]	0,08-1,43 (Ac ₁), 0,08-0,59 (Ac ₃), 0,11-0,60 (Ms)	0,04-1,98 (Ac ₁ , Ac ₃), 0,04-4,87 (Ms)	0,06-1,78 (Ac ₁), 0,09-1,78 (Ac ₃), 0,11-1,89 (Ms)	≤ 4,48 (Ac ₁ , Ac ₃) ≤ 4,61 (Ms)	≤ 5,00 (Ac ₁ , Ac ₃), ≤ 5,04 (Ms)	≤ 2,61 (Ac ₁), ≤ 1,05 (Ac ₃), ≤ 5,40 (Ms)	≤ 2,51 (Ac ₁), ≤ 0,70 (Ac ₃)	≤ 0,072 (Ac ₁ , Ac ₃) As; ≤ 4,10 (Ac ₁ , Ac ₃) W
[3]	0,30-0,60	≤ 2,00	≤ 1,00	≤ 1,50	≤ 3,50	≤ 0,50	–	–
[4]	0,13-0,60 (Ac ₁), 0,13-0,73 (Ac ₃ , Ms)	0,39-2,04	0,15-0,53 (Ac ₁), 0,15-1,62 (Ac ₃ , Ms)	≤ 1,95	≤ 5,00	≤ 0,54	–	– ≤ 0,98 Cu
[5]	0,25-0,45	0,70-1,20	0,6-3,1	0,8-2,9	–	0,20-0,90	≤ 0,4	–
[6]	0,09-0,81	0,35-1,79	0,02-1,49	≤ 1,55	≤ 4,56	≤ 0,92	–	–
[7,8]	≤ 0,83	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 3,0	≤ 1,0	≤ 0,5	≤ 1,0 %W; ≤ 1,0 Cu; ≤ 0,2 Al; ≤ 0,15 Ti; ≤ 0,2 Nb; ≤ 0,04 P; ≤ 0,04 S; ≤ 0,025 N; ≤ 0,01 B
[9]	~ 1 %	*	*	*	*	*	*	*
[10]	0,1-0,55	0,20-1,70	–	≤ 3,50	≤ 5,00	≤ 1,00	–	–
[14]	0,20- 0,85	–	–	≤ 1,50	–	≤ 1 %	–	–
[16]	0,11-0,56	0,34-1,49	0,14-0,40	0,14-4,80	0,23-4,33	0,07-1,99	–	–
[17]	0,15-0,45	0,35-1,30	0,05-0,50	0,10-1,90	0,03-2,80	0,03-0,85	0,01-0,35	–
	0,10-1,10	0,35-1,45	0,25-0,50	11,00-17,70	0,25-2,45	0,05-1,65	0,01-0,35	–
ГЧМ	0,25-0,35	0,35-0,75	0,25-1,70	0,80-2,90	1,80-2,60	0,30-0,47	0,0005- 0,17	0,01-0,05 Al; 0,001-0,004 Ti; 0,004-0,03 Nb; 0,03-0,30 Cu; 0,001-0,002 B

Примітки: “–” вплив елементів не враховується, * – дані відсутні

Результати визначення температур критичних точок для сталі-прототипу (див. таблицю 1) за результатами ДТГА приведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Експериментальні величини температур критичних точок для сталі прототипу

Критичні точки	Ac1	Ac3	Ms	Bs
Температура, °C	749	761	285	311

Результати розрахунку температур критичних точок сталі-прототипу, які виконано за математичними моделями, що були обрані за результатами оцінювання умов їх використання (див. таблицю 2), та величини похибок від їх експериментальних значень (див. таблицю 3), наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі-прототипу, та похибка між розрахунковими та експериментальними даними

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	експ.	розн.		експ.	розн.		експ.	розн.		експ.	розн.	
[1]	749	746	0,40	761	788	-3,5	285			311		
[2]		736	1,74		762	-0,1		319	-11,9			
[10]								300	-5,3		382	-22,8
[11]								259	9,1			
[12]								257	9,8			
[13]								252	11,6			
[16]											476	-53,1
[18]								278	2,5			
JmatPRO		743	0,80		756	0,7		289	-1,4		305	1,9
ІЧМ		717	4,27		762	-0,1						

Гістограми температур фазових перетворень в критичних точках сталі-прототипу, які розраховані за різними моделями представлено на рис. 1.

З аналізу отриманих результатів (див. таблицю 4, рис. 1) витікає, що з числа обраних математичних моделей найбільш точною

(величина похибки не більше 1,9%) є модель, яка основана на математичній моделі Кіркалді і реалізована в програмному комплексі JMatPro.

Виходячи з цього, в подальших дослідженнях для сталей 1...3 в якості істинних використовували результати розрахунку температур критичних точок за програмним комплексом JMatPro. Результати розрахунку за програмою JmatPRO для сталей 1...3 приведено в таблиці 5.

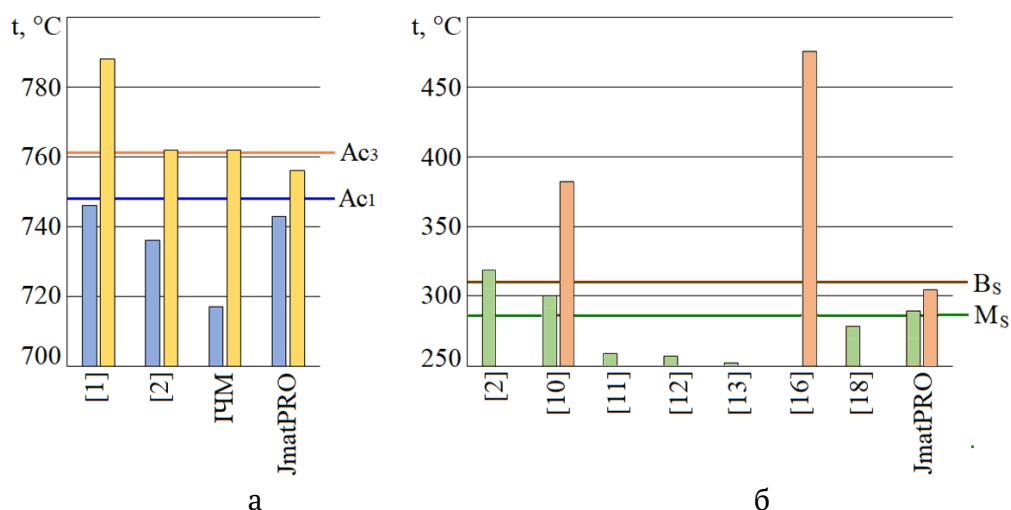


Рисунок 1 - Гістограми температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі-прототипу, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені експериментальні рівні критичних точок

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -Ms ■ -Bs

Таблиця 5

Результати розрахунку за програмою JmatPRO для сталей 1...3

Сталь	Ac ₁	Ac ₃	Ms	Bs
	Температура, °C			
Сталь 1	772	780	280	303
Сталь 2	720	773	354	368
Сталь 3	719	763	335	412

Результати розрахунків температур критичних точок для сталей 1...3, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO представлено в таблицях 6...8, та на гістограмах рис. 2...4.

Таблиця 6

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 1, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.	
[1]	772	784	-1,55	780	878	-12,56	280			303		
[2]		770	0,26		835	-7,05		316	-12,86			
[5]		735	4,79		919	-17,82						
[10]								300	-7,14		408	-34,65
[11]								255	8,93			
[12]								251	10,36			
[13]								246	12,14			
[18]								270	3,57			
ІЧМ		713	7,64		721	7,56						

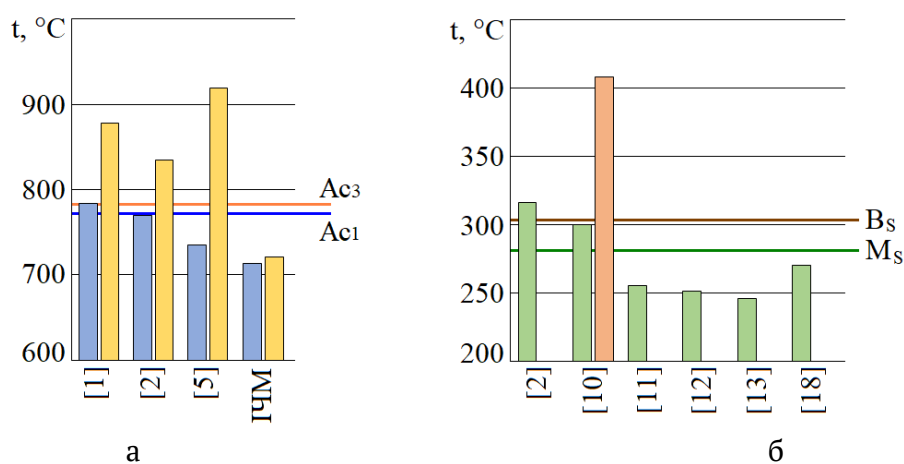


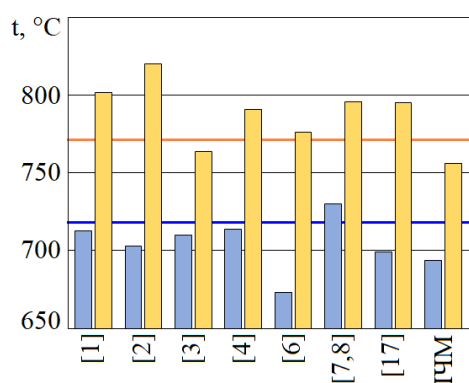
Рисунок 2 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac₁, Ac₃ (а) та M_s, B_s (б) в сталі 1, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac₁ ■ -Ac₃ ■ -M_s ■ -B_s

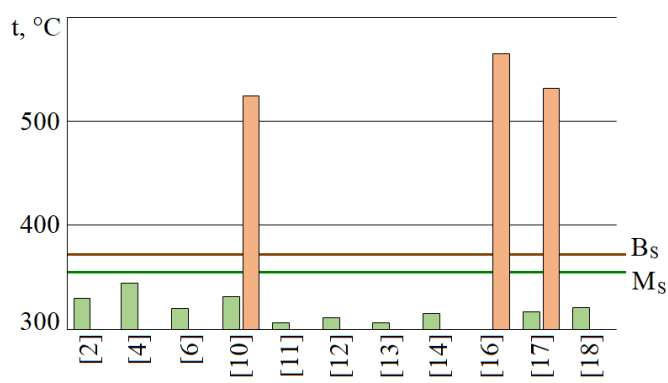
Таблиця 7

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 2, та похибка між розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.		JmatPR O	розр.	
[1]	720	713	0,97	773	802	-3,75	354			368		
[2]		703	2,36		820	-6,08		330	6,78			
[3]		710	1,39		764	1,16						
[4]		714	0,83		791	-2,33		344	2,82			
[6]		673	6,53		776	-0,39		320	9,60			
[7,8]		730	-1,39		796	-2,98						
[10]								331	6,50		525	-42,66
[11]								306	13,56			
[12]								311	12,15			
[13]								306	13,56			
[14]								315	11,02			
[16]											565	-53,53
[17]		699	2,92		795	-2,85		317	10,45		532	-44,57
[18]								321	9,32			
ІЧМ		694	3,61		756	2,20						



а



б

Рисунок 3 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac₁, Ac₃ (а) та M_s, B_s (б) в сталі 2, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac₁ ■ -Ac₃ ■ -M_s ■ -B_s

Таблиця 8

Результати розрахунків температур критичних точок для сталі 3, та похибка між
розрахунковими даними та даними за програмою JmatPRO

Модель	Ac ₁		Похибка, %	Ac ₃		Похибка, %	M _s		Похибка, %	B _s		Похибка, %
	JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.		JmatPRO	розр.	
[1]	719	719	0,00	763	816	- 6,95	335			412		
[2]		710	1,25		807	- 5,77		364	-8,66			
[4]		719	0,00		797	- 4,46		369	-10,15			
[6]		680	5,42		796	- 4,33		349	-4,18			
[7,8]		729	-1,39		809	- 6,03						
[10]								366	-9,25		541	-31,31
[11]								324	3,28			
[12]								333	0,60			
[13]								329	1,79			
[14]								338	-0,90			
[16]											561	-36,17
[17]		709	1,39		814	- 6,68		340	-1,49		542	-31,55
[18]								343	-2,39			
ІЧМ		705	1,95		780	- 2,23						

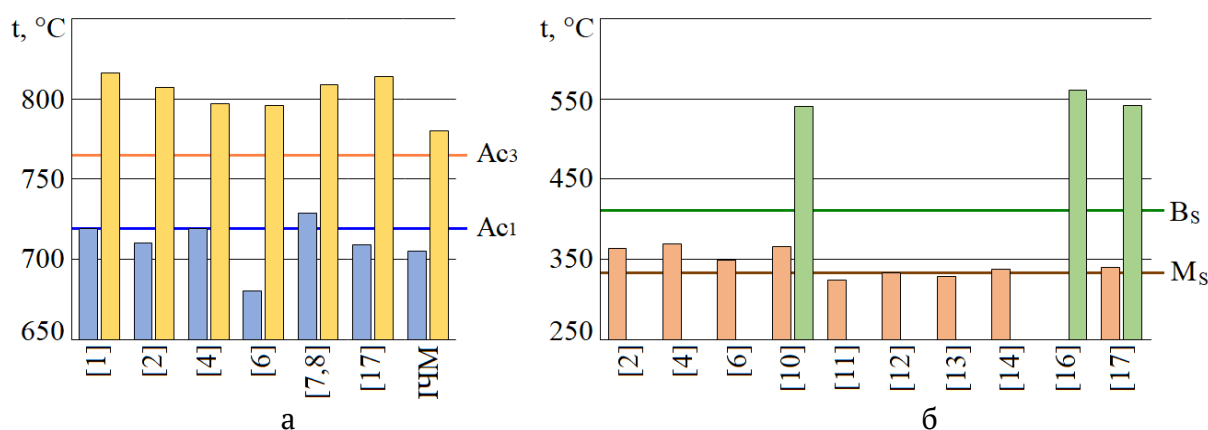


Рисунок 4 - Гістограм температур фазових перетворень в критичних точках Ac1, Ac3 (а) та Ms, Bs (б) в сталі 3, які розраховані за різними моделями, де горизонтальними лініями відмічені рівні критичних точок, визначених за програмою JmatPRO

■ -Ac1 ■ -Ac3 ■ -Ms ■ -Bs

Як випливає з аналізу отриманих даних, для визначення температури Ac1 і Ac3 можна рекомендувати математичну модель роботи [1]. Щодо усіх інших критичних точок, то жодна з використаних моделей не дозволяє з прийнятною для інженерних розрахунків точністю вичислити їх значення. Крім того всі відомі моделі за виключенням моделі програмного комплексу JmatPRO непридатні для комплексного розрахунку одним методом температур всіх критичних точок, обраних в роботі багатокомпонентних конструкційних економнолегованих багатокомпонентних сталей.

Висновки.

За результатами виконаних досліджень встановлено, що досліджені математичні моделі дозволяють встановити величини критичних точок сталей з відносно невеликою точністю. Тим не менше, виходячи з того, що на практиці для призначення температури під загартування найбільш значущою є температура Ac3, а реальна температура загартування, з технологічної точки зору та обладнання, що використовується для проведення термічної обробки, може перевищувати температуру точки Ac3 на 30...100 °C, то з достатньо високим рівнем точності розрахунок величини температури Ac3 для економнолегованих конструкційних сталей рекомендовано проводити за математичними моделями програмного комплексу Jmat PRO або ІЧМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Günther E., Radomski G., Oheim B., Günther E. Die rechnerische Ermittlung der Umwandlungspunkte A_{c1} und A_{c3} . *Neue Hütte*. 1970. Vol. 15. P. 18–21.
2. Andrews K.W. Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965. Vol. 203. P. 721–727.
3. Grange R.A. Estimating Critical Ranges in Heat Treatment of Steels. *Metal Progress*. 1961. Vol. 79. No. 4. P. 73–75.
4. Kunitake T. Prediction of A_{c1} , A_{c3} and M_s temperature of steels by empirical formulas. *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*. 2001. Vol.41(3). P.164–169.
5. Кунітаке Т., Като Т. Вплив різних легуючих елементів на Si-Cr-Mo-V сталі. *Теуу то заган*. 1964. Т. 50. № 4. P. 666–668.
6. Eldis, G.T. A Critical Review of Data Sources for Isothermal Transformation and Continuous Cooling Transformation Diagrams. *Hardenability Concepts with Applications to Steel*. 1978. P. 126–148.
7. Винокур, Б.Б., Пілюшенко В.Л., Касаткін О.Г. Структура конструкційної легованої сталі. М.: Металургія, 1983. 216 с.
8. Касаткін О.Г., Винокур Б.Б., Пілюшенко В.Л. Розрахункові моделі визначення критичних точок сталі. *Металознавство та термічна обробка металів*. 1984. №1. С. 20–22.
9. Зюзін В.І., Садовський В.Д., Баранчук С.І. Вплив легуючих елементів на положення мартенситної точки, кількість залишкового аустеніту та стійкість його при відпустці. *Металург*. 1939. № 10–11. С. 75–80.
10. Steven W., Haynes A.G. The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels: Some Effects of Chemical Composition. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1956. Vol. 183. P. 349–359.
11. Carapella L.A. Computing A'' or M_s (Transformation Temperature on Quenching) from Analysis. *Metal Progress*. 1944. Vol. 46. No. 1. P. 108.
12. Payson P., Savage C.H. Martensite Reactions in Alloy Steels. *Transactions ASM*. 1944. Vol. 33. P. 261–275.
13. Rowland E.S., Lyle S.R. The Application of M_s Points to Case Depth Measurement. *Transactions ASM*. 1946. Vol. 37. P. 27–46.
14. Grange R.A., Stewart H.M. The Temperature Range of Martensite Formation. *Transactions AIME*. 1946. Vol. 167. P. 467–490.
15. Artinger I. Szerszámacélok és hőkezelésük : підручник. Budapest : Műszaki Könyvkiadó, 1978. 271 p.
16. Kunitake T., Okada Y. The estimation of bainite transformation temperatures in steels by the empirical formulas. *Tetsu-to-Hagane*. 1998. Vol.84, №2. P. 137–141.
17. Kulmburg A. Contribution to the Calculation of the Transformation Behaviour of Steel. Computational Materials Technology. Proceedings of an International Conference. Linköping (4–5 Jun). 1981. P. 61–67.
18. Nehrenberg A.E. Contribution to discussion on grange and stewart. *Transactions AIME*. 1946. Vol. 167. P. 494–498.
19. Тогобицкая Д.Н., Кукса О.В., Пучиков А.В., Узлов О.В., Хулин А.Н. Прогнозирование величин критических точек фазовых превращений A_{c1} , A_{c3} для малоуглеродистых конструкционных сталей методом физико-химического моделирования на основе параметров межатомного взаимодействия. *Системные технологии* 2018. №2 (215). С. 14–19.

REFERENCES

1. Günther, E., Radomski, G., Oheim, B., & Günther, E. (1970). Die rechnerische Ermittlung der Umwandlungspunkte Ac1 und Ac3. *Neue Hütte*, 15, 18–21.
2. Andrews, K.W. (1965). Empirical Formulae for the Calculation of Some Transformation Temperatures. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 203, 721–727.
3. Grange, R.A. (1961). Estimating Critical Ranges in Heat Treatment of Steels. *Metal Progress*, 79, 4, 73–75.
4. Kunitake, T. (2001). Prediction of Ac1, Ac3 and Ms temperature of steels by empirical formulas. *Journal of the Japan Society for Heat Treatment*. 2001, 41(3), 164–169.
5. Kunitake, T., & Kato T. (1964). Vplyv riznykh lehuiuchykh elementiv na Si-Cr-Mo-V stali [The effect of various alloying elements on Si-Cr-Mo-V steels]. *Tetsu to gagan*, 50, 4, 666–668 [in Ukrainian].
6. Eldis, G.T. (1978). A Critical Review of Data Sources for Isothermal Transformation and Continuous Cooling Transformation Diagrams. *Hardenability Concepts with Applications to Steel*, 126–148.
7. Vynokur, B.B., Piliushenko, V.L., & Kasatkin, O.H. (1983). Struktura konstruktsiinoi lehovanoi stali [Structure of structural alloy steel] [in Ukrainian].
8. Kasatkin, O.H., Vynokur, B.B., & Pyliushenko, V.L. (1984). Rozrakhunkovi modeli vyznachennia krytychnykh tochok staly [Calculation models for determining critical points of steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, 1, 20–22.
9. Ziuzin, V.I., Sadovskyi, V.D., & Baranchuk, S.I. (1939). Vplyv lehuiuchykh elementiv na polozhennia martensytnoi tochky, kilnist zalyshkovoho austenitu ta stiikist yoho pry vidpusttsi [The influence of alloying elements on the position of the martensite point, the amount of retained austenite and its stability during tempering]. *Metalurh*, 10-11, 75–80.
10. Steven, W., & Haynes, A.G. (1956). The Temperature of Formation of Martensite and Bainite in Low-Alloy Steels: Some Effects of Chemical Composition. *Journal of the Iron and Steel Institute*, 183, 349–359.
11. Carapella, L.A. (1944). Computing A'' or Ms (Transformation Temperature on Quenching) from Analysis. *Metal Progress*, 46, 1, 108.
12. Payson, P., & Savage, C.H. (1944). Martensite Reactions in Alloy Steels. *Transactions ASM*, 33, 261–275.
13. Rowland, E.S., & Lyle, S.R. (1946). The Application of Ms Points to Case Depth Measurement. *Transactions ASM*, 37, 27–46.
14. Grange, R.A., & Stewart, H.M. (1946). The Temperature Range of Martensite Formation. *Transactions AIME*, 167, 467–490.
15. Artinger, I. (1978). *Szerszámacélok és hőkezelésük : textbook*. Budapest : Műszaki Könyvkiadó.
16. Kunitake, T., & Okada, Y. (1998). The estimation of bainite transformation temperatures in steels by the empirical formulas. *Tetsu-to-Hagane*, 84, 2, 137–141.
17. Kulmburg, A. (1981). Contribution to the Calculation of the Transformation Behaviour of Steel. *Computational Materials Technology. Proceedings of an International Conference*. Linköping (4–5 Jun), 61–67.
18. Nehrenberg, A.E. (1946). Contribution to discussion on grange and stewart. *Transactions AIME*, 167, 494–498.

19. Tohobytskaia D.N., Kuksa O.V., Puchykov A.V., Uzlov O.V., Khulyan A.N. (2018). Prognozirovanie velichin kriticheskikh toчек fazovykh prevrascheniy Ac1, Ac3 dlya malouglerodistykh konstruktsionnykh staley metodom fiziko-himicheskogo modelirovaniya na osnove parametrov mezhatomnogo vzaimodeystviya [Prediction of values of critical points of phase transformed Ac1, Ac3 for low-carbon structural steels by the method of physical and chemical modeling based on parameters of interatomic interaction]. *Sistemnyie tehnologii*, 2 (215), 14-19 [in Russian].

Received 25.04.2025.

Accepted 11.05.2025.

UDC 627.63. 632.81.618.83

Oleksandr Babachenko, Ganna Kononenko, Tetiana Kimstach,
Rostyslav Podolskyi, Olena Safronova

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR DETERMINING CRITICAL POINT TEMPERATURES OF ECONOMICALLY ALLOYED STEELS

The problem of determining the temperatures of critical points of phase transformations in steels remains relevant due to the need to ensure high accuracy in assigning heat treatment modes. It is known that the position of critical points is largely determined by the chemical composition of the steel, in particular the content of alloying elements.

The aim of the work is to determine, from among the known mathematical models, the most suitable ones for predicting the temperatures of critical points of multicomponent economically alloyed structural steels.

The research was conducted by comparative analysis of the results of calculations using known mathematical models used to determine the temperatures of critical points of phase transformations in multicomponent economically alloyed structural steels, and experimental data for the studied steels and the prototype steel. The chemical composition of the studied steels was determined on a precision analyzer EXPERT 4L. The studied steels were smelted from charge materials of technical purity in an induction module ITTIE-0,01. The melting was carried out by the remelting method without forced oxidation of impurities. The introduction of alloying elements into the liquid steel was carried out by immersing a protective metal container into it, where samples of the necessary alloying elements were placed. To identify structural and phase transformations of the prototype steel, the method of differential thermogravimetric analysis was used, which was carried out on a synchronous thermal analyzer STA 449 C Jupiter.

The results of a comparative analysis of mathematical models used to predict the temperatures of critical points of phase transformations in multicomponent economically alloyed structural steels are presented. The influence of alloying elements on the values of critical temperatures is analyzed, and the conditions for the application of various mathematical models are also considered. It was found that the studied mathematical models allow to establish the values of critical points of steels with relatively low

accuracy. Nevertheless, based on the fact that in practice, the most significant temperature for setting the tempering temperature is the A_{c3} temperature, and the real tempering temperature, from a technological point of view and the equipment used for heat treatment, may exceed the A_{c3} point temperature by 30...100 °C, it is recommended to calculate the A_{c3} temperature value for economically alloyed structural steels with a sufficiently high level of accuracy using mathematical models of the Jmat PRO or ISI software complex..

Keywords: *steel, mathematical model, critical points, heat treatment, alloying elements.*

Бабаченко Олександр Іванович - член-кореспондент, докт. техн.наук, директор Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Кононенко Ганна Андріївна - докт. техн. наук, ст. досл., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, професор НТУ «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна

Кімстач Тетяна Володимирівна – к.т.н., доцент Українського державного університету науки і технологій; старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Подольський Ростислав Вячеславович – докт. філ., в.о зав. відділу проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

Сафронова Олена Анатоліївна – аспірантка, науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Babachenko Oleksandr - corresponding member, Dr. Technical Sciences, Director of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Kononenko Ganna - Doct. technical science, sen.resear., Senior Researcher at the Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine, Professor at the National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine

Kimstach Tetiana Volodymyrivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Ukrainian State University of Science and Technologies (USUST); senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Podolskyi Rostyslav – PhD, Acting Head of the Department of Problems of Deformation and Heat Treatment of Structural Steels of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

Safronova Olena – PhD-student, researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.04

UDC 669.184.6:621.373.5

Anatolii Nikolenko, Vadym Nezhurin, Viktor Kuvaev, Oleksandr Verovkin,
Volodymyr Bashko, Vladyslav Kopysov, Oleksandr Koliadenko

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE FERROALLOY SMELTING PROCESS IN ELECTRIC ARC FURNACES BY IMPROVING CONTROL AND MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL MODES

Abstract. *The article addresses the issues of improving the efficiency of ferroalloy smelting in electric arc furnaces by enhancing the control and management of technological regimes. Recent global trends, such as the increase in the production of high-quality alloy steels and semiconductor products, have led to a sharp rise in the demand for ferroalloys and crystalline silicon. In this context, the intensification of technological processes and the optimization of energy consumption in ferroalloy electric furnaces have become particularly relevant.*

The ferroalloy smelting process is based on the carbothermic reduction of metals from their oxides, occurring at high temperatures with significant heat absorption. Although the mechanisms and kinetics of the main reduction reactions have been well studied, in industrial conditions, the techno-economic indicators of the process are significantly inferior to those achieved in laboratory settings. The extraction rate of target elements decreases to 75–80%, and the energy consumption exceeds the theoretically necessary amount by 1.5–2 times.

Traditional approaches to improving the ferroalloy smelting process through the enhancement of furnace designs and the selection of charge materials with specific physico-chemical properties have largely exhausted their potential. In the context of continuously rising energy costs and deteriorating raw material quality, the urgent problem now lies in implementing fundamentally new approaches to technological process control, focused on detailed monitoring and analysis of the furnace's current state.

The authors justify the necessity of transitioning from the "input-output" control system to a more advanced "input-state-output" principle, which enables real-time analysis of the furnace workspace parameters and prompt influence on the course of the

© Nikolenko Anatolii, Nezhurin Vadym, Kuvaev Viktor, Verovkin Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Koliadenko Oleksandr

technological process. In particular, significant attention is devoted to the development of methods for analyzing the electrical, thermal, and physico-chemical characteristics of the active zone of the furnace, which determine the main transformation processes of the charge.

The paper discusses the design features of electric arc furnaces and describes the structure of the workspace for different types of processes - slag-free and slag-forming. It is shown that the distribution of energy among the zones of the charge, the arc, and the melt has a substantial impact on the techno-economic indicators of production. The peculiarities of arc burning, heat transfer processes, and ionization in the gas cavities of the furnaces are studied.

The article highlights the main methods for investigating processes in furnaces: probing, analyzing oscillograms of current and voltage, determining the resistances of the charge and melt, as well as modern methods for assessing power distribution across furnace zones based on measurements of electrical parameters. Special attention is paid to the problem of increasing the accuracy of assessing the parameters of energy processes without interfering with the technological process.

The authors emphasize the importance of optimizing the modes of electric power supply and the structural parameters of furnaces to ensure the stability of the bath operation, reduce the dispersion of fluctuations, and minimize losses. Methods for selecting optimal electrode immersion parameters, managing charge regimes, and selecting charge materials considering their electrophysical properties are presented.

The article makes a significant contribution to the creation of a scientific basis for improving the efficiency of ferroalloy smelting, which is of particular importance in the context of the modern energy crisis and the growing demands for the quality of metallurgical industry products.

Keywords: *ferroalloy smelting; electric arc furnace; carbothermic reduction; automated control; techno-economic indicators; energy distribution; electric arc discharge; process optimization; charge materials; energy consumption; furnace state control.*

Introduction

The global trend towards increasing the production of high-quality alloy steels and semiconductors, which has emerged in recent years, has defined the growing demand for ferroalloy and crystalline silicon smelting. Mass production ferroalloys are obtained in electric arc furnaces by a carbothermic method based on the

reduction of metals from their oxides. The key feature of this method is that the reactions between oxides and carbon occur at high temperatures with significant heat absorption. The specific energy consumption during the production of different alloys ranges from 3 to 18 MWh per ton. The mechanisms and kinetics of the reduction reactions are fairly well studied, and the conditions for their optimal progress have been determined and optimized. However, while in laboratory conditions one of the main indicators of the process - the extraction rate of the target element - reaches 90% or higher, during industrial implementation, it is significantly lower, around 75–80%, and the specific energy consumption exceeds the theoretical minimum by 1.5 to 2 times.

Numerous research efforts aimed at improving furnace designs and selecting charge materials with specified physico-chemical properties have helped reduce the gap between theoretical and actual process performance. However, this reserve is now almost exhausted. In conditions of high energy costs and the tendency for further price increases, the share of energy expenses in the production cost structure is growing substantially. Furthermore, the declining quality of ores and carbonaceous reductants leads to a significant deterioration in the techno-economic indicators of production. Therefore, the issues of intensifying technological processes and improving production efficiency are becoming particularly urgent.

A specific feature of ferroalloy technologies is the inaccessibility of the furnace workspace for direct measurements, resulting in a lack of real-time information about the process state, which has historically determined the widespread use of the "input-output" control principle. However, the complex interrelation of chemical, electrical, and thermal processes in the furnace bath requires a different management approach - the "input-state-output" principle.

The technical re-equipment of the ferroalloy industry, which began at the end of the 1970s, led to an increase in the power capacity of existing furnaces and the commissioning of units with installed capacities up to 81 MVA. As a result, the management of these facilities has become significantly more complicated, necessitating a scientifically based study of the full diversity of processes occurring in the furnace bath and their interrelationships. At that time, the level of monitoring of key technological parameters was extremely low, and the underdevelopment of

methodological frameworks for process state analysis led to an inefficient, largely intuitive approach to process control. The use of automated systems for these purposes was limited by the low capabilities of domestic computing technology.

The significant progress in computing technology that began in the 1990s greatly improved the quality of process monitoring and control. This allowed the development of local automated control systems that included automatic regulators for electrical regime parameters. With the development of network technologies, it became possible to create large databases that integrate technological and economic process parameters along with tools for their timely updating and processing. However, the methodological basis of such systems has not undergone significant changes, and most of them still operate according to the "input-output" principle. Therefore, special attention must be given to the development of methods for monitoring and analyzing the process state when designing control systems.

The ferroalloy furnace, as a control object, represents a complex dynamic system. The interconnection of physico-chemical, thermal, and electrophysical processes occurring in the furnace bath, as well as their different inertia, determine their stochastic nature. Insufficient information about the process state leads to untimely or often incorrect application of control actions. The result is a fluctuating process behavior characterized by the alternation of transitions from one inefficient state to another. The higher the furnace capacity - and thus the longer the transient processes - the greater the dispersion of these fluctuations, and the higher the material and energy losses accompanying the process.

Another negative consequence of insufficient informational support for process control is the largely subjective nature of decision-making. Responsibility for applying the necessary control actions generally falls on the furnace operator. Thus, the quality of process control becomes dependent on the technical training and experience of the personnel, meaning that the control procedure is not formalized and is often performed intuitively. Consequently, the probability of errors during control execution is very high. Formalizing the control procedure means defining and clearly understanding the sequence of steps needed to achieve the desired state of the object, offering a single, reliable way to lead the process toward optimal operation.

Expanding the information base by introducing additional parameters that describe the process state allows for a quantitative analysis of the technological parameters' interrelations and the development of methods for regulating the main technological regimes.

The objective of this research is to develop scientifically grounded methods for real-time control of the ferroalloy smelting process in electric arc furnaces, to improve the regulation of technological regimes, and to optimize the distribution of energy parameters within the furnace workspace. Achieving these goals is expected to ensure the intensification of the smelting process, improvement of the techno-economic performance of production, reduction of energy consumption and material losses, and create the foundation for implementing modern automated control systems for ferroalloy smelting processes under conditions of limited informational support and high complexity of the physico-chemical interactions.

Presentation of the Main Material

Electric arc reduction furnaces intended for the production of ferroalloys are continuous operation units, as these technologies are characterized by continuous charging, processing of charge materials, and periodic tapping of slag and metal. The electrical circuit of the furnace includes the furnace transformer, the secondary current supply system (short network), self-baking electrodes, and the melting bath. A distinctive feature of the carbothermic reduction of metals in electric arc furnaces lies in the direct conversion of supplied electrical energy into heat within the working material itself, that is, on the active resistances of individual zones of the furnace workspace: in the charge, the melt, and the arc discharge. In turn, the resistances of these zones depend on a multitude of factors determined by the electrical, thermophysical, and physico-chemical processes occurring in the furnace bath and the properties of the materials involved. Given that these processes are closely interconnected, the interdependence of the parameters of the main technological regimes - electrode, electrical, and charge regimes - is highly complex.

At the same time, studying the interrelation of energy and technological process parameters is critically important for solving the problems of intensifying the operation of electric arc reduction furnaces, optimizing technological regimes,

and developing production control systems. It is worth noting that at the early stages of electric furnace technology development, arc reduction furnaces were primarily viewed as electrical devices, with less attention paid to the study of physico-chemical and thermophysical processes. The first works on studying the relationship between energy parameters and technological aspects were conducted by one of the founders of domestic electric furnace technology, M.S. Maksimenko [1]. He was the first to point out that achieving high techno-economic production indicators requires the optimization of the energy characteristics of the process. According to M.S. Maksimenko, these characteristics include the volumetric densities of energy and power released in solid and liquid conductors as well as in the gas discharge.

Subsequently, this research direction was further developed in the works of A.S. Mikulinsky, Ya.S. Shchedrovitsky, S.I. Khitrik, S.I. Telnoy, and other scholars. A.S. Mikulinsky can be considered the founder of the comprehensive approach to studying processes in the baths of ore-reducing electric furnaces. He outlined the main directions in the theory and practice of ore electric furnace technology and proposed the classification of electric furnace processes based on the quantity of slag produced [2]. According to this classification, slag-free processes are those in which the slag ratio (the mass of slag relative to the mass of metal) is insignificant, approximately $\sim 0.03\text{--}0.05$, because practically all elements present in the ore are reduced. This group includes the processes of producing silicon and high-silicon ferroalloys.

Slag-forming processes correspond to selective reduction technologies, where only a group of target elements present in the ore is reduced, while oxides of other elements form the slag. These processes include the production of ferrosilicomanganese (slag ratio $0.45\text{--}0.6$), ferromanganese ($0.8\text{--}1.2$), and carbon ferrochrome ($0.8\text{--}0.9$). Some specific features differentiate the processes of the first and second groups. Thus, for slag-free processes, a powerful, stable arc discharge is characteristic, shielded by the charge and shunted by its resistance. In slag-forming processes, a powerful arc only exists during the tapping of the melt from the furnace and for a short period afterward. The electrical resistance of the charge in slag-forming processes is significantly higher than in slag-free ones, as less carbonaceous

reductant is required for selective reduction, and carbon has the highest conductivity among all charge components.

According to the classification proposed by B.M. Strunsky [3], reduction processes in electric arc furnaces are distinguished by the methods of energy release in the working space, highlighting the following main groups:

- In the near-electrode zone and under-electrode gas cavity covered with charge materials;
- In the slag;
- Through open arcs on the burden surface (typically for refining processes).

The complex nature of the interrelation between energy and technological parameters, as well as the mutual influence of individual technological regimes, defines the multifaceted variety of studies of electric arc furnace processes as objects of control.

Among the main research directions, the following can be distinguished:

- Investigation of the kinetics and mechanisms of carbothermic metal reduction reactions;
- Study of the structure of furnace bath workspaces;
- Experimental research and mathematical modeling of electrical and temperature fields in the furnace bath;
- Study of the physico-chemical, thermophysical, and electrical properties of workspace materials;
- Examination of the distribution of energy across different zones of the workspace and the development of methods and algorithms for process optimization;
- Development and implementation of automated control systems for the technology.

The advancement of understanding regarding the structure of the furnace workspace for carbothermic reduction enables a deeper comprehension of the kinetics and mechanisms of the processes and the specifics of energy supply to individual charge transformation zones. This knowledge is also necessary for furnace

design, creation of mathematical models of the process and individual technological regimes, and the development of control and optimization algorithms.

The structure of the furnace bath workspace is predominantly determined by the horizontal distribution of materials: raw charge, intermediate products, the target alloy, and slag. The first studies [4] examining the structure of the workspace were conducted by disassembling cooled furnaces used for the smelting of carbon ferrochrome, ferrosilicomanganese, and ferrosilicon. However, the assumption underlying these studies—that the structure of the cooled furnace corresponds exactly to that of an operating furnace—was not fully confirmed in practice. Nevertheless, data obtained from the disassembly of cooled furnace baths allow for qualitative conclusions about the relationships between the materials and products of smelting.

Notably, it was observed that there is no clear layered separation between the solid charge, magmatic mass, slag, and metal inside the furnace. The boundaries between these phases have complex configurations and are characterized by mutual penetration. Significant advances in studying the active zones of operating furnaces were made by I.T. Zherdev and his collaborators through the use of probing methods [5]. Their work confirmed the existence of gas cavities, estimated their dimensions, and determined the transition boundaries where the charge materials change from one physical state to another, as well as the configurations of electrical and temperature fields.

Important observations for the theory and practice of electric furnace processes were also made by Japanese researchers T. Otani and M. Saito. Using a graphite tube equipped with an optical system and gas sampling apparatus, they probed the gas cavity of a 2.8 MW silicon smelting furnace. Through this system, they were able to determine the temperature of specific zones of the electrode and crucible, and to observe the conditions and transformations of materials on the cavity walls. Their studies confirmed the existence of the gas cavity and expanded the knowledge about its structure.

A summary of data on furnace bath structure is presented in works [2, 3]. For slag-free processes, the structure of the furnace workspace appears as follows: above the gas cavity surrounding the electrode tip lies a layer of solid charge, typically

conical in shape at the burden surface, composed of quartzite, carbonaceous materials, and metallic additives. The lower portion of the burden surface, which covers the gas cavity from above, forms a dome consisting of a viscous silicon dioxide melt interspersed with pieces of carbonaceous reductant, on the surfaces of which silicon carbide forms. The concentration of silicon carbide increases with the depth of immersion.

The walls of the gas cavity mainly consist of silicon carbide and siliceous slag with inclusions of the alloy. The target product, silicon alloy, coagulates into large droplets that drain to the bottom of the cavity and fill the channels in the porous mass of the "false" furnace bottom, which is primarily composed of silicon carbide and slag magma. Due to the continuous interaction between silicon monoxide and silicon carbide, the charge at the cavity walls is constantly renewed while maintaining the relative shape and size of the cavity.

In furnaces operating slag-forming processes, the structure of the workspace is described less extensively in the literature. Due to the periodic tapping of the alloy and slag, the structure of the active zone changes throughout each smelting cycle. According to most researchers [6], a viscous, slag-saturated layer of metal forms at the furnace bottom, atop which accumulates a pool of metal melt that periodically taps out and covers the entire area confined by the furnace lining. Above the metal melt lies a slag layer of variable thickness. Depending on many factors, the slag layer may occupy part or all of the bath surface during the smelting cycle. Between the solid charge and the slag is a layer of magmatic charge. The highest concentration of target elements is found at the slag–magmatic boundary. This description mainly applies to furnaces used for smelting carbon ferrochrome and ferromanganese.

Some differences are observed in the structure of furnace baths used for the production of ferrosilicomanganese and one-stage silicochromium. These furnaces are characterized by more developed gas cavities and a non-uniform cross-sectional distribution of the slag melt. Differences also exist in bath structure between furnaces producing manganese-based and chromium-based alloys.

For example, during ferrosilicomanganese production, a wide coke layer (the coke burden) lies above the slag. The heating of this coke layer induces the melting of the ore component of the charge and filtration of the primary melt

through it. In furnaces smelting carbon ferrochrome, the ore layer is more developed and consists of semi-molten pieces of ore, slag, and coke. Droplets of carbon ferrochrome, formed in the solid-phase reduction zone, pass through this layer and are refined by carbon.

An important element of the furnace workspace is the electrodes. During the smelting process, they are gradually consumed due to interactions with the oxides of the charge, the exhaust gases, carbon sublimation from the arc spot, and thermal destruction. Therefore, the electrodes must be periodically lengthened. In ferroalloy smelting, self-baking electrodes are commonly used, while in silicon production, graphitized electrodes are preferred.

The most widely adopted in ferroalloy technology are cylindrical self-baking electrodes with diameters ranging from 100 to 200 cm, lengths between 15 and 20 meters, and weights of 15–30 tons. The steel casing, reinforced with radially arranged stiffeners, is filled with electrode mass, primarily composed of thermoanthracite (50–70%), along with foundry coke, graphitized coke, and production waste from the electrode industry. The binding material is coal tar pitch (25–28%).

The depth of electrode immersion into the charge determines the position of the reaction (active) zone within the furnace workspace. The correct selection of immersion depth significantly influences the techno-economic indicators of the process. The contact area between the electrode and the charge - and hence its diameter - greatly affects both the active resistance of the bath and the distribution of energy across the workspace zones. Additionally, electrode movement is the most frequently employed control action during the smelting process. Therefore, studying the properties of electrode mass, the design features, and operating modes of electrodes is of particular importance for solving technological control tasks.

The most comprehensive information on this topic is provided in the monograph by M.I. Gasyk [7]. The purpose of self-baking electrodes is to deliver electrical energy directly to the zones where material transformations occur. Moreover, the electrode acts as a regulator of electrical resistance and the position of the active (reaction) zone within the furnace workspace. Its carbon also plays the role of a compensator for the shortage of reductant in the charge.

Research [7] established that the sintering process proceeds in three stages: heating and melting of the electrode mass, coking, and graphitization of the coked electrode section. This sintering is primarily ensured by Joule heating within the electrode, although this heat constitutes no more than 10% of the electrode's total energy balance.

According to [7], several factors significantly influence the baking process: the current load, the height of the liquid electrode mass column, the air temperature at the exit of the "electrode-mantel" space, the parameters of the cooling water, and the overall progress of the technological process. To implement a rational coking regime, it is necessary to match the electrode baking speed to its consumption rate, which requires proper selection of the current load and the electrode slip rate. Naturally, the optimal solution to this problem can be achieved only through the application of automated monitoring and control systems [8].

The increase in installed furnace capacities to 63–80 MVA and the corresponding rise in current strength to 180–200 kA necessitated the use of larger-diameter electrodes (up to 2200 mm) and rectangular-section electrodes. As a result, due to the development of their lateral surface, the resistance decreased, leading to a drop in the power factor - the ratio of the active resistance component to the furnace impedance. Furthermore, the increase in electrode diameter led to a redistribution of energy across the furnace workspace zones because the increased ratio of "delta" to "star" currents caused a higher proportion of energy to be released in the charge.

An important feature of electrodes, as conductors of alternating electric current, is the non-uniform distribution of current density across their cross-section due to the "skin effect." Since the penetration depth of the electromagnetic wave into the electrode does not depend on its size, the main portion of the electrical power is released within a zone of equal width for both large and small diameter electrodes. Consequently, with approximately equal volumetric power densities in the carbon part of the electrodes, the ratio of heat-releasing to heat-absorbing volumes of the electrode mass is significantly lower for larger electrodes than for smaller ones. Therefore, the baked portion of large-diameter electrodes exhibits low thermal stability. Other issues arising during electrode operation are discussed in [8].

A particularly important zone of the furnace workspace, in terms of heat exchange intensity and energy concentration, is the gas cavity containing the electric arc. The arc - one of the many types of electrical discharges in gases - represents a column of plasma moving within an electromagnetic field and serves as a highly efficient converter of electrical energy into thermal energy.

The theory of low-temperature (thermal) plasma and electric arc discharge has been extensively developed and presents no major contradictions. Key contributions to this field include the monographs by A. Engel and M. Steenbeck, W. Finkelburg and G. Meckel, N.A. Kaptsov, D.M. Somerville, and other researchers. Here, we shall highlight only the fundamental principles of this theory as they pertain to powerful (current above 50 A), compressed arcs.

The compressed electric arc, due to its high current density and constriction, achieves very high temperatures in its core, often exceeding several thousand degrees Celsius. The surrounding plasma envelope enables efficient transfer of heat to the surrounding materials - the charge, the slag, and the electrode surfaces. Due to these characteristics, the arc plays a pivotal role in providing the necessary thermal energy for driving the reduction reactions and phase transformations within the furnace bath.

The stability and characteristics of the arc depend heavily on several factors, including the composition and pressure of the gas atmosphere, the electrical parameters of the circuit (current and voltage), the configuration and condition of the electrodes, and the characteristics of the furnace charge. Variations in these factors can lead to changes in the arc length, temperature distribution, and energy density, all of which significantly influence the efficiency and stability of the smelting process.

In the context of ferroalloy production, understanding and controlling the behavior of the arc is crucial for optimizing energy use, minimizing electrode consumption, and ensuring the desired quality of the final alloy product. Research into arc behavior and its interaction with the furnace materials remains an important area of study, as it directly impacts the overall techno-economic performance of the electric arc furnace operations.

The electric arc tends to stabilize itself in such a way that its consumed energy is minimized (Steenbeck's principle of minimum energy).

The temperature of the arc column is directly proportional to the ionization potential of the gas.

The cathode current is primarily governed by thermoelectronic emission, with a lesser role played by autoelectronic emission.

The plasma conductivity is proportional to the density and mobility of electrons.

The degree of ionization (χ), defined as the ratio of the number of ionized molecules to the total number of molecules before ionization, considering the quantum statistical weights of the molecular (gg) and ionic (gp) states formed, is determined by the Saha equation.

Most of the voltage drop across the arc occurs in the near-electrode regions of the gas discharge gap, with the anode voltage drop being significantly higher than the cathode drop.

The static current-voltage characteristics (CVC) of the arc show a decreasing trend.

In his work, G.A. Sisoyan [9] proposed classifying powerful AC electric furnace arcs based on their thermal state and heat exchange regime with the surrounding environment. According to this classification, all arcs are divided into three groups. As the author notes, the external manifestation of the arc burning behavior can be observed in the forms of the current and voltage curves.

The first group includes arcs with an intensely cooled arc column. Due to the intense cooling, the discharge gap rapidly deionizes during the current decay, and the arc extinguishes before the voltage curve crosses the zero point. The voltage at which the arc extinguishes - the extinction voltage - can create a potential gradient necessary to sustain the current. During the period when the arc is extinguished, the deionization of the medium increases, requiring a higher voltage for re-ignition compared to the voltage at extinction. Hence, ignition and extinction peaks are observed on voltage oscillograms, where the ignition peak corresponds to a higher voltage value, and the arc current curve shows pauses. Arcs of this group are typically observed in electric steelmaking furnaces.

The second group consists of arcs with a moderate degree of column cooling, burning under more favorable thermal conditions. In this case, the ignition and extinction peaks on the voltage oscillograms are much smaller or may even be absent. The voltage curves during burning do not exhibit convexity and have a trapezoidal shape. Pauses in the current oscillogram still exist but are significantly shorter. This group includes arcs burning in enclosed volumes under less favorable thermal and technological conditions, such as after furnace downtime.

The third group includes arcs with minimal column cooling, burning steadily and continuously. The deionization of the arc column occurs so slowly that by the end of the current half-cycle, a sufficient number of charged particles remain in the discharge gap to sustain the current. According to the author, if the applied voltage at that moment is sufficient to overcome the cathode and anode potential drops, the next current period begins without a pause, and the arc burns continuously, with the current curve having a sinusoidal shape when powered by a sinusoidal voltage source. This type includes powerful arcs shunted and shielded by the burden, burning in ore-smelting furnaces intended for the production of ferroalloys, such as ferrosilicon of various grades and crystalline silicon.

An effective method for studying the electrical parameters of the arc discharge is the oscillographic recording of current and voltage curves, as well as the registration of static and dynamic current-voltage characteristics (CVCs). Static CVCs of the arc represent the relationship between the root mean square (RMS) values of the arc voltage drop and the arc current at a given arc length, while dynamic CVCs describe the relationship between the instantaneous values of these parameters.

In one of his early works [10], S.I. Telny, analyzing the results of oscillograms of arc voltage in electric furnaces, concluded that the arc voltage remains constant throughout the burning period. Based on this conclusion, he derived the equations for current and voltage curves. In a subsequent work, together with I.T. Zherdev [11], he published oscillograms of the current and voltage of arcs burning in single- and three-phase furnaces and confirmed the assumption of the constancy of the arc voltage and the presence of pauses on the current oscillograms.

Similar conclusions were reached by foreign researchers studying the characteristics of powerful (current strength from 10 to 50 kA) electric arcs under various heat exchange conditions with the surrounding environment. They noted the presence of ignition and extinction peaks on the arc voltage oscillograms under conditions of intensive cooling, the reduction of these peaks under moderate cooling of the arc column, and their disappearance under conditions of high thermal insulation.

The linear parameters of the circuit also have a significant impact on the arc characteristics, namely: resistances shunting the arc and resistances connected in series with it, as well as the circuit inductance. In works [11, 12], an analysis of the influence of these factors on arc burning modes was conducted. In particular, it was noted that the series resistance serves both as a limiter of the arc discharge current and stabilizes the arc burning mode. The series-connected inductance, under certain conditions, ensures a continuous arc burning mode, eliminating current pauses and giving the voltage a rectangular waveform.

The distinct difference between the arc current and voltage curves from a sinusoidal form unambiguously indicates the nonlinear nature of the arc's electrical properties. However, some researchers, including G.A. Sisoyan [9] and P.V. Sergeev [13], based on oscillographic analysis of currents and voltages in industrial furnaces, argued that with increasing temperature, the arc increasingly exhibits the properties of an active conductor with a linear CVC.

It is evident, however, that such mistakes arise from neglecting the voltage drop across the melt resistance. When added to the trapezoidal arc voltage signal, it yields a curve close to a sinusoid, which leads to incorrect conclusions.

A significant contribution to the development of the theory of the shunted three-phase electric arc was made by I.T. Zherdev. In his works [14, 15], he provided solutions to systems of differential equations describing the balance of voltages in individual phases and branches of the equivalent electrical circuit of a ferroalloy furnace. His models assumed equal active and reactive resistances in each phase, constant and equal arc voltages across all three phases.

The outcome included formulas for calculating the time dependencies of arc and burden currents, phase voltage drops, voltage drops across the charge, and

neutral point shifts. Among the main results of these studies are the conclusions that:

- The convex form of the phase voltage drop curve does not contradict the assumption of constant arc voltage;
- The melt resistance plays an exceptional role in regulating the electrical regime;
- A continuous current (without pauses) mode of burning a shunted arc is impossible.

Thus, it becomes evident that the idealized dynamic CVC of an AC arc has the so-called "relay form." Numerous studies have confirmed that the static CVCs of powerful arcs exhibit a falling characteristic. Some researchers also noted that for current densities exceeding critical values - where the volume power density of the arc discharge becomes sufficient to cause intensive electrode material erosion - an ascending section appears on the static CVC.

The final confirmation regarding the forms of current and voltage curves of powerful shielded and shunted arcs and their dynamic CVC was provided in work [16] by Ya.B. Dantsis. For this study, an original probing method was applied: a probe was introduced at a constant speed through an axial hole in the electrode. As the probe moved, the voltage between the electrode tip and individual points within the gas discharge gap was oscillographically recorded. The results of these investigations, conducted on a 1 MVA single-phase industrial furnace, fully confirmed the assumptions of S.I. Telny and I.T. Zherdev.

Being a conductive medium and thus an element of the equivalent electrical circuit of the furnace workspace, the melt zone significantly influences the energy characteristics of the process. In particular, it affects the power distribution across the bath zones, the configuration of the temperature and electrical fields, and, consequently, the main techno-economic performance indicators of the process.

The structure of this zone differs substantially between slag and slagless processes. In slagless processes, the so-called "false bottom," which consists of an oxide-carbide layer, forms due to local, and sometimes systematic, deviations of the charge composition from stoichiometry. It has a porous structure and is impregnated with a liquid metal melt. Since the constituent materials of the false bottom have a

higher specific electrical resistance compared to ferroalloys and silicon, during metal tapping, as the pores of the charge materials are emptied, the resistance of the melt zone increases.

The slag ratio in the technologies for producing crystalline silicon and silicon-rich ferroalloys is very low (approximately 0.03–0.05). However, the specific resistance of slag exceeds that of the metallic melt by a factor of 10^2 – 10^3 . Therefore, the assertions made by some authors about the negligible influence of slag resistance on practical calculations of electrical parameters are incorrect.

In work [17], a generalization of data regarding the viscosity and melting temperatures of slags formed during ferroalloy smelting was conducted. It was noted that during ferrosilicon production, an increase in silicon content results in a higher proportion of silica in the slag and a slight increase in its melting temperature. In slag processes, the slag occupies the predominant volume of the melt zone. Possessing the highest resistance compared to other zones of the workspace and being the major consumer of thermal and electrical energy, it largely determines the character of the temperature and electrical regimes of the smelting process.

The electrical circuit of reduction furnaces can be represented as an equivalent circuit model with lumped parameters. This simplification is particularly important for solving tasks related to the real-time control and management of the electrical regime. Equivalent circuits for the useful load - essentially the furnace workspace - differ between slag and slagless processes and are determined based on the current flow patterns obtained from research data.

For slagless processes, the substitution circuit of one phase of the load consists of the arc resistance (a nonlinear element) and the melt resistance (R_p) connected in series, shunted by the charge resistance (R_{ch}). This circuit is further connected in series with an inductive reactance, determined by the sum of the inductances of the open electrode segment and the furnace bath, along with the mutual inductances between the electrodes of different phases.

In slag processes, the arc is shunted by the charge resistance, and the melt resistance is connected in series with them.

The difficulty in assessing the energy distribution among the zones of the workspace primarily stems from the lack of sufficient information about the

electrical parameters of the substitution scheme. Indeed, the only directly measurable electrical characteristics are the currents in the electrodes and the phase voltage drops, which are insufficient to calculate the resistances and the power dissipated in individual zones.

Therefore, certain studies focusing on the distribution of potential and current density within the ferroalloy furnace baths, conducted via probing methods, are of significant interest. For example, in work [18], it was shown that in a 10 MVA furnace smelting silicochromium, the current density in the charge increased with depth (from 5 to 50 cm) from 0.2 to 0.8 A/cm², the specific resistance decreased to 0.48 Ω·cm, and the volumetric power density increased to 0.5–0.6 W/cm².

I.T. Zherdev and his colleagues [19] demonstrated that in furnaces smelting silicon-rich alloys, the current density in the charge varied between 0.45 and 0.76 A/cm² at depths ranging from 20 to 40 cm.

To determine the charge resistance and the combined resistance of the arc and melt, V.P. Vorobyov [20] proposed a method based on the simultaneous measurement of electrode currents and useful phase voltage drops as the electrodes are lifted by certain distances from their normal immersion level. From the measured currents and voltages, the average phase bath resistance was calculated. On the characteristic curve of resistance change during the electrode lift above 70–80 cm from the nominal immersion, constant resistance sections were noted, which were then considered as the average resistance of the charge zone.

Another method for assessing the power distribution was proposed by B.M. Strunsky [21], based on replacing the high primary voltage of the furnace transformer with a reduced voltage (220–560 V). As a result, due to the drastic decrease of the voltage on the electrodes (down to 2–3 V), arc burning ceases, allowing, without changing the electrode position, the measurement of the small charge conductivity currents and subsequent calculation of the power and resistance values for the individual zones.

The value of such studies lies in the indisputable evidence of the existence of charge conductivity currents and the ability to estimate the share of charge power in the total phase power. However, probing methods are extremely labor-intensive and require complex experimental equipment, and the methods involving electrode

lifting and primary voltage reduction significantly impact the main characteristics and the course of the process. Therefore, these methods cannot be fully applied for real-time monitoring of the energy parameters of the furnace workspace zones.

In this context, direct measurement methods of electrical parameters are of great practical interest. The essence of most of these methods lies in complementing the system of equations describing the electrical regime of the process with the characteristic features of any element of the substitution scheme. In particular, the arc discharge, which has pronounced nonlinear electrical properties, is used.

An example is the method proposed by N.A. Markov [22], based on the following principle: depending on the change in the charge resistance, the neutral point shift occurs - the voltage between the artificial neutral of the furnace transformer's low side and the bath neutral. It is known [22] that in the presence of a nonlinear element in the circuit, under a symmetrical supply voltage system and symmetrical loading, this voltage results from the third and higher odd harmonics of the phase voltages of the furnace.

Based on the calculated dependencies of U_{00} on the charge current at different values of charge and melt resistance, the values of r_{ch} and r_m are determined. The main disadvantage of this method is that it applies only under conditions of complete symmetry of the electrical regime, which is practically unattainable in industrial furnaces.

Another method based on the determination of the third harmonic in the "electrode-bottom" voltage signal was proposed by S.A. Morgulev [23]. Neglecting the charge conductivity currents and assuming a rectangular shape for the arc voltage, the arc voltage drop is calculated as three times the third harmonic voltage. However, many researchers have both theoretically and experimentally shown that charge conductivity currents do exist, and in slagless processes, they can be three or more times higher than the currents flowing through the "arc-melt" circuit. Thus, this method is not suitable for the calculation and monitoring of energy distribution among individual furnace zones.

V.M. Frigin [24] proposed a method to determine the charge and arc currents in electric arc reduction furnaces operating under slagless technologies. A sinusoidal voltage U_s from an external source is applied counter to the furnace voltage

(presumably the phase voltage drop). Given that the shunted arc burns intermittently, and by adjusting the amplitude and phase of the external signal, a differential signal U_p is obtained on the oscilloscope screen.

The tuning criterion for this signal is the appearance of straight-line sections corresponding to arc current pauses on the time axis of the oscillogram. Correctly assuming that without arc current, the entire current flows through the charge, and accepting that the charge current is proportional to the furnace voltage, it follows that by measuring U_p and U_s and knowing the effective furnace current, one can determine the arc current and then calculate the charge current according to Kirchhoff's first law.

A variation of the method involves determining the total charge resistance Z_{ch} based on the tangent of the slope of the dynamic CVC built on the oscilloscope screen, accounting for scaling coefficients. The main advantage of this method compared to the previously discussed ones is that it allows real-time monitoring and tracking of changes in current distribution and power among the "charge", "arc," and "melt" zones, as well as the charge resistance value, without the use of complex equipment and without interfering with the technological process.

As a result of the review of power distribution assessment methods across furnace bath zones, various data obtained by different researchers are summarized. However, data on energy distribution in slag processes are almost absent, and for slagless processes, the results vary significantly.

For example, B.M. Strunsky, using the method of replacing the high voltage with a reduced voltage when studying the modes of a carbide furnace, obtained the following power distribution across zones: 27–30% in the charge, 40–50% in the arcs, and 32% in the melt. Applying the same method for studying the power distribution in a furnace smelting 75% ferrosilicon, Weinstein and Yermolovich found: 56–64% in the charge, 29–32% in the arcs, and 7–8% in the melt.

According to V.M. Frigin, in most cases, the share of arc power in the total phase power is 18–23%, although in some cases it may reach 50–60%.

Achieving high techno-economic indicators in ferroalloy technologies critically depends on rational and efficient process control. However, the differing inertia of

processes in the furnace bath necessitates the separation of subsystem controls for individual technological modes within the general control system.

The tasks of process control are closely linked to the tasks of optimizing the energy and technological parameters. Two optimization paths can be distinguished, differing in their goals:

Selecting rational geometrical and electrical parameters (bath diameter, electrode diameter and spacing, total transformer capacity, and secondary voltage) when designing new furnaces or reconstructing existing ones.

Optimizing the parameters of individual technological modes.

The first path was proposed by A.S. Mikulinsky [25] and is based on the theory of similarity. A working furnace with lower capacity but optimal techno-economic performance among similar ones is chosen as a model. Based on the condition of ensuring a given electrical energy distribution under optimal electrode immersion, a similarity criterion for the electric field was derived using Ohm's law in differential form.

I.T. Zherdev shared similar views, although he noted that the relative geometric parameters depend on the furnace power. In practice, it has been shown that similarity constants are not universal and require adjustment when calculating parameters for furnaces producing different alloys.

V.A. Ershov and V.L. Rozenberg determined that this dependence is statistical, and the similarity parameter (p) can vary between 0.25 and 0.33, with the coefficient C depending on the conditions of the chemical processes: reagent activity, product composition, average temperature, and granularity of the charge. Thus, as the authors note, the concept of a “reference furnace” loses its meaning.

The second approach in solving optimization tasks is associated with determining the optimal parameters of separate technological modes that affect each other, and identifying the nature of their interdependence. Measurements of parameters are based on the method of comprehensive furnace research.

In the monograph [26], V.I. Zhuchkov and V.L. Rozenberg highlighted the main tasks solved by this method:

- Identifying limiting structural elements in terms of reliability;
- Determining optimal operating modes to achieve maximum productivity;

- Obtaining initial data for automated process control;
- Defining technical requirements for the type and quality of charge materials;
- Obtaining data for the design of new, modern, and more powerful aggregates.

However, a significant disadvantage of this method is that its application involves the use of special equipment (probes, a large number of measuring devices) and the high labor intensity of experiments, which excludes its use for real-time monitoring of the process state.

Clearly, solving optimization, control, and monitoring tasks must be increasingly oriented toward the development and application of indirect methods for process state evaluation [27–29].

Long-observed trends, such as the decrease in charge material quality (ores and reducing agents) and the sharp reduction in bath active resistance due to increased furnace unit power, have determined the main optimization directions, including:

- Replacing part of the expensive carbon reducer with a cheaper one;
- Selecting the optimal chemical and granulometric composition of the carbonaceous part of the charge to ensure maximum bath resistance;
- Determining the optimal electrode immersion depth and movement patterns during smelting cycles;
- Studying the influence of the carbon excess coefficient in the charge on process indicators;
- Selecting optimal electrical mode parameters.

Conclusions

The effective control and optimization of the techno-economic performance of ferroalloy smelting processes in electric arc furnaces are impossible without the application of modern automated monitoring and production control systems. Despite the significant advancements in computing technologies that began in the early 1990s, the current level of automation in ferroalloy production remains insufficiently developed. Most furnaces are still equipped only with automatic regulators for electrode movement, and only in isolated cases have systems been

introduced for managing charge weighing and dosing regimes, typically designed by in-house specialists.

The creation of multi-level automated control systems for ferroalloy smelting technologies therefore remains a highly relevant and urgent task. Transitioning from traditional "input-output" control models to more advanced "input-state-output" models is essential to significantly improve process efficiency. Such a transition would allow real-time monitoring and comprehensive analysis of the state of the furnace workspace, enabling operators to make timely and more accurate corrective actions.

The studies presented emphasize that achieving high techno-economic performance requires a deeper understanding of the complex and interconnected physico-chemical, thermal, and electrical processes occurring within the furnace bath. Special attention must be given to the optimization of energy distribution among the furnace zones (charge, arc, melt), as the efficiency of these processes has a direct impact on energy consumption, material yield, and product quality.

The implementation of indirect methods for evaluating the state of the furnace, based on the analysis of electrical parameters without interfering with the technological process, represents a promising direction for enhancing control quality. Furthermore, research demonstrates that developing mathematical models of furnace behavior, identifying optimal technological parameters, and formalizing control procedures can significantly reduce the dispersion of process fluctuations, minimize material and energy losses, and improve the stability of furnace operations.

Future development efforts must focus on:

- Increasing the depth and accuracy of real-time process diagnostics;
- Creating adaptive and predictive control systems based on data-driven modeling;
- Integrating intelligent decision support systems to assist operators;
- Expanding the scope of automated monitoring to include not only electrical, but also chemical and thermal parameters.

The solutions outlined in this work create a foundation for the future transition to smart ferroalloy production technologies that meet modern requirements for energy efficiency, environmental safety, and high product quality.

REFERENCES

1. Maksimenko M.S. Fundamentals of Electrotechnology. Moscow: GONTI, 1937. – 95 p.
2. Mikulinsky A.S. Processes of Ore Electrotechnology. Moscow: Metallurgy, 1966. – 280 p.
3. Strunsky B.M. Ore-Thermal Smelting Furnaces. Moscow: Metallurgy, 1972. – 357 p.
4. Barcza N.A., Koursaris A., See J.B., Gericke W.A. The 'dig-out' of a 75 MVA high-carbon ferromanganese electric smelting furnace. 37th Electric Furnace Conference Proceedings. Detroit: AIME, 1979, pp. 19–33.
5. Zherdev I.T., Dekhapov N.A., Moskovtsev D.P., et al. Study of the working space of silicomanganese electric furnaces. Elektrotehnika, 1968, No. 71, pp. 81–84.
6. Gusev V.I., Andryukhin G.S., Kravchenko V.A., Bogutsky Yu.M. Correlation of technological, geometric, and electrical parameters of the furnace during the production of silicomanganese. In: Metallurgy of Manganese. Tbilisi: Metsniereba, 1977, pp. 256–258.
7. Gasik M.I. Self-Baking Electrodes for Ore-Reduction Electric Furnaces. Moscow: Metallurgy, 1976. – 363 p.
8. Kiselev A.M. Investigation of Self-Sintering Electrodes in Powerful Ore-Reduction Electric Furnaces and Ensuring Increased Operational Durability. Ph.D. Thesis (Technical Sciences). Moscow, 1975. – 156 p.
9. Sisoyan G.A. Electric Arc in Electric Furnaces. Moscow: GONTI, 1961. – 414 p.
10. Telny S.I. Theory of Electric Arcs Applied to Arc Electric Furnaces. In: Transactions of Dnipropetrovsk Mining Institute. Kyiv: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1928, pp. 13–32.
11. Telny S.I., Zherdev I.T. Continuous Burning of a Three-Phase Arc. In: Theory and Practice of Metallurgy, 1937, No. 8, pp. 24–28.
12. Telny S.I., Zherdev I.T. Shunted Arc in Electric Ferroalloy Furnaces. In: Theory and Practice of Metallurgy, 1937, No. 9, pp. 34–39.
13. Sergeev P.V. Energetic Regularities of Ore-Thermal Electric Furnaces, Electrolysis, and Electric Arcs. Alma-Ata: Academy of Sciences of Kazakh SSR, 1963. – 250 p.
14. Zherdev I.T. Electric Circuit of a Three-Phase Shunted Arc. Elektrichestvo, 1960, No. 8, pp. 19–24.
15. Zherdev I.T. Regulation of the Circuit of a Three-Phase Shunted Arc. Elektrichestvo, 1963, No. 5, pp. 28–32.
16. Dantsis Ya.B. On the Electric Arc of Ore-Thermal Furnaces. In: Research in Chemical Electrotechnology. Proceedings of Leningrad Research Institute of Gipromchim, Vol. 1, Leningrad, 1967, pp. 142–154.
17. Zhuchkov V.I., Mikulinsky A.S. Electrical Resistance of Charges Used for the Production of Manganese Alloys. In: Metallurgy and Cokemaking. Kyiv: Tekhnika, 1968, Issue 11, pp. 76–79.
18. Zhuchkov V.I. Electrical Resistance of Materials and Charges and Its Influence on the Operation of Ore-Thermal Furnaces in the Production of Silicon Alloys. Ph.D. Thesis (Technical Sciences). Sverdlovsk, 1965. – 160 p.
19. Polyakov I.I., Kornevich A.L., Zherdev I.T., Yaskov E.S. Similarity Method, Parameters, and Operating Modes of Ferroalloy Furnaces. In: Metallurgy and Cokemaking. Electrometallurgy of

- Steel and Ferroalloys. Interdepartmental Scientific-Technical Collection, 1984, Issue 72, pp. 76–80.
20. Vorobyov V.P. On the Choice of Optimal Electrical Parameters for Ore-Thermal Furnaces. Proceedings of the Symposium "Parameters of Ore-Reduction Electric Furnaces". Moscow: VNIETO, 1971, pp. 46–49.
21. Strunsky B.M. Method of Power Distribution Research in the Hearth of Ore-Reduction Furnace. Elektrichestvo, 1958, No. 12, pp. 62–66.
22. Markov N.A. Electric Circuits and Modes of Arc Electric Furnace Installations. Moscow: Energiya, 1975. – 204 p.
23. Morgulev S.A. On the Method of Calculating Electrical Parameters of Ore-Reduction Furnaces. Abstracts of III All-Union Scientific and Technical Symposium "Parameters of Ore-Reduction Electric Furnaces". Moscow: Informelektro, 1982, pp. 11–12.
24. Frygin V.M. Determination of Currents in the Arc and Charge of Ore-Thermal Furnace. In: Proceedings for the All-Union Meeting on Electrotechnology and Electrotechnological Equipment. Moscow, 1964, pp. 25–26.
25. Mikulinsky A.S. On the Determination of Parameters for Ore-Thermal Electric Furnaces. Elektrichestvo, 1961, No. 6, pp. 33–38.
26. Zhuchkov V.I., Rozenberg V.L., et al. Energetic Parameters and Designs of Ore-Reduction Electric Furnaces. Chelyabinsk: Metall, 1994. – 192 p.
27. Kulinich V.I. Methods for Calculating Power Distribution across Zones of Ore-Thermal Furnaces under Pronounced Arc Mode. In: Problems of Optimizing the Technological Mode and Methods of Calculating Arc Ore-Thermal Furnaces. Saint Petersburg, 1994, pp. 96–99.
28. Vorobyov V.P., Sivtsov A.V. Electrical Parameters of Characteristic Zones of the Working Space of Ferroalloy Furnaces. Promyshlennaya Energetika, 1986, No. 10, pp. 46–49.
29. Kuzmenko S.N., Nikolenko A.V. Determination of Parameters and Characteristics of Equivalent Circuit Elements for Ore-Reduction Electric Furnace Baths. Stal, 2005, No. 12, pp. 35–38.

Received 15.04.2025.

Accepted 05.05.2025.

УДК 669.184.6:621.373.5

Анатолій Ніколенко, Вадим Нежурін, Віктор Куваєв, Олександр Верьовкін,
Башко Володимир, Владислав Кописов, Олександр Коляденко

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ВИПЛАВКИ ФЕРОСПЛАВІВ В ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПЕЧАХ ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ РЕЖИМАМИ

Анотація. У статті розглянуто проблеми підвищення ефективності виплавки феросплавів в електродугових печах шляхом удосконалення контролю та управління технологічними режимами. Світові тенденції, що спостерігаються останніми роками, такі як збільшення виробництва високоякісних легованих сталей та напівпровідникової продукції, визначили стрімке зростання попиту на

феросплави та кристалічний кремній. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають питання інтенсифікації технологічних процесів та оптимізації енергетичних витрат у феросплавних електропечах.

Процес виплавки феросплавів базується на карботермічному способі відновлення металів із їх оксидів, що протікає при високих температурах із поглинанням значної кількості тепла. Попри те, що механізм та кінетика основних відновлювальних реакцій добре вивчені, у промислових умовах техніко-економічні показники процесу істотно поступаються лабораторним. Ступінь вилучення цільових елементів знижується до 75–80%, а витрата електроенергії перевищує теоретично необхідну у 1,5–2 рази.

Традиційні підходи до вдосконалення процесу виплавки феросплавів шляхом покращення конструкції печей і підбору фізико-хімічних властивостей шихтових матеріалів вичерпали свій потенціал. В умовах постійного зростання цін на енергоресурси та погіршення якості сировини нагальною проблемою стає впровадження принципово нових підходів до керування технологічним процесом, орієнтованих на детальний контроль та аналіз поточного стану печі.

Автори обґрунтовують необхідність переходу від системи керування за принципом «вхід-вихід» до більш прогресивного принципу «вхід-стан-вихід», що дозволяє в режимі реального часу аналізувати параметри робочого простору печі та оперативно впливати на хід технологічного процесу. Зокрема, значна увага приділяється розвитку методів аналізу електричних, теплових та фізико-хімічних характеристик активної зони печі, що визначають хід основних процесів перетворення шихти.

У роботі розглянуто конструктивні особливості електродугових печей, описано будову робочого простору для різних типів процесів – безшлакових та шлакових. Показано, що форма розподілу енергії між зонами шихти, дуги та розплаву має суттєвий вплив на техніко-економічні показники виробництва. Вивчено особливості горіння дуги, процеси теплообміну та іонізації в газових порожнинах печей.

Стаття висвітлює основні методи дослідження процесів у печах: зондування, аналіз осцилограм струму та напруги, визначення опорів шихти та розплаву, а також новітні методи оцінки розподілу потужності по зонах печі на основі вимірювань електричних параметрів. Особливої уваги надано проблематиці

підвищення точності оцінки параметрів енергетичних процесів без втручання в технологічний процес.

Автори обґрунтовують важливість оптимізації режимів електропостачання та конструктивних параметрів печей для забезпечення стабільності роботи ванни, зниження дисперсії коливань та мінімізації втрат. Наведено методи вибору оптимальних параметрів занурення електродів, управління шихтовими режимами, підбору шихтових матеріалів із урахуванням їх електрофізичних властивостей.

Стаття робить вагомий внесок у створення наукової основи для підвищення ефективності виплавки феросплавів, що має особливе значення в умовах сучасної енергетичної кризи та зростання вимог до якості продукції металургійної промисловості.

Ключові слова: *виплавка феросплавів; електродугова піч; карботермічне відновлення; автоматизоване керування; техніко-економічні показники; розподіл енергії; дуговий розряд; оптимізація процесу; шихтові матеріали; енергетичні витрати; контроль стану печі.*

Анатолій Ніколенко, к.т.н., доцент, зав. каф. електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій (Україна)

e-mail: nikolenko.a.v.nmetau@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3808-4249

Вадим Нежурін, доцент, каф. електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій (Україна)

Куваєв Віктор, ст. викл. каф. електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій (Україна)

Олександр Верьовкін - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна

e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

Олександр Коляденко – провідний фахівець кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. kolyadenko.aleks@gmail.com; ORCID iD: 0009-0006-1983-8673

Владислав Кописов, студент, НТУ “Дніпровська політехніка”, Україна
ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

Башко Володимир, провідний фахівець, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Україна, v.bashko7@gmail.com; orcid.org/0009-0007-7820-1944

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.05

UDC 681.3.06

Mykola Tryputen, Vitalii Kuznetsov, Oleksandr Verovkin, Vitalii Ivliev

ADAPTATION OF A PREDICATE MODEL IN CONTROL PROBLEMS OF NONSTATIONARY STATIC OBJECTS

Abstract. *When controlling static objects at the optimization level, pattern recognition methods are used that allow partitioning the factor space into elementary subdomains in the form of n -dimensional hyperparallelepipeds. One of the main elements of the control structure for this approach to control is the adaptation algorithm, that makes it possible to refine the description of a static object under nonstationarity conditions. Repeated use of the adaptation algorithm to refine the model leads to an unjustified complication of its logical structure and the accumulation of information that has lost its relevance. The paper proposes a method for minimizing the description of images of technological situations, that makes it possible to overcome the indicated disadvantages. The method is based on the property of invariance of the number of parameters defining the hyperparallelepiped to the size of the described area in the factor space. This made it possible to identify significant boundary sub-areas in the description of the image of technological situations and, by their subsequent combination in the direction of the feature axes, to select a description with a minimum number of sub-areas. When performing these operations, “outdated” information is removed and the logical structure of a static control object is simplified as much as possible. The paper shows the possibility of implementing an algorithm for minimizing the description of images on the basis of α -algebra, that makes it possible to integrate its control structures using relational data models. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed by computational experiments in the control of the process of lump crushing for the conditions of a mining and processing plant.*

Keywords: *controlling static objects, α -algebra, method for minimizing the description of images, information, adaptation algorithm*

Introduction

Adaptive control systems capable of functioning effectively in unstable environments remain an important area of modern scientific research. In particular,

predicate models — logical knowledge representation models based on predicates (mathematical logic formulas) — and their adaptation for solving control tasks of technical objects are being actively studied [1]. Predicate models make it possible to describe the states and interrelations of an object in the form of logical statements (predicates), which ensures flexible decision-making based on knowledge. However, for their effective application in real-time systems, such models require mechanisms for adaptation to changing operating conditions of the controlled object.

Ukrainian researchers have made a significant contribution to the development of this area. Thus, the authors in [2] proposed a predicate model for selecting protection devices for asynchronous motors operating under unstable power supply conditions. It has been shown that the energy-economic model of the motor can be represented as a disjunction of predicates, and pattern recognition algorithms can be applied to this model for decision-making regarding motor protection. An important advantage of this approach is the openness of the model and the possibility of accumulating knowledge about the equipment [3]. Based on the classical algorithm of statistical optimization of nonlinear objects represented by a set of predicates, the authors in [2, 3] achieved an effective search for solutions according to the principle of local gain. Further research by these authors was aimed at accelerating the development of predicate models and ensuring their structural adaptation. In particular, methods for reducing the description of features made it possible to build a model faster at the training stage and subsequently perform the necessary structural transformations during adaptation while maintaining the accuracy of describing the interrelations [4, 5]. This made it possible to take into account the technical and economic performance indicators of the equipment under various conditions (with or without protection devices) and to ensure the optimal choice of a solution [2-5].

In addition to recent works, it is worth noting earlier studies that laid the foundation for the development of adaptive predicate models. The author in [6] proposed a method of adapting the description of patterns in the algorithm of recognizing production situations as early as 1984. The author in [7] in 1982 developed a method for describing technological situations for process control using state predicates, optimizing the description by reducing redundant information.

These studies [6,7] demonstrated the possibility of encoding the states of technological objects in the form of numerical predicates and their use in control systems. These fundamental studies, although conducted several decades ago, remain relevant as examples of knowledge formalization about the control object and their gradual refinement (adaptation) during operation.

In parallel with Ukrainian research, approaches to adaptive control based on logical models are also actively developing in the global scientific community. For example, the authors in [8] compared the capabilities of classical predicate logic, fuzzy logic, and non-monotonic logic as methods of knowledge representation for control systems. They demonstrated that each approach has its strengths: predicate logic ensures strictness and unambiguity of conclusions; fuzzy logic provides flexibility in conditions of uncertainty; and non-monotonic logic enables the revision of previously made conclusions when new information becomes available. Modern studies often combine these approaches to achieve greater adaptability of control systems.

Scientific literature emphasizes that effective control of non-stationary objects requires the use of models capable of being updated in real-time and of taking into account changes in system parameters during operation. Such models reflect both the current state of the object and the rules of response to changes (for example, exceeding parameter thresholds).

Once a sufficient amount of reliable and accurate information about the main disturbing factors and external influences affecting the technological object is collected, it becomes possible to significantly improve the quality of control over such systems. In particular, the availability of detailed data on the characteristics and behavior of the controlled object under varying operating conditions allows for the development and implementation of highly effective control strategies. These strategies are aimed at ensuring stable operation of the object, minimizing negative effects from disturbances, and maintaining optimal performance indicators.

In order to achieve such a high level of control, it is necessary to determine optimal control actions that are adequate to the current operational state of the object and the nature of the influencing disturbances. The formation of these

optimal control actions can be carried out in different ways, depending on the peculiarities of the technological process and the available computational resources.

One of the possible approaches is to establish the dependence of the control actions on the changing disturbances directly in the course of the control process. In this case, optimal solutions are determined in real time using optimization algorithms based on the current values of disturbances and object parameters. However, this approach often requires considerable computational resources and time, especially when the system is complex or when the object is influenced by a large number of rapidly changing factors. Moreover, the resulting dependence of optimal control actions on disturbances usually cannot be expressed explicitly in a simple analytical form due to the complexity of the object's behavior.

Alternatively, the dependence of control actions on disturbing factors can be formed in advance, during the design or configuration phase of the control system, based on a mathematical model of the object obtained from previous studies or experimental data. In this case, the optimization calculations are carried out beforehand for different scenarios of possible disturbances, and the results are stored in the form of precomputed functions, lookup tables, or control charts. These stored solutions are then used during the operation of the system for quick selection of control actions without the need for repeated optimization computations.

Both of these approaches are conceptually similar, as they are based on the idea of optimizing control actions in accordance with the characteristics of the object and the nature of the disturbances. However, they differ primarily in the frequency and timing of optimization calculations. In the first approach, the calculations are performed continuously or at the rate at which the disturbances change, ensuring an adaptive response of the control system to real-time changes. In the second approach, all necessary computations are performed offline, prior to the control process, and the system uses the prepared data during its operation.

Regardless of the chosen approach, in both cases the task of determining optimal control actions is solved using well-known mathematical programming methods. These include various techniques of linear, nonlinear, and dynamic optimization, which are widely used in control theory for static or quasi-static objects [9, 10]. These methods allow for formalizing the control problem, taking into

account existing constraints and optimization criteria, and finding the most effective control actions that ensure stable and efficient functioning of technological objects under variable external conditions.

Static optimization methods are widely recognized as an effective tool for solving a broad spectrum of practical problems in the field of control of technological processes and technical systems. These methods make it possible to determine optimal operating modes, resource allocation, or control strategies under given conditions and system constraints. The choice of a particular optimization method, as indicated in [11], is largely determined by the availability of a well-defined mathematical description of the process or object to be controlled.

Indeed, the presence of a reliable and sufficiently accurate mathematical model of the object is a key prerequisite for the successful application of most static optimization techniques. Such a model serves as the basis for formulating the optimization problem, setting the objective function, and defining the system constraints.

However, in many real-world cases, obtaining a mathematical model of a complex technological object is associated with significant challenges. This is especially true for industrial processes characterized by high variability, nonlinearity, or the influence of many uncontrolled factors. A typical example of this is the process of lump crushing at ore-dressing and processing plants, where the dynamics of the process are determined by a large number of random and difficult-to-measure parameters.

The development of a mathematical model for such objects using traditional approaches — such as experimental research, statistical data analysis, or physical modeling — requires considerable financial investment, as well as substantial time and human resources. These costs may become even more substantial when considering the fact that in real operating conditions, the parameters and characteristics of the process often change over time due to wear of equipment, changes in raw material properties, or varying external influences.

Consequently, it is necessary not only to develop the initial mathematical model but also to regularly update or refine the model coefficients to maintain its relevance and accuracy. This model adjustment is essential to ensure the correctness

of the optimization results and the effectiveness of control decisions. However, periodic model identification or recalibration requires additional measurements, data collection, and computational resources, which further increases the overall economic and labor costs associated with the modeling and optimization process.

Therefore, when selecting optimization methods for practical application, it is very important to take into account not only the accuracy requirements for the mathematical description of the process but also the cost-effectiveness of obtaining and maintaining such a model. In some cases, it may be reasonable to use simplified models, heuristic methods, or knowledge-based approaches that require less detailed information about the object but still provide acceptable quality of optimization and control solutions.

One of the possible and widely recognized approaches to overcoming the aforementioned difficulties associated with obtaining mathematical models of complex technological processes is the use of adaptive identification methods. These methods are designed to automatically adjust the parameters of the model during the operation of the control system based on real-time measurement data. This approach makes it possible to significantly reduce the cost and time associated with traditional offline modeling procedures, especially in cases where the system operates under conditions of uncertainty or frequent changes in its parameters.

Among the existing adaptive identification methods, the most commonly used is the least squares method, which has proven to be highly effective in many engineering applications. This method provides parameter estimation by minimizing the sum of squared deviations between the measured output data of the system and the corresponding values calculated from the model. Its widespread popularity is explained by its relatively simple mathematical implementation, stability of results, and the possibility of its application in both static and dynamic systems.

In addition to the least squares method, various modifications of the stochastic approximation method are also used quite successfully for solving identification tasks, especially in situations where the measurement data are subject to significant noise or when the system parameters vary in a random manner [12]. These methods allow for a gradual refinement of parameter estimates through iterative procedures

based on incoming measurement data, which ensures the adaptability of the model to changing external and internal conditions of the technological object.

However, despite the obvious advantages and the wide range of proposed methods for adaptive identification, it should be noted that the practical application of this approach is not without significant limitations and challenges. One of the main problems is that, although the theory of identification provides a large variety of mathematical tools, algorithms, and procedures for parameter estimation, it does not offer clear recommendations regarding the rational choice of the model structure itself or the optimal identification criteria.

In other words, the main focus of identification theory is on the mathematical aspects of parameter estimation within an already defined model structure, while the issue of selecting the appropriate structure of the model — that is, the set of variables, their interrelationships, and the form of the model equations — often remains outside the scope of this theory. Additionally, there is a lack of universally accepted criteria for evaluating the quality of identification results and for choosing the most suitable identification algorithms for a specific object or control task.

As a result, as noted by experts in this field [13], the process of selecting appropriate adjustable models and corresponding algorithms for their identification is often based not only on strict scientific principles but also on the experience, intuition, and creative approach of the developer or system designer. Therefore, it is quite fair to state that “the choice of tunable models and algorithms is more an art than a science” [13], reflecting the fact that successful implementation of adaptive identification methods in practice requires not only theoretical knowledge but also a deep understanding of the specific features of the controlled object, the nature of the disturbances, and the requirements of the control system.

In addition, the model of an object in analytical form has a significant drawback: the invariability of its structure. The constancy of the structure of the mathematical model leads to a loss of accuracy in describing a real process. Pattern recognition methods have much greater flexibility in terms of improving the model, that is, clarifying its structure.

Recognition methods are widely used in process control. They are mainly used for predicting its course, that is, predicting the parameters characterizing the

process, or assigning the expected mode to one of the predetermined classes - typical modes. It is obvious that optimization methods and recognition methods complement each other, and only their combined application can improve the efficiency of technological processes control.

In [14, 15], this approach is applied to the choice of technical means of protection of an induction motor in electrical networks with low-quality electricity. At the same time, a predicate adaptive model of the following type was chosen as a mathematical model reflecting the regularities of the influence of the indicators of the electrical network and the cost indicators of protective equipment on the economic efficiency of operating an induction motor:

$$Z_e[\vec{X}, \vec{U}] = \bigvee_{p=1}^q \left\{ \left[\bigvee_{l=1}^{\lambda_p + s_1} Z_{pl}[\vec{X}, \vec{U}] \right] \wedge \left[\bigvee_{h=1}^{s_2} Z_{ph}[\vec{X}, \vec{U}] \right] \right\} \quad (1)$$

where $\vec{X}, \vec{U}$ – are the vectors of power quality indicators and cost indicators of protective equipment, respectively; s_1 and s_2 – the number of results obtained for the recognition of contradictions of the first and second kind, respectively; q – the number of images of economic situations; λ_p – the number of predicates describing l – the pattern at the end of the pattern recognition learning procedure; $\wedge, \vee$ – logical operations of disjunction and conjunction, respectively.

Model (1) can also be applied to optimize static technological processes, if vectors of perturbing and control quantities are considered as vectors $\vec{X}$ and $\vec{U}$. However, continuous refinement of this model will inevitably lead to an increase in conjunction and disjunction operations in its right-hand side and, as a consequence, a complication of the structure and the need to adjust the algorithm for choosing the optimal control actions. This circumstance limits the application of the considered approach to the control of technological processes with constant parameters.

Purpose of paper. This paper is aimed at substantiating the possibility and determining the stages of identical transformations of the predicate model in order to prevent the complication of its structure.

The main material

The optimal control of static and case-static modes of robots of technological objects is based on the pattern recognition method, which allows partitioning the factor space into elementary subdomains. The essence of the algorithm for recognizing static optimization of nonlinear objects is as follows.

In the process of learning recognition by elements of the sample population $(\overrightarrow{X_1}, \dots, \overrightarrow{X_u})$, it is necessary, by setting different values of the control criterion y in the interval $y_{\max} \div y_{\min}$, to split the factor space $\{x_1, \dots, x_n\}$ into two images: M_1 , if $y_j \leq y$ and M_2 , if $y_j > y$ ($j = \overline{1, v}$), where v – sample size. If, in this case, the value of the control criterion is changed with the interval Δy , then $m = \text{entier}((y_{\max} - y_{\min}) / \Delta y) + 1$ of the separating images of hypersurfaces will be obtained, which, in accordance with the method of analytical description of objects by methods that allow partitioning the factor space into elementary regions, can be specified in the form of predicate equations Z_i . If a controlled value can be selected as a quality, then Δy is the accuracy of its control.

A significant advantage of constructing a mathematical model of a complex and heterogeneous technological process within a unified mathematical framework is that such a model inherently incorporates the basic constraints and limitations imposed by the physical nature and operating conditions of the process itself. These built-in constraints reflect the fundamental technological requirements, safety regulations, operational limits, and resource restrictions that must be respected during the control of the object.

When the technological process is adequately described within a single modeling approach — for example, using unified mathematical equations or a generalized set of dynamic relationships — it becomes possible to significantly simplify the development of the control system. This is because the restrictions that normally require separate consideration in optimization problems are already implicitly present in the mathematical representation of the process.

As a result, there is no need to formulate an additional system of external constraints or perform complex analytical transformations to account for them

during optimization. The constraints are naturally integrated into the model structure through the interconnections between variables, technological balances, and functional relationships governing the process behavior.

This modeling feature provides a unique opportunity to design control algorithms that do not require the application of conventional, often resource-intensive, optimization methods. Instead of resorting to classical optimization procedures — such as linear programming, nonlinear programming, or multi-criteria optimization — the control problem can be solved using relatively simple computational procedures based on the existing model.

In such cases, the optimal control actions are generated directly within the control algorithm as a result of the model's structure and its inherent properties. The system automatically respects all process limitations without the need for additional computational steps for constraint handling.

Thus, the use of a unified mathematical model for describing heterogeneous technological processes allows for the implementation of straightforward and computationally efficient control algorithms. These algorithms ensure optimal or near-optimal control performance while significantly reducing the complexity of the control system and minimizing the computational burden compared to traditional optimization-based control approaches.

This modeling strategy is especially relevant in real-time control tasks or in systems with limited computational resources, where the simplicity and speed of the control algorithm are critical factors for its practical implementation.

Of the factors influencing the process, controllers $x_1 \div x_v$ are distinguished and the full range of their changes is presented as a series of values with an interval Δx . Thus, all possible controls can be specified as combinations of these values. Then, based on the values of the disturbing factors $x_{v+1} \div x_n$, it is sufficient to determine the truth of the predicate Z_1 for all possible controls. The optimal control is the one that ensures the truth of the predicate. If the optimal combination is not found by the predicate Z_1 , then it is necessary to expand the investigated zone of the factor space by passing to the predicate Z_2 , etc.

When constructing mathematical models of complex systems or when solving control and optimization problems, it is often necessary to partition the n -dimensional factor space into simpler geometric regions for the purpose of analysis, classification, or decision-making. In this context, one of the most convenient and widely used geometric objects for representing an elementary domain in an n -dimensional factor space is the hyperparallelepiped.

A hyperparallelepiped is a generalized geometric figure in multidimensional space, which is a direct extension of a parallelepiped in three-dimensional space to higher dimensions. Its structure is defined by specifying the lower and upper boundaries along each of the n coordinate axes corresponding to the factors or variables under consideration.

Mathematically, such an elementary domain can be very conveniently and compactly described using a two-valued logical predicate function, which allows one to determine whether a given point in the factor space belongs to this region or not. In other words, the hyperparallelepiped is defined as a set of all points whose coordinates satisfy a system of inequality constraints that specify the minimum and maximum permissible values for each factor.

This two-valued predicate takes the value "true" (or 1) if the point lies within the specified limits along all coordinate axes, and "false" (or 0) if at least one of the constraints is violated. Such a representation is not only mathematically rigorous and unambiguous but also very convenient for practical implementation in algorithms of control, identification, classification, or optimization.

Moreover, using a hyperparallelepiped as an elementary domain in the factor space offers a number of advantages from the computational point of view. The simplicity of the mathematical expression that defines its boundaries allows for fast checking of point membership, which is critical in real-time control systems or in optimization algorithms where a large number of such checks may be required.

In summary, the hyperparallelepiped provides a universal and efficient geometric structure for partitioning the factor space in multidimensional modeling tasks. Its formal description through a two-valued logical predicate ensures clarity, ease of implementation, and high computational efficiency, making it one of the

most suitable elementary domains for use in control theory, decision-making systems, pattern recognition, and various engineering applications:

$$Z[\vec{X}] = \frac{1}{2^n} \prod_{j=1}^n \left\{ 1 + \operatorname{sgn}[(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] \right\} \quad (2)$$

where

$$\operatorname{sgn}[(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] = \begin{cases} 1, & \text{if } [(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] \geq 0 \\ -1, & \text{if } [(X_j - X_{j\min})(X_{j\max} - X_j)] < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$X_{j\min}, X_{j\max} (j = \overline{1, n})$ – parameters of an elementary hyperparallelepiped that determine its dimensions; n – the number of input quantities (disturbing and controlling); x_j – current values of input quantities; $\prod$ – mathematical multiplication operation.

If the current technological situation $\vec{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ falls inside the hyperparallelepiped (the technological situation is recognized), then $Z[\vec{X}] = 1$, otherwise $Z[\vec{X}] = 0$ (the technological situation is not recognized).

Then the whole p - image can be represented as a logical sum of predicates:

$$Z_p[\vec{X}] = \bigcup_{l=1}^{\lambda_p} Z_l[\vec{X}], \quad (4)$$

where λ_p – the number of predicates that determine the p - image.

The set of n - dimensional hyperparallelepipeds that define the p - image in the feature space have a random arrangement - they may intersect or have no common points at all.

The mathematical model of the controlled object, presented in the form of m - images, will take the form:

$$Z_m[\vec{X}] = \bigcup_{p=1}^m Z_p[\vec{X}], \quad (5)$$

In the process of control, it is possible to refine the model (5). So if for the current technological situation the optimal control values have not been found

(error of the first kind), then predicate (2) is formed based on the control result with the current control values and is included in (4). If, for the current situation, the optimal control values are determined, but the control result does not correspond to the expected (error of the second kind), then the corresponding predicate in (4) is further considered false and a new alternative image is formed, and the mathematical model takes the form (1). A simple removal of the false predicate from (4) is impossible, since it defines a set of technological situations that fall inside some n-dimensional hyperparallelepiped.

Obviously, when controlling a non-stationary static or quasi-static object, such refinements can be performed many times, which will lead to a structural complication of the mathematical model (1) and, as a consequence, to the loss of the control algorithm performance. Structural changes (1) should be limited.

It is proposed to solve the problem of limiting structural changes in the predicate model of technological situations on the basis of the invariance of the number of parameters of the hyperparallelepiped to the size (volume) of the region specified by it in the feature space. A set of randomly located p-image hyperparallelepipeds can be represented as ordered hyperparallelepipeds differing in size (Fig. 1). The hyperparallelepipeds located on the border of the image will have the smallest dimensions, since they determine the accuracy of the dividing function. In Fig. 1 they are shaded.

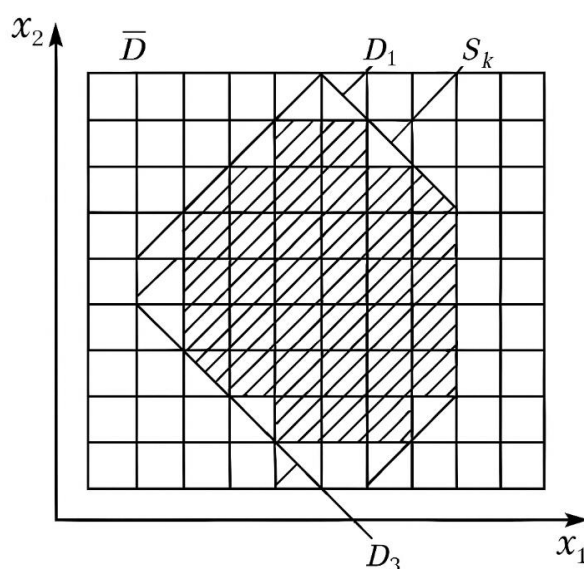


Figure 1 - Location of Boundary Subareas

If we combine the shaded boundary sub-areas in the direction of one of the feature axes, for example, x_1 , we get different-sized sub-areas that completely describe the image. Thus, the union of the subdomains D_1 and D_2 is of interest, since the resulting subdomain D_{12} includes, in addition to D_1 and D_2 , one more internal subdomain of the image S_k . Combining the D_1 and D_3 subdomains into the D_{13} subdomain will allow simultaneously describing four more internal subdomains.

It is easy to see that the combined subregions differ only in the parameters of one projection. This allows us to propose a simple condition according to which two boundary subdomains are to be united if all internal subdomains located between them belong to the image $x_{j\min}^1 = x_{j\min}^2; x_{j\max}^1 = x_{j\max}^2$ under $j = \overline{1, n}; j \neq r$, where $x_{j\min}^1, x_{j\min}^2, x_{j\max}^1, x_{j\max}^2$ – parameters of function (2) describing two combined subdomains; r is the number of the feature axis in the direction of which the union is performed. For the resulting subdomain, the unknown minimum and maximum value of the m -feature is defined as $x_{m\min}^{12} = \min \{x_{m\min}^1, x_{m\min}^2\}; x_{m\max}^{12} = \max \{x_{m\max}^1, x_{m\max}^2\}$.

Obviously, the considered unification of the boundary subareas does not lead to a change in the location of the image in the feature space, since the boundary areas do not change their location - they are only united by oppositely located boundary subareas. This transformation of the image is identical. It can be performed immediately upon the occurrence of the previously mentioned contradiction of the second kind. Then the complication of the structure of model (5) is not required.

It should be noted that the number of enlarged subregions obtained as a result of merging is already more than two times less than the number of boundary subregions. These joins can be continued in the remaining $n - 1$ directions. If you change the sequence of combining along the attribute axes, you can get $n!$, separating functions, from which the minimum in terms of the number of constituent subdomains is selected.

Practical implementation of the minimization algorithm

The set of technological situations given by predicates (2) are combined into classes depending on the values of the control criterion. Each class is determined by the disjunction of predicates. The use of such a model involves arranging its elements in the form of a two-dimensional table. And in its columns values $X_{j_{\min}}^{pl}, X_{j_{\max}}^{pl}$ are placed, and the line corresponds to some predicate.

It is easy to see that the columns of the table have different names and are homogeneous, all rows are unique and have the same structure. The order of the lines is not significant and only affects the speed of access to each of them. Given also that the information in the columns is atomic, we can conclude that this table satisfies the conditions and constraints that allow us to consider its relationship as a relational data model [16-18]. The sequence number of the relation tuple (table row) uniquely identifies the current technological situation. The set of attributes (columns of the table) determines the scheme of the relationship. It is clear that the set of relations M_k , each of which describes a certain class of technological situations, completely determine the model of the technological process. Here $k = \overline{1, q}$, where q is the number of relationships.

Operations on relations are determined by α -algebra. Consider the application of α -algebra to implement the procedures of the proposed minimization algorithm.

Algorithms for minimization and accelerated learning are based on combining two subregions D1 and D2 in factor space (Fig. 2).

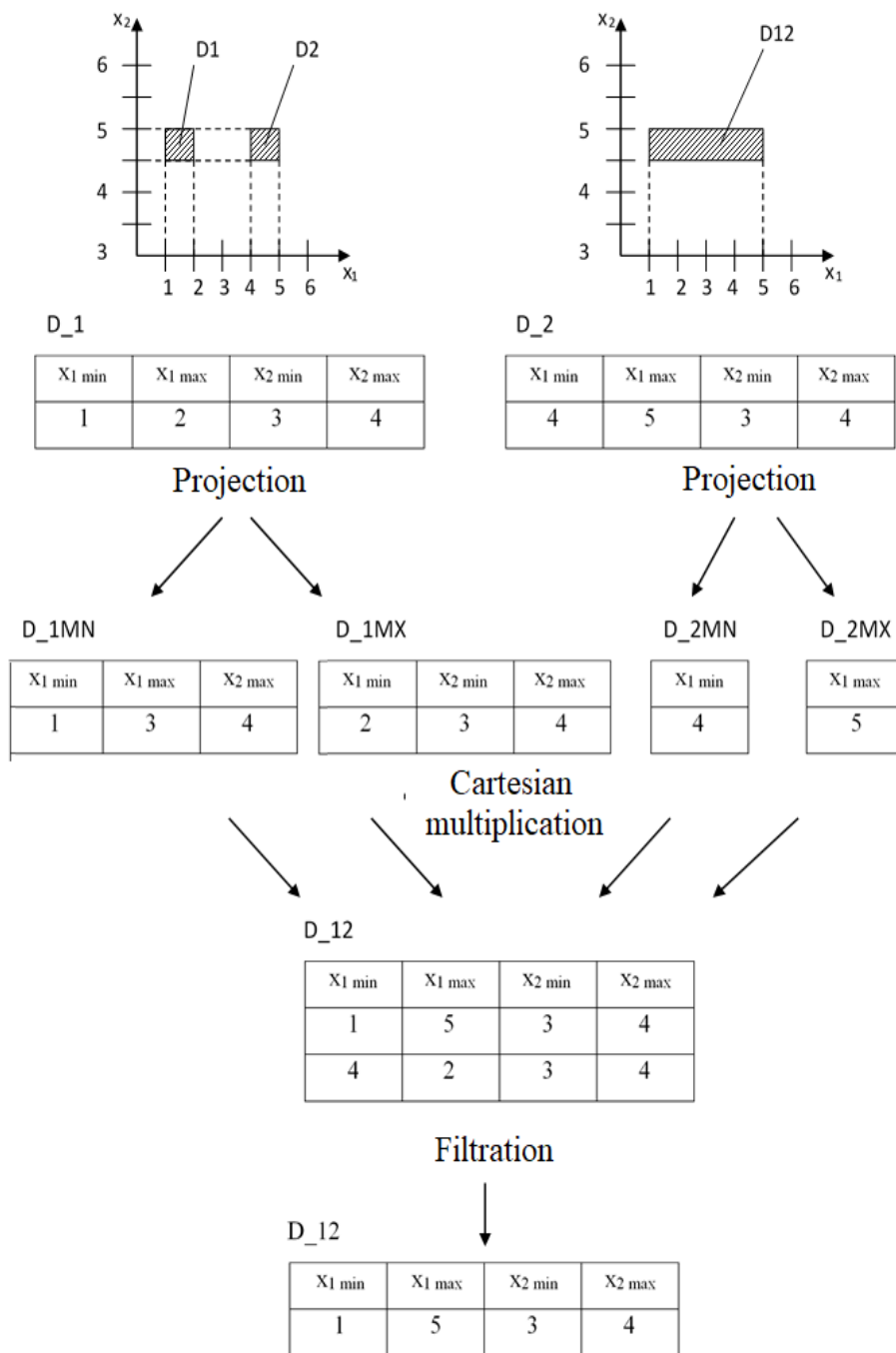


Figure 2 - Defining a tuple that defines a merged area

The tuples of relations that define these subdomains differ in the value of the two attributes $x_{l_{\min}}, x_{l_{\max}}$ (x_1 is the sign axis in the direction of which the union takes place. Selection of these tuples D_1 and D_2 is achieved by the filtering

operation. To obtain a tuple D_{12} that defines the combined region D_{12} , the relation D_1 is first decomposed into the relation D_{1MX} without the attribute x_{1min} and the relation D_{1MN} without the attribute x_{1max} , and the relation D_2 into the relation D_{2MN} with a single attribute x_{1min} and the relation D_{2MX} with a single attribute x_{1max} .

This decomposition is achieved by the projection operation. In the future, performing the Cartesian multiplication operation $D_{1MX} \otimes D_{2MN}$ and $D_{1MN} \otimes D_{2MX}$, two tuples of the relation D_{12} with a complete set of attributes are formed, from which the desired D_{12} is selected by filtering under the condition $x_{1min} < x_{1max}$.

Conclusions

1. The proposed minimization algorithm provides a robust mechanism for stabilizing the structure of the predicate model, which is particularly important when dealing with nonlinear and nonstationary objects. By systematically reducing the uncertainty and variability inherent in such systems, the algorithm ensures the consistency and adaptability of the model structure over time. This, in turn, allows the refined predicate model to be effectively utilized for solving optimal control problems, enabling improved decision-making, better system responsiveness, and enhanced performance in dynamic and complex environments.

2. Identical transformations applied to the predicate model, which are grounded in the principle of invariance of the number of predicate parameters with respect to the size of the region in the n -dimensional factor space that the model characterizes, enable a significant simplification of the model structure. This invariance implies that the complexity of the model does not necessarily have to grow with the expansion of the factor space, allowing for a more efficient representation of the system's behavior. As a result, it becomes possible to systematically reduce the number of predicates without losing the descriptive power or accuracy of the model. Such a reduction contributes to improved computational efficiency, enhances interpretability, and facilitates the application of the model to

real-time or large-scale control and decision-making tasks in dynamic environments.

3. Representation of elements of the predicate model in the form of a relational data model allows to describe the minimization procedure on the basis of a single mathematical apparatus of α -algebra. Given that relational data models are supported by database management systems, the proposed algorithm can be easily integrated into the information and software structures of existing management systems.

REFERENCES

1. Temnikova, O. L. Mathematical Logic and Theory of Algorithms: Lecture Notes [Electronic resource]: a textbook for students of the specialty 113 "Applied Mathematics", educational program "Data Science and Mathematical Modeling" / O. L. Temnikova; Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. – Electronic text data (1 file: 3.60 MB). – Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2021. – 177 p.
2. Tryputen, N., Nikolenko, A., Voskoboynik, Y., Kuznetsov, V., Kuznetsova, Y., & Tryputen, M. (2018). Predicate model in the task of optimal selection of protection means for an asynchronous motor. *Electromagnetic Compatibility and Safety on Railway Transport*, (16). Pp. 70-75. <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172650>
3. Kuznetsov V., Tryputen M., Kuznetsov V., Tryputen M., Kuznetsova A., and Kuznetsova Y. Choosing of Asynchronous Motor Protection Equipment in Production Environment IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 985 (2020) 012022 doi:10.1088/1757-899X/985/1/012022
4. Tryputen M., Kuznetsov V., Kovzel M., Kovalenko V., Artemchuk V., Nadtochy V. Minimization of the Description of Images in the Problem of Adaptive Control of Static Technological Objects (2021) *Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021*. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598651
5. Tryputen M., Kuznetsov V., Kuznetsova A., Tryputen M., Kuznetsova Y., Serdiuk T. Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem (2021) *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1247 AISC, pp. 143 – 152. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_13
6. Kachan, Y. G. (1984). Adaptation of the image in the algorithm for recognizing industrial situations. *Mechanization and Automation of Control*, (1), 15–17.
7. Voronov, V. A. (1982). Method for describing technological situations and its application in process control. *Ore Beneficiation*, (2), 31–35.
8. Yang K.H., Olson D., Kim J. Comparison of first order predicate logic, fuzzy logic and non-monotonic logic as knowledge representation methodology (2004) *Expert Systems with Applications*, 27 (4), pp. 501 - 519, DOI: 10.1016/j.eswa.2004.05.012
9. Zangwill, Willard I. *Nonlinear programming; a unified approach* (1969) Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 356 p.
10. Polak, E. *Computational Methods in Optimization* (1971), Academic Press, New York-London, 329 p.
11. Himmelblau, David Mautner *Applied Nonlinear Programming* (1972), New York, 498 p.

12. Tsypkin, Ya Z. Adaptation and Learning in Automatic Systems (1971), Academic Press, New York / London, 399 p.
13. Tsypkin, Ya Z. Information theory of identification (1995), Moscow, Science, 336 p.
14. Kuznetsov, V.V., Tryputen, M.M., Kuznetsov, V.G., Tryputen, M., Kuznetsova, A., Kuznetsova, Y. Choosing of asynchronous motor protection equipment in production environment (2020) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 985 (1), DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012022
15. Tryputen, M., Kuznetsov, V., Kuznetsova, A., Tryputen, M., Kuznetsova, Y., Serdiuk, T. Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem (2021) Advances in Intelligent Systems and Computing, 1247 AISC, pp. 143-152. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_13
16. Wei, Q., Duan, G., Cai J. and Zhou, G. Mapping Technique of STEP Data Model in Relational Database Based on Data Storage, 2009 Second International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 2009, pp. 657-660, doi: 10.1109/ICINIS.2009.170.
17. Al-Kandari, A. and Alhouli, M. Fuzzy Object Relational Database Management System (FORDBMS) is appropriate approach for Real-Estate (GIS) business, 2014 Fourth International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), 2014, pp. 114-117, doi: 10.1109/DICTAP.2014.6821667.
18. Suna Yin, Dehua Chen, Jiajin Le, "STNoSQL: Creating NoSQL database on the SensibleThings platform", Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD) 2016 17th IEEE/ACIS International Conference on, pp. 669-674, 2016.

Received 17.04.2025.

Accepted 15.05.2025.

УДК 681.3.06

Микола Трипутень, Віталій Кузнецов, Олександр Верьовкін, Віталій Івлєв

АДАПТАЦІЯ ПРЕДИКАТНОЇ МОДЕЛІ В ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИМИ СТАТИЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Анотація. У даній роботі розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління статичними та квазістатичними технологічними об'єктами в умовах їх нестаціонарної поведінки та мінливості зовнішніх впливів. Особлива увага приділяється застосуванню предикатних моделей, які дозволяють формалізовано описувати різноманітні технологічні ситуації, стани та взаємозв'язки параметрів об'єкта управління за допомогою логічних конструкцій. Такі моделі є гнучким інструментом для представлення знань про об'єкт і забезпечують можливість адаптації до зміни параметрів у процесі експлуатації.

Запропоновано новий підхід до побудови та адаптації предикатної моделі на основі алгоритму мінімізації опису образів технологічних ситуацій. Його сутність полягає у виявленні та видаленні з моделі інформації, що втратила

актуальність, а також у спрощенні логічної структури моделі без втрати якості її опису. Важливою особливістю даного підходу є використання властивості інваріантності кількості параметрів, що визначають гіперпаралелепіпед у факторному просторі незалежно від його розмірів. Це дозволяє суттєво зменшити кількість предикатів у моделі та знизити складність обчислювальних процедур у системах автоматизованого управління.

Методика побудови моделі передбачає розбиття факторного простору на елементарні підобласті - гіперпаралелепіпеди, які дозволяють гнучко формувати опис різних ситуацій. При цьому граничні підобласті, що мають найменші розміри, визначають точність роздільної функції. Об'єднання таких підобластей у напрямку осей ознак дозволяє оптимізувати структуру моделі та спростити процес прийняття рішень в системах управління.

Особливу увагу в роботі приділено можливості практичної реалізації алгоритму мінімізації на основі апарату α -алгебри. Це забезпечує інтеграцію моделі до інформаційних систем на основі реляційних моделей даних, які підтримуються сучасними системами управління базами даних. Такий підхід дозволяє підвищити універсальність та зручність використання запропонованого методу у складі існуючих автоматизованих систем управління технологічними процесами.

Показано, що використання моделі з мінімізованим описом дозволяє забезпечити високу якість управлінських рішень, адаптивність до зміни характеристик процесу та стабільність функціонування системи в умовах впливу зовнішніх та внутрішніх факторів невизначеності.

Таким чином, представлений у роботі підхід до побудови предикатної моделі та її адаптації шляхом мінімізації опису образів технологічних ситуацій є універсальним інструментом для управління нестационарними статичними об'єктами. Запропонований алгоритм може бути використаний для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, автоматизованих систем оптимального управління, а також інформаційно-аналітичних систем промислових підприємств.

Ключові слова: управління статичними об'єктами, предикатна модель, α -алгебра, мінімізація опису образів, адаптація моделі, інформація, нестационарні технологічні процеси, реляційна модель даних, автоматизовані системи управління.

Mykola Tryputen, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

e-mail: nikolaytriputen@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

Vitalii Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Oleksandr Verovkin, Public joint stock company "Dniprovazhmash", Dnipro, Ukraine

e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

Vitalii Ivliev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Engineering of Technical Systems, Dnipro State Agrarian and Economic University, e-mail: ivliev.v.v@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4878-4794>

Микола Трипутень, к.т.н., доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

e-mail: nikolaytriputen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

Віталій Кузнецов, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна

e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

Віталій Івлєв – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно- економічного університету (м. Дніпро, вул. Сергія Єфремова, 25), e-mail: ivliev.v.v@dsau.dp.ua, <https://orcid.org/0000-0002-4878-4794>).

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.06

UDC 681.3.06

Mykola Tryputen, Vitalii Kuznetsov, Oleksandr Verovkin, Oleksandr Koliadenko

INCREASING THE RELIABILITY OF SIMULATION OF ASYNCHRONOUS MOTOR OPERATION BASED ON AN ADAPTIVE APPROACH

Abstract. *This research focuses on improving the reliability of simulating the operation of induction motors when solving technical and economic problems related to the selection of protection systems for electric drives operating in industrial power networks with poor power quality. The presence of voltage asymmetry, harmonic distortions, and other power quality issues in workshop networks significantly affects the performance and service life of induction motors, increasing energy losses and maintenance costs.*

The article proposes a power and economic model that allows conducting computational experiments to determine the optimal solution for improving power supply quality. A key element of the model is the system for generating and controlling linear voltage parameters, which ensures compliance of the simulated signals with their statistical regularities observed in real industrial conditions.

The research introduces adaptive algorithms for the continuous and simultaneous assessment of average values, variances, autocorrelation, and cross-correlation functions of voltage harmonics. Mathematical expressions for their correction during the accumulation of information are presented. Structural schemes of control systems for both analog and digital modeling of voltage processes are proposed, allowing for real-time monitoring of the reliability of generated data.

The simulation results were verified through statistical hypothesis testing for the average values and variances of the generated voltage harmonics. Experimental studies were carried out in the rolling shop No. 1 of Dneprospetsstal LLC, where significant voltage distortions are caused by the operation of powerful semiconductor converters. The results confirmed the adequacy of the proposed modeling approach and its applicability for making economically sound decisions regarding the choice of technical solutions for voltage quality improvement.

This work contributes to the field of energy efficiency in industrial enterprises by providing a methodological basis for the reliable simulation of induction motor operation

in the presence of distorted power supply conditions. The proposed approach allows reducing the cost and duration of experimental studies by replacing them with validated computational modeling.

Keywords: *Induction Motor, Electric Networks, Linear Voltages, Protection Tools, Economic Model, Electric Energy*

Introduction

In the current context, induction motors are the primary devices for converting electrical energy into mechanical energy and form the foundation of the drive systems of most industrial mechanisms. This position has been earned due to a successful combination of operational and structural characteristics — the ability to automatically adjust torque in response to changes in load torque on the shaft, high efficiency, simple construction, and relatively low manufacturing cost compared to other electromechanical converters [1]. Moreover, it should be emphasized that induction motors, despite their numerous advantages and widespread application in various industries, remain the largest consumers of electrical energy on a global scale. Their extensive use in industrial enterprises, transport systems, municipal infrastructure, and household appliances has led to an exceptionally high share of total electricity consumption attributed to electric drive systems. According to expert estimates and international energy studies, the share of electric motors in the global structure of electricity consumption ranges from 43% to 46%, making them the most energy-intensive class of electrical equipment.

Such a significant consumption of energy resources by electric motors is a key factor influencing the development of modern energy policy, especially in the context of the growing need for energy saving, reducing operational costs, and minimizing negative environmental impacts. If no systematic and effective measures are taken to increase energy efficiency, optimize the operation of drive systems, and modernize the power infrastructure, then according to analytical forecasts, electricity consumption by induction motors could increase to a critical level — up to 13,360 TWh per year by 2030. This scenario takes into account the projected growth of industrial production volumes, the increase in the number of automated technological lines, and the expansion of the global industrial sector.

Currently, end-users of electric motors - industrial enterprises, commercial facilities, and residential consumers - collectively spend approximately 565 billion

US dollars annually on electricity costs for the operation of electric motor-driven systems. These costs include not only direct energy expenses but also additional operational costs associated with low energy efficiency, equipment wear, and losses in power networks. If comprehensive programs aimed at improving the energy efficiency of electric drives, implementing smart control systems, and using modern energy-saving technologies are not implemented at the national and international levels, it is expected that by 2030 these annual expenditures may increase dramatically - reaching almost 900 billion US dollars. This will place a considerable burden on both industrial enterprises and national economies, underscoring the urgent need to develop and apply technical and organizational measures to improve the energy performance of electric motors across all sectors of their use [2].

Modern electric drive systems, which implement electromechanical energy conversion processes and are mainly based on squirrel-cage induction motors, are not structurally complex. However, the operation of this class of motors today is associated with a number of challenges. One of the most pressing problems is the supply of poor-quality electric power to induction motors. It is well established that even minor deviations in supply voltage quality lead to adverse effects, including insulation aging and reductions in energy performance indicators such as efficiency and power factor [3]. The quality of electric power supply significantly affects the reliability, efficiency, and service life of these motors [4]. Therefore, one of the urgent problems influencing the operation of induction motors is the deterioration of power quality — the presence of asymmetry, waveform distortion, frequency instability, and other deviations from standard values [5, 6, 7].

It is known [8] that harmonic voltage distortions arise due to the operation of thyristor converters, switching power supplies, and other nonlinear loads, which lead to voltage and current waveform distortion in motor windings. In [9], the authors showed that voltage containing harmonic components on the stator causes significant changes in the motor's electromagnetic parameters (torque, currents, losses, etc.) and affects the mechanical part of the drive. The study concluded that electric motors operating under harmonic distortion suffer from reduced efficiency and shorter service life due to increased iron and copper losses. Additionally, voltage and current harmonics can influence the torque developed by the motor. Harmonic components in rotating machines can also cause vibrations and noise. For example,

harmonics of negative sequence create a counteracting torque that opposes the main motor torque, thereby reducing overall motor efficiency. Odd harmonics generate a reverse magnetic field (negative sequence) in the motor, which produces a negative torque and further reduces the useful output torque of the induction motor.

The study by the author in [10] investigates the relationship between supply voltage variations and the operating characteristics of induction motors, particularly their effects on torque, current, power factor, heating, and overall efficiency. The author concluded that voltage deviations significantly affect the reliability and performance of electric motors. To ensure stable operation and extend motor service life, system voltage must be maintained as close to the nominal value as possible [10]. A special case is voltage asymmetry in induction motors, when deviation occurs in only one phase of the supply network, as studied in [11]. The researchers modeled situations in which the voltage in one phase exceeded the nominal value by 10% and 20%, while the other two phases remained at nominal levels. The simulations on the synthesized model [11] demonstrated that even a minor overvoltage in one phase (10–20%) has a substantial impact on the performance of a three-phase induction motor — leading to increased winding temperatures and reduced performance metrics, which may result in premature motor failure.

Other researchers [12, 13] note that short-term overvoltages caused by switching processes can lead to insulation breakdown in motors. Modeling results presented in [13] confirm that overvoltages reduce insulation lifespan and can cause premature inter-turn insulation failures. Practical recommendations include the use of surge protection devices (such as surge arresters, varistors, etc.) and maintaining voltage levels within acceptable limits, as any exceedance of 10% or more should be considered an emergency condition.

Industrial enterprises, especially those with a large number of electromechanical systems, often face a serious problem related to the deterioration of power supply quality within workshop electrical networks. In particular, induction motors - widely used in production processes - are highly sensitive to deviations of electrical parameters from nominal values. The so-called "noisy electricity", which includes voltage asymmetry, harmonic distortions, and a general deviation from the sinusoidal form of the supply voltage, negatively affects the stable operation of such motors.

Unsymmetrical load distribution between phases, the presence of higher harmonics in the power grid, and frequent voltage fluctuations lead to a whole complex of undesirable phenomena in the operation of induction motors. These factors cause overheating of motor windings, which provokes premature insulation wear and increases the risk of failures. In addition, a decrease in power factor and energy efficiency is observed, along with a significant increase in reactive power consumption. Over time, these processes not only reduce the overall efficiency of production equipment but also contribute to its accelerated wear and shortening of service life, increasing the frequency of repairs and maintenance.

Therefore, the problem of reducing the negative influence of poor-quality power supply on electromechanical systems becomes particularly relevant for modern industrial enterprises seeking to increase energy efficiency and minimize downtime losses. To neutralize or mitigate the harmful effects of distorted voltage, several technical solutions are used in practice. These include, for example, "individual" LC-filters installed directly at the input of a specific electric motor, or more powerful "cluster" devices for compensation of voltage distortion installed at the level of an entire workshop or production section.

An alternative strategy involves the control and correction of power supply quality directly in the zones of distortion formation — in other words, preventive actions aimed at eliminating the causes of noise at the earliest stages. However, each of the mentioned approaches has not only a certain technical potential but also requires significant financial investments for its implementation, as well as subsequent maintenance costs.

Choosing the optimal solution among these alternatives is a complex technical and economic task. It requires consideration of many factors - from the characteristics of the technological process and the degree of power supply quality deviation to the costs of implementing and operating compensating devices. Conducting real industrial experiments to compare these options is extremely costly and time-consuming. Therefore, a promising direction is the use of mathematical modeling and computer simulations. They make it possible to evaluate in advance the effectiveness of various technical solutions, predict their impact on energy consumption, equipment operation, and the overall economic efficiency of production. Simulation experiments allow companies to minimize financial risks and

make informed decisions regarding the modernization of workshop electrical networks.

Literature review and problem statement. It is a well-established and widely recognized fact in the field of electrical engineering that poor-quality power supply has a significant and often detrimental impact on the operational characteristics and performance parameters of induction motors (IM), which are among the most commonly used types of electric motors in industrial applications. The stability, reliability, and efficiency of induction motors directly depend on the quality of the supplied voltage. Any deviations of power supply parameters from the nominal values — including voltage fluctuations, asymmetry between phases, frequency instability, or the presence of harmonic distortions — inevitably lead to unfavorable operating conditions for the motor.

Such distortions in the supply voltage negatively influence the electromagnetic processes occurring within the motor, altering its torque characteristics, increasing energy losses, and provoking the emergence of additional heating in motor windings. As a result, the service life of the insulation system is reduced, and the probability of premature failures grows substantially. Moreover, poor power quality affects not only the energy efficiency indicators of induction motors — such as efficiency, power factor, and reactive power consumption — but also leads to mechanical problems, such as increased vibration, noise, and even mechanical stress on the motor shaft and bearings.

Given that induction motors often operate in critical technological processes in industrial enterprises, where stable and uninterrupted functioning of equipment is required, ensuring high-quality power supply becomes an essential prerequisite for maintaining operational reliability and extending the service life of electric drives. Therefore, analyzing the negative impact of poor-quality power supply on induction motors and developing effective methods to mitigate this influence remains one of the key areas of research in modern energy engineering and industrial automation [14 - 16].

Reduced quality of power voltage results in pulsation of the moment generated by the motor, drop of starting and critical IM moment, increase in vibration, early wear of bearing and gear components, increased steel losses due to higher harmonic field constituents in a gap, reduction in such power indices of induction motor

operation as efficiency coefficient and power coefficient. Moreover, availability of noisy electric energy within workshop grids of industrial enterprises results in the accelerated physical ageing; in the decreased power efficiency of equipment in use; and in the increased risk of industrial emergency situations. Paper [17] has shown that the problem solution should be sought at technical-and-economic level involving methods of mathematical modeling. Papers [17 and 18] have proposed a technique to make optimum decision as for electric equipment operation under the conditions of noisy power. The technique relies upon economic evaluation of various alternatives to recover supply voltage up to the preset quality indices. Moreover, its suitability has been demonstrated in terms of induction motor operation. According to the technique, power indices of electromechanical transducer are calculated involving the current quality power indices within the enterprise power grid [19, 20, and 21], and basing upon electric model, and thermal model [22]. If indices, calculated in such a way, differ substantially from preset ones, various alternatives of engineering solutions, intended to recover electric power supplying the motor, are considered. Cost of each of the alternatives is estimated and final decision, concerning its further operation, is made.

Method relies upon the use of power and economic model of certain electric equipment; taken as a whole, it helps optimize selection of technical means aimed at electric energy quality recovery according to cost criterion involving restrictions to power indices of the electrical consumer. However, calculation of different variants is based upon the knowledge of statistic regularities of linear voltage change under specific operation conditions of the equipment. That supposes carrying out of a number of expensive and long-term experiments using real object. To reduce both cost of the experiments as well as their period, it has been proposed to substitute industrial experiments for computational ones. For that purpose, power and economic model is supplemented by a unit to form linear voltages and to control them. Probability model of linear voltages to be applied in workshops of industrial enterprises is represented in [23].

Power and economic model of electric equipment. Fig. 1 demonstrates one of the variations of power and economic model making it possible to perform computational studies of IM operation. In this context, making a correct decision is possible, if only linear voltages are simulated in accordance with their statistic

regularities. Basing upon specific features of linear voltage simulation [23] it is required to control average values, dispersion, autocorrelation, and cross-correlation functions of harmonics of linear voltages. Moreover, the listed values and functions should be evaluated simultaneously and continuously during the modeling process. Such an evaluation can be performed relying upon adaptive approach.

Average value of continuous stationary random process at t time moment is determined using the formula:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t x(t) dt \quad (1)$$

where $x(t)$ is continuous stationary random process.

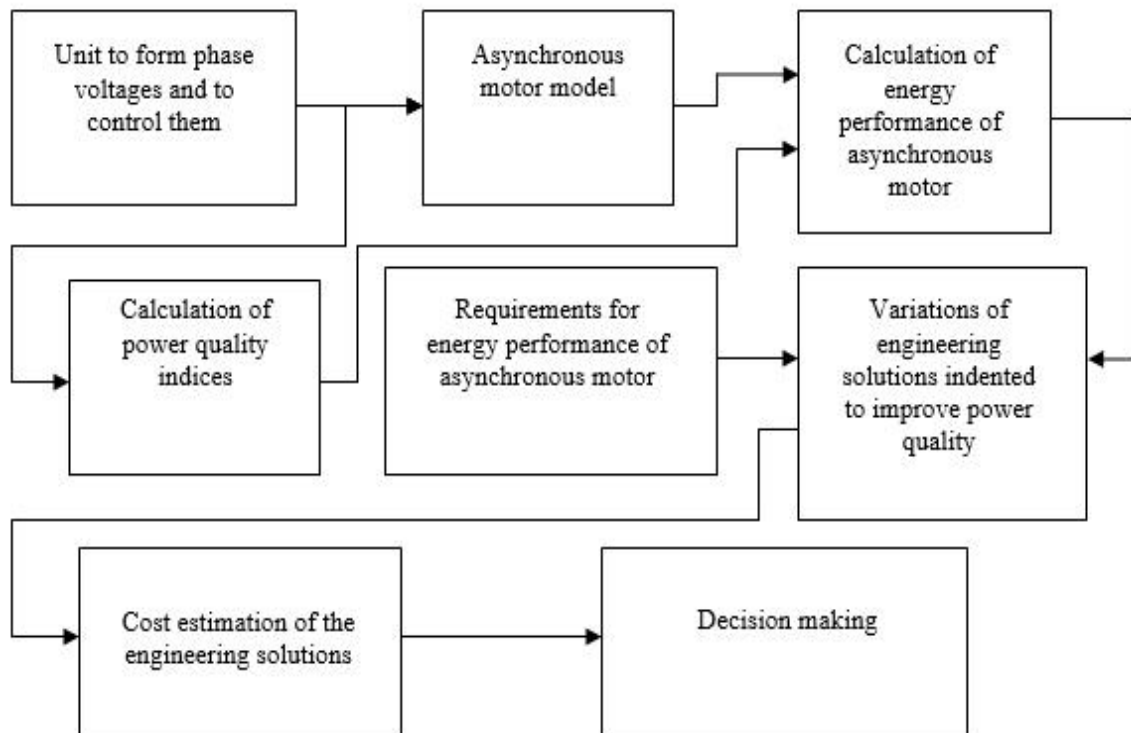


Figure 1 - Schematic diagram of power and economic model of electric equipment

Differentiate left side and right side of expression (1) with respect to t :

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = -\frac{1}{t^2} \int_0^t x(t) dt + \frac{1}{t} x(t) \quad (1)$$

or:

$$\frac{d\bar{x}(t)}{dt} = -\frac{1}{t}\bar{x}(t) + \frac{1}{t}x(t)\frac{1}{t}(x(t) - \bar{x}(t)). \quad (2)$$

If the random process is represented by a discrete (impulse) function, then expression (2) is:

$$\bar{x}[iT] - \bar{x}[(i-1)T] = \frac{1}{i}(x[iT] - \bar{x}[(i-1)T]) \quad (3)$$

where T is time discretization of $x(t)$ function; $i = \overline{1, n}$ is discretization interval number; and n is a total of discretization intervals.

It is more convenient to demonstrate expression (3) as follows:

$$\bar{x}[iT] = \bar{x}[(i-1)T] + \frac{1}{i}(x[iT] - \bar{x}[(i-1)T]) \quad (4)$$

Dispersion of continuous stationary random process at t time moment is determined by means of the formula:

$$D_x(t) = \frac{1}{t} \int_0^t (x(t) - \bar{x}(t))^2 dt \quad (5)$$

and values of autocorrelation function and cross-correlation function for different time shifts τ are determined by means of the formulas:

$$R_{x,x}(t, \tau) = \frac{1}{t} \int_0^t ((x(t) - \bar{x}(t))(x(t - \tau) - \bar{x}(t))) dt \quad (6)$$

$$R_{x,y}(t, \tau) = \frac{1}{t} \int_0^t ((x(t) - \bar{x}(t))(y(t - \tau) - \bar{y}(t))) dt \quad (7)$$

where $y(t)$ is continuous stationary random process, and $\bar{y}(t)$ average $y(t)$ value at t time moment.

After performing transformation of (5), (6), and (7) expressions, being analogous to the above mentioned ones, we obtain the following for continuous random functions:

$$\frac{dD_x(t)}{dt} = \frac{1}{t}((x(t) - \bar{x}(t))^2 - D_x(t)) \quad (8)$$

$$\frac{dR_{x,x}(t, \tau)}{dt} = \frac{1}{t}((x(t) - \bar{x}(t))(x(t - \tau) - \bar{x}(t)) - R_{x,x}(t, \tau)) \quad (9)$$

$$\frac{dR_{x,y}(t, \tau)}{dt} = \frac{1}{t}((x(t) - \bar{x}(t))(y(t - \tau) - \bar{y}(t)) - R_{x,y}(t, \tau)) \quad (10)$$

In a digital form, (8), (9), and (10) expressions are:

$$D_x[iT] = D_x[(i-1)T] + \frac{1}{i}((x[(i-1)T] - \bar{x}[(i-1)T])^2 - D_x[(i-1)T]) \quad (11)$$

$$R_{x,x}[iT, \tau] = R_{x,x}[(i-1)T, \tau] + \frac{1}{i}((x[(i-1)T] - \bar{x}[(i-1)T]) \times \\ \times ((x[(i-1)T] - \bar{x}[(i-1)T])) - R_{x,x}[(i-1)T, \tau]) \quad (12)$$

$$R_{x,y}[iT, \tau] = R_{x,y}[(i-1)T, \tau] + \frac{1}{i}((x[(i-1)T] - \bar{x}[(i-1)T]) \times \\ \times ((y[(i-1)T] - \bar{y}[(i-1)T])) - R_{x,y}[(i-1)T, \tau]) \quad (13)$$

Fig. 2 represents structural scheme of a control system implementing (2), (8), (9), and (10) algorithms to evaluate statistic characteristics of continuous implementations of random functions of first harmonics of amplitudes (phases) of linear voltages AB and BC $U_{mAB1}(t)$ and $U_{mBC1}(t)$ ($\psi_{AB1}(t)$ and $\psi_{BC1}(t)$).

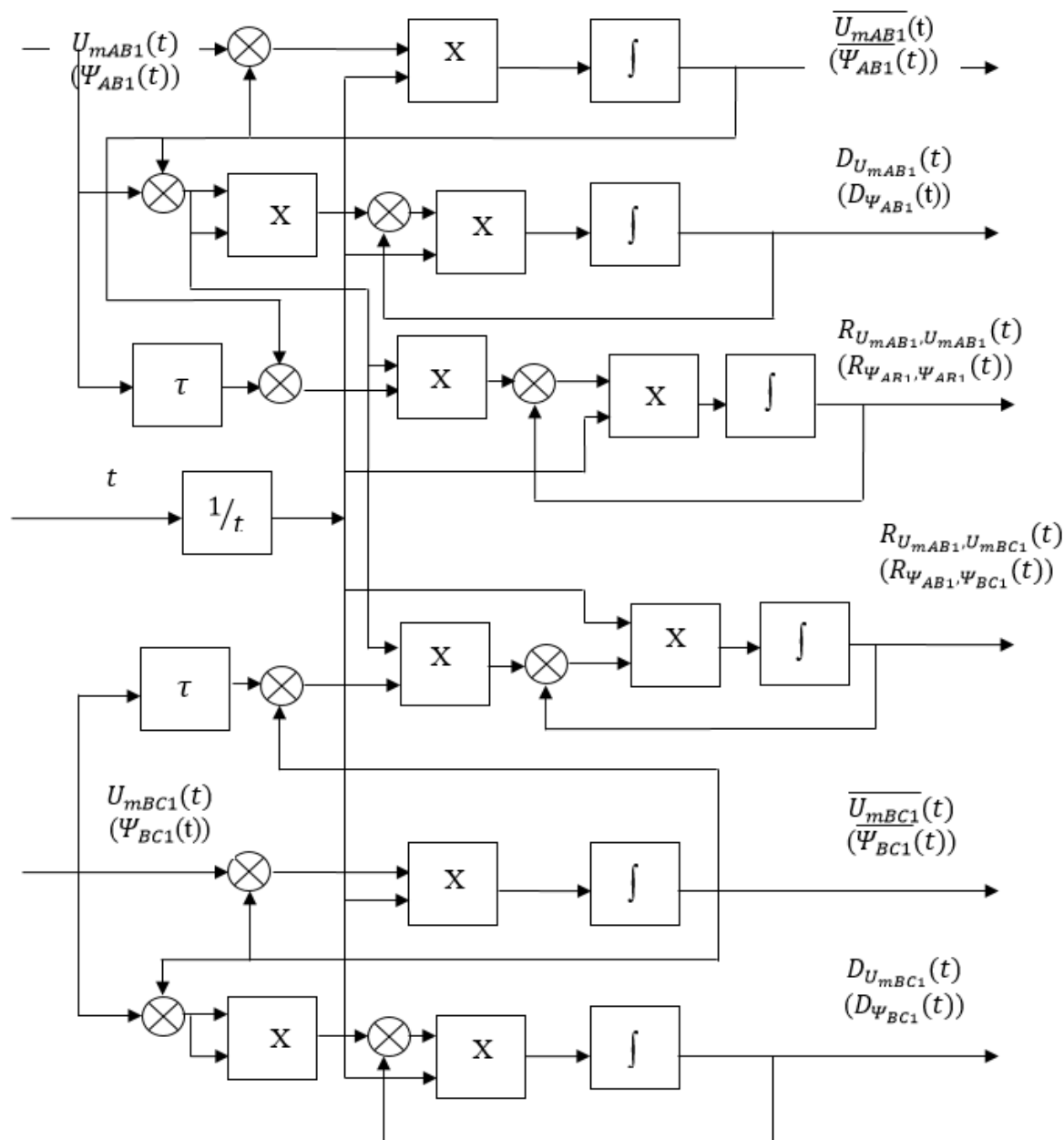


Figure 2 - Diagram of analogous control system

Fig. 3 represents structural scheme of a control system implementing (4), (11), (12), and (13) algorithms to evaluate statistic characteristics of discrete implementations of the same random functions according to [3,24].

The control system scheme, shown in Fig. 2, can be used in the process of analogous modeling of linear phase voltages; the scheme, shown in Fig. 3, is

applicable in the context of digital modeling. Letter D specifies discrete integrator, i.e. digrator. Values of the averages and dispersions of the generated random functions, obtained during the modeling, have been checked for significance of their variation from those hypothetic average values and dispersions obtained in [3, 24].

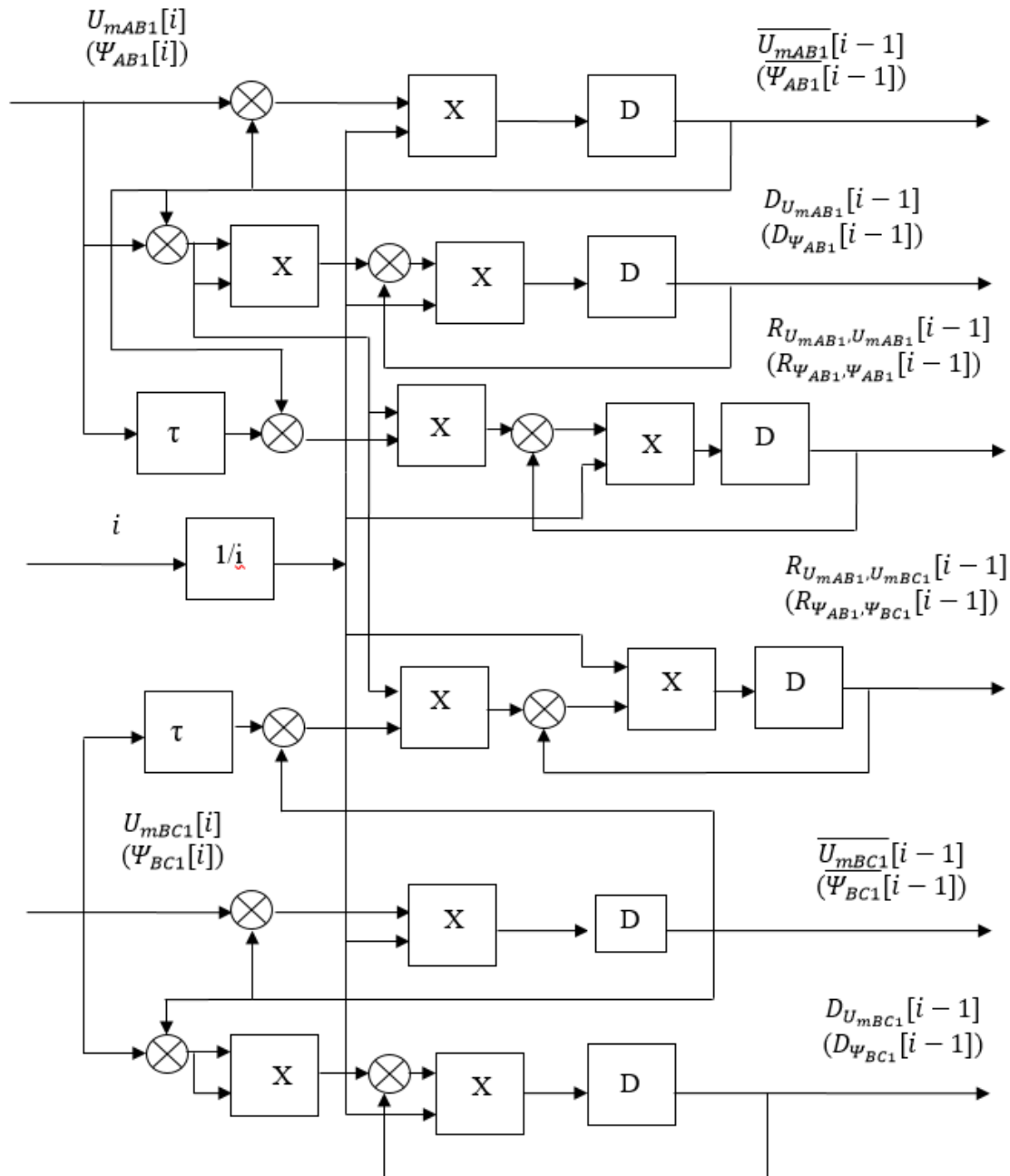


Figure 3 - Diagram of discrete control system

Zero hypothesis checking in terms of α $H_0: \bar{x} = x_0$ significance level concerning equality between an overall average $\bar{x}$ of normal population with the known dispersion D_0 and hypothetic value x_0 in terms of a competing hypothesis $H_1: \bar{x} \neq x_0$ has been performed basing upon the criterion value [25-27]:

$$U_{observ} = \frac{(\bar{x} - x_0)\sqrt{n}}{D_0}$$

and critical point u_{cr} of two-sided critical region determined according to Laplace function table relying upon the equation:

$$\phi(u_{cr}) = \frac{(1-\alpha)}{2}.$$

In this context, n is the number of observations.

If $|U_{observ}| < u_{cr}$, then there is no necessity to reject zero hypothesis.

Determine $\phi(u_{cr}) = 0,475$ for $\alpha = 0,05$ where $u_{cr} = 1,96$.

Table 1 demonstrates checking results of the average random sequences of harmonics of linear voltages generated according to [25-27] and evaluated with the help of a control system (Fig. 3) if $n = 30$.

Table 1

Checking results of average harmonics of linear voltages

Linear voltage U_{AB}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Average x_0	Average $\bar{x}$	$ U_{observ} $	Average x_0	Average $\bar{x}$	$ U_{observ} $
1	529.82	531.26	1.8	-	-	-
2	4.23	4.38	0.7	63	59.95	-1.58
3	17.60	16.85	-1.35	206	208.01	1.34
4	1.51	1.58	1.63	92	94.88	1.71
5	18.54	17.75	-1.51	130	134.99	1.87
6	3.05	2.95	-1.02	290	286.24	-1.67
Linear voltage U_{BC}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Average x_0	Average $\bar{x}$	$ U_{observ} $	Average x_0	Average $\bar{x}$	$ U_{observ} $
1	532.09	533.38	1.70	-	-	-
2	3.98	4.41	1.88	78	74.63	-1.83
3	19.13	18.38	-1.44	235	236.7	1.33
4	1.55	1.64	1.92	111	114.27	1.74
5	16.77	17.35	1.25	114	109.11	-1.85
6	4.15	4.33	0.94	325	327.08	0.97
Linear voltage U_{CA}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Average a_0	Average $\bar{y}$	$ U_{observ} $	Average a_0	Average $\bar{y}$	$ U_{observ} $
1	530.41	531.85	1.90	-	-	-
2	3.71	4.07	1.78	94	91.23	-1.55
3	18.27	19.09	1.69	182	182.31	0.19
4	1.50	1.57	1.63	83	85.42	1.77
5	16.01	16.56	1.08	165	169.22	1.71
6	3.82	3.57	-1.88	310	315.34	1.89

Zero hypothesis checking in terms of α $H_0 : D_x = D_0$ significance level concerning equality between unknown overall dispersion D_x with the known dispersion D_0 and hypothetic value D_0 in terms of a competing hypothesis $H_1 : D_x \neq D_0$, has been performed basing upon the criterion value [25-27].

$$\chi_{observ}^2 = \frac{(n-1)D_x}{D_0}$$

Zero hypothesis is accepted if $\chi_{l.cr.(1-\alpha/2;k)}^2 < \chi_{observ}^2 < \chi_{r.cr.(\alpha/2;k)}^2$ inequality is met. In this context, $k = n - 1$ is the number of degrees of freedom; $\chi_{l.cr.(1-\alpha/2;k)}^2$ and $\chi_{r.cr.(\alpha/2;k)}^2$ are left and right critical points determined according to Laplace function table. In the context of $n = 30$ and $\alpha = 0,05$, $\chi_{l.cr.(1-\alpha/2;k)}^2 = 16$ and $\chi_{r.cr.(\alpha/2;k)}^2 = 42.6$

Table 2 demonstrates checking results of dispersions of random consequences of harmonics of linear voltages generated with the help of digital generators.

Experimental validation is the most reliable method to confirm adequacy of any mathematical model. The rolling shop No. 1 of Dneprospetsstal LLC was selected as the experimental one; the rolling shop contains powerful semiconductor converter which operation is accompanied by distortions in the workshop power grid (asymmetry and nonsinusoidality). During the experiment, oscillograms of currents used by IM of 7.5 kW power have been obtained. In the process of the experiment, there was an access to a zero point of the motor; thus, oscillograms of phase currents and voltages were taken. Measuring of active resistances of windings has shown their symmetry and correspondence to the certified values. IM shaft load was of random character changing within a wide range from 2.3 up to 12.8 kW.

Table 2

Control results of dispersions of harmonics of linear voltages

Linear voltage U_{AB}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2
1	19.11	21.19	32.16	-	-	-
2	1.42	1.24	25.34	112	70.06	18.14
3	9.35	6.41	19.87	68	62.16	26.51
4	0.06	0.04	21.19	85	68.06	23.22
5	8.29	11.35	39.72	214	276.06	37.41
6	0.27	0.31	33.07	152	180.51	34.44
Linear voltage U_{BC}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2
1	17.36	11.87	19.83	-	-	-
2	1.56	1.02	18.92	102	96.20	27.35
3	8.19	8.83	31.27	49	40.82	24.16
4	0.06	0.05	22.88	106	137.99	37.75
5	6.44	5.59	25.17	210	191.97	26.51
6	1.11	0.82	21.45	138	144.00	30.47
Linear voltage U_{CA}						
Harmonic	Amplitude, V			Phase, degrees		
	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2	Dispersi on D_0	Dispersi on D_x	χ_{observ}^2
1	17.28	1.59	21.13	-	-	-
2	1.25	1.75	40.52	96	87.66	26.48
3	7.14	9.38	38.10	78	97.23	36.15
4	0.06	0.04	17.06	56	66.86	34.62
5	7.66	6.59	24.93	183	250.90	39.76
6	0.53	0.36	19.67	240	338.90	40.95

Fig. 4 demonstrates a window of CED Expert software in the process of oscillographic testing of signals during operation of tested electric motor under loading.



Figure 4 - Oscillograms of currents (from above) and voltages (from below) within the considered electric motor while operating under loading

Conclusions

The analysis of complex processes through computer-based experiments inherently involves the emergence of errors that stem from multiple sources. One major source of such errors lies in the fact that a discrete function is often represented as a finite set of its values corresponding to different groups of arguments. This inherently discrete nature leads to approximation inaccuracies because the continuous behavior of a system can only be imitated by a limited number of sampled points. In addition to sampling errors, computational procedures often involve rounding of numerical results, either deliberately to conform to specified precision levels or inherently due to hardware and software limitations. Further compounding the situation are errors that arise during the conversion of numbers between different numerical formats, such as from decimal to binary systems, and particularly when employing floating-point representations, which are well known for their limited precision and susceptibility to cumulative rounding errors.

These cumulative and interdependent sources of errors may, under certain circumstances, cause the generation of completely unexpected or even paradoxical results during the simulation or computational experimentation processes. For

instance, subtle inaccuracies in the representation of harmonic components of voltage waveforms can result in significant deviations when assessing power quality metrics or motor behavior characteristics. Consequently, careful management of computational errors becomes critically important when high-precision modeling and decision-making are required.

To address these issues within the context of analyzing electric motors, particularly asynchronous (induction) motors, a significant improvement was achieved by complementing the existing power-economic model with a dedicated control system aimed at managing the static characteristics of the motor's linear voltages. The addition of this control system enables the regulation and correction of random sequences generated during computational experiments, thereby improving the reliability and correctness of the simulated data. This, in turn, facilitates the selection of more cost-effective alternatives for restoring and maintaining the quality of the electric power supplied to electric motors.

The control systems were synthesized based on the concept of adaptation, employing mathematical expressions derived from a thorough analysis of the system behavior and error propagation characteristics. These adaptation-based control systems dynamically adjust key parameters during the simulation process to compensate for observed deviations, thereby enhancing the overall robustness of the modeling results.

The paper presents comprehensive results of the evaluation regarding the control of averages, amplitude dispersions, and phases associated with six harmonics of linear voltages obtained through extensive computer-based modeling. The assessments include not only the calculation of statistical parameters of the generated random sequences but also a critical verification step. This verification involves checking the extent to which the empirical averages and dispersions differ from their respective hypothetical (theoretical) values. Special emphasis is placed on quantifying these differences and analyzing their impact on the overall fidelity and validity of the computational experiments.

Through this rigorous approach, the study highlights both the necessity and the effectiveness of incorporating adaptation-based control systems into computational models to minimize error accumulation and to maintain the

statistical integrity of simulation outputs. Such improvements are essential for advancing the precision and reliability of computer-based analysis in the context of complex electrotechnical systems.

REFERENCES

1. Kuznetsov V.V., Tryputen M.M., Kuznetsov V.G., Tryputen M., Kuznetsova A., Kuznetsova Y. Choosing of asynchronous motor protection equipment in production environment (2020) *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 985 (1), art. no. 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/985/1/012022
2. Waide, P., Brunner, C.U. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems; *International Energy Agency*: Paris, France, 2011.
3. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text] : *Monograph* . M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p. DOI: <https://doi.org/10.30890/978-3-98924-021-6.2024>
4. Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. (2020). Harmonics Consequences on Drive Systems with Induction Motor. *Applied Sciences*, 10(4), 1528. <https://doi.org/10.3390/app10041528>
5. EN 50160:2010. Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; *Normalization Spanish Association*: Madrid, Spain, 2010.
6. IEEE Std 519-2014. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. *IEEE Standards Association*.
7. IEEE Std 1159-2019. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. *IEEE Standards Association*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
8. Cuong Ngo Van, Kovernikova Lidiia I. Analysis of the influence of non-sinusoidal and unbalanced network modes on induction motors. E3S Web of Conferences 289, 01002 (2021). *Energy Systems Research 2021*. doi.org/10.1051/e3sconf/202128901002
9. Beleiu, H. G., Maier, V., Pavel, S. G., Birou, I., Pică, C. S., & Dărab, P. C. (2020). Harmonics Consequences on Drive Systems with Induction Motor. *Applied Sciences*, 10(4), 1528. <https://doi.org/10.3390/app10041528>
10. Bryan, J. (2011). Effect of Voltage Variation on Induction Motor Characteristics. *Electrical Apparatus Service Association (EASA)*. Available at: https://easa.com/training/private-webinars/effect-of-voltage-variation-on-induction-motor-characteristics?utm_source
11. Nadir Benamira, Azzeddine Dekhane, Ahmed Bouraiou, Issam Atoui, Exploring the effects of overvoltage unbalances on three phase induction motors: Insights from motor current spectral analysis and discrete wavelet transform energy assessment, *Computers and Electrical Engineering*, Volume 117, 2024, 109242, ISSN 0045-7906, <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109242>.
12. Elgammal M.A., Abou-Ghazala A.Y. and Elshennawy T.I. Effects of Voltage Sags on Induction Motors. *ACTA ELECTROTEHNICA*. Volume 50, Number 4, 2009. Pp/245-252/
13. Dongdong Zhang Effects of Voltage Sag on the Performance of Induction Motor Based on a New Transient Sequence Component Method. *CES TRANSACTIONS ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS*, Vol. 3, No. 3, September 2019. pp.316-324.
14. Sayenko, D. Kalyuzhnyi, "Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages", *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 91, pp. 81-85, 2015.

15. Zhezhelenko, I.V. Selected problems of nonsinusoidal modes within power grids of enterprises [Text] / I.V. Zhezhelenko, Yu.L. Saenko, T.K. Baranenko, A.V. Gorpinich, & V.V. Nesterovich. – M.: Energoatomizdat, 2007. – 294 pp.
16. Pedra, J. Estimation of typical squirrel-cage induction motor parameters for dynamic performance simulation [Text] / J. Pedra // IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution. – 2006. – Vol. 153, Issue 2. – P. 197. doi: 10.1049/ip-gtd:20045209.
17. G. C. Seritan, C. Cepișcă, P. Guerin, "The analysis of separating harmonics from supplier and consumer", *Electrotehnică Electronică Automatică (EEA)*, vol. 55, no. 1, pp. 14-18, 2007.
18. Yevheniia Kuznetsova, Vitaliy Kuznetsov, Mykola Tryputen, Alisa Kuznetsova, Maksym Tryputen "Development and Verification of Dynamic Electromagnetic Model of Asynchronous Motor Operating in Terms of Poor-Quality Electric Power," 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 350-353. doi: 10.1109/MEES.2019.8896598
19. Electric energy. Requirements for electric energy quality within general-purpose power grids: GOST 13109-97. – IPK. – M.: Publication House of Standards, – 1998. – 15 pp.
20. Kuznetsov Vitaliy, Tryputen Nikolay, Kuznetsova Yevheniia (2019). Evaluating the effect of electric power quality upon the efficiency of electric power consumption. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering Lviv, Ukraine, July 2-6, 2019, pp. 556-561. DOI: 10.1109/UKRCON.2019.8879841.
21. I. Romashykhin, N. Rudenko and V. Kuznetsov, "The possibilities of the energy method for identifying the parameters of induction motor," 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2017, pp. 128-131. doi: 10.1109/MEES.2017.8248869
22. Kachan, Yu.G., Nikolenko, A.V., & Kuznetsov, V.V. Identifying parameters and testing adequacy of thermal model of asynchronous motor operating under the conditions of noisy electric energy / Kachan, Yu.G., Nikolenko, A.V., & Kuznetsov, V.V. — Kremenchuk, 2011. — Pp.56-59.— (Messenger of Kremenchuk State Polytechnical University: #1).
23. Kachan, Yu.G., Nikolenko, A.V. On the voltage modeling within power grids of industrial enterprises. – *Electrotechnics and power industry*. – # 1 2012. Pp.72-75, Zaporizhzhia.
24. M. Tryputen, V. Kuznetsov, A. Kuznetsova, K. Maksim and M. Tryputen, "Developing Stochastic Model of a Workshop Power Grid," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240898.
25. V. E. Gmurman, *Fundamentals of Probability Theory and Mathematical Statistics*, I. I. Berenblut, Ed. London: Illiffe Book Ltd., 1968
26. Soong T. T. *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. Wiley. 2004
27. Ross S. M. *A First Course in Probability*. Pearson. 2018

Received 21.04.2025.

Accepted 18.05.2025.

УДК 681.3.06

Микола Трипутень, Віталій Кузнецов,
Олександр Верьовкін, Олександр Коляденко

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА НА ОСНОВІ АДАПТИВНОГО ПІДХОДУ

Анотація. Дослідження присвячене підвищенню надійності моделювання роботи асинхронних двигунів під час розв'язання техніко-економічних завдань, пов'язаних із вибором систем захисту електроприводів, що працюють у промислових електричних мережах зі зниженою якістю електроенергії. Наявність напругових асиметрій, гармонічних спотворень та інших проблем якості електроенергії в цехових мережах істотно впливає на ефективність роботи і тривалість служби асинхронних двигунів, збільшуючи втрати енергії та витрати на технічне обслуговування.

У статті запропоновано енергетико-економічну модель, яка дозволяє проводити обчислювальні експерименти з метою визначення оптимальних технічних рішень для поліпшення якості енергопостачання. Ключовим елементом моделі є система генерації та контролю параметрів лінійних напруг, яка забезпечує відповідність змодельованих сигналів їх статистичним закономірностям, що спостерігаються у реальних умовах роботи промислових підприємств.

Вперше впроваджено адаптивні алгоритми для безперервної та одночасної оцінки середніх значень, дисперсій, автокореляційних і взаємкореляційних функцій гармонік напруги. Наведено математичні вирази для корекції цих характеристик у процесі накопичення інформації. Запропоновано структурні схеми систем керування для аналогового та цифрового моделювання процесів зміни напруги, що дозволяють здійснювати моніторинг достовірності отриманих даних у реальному часі.

Отримані результати моделювання були верифіковані за допомогою перевірки статистичних гіпотез щодо середніх значень і дисперсій гармонік напруги. Експериментальні дослідження проводилися у прокатному цеху №1 ПАТ "Дніпроспецсталь", де функціонування потужних напівпровідникових перетворювачів спричиняє значні спотворення напруги в цехових мережах. Результати досліджень підтвердили адекватність запропонованого підходу до моделювання та його придатність для обґрунтування економічно ефективних рішень щодо поліпшення якості електроенергії.

Робота робить вагомий внесок у підвищення енергоефективності промислових підприємств, надаючи методичну основу для достовірного моделювання роботи асинхронних двигунів в умовах спотвореної якості енергопостачання. Запропонований підхід дозволяє істотно скоротити витрати і тривалість експериментальних досліджень

за рахунок заміни їх на валідоване обчислювальне моделювання. Окрім цього, розроблена система адаптивного керування забезпечує мінімізацію накопичення похибок у процесі чисельного моделювання та підвищення точності аналізу складних електротехнічних систем. Проведення дослідження підкреслює важливість комплексного підходу до врахування реальних умов роботи електроприймачів у процесі створення моделей для оптимізації енергоспоживання та забезпечення надійності електроприводів у промислових мережах.

Mykola Tryputen, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: nikolaytriputen@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Vitalii Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

Oleksandr Verovkin e-mail: alex1monya@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>. Public joint stock company "Dniprovazhmash",
Dnipro, Ukraine

Oleksandr Koliadenko – Lead Specialist at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: kolyadenko.aleks@gmail.com ;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1983-8673>

Микола Трипутень, к.т.н., доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

e-mail: nikolaytriputen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0003-4523-927X>

Віталій Кузнецов, к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна

e-mail: witjane20002014@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8169-4598

Вервовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна

e-mail: alex1monya@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-4253-9802>

Олександр Коляденко – провідний фахівець кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. kolyadenko.aleks@gmail.com; ORCID iD: 0009-0006-1983-8673

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.07

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

Т.С. Голуб, Л.С. Молчанов, О.М. Мінай

**КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ
СТРУМЕНІВ, ЩО ВИТІКАЮТЬ З СОПЕЛ ЦИЛІНДРИЧНОЇ
КОНСТРУКЦІЇ, ДЛЯ УМОВ ВИКОРИСТАННЯ
В КИСНЕВИХ КОНВЕРТЕРАХ**

Анотація. Киснево-конверторний процес є єдиним конкурентоспроможним лідером з виробництва рідкої сталі. Це, насамперед, зумовлено наявними різними типами продувних пристроїв, які виконують за ходом виплавки різноманітні функції та дають змогу оперативно підлаштовуватися під змінні технологічні умови. Основними типами сопел для верхніх продувних пристроїв є сопла Лавалю, які використовуються для подачі основного кисневого потоку, та циліндричні сопла, які частіше використовують для допалювання відхідних газів. Представлені результати різнопланового дослідження особливостей витікання газового струменя з циліндричного сопла, які були проведені методами тінькової зйомки при витіканні газового потоку у вільне повітряне середовище та у модельну рідину – воду, та методами математичного моделювання для з'ясування раціональних меж їх використання у конструкції верхніх продувних фурм кисневого конвертера. За результатами досліджень відповідно до промислових технологічних умов використання сопел, встановлено, що при висоті розташування циліндричних сопел на рівні 40 калібрів від поверхні спокійної ванни високі показники енергії продувного газу та відповідно швидкостей газового потоку можуть бути досягнуті при подачі продувного газу з надлишковим тиском не менше 300 кПа. При цьому можливість проникнення у реальний шлако-металевий розплав за таких умов (при екстраполяції розрахунків на 60 кг лабораторну модель кисневого конвертера) складає на рівні 56 – 65 % висоти шлакового розплаву. Відмічено, що для збільшення проникної здатності газового струменя, що витікає з циліндричного сопла, необхідно зменшити висоту розміщення продувного пристрою на 25% відн.

Відзначені характерні особливості зміни форми газового струменя та розповсюдження швидкостей за довжиною при зміні тиску продувного газу, та їх

© Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Мінай О.М.

вплив на фактичну глибину занурення газового струменя у модельну рідину - воду. Зроблений висновок про доцільність використання циліндричних сопел як сопел другого ряду для багаторядних верхніх фурм.

Ключові слова: *продувка зверху, циліндричне сопло, газовий струмінь, тіньова зйомка, математичне моделювання, глибина занурення.*

Постановка проблеми. З практики сучасного киснево-конвертерного процесу відомо, що циліндричні сопла використовуються для організації ділянок внутрішнього простору конвертера, які відрізняються звуковою швидкістю руху газових потоків й використовуються для оптимізації теплового балансу плавки та поліпшення умов шлакоутворення. З досвіду киснево-конвертерного процесу відомо, що в період становлення використовувалися фурми, оснащені циліндричними соплами. Відомо, що виготовлення наконечників кисневих фурм, оснащених соплами Лавалля, супроводжується необхідністю використання складного технологічного устаткування. А експлуатація зазначеного типу сопел в умовах високотемпературної металевої ванни обмежена зміною конфігурації профілю кромки сопла через її розгар. Таким чином актуальним завданням для сучасного киснево-конвертерного процесу є встановлення меж використання сопел циліндричного типу у конструкції верхньої кисневої фурми.

Аналіз досліджень. Киснево-конвертерний спосіб отримання залізо-вуглецевого напівпродукту залишається єдиним найбільш конкурентоспроможним способом, який забезпечує близько 71 % виробництва [1, 2]. Це зумовлено як гнучкістю самого процесу, який легко пристосовується до шихтових умов, так і меншими порівняно з іншими варіантами виробництва рідкої сталі витратами [2]. Гнучкість киснево-конвертерного процесу зумовлена наявними різновидами процесу, і, в першу чергу, значними керуючими можливостями верхнього продувного пристрою – кисневої фурми [3-6]. В сучасних умовах для забезпечення ефективного керуючого впливу верхньої продувної фурми на фізико-хімічні процеси, що протікають в порожнині кисневого конвертера, в конструкції фурми використовують різні сопла: типу Лавалля для введення основного кисневого потоку для здійснення процесів окислення; сопла циліндричного типу, розташовані як на

наконечнику, так і на певній відстані від нього – на другому ярусі. Вони призначені для здійснення додаткового впливу на процес конвертування за рахунок поліпшення теплового балансу плавки за рахунок допалення CO до CO₂ у відхідних газах; покращення масообмінних процесів для асиміляції шлакоутворюючих матеріалів та ефективного впливу на процеси рафінування за рахунок газодинамічного впливу на шлако-металеву емульсію.

Мета дослідження. Враховуючи використання сопел циліндричного типу у верхніх продувних фурмах, що використовуються у плавильних печах відбивного типу, метою дослідження є встановлення газодинамічних особливостей витікання газових струменів з циліндричних сопел для з’ясування раціональних меж їх використання у конструкції верхніх продувних фурм кисневого конвертера.

Прилади та обладнання. Дослідження технологічних можливостей циліндричних сопел було проведено за допомогою фізичного стендового дослідження з продувкою у повітряне середовище та у модельне водне середовище, а також за допомогою математичного моделювання на прикладі циліндричного сопла діаметром $3,2 \cdot 10^{-3}$ м (у масштабі 1:13 до промислового еквівалентного перетину сопел верхньої кисневої фурми, що використовується для продувки в 250-т кисневих конвертерах) при продуванні стисненим повітрям за контролюємої витрати (тиску). Стендове дослідження було проведено з використанням методів тіньової зйомки [7, 8]. На рис. 1 наведено загальний вигляд стенду дослідження тіньовою фотозйомкою витікання газового струменя у повітряне середовище [7]. На рис. 2 наведений загальний вигляд стенду дослідження взаємодії газового струменя з рідиною за допомогою тіньової фото/відеозйомки. Для моделювання взаємодії газового струменя з рідкою ванною була обрано у якості модельної рідини вода, яка має близькі значення в’язкості у порівнянні із рідкою сталлю й фізичні параметри якої добре узгоджуються відповідно до критеріїв подоби Фруда модифікованого [9, 10]. При проведенні стендової тіньової зйомки взаємодії газового струменя з рідкою фазою використовували пласку прозору скляну ємність. Такий вибір був обґрунтований проведеними додатковими дослідженнями щодо впливу типу ємності на лінійні розміри об’єктів та їх

співвідношення на отриманих фотографіях, за якими було встановлено, що пласка поверхня створює менше викривлення середовища, ніж опукла. Продувку здійснювали стисненим повітрям з тиском 100, 200 та 300 кПа (до показників тиску, що приймається за робочий перед соплами промислових верхніх продувних пристроїв [11]), що подавався від компресора крізь циліндричне сопло $3,2 \cdot 10^{-3}$ м. Висоту розміщення продувної фурми відносно спокійної рідини встановлювали на рівні 20 – 40 калібрів продувного сопла.

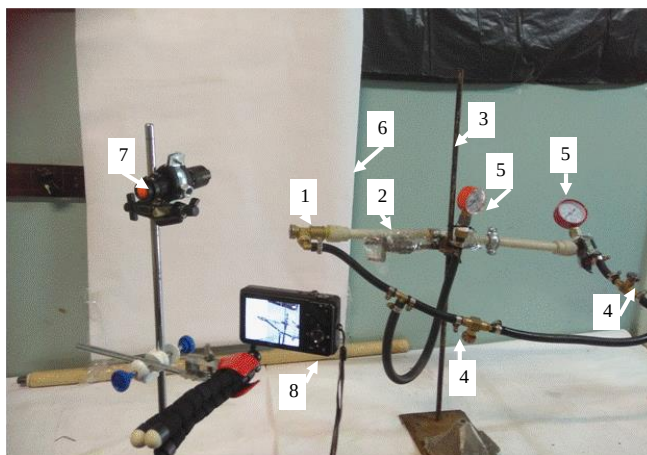


Рисунок 1 – Фото установки для тіньової зйомки витікання газового струменя з дослідного сопла. 1 – дослідний наконечник з соплом, 2 – фурма, 3 – кронштейн, 4 – голчастий кран, 5 – манометр, 6 – білий екран, 7 – джерело світла, 8 – камера.

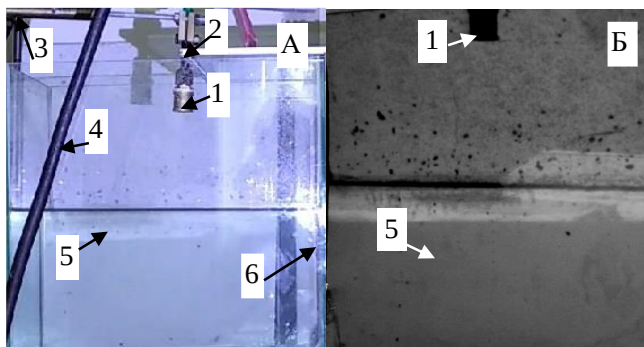


Рисунок 2 – Фото установки тіньової зйомки взаємодії газового струменя, що витікає з дослідного сопла, з рідкою ванною, змодельованою водою (А), та вигляд тіньової фотографії (Б) 1 – дослідний наконечник з соплом, 2 – продувна фурма, 3 – кронштейн, 4 – шланг подачі стисненого повітря на продувку, 5 – модельна рідина – вода, 6 – прозора пласка ємність

Область занурення газового струменя у рідину фіксували на білому екрані, розташованому позаду моделі. Геометричні параметри лунки занурення переобчислювали на реальні виходячи з дійсних геометричних розмірів продувного пристрою, що фіксувався також на фото, та з урахуванням кута нахилу відеокамери, яка була розташована для реєстрації глибини лунки занурення зі зміщенням вправо від центральної вісі продувного пристрою [8].

Математичне моделювання було проведено за допомогою програмного продукту ANSYS Fluent, який призначений для вирішення задач обчислювальної газо- та гідродинаміки (CFD). Для моделювання був обраний алгоритм рішення, що базується на густині. Він застосовується для розрахунків високошвидкісних транс- та надзвукових потоків. Поведінка газового струменя, що витікає з сопла, можна описати рівнянням нерозривності, яке зв'язує швидкість потоку з площиною перетину вихідного каналу, яке у диференційному вигляді за осовим направленням має вигляд [12-13]:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dx} + \frac{1}{S} \frac{dS}{dx} = 0 \quad (1)$$

де ρ – густина газу, кг/м^3 ; V – швидкість потоку, м/с ; S – площа вихідного перетину сопла, м^2 .

Для створення умов витікання струменя з надзвуковою швидкістю, співвідношення тиску, що є на вході в сопло, та навколишнього тиску має задовольняти рівнянню:

$$\frac{P_0}{P_3} \geq \frac{(\gamma + 1)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}}{2} \geq 1,89 \quad (2)$$

де P_0 – тиск газу на вході в сопло, Па; P_3 – зовнішній тиск, Па; γ – показник адіабати (для двоатомного газу – кисню та повітря, дорівнює 1,4).

За вказаних умов формується струмінь, що рухається з надзвуковою швидкістю, й при взаємодії із навколишнім середовищем утворює ударні хвилі, в яких середовище струменя згущується з формуванням бочкоподібних утворень й дисків Маха [12-14].

Алгоритм обчислення математичної моделі базувався на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса із дискретизацією основних рівнянь у вигляді

неусталеного рівняння збереження енергії для перенесення скалярних величин, турбулентної в'язкості та теплопровідності [15]. Для нестискаємого газового середовища система рівнянь мала вигляд:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{v}) = 0, \\ \rho \frac{d\bar{v}}{dt} = -\operatorname{grad} p + \mu \Delta \bar{v} + \frac{1}{3} \mu \operatorname{grad}(\operatorname{div} \bar{v}) + \bar{f}, \\ dp = K \frac{d\rho}{\rho}. \end{cases} \quad (3)$$

де Δ – оператор Лапласа; $\bar{v}$ – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; μ – динамічна в'язкість, $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{с}$; ρ – густина середовища, $\text{кг}/\text{м}^3$; p – тиск, Па ; $\bar{f}$ – об'ємна сила (наприклад, сила тяжіння).

Основними кроками проведення математичного моделювання були:

1. побудова геометрії розрахункової моделі;
2. побудова розрахункової сітки;
3. налаштування математичної моделі (визначення фізичних властивостей матеріалів, завдання граничних умов, налаштування параметрів вирішення, ініціалізація початкових значень змінних, завдання частоти збереження проміжних результатів, вибір кроку часу розрахунку);
4. комп'ютерне обчислення;
5. обробка отриманих результатів.

Для математичного моделювання витікання газового потоку крізь циліндричне сопло була побудована 3D модель циліндричного сопла (рис. 3).

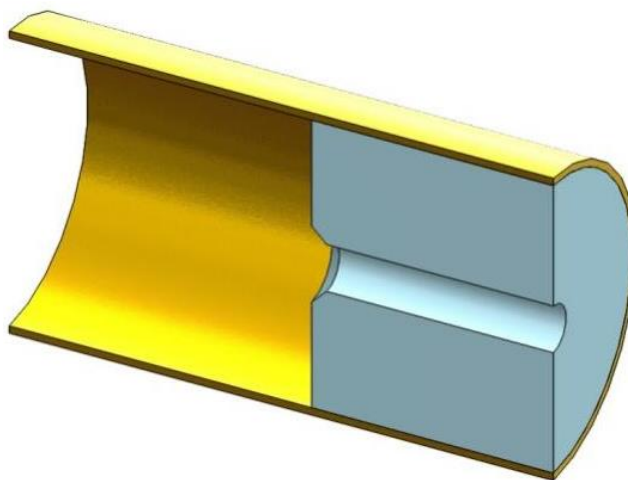


Рисунок 3 – 3D модель циліндричного сопла у перетині

Моделним тілом було обрано повітря, властивості якого задавалися рівнянням стану ідеального газу Клапейрона-Менделєєва [16]. Для отримання точних рішень була використана дискретизація рівнянь потоку, кінетичної енергії в турбулентному потоці, розсіювання турбулентного потоку другого та вище порядків точності. Результати моделювання були отримані у вигляді кольорових полів швидкостей та тиску продувного газу за довжиною струменя.

Результати та дискусія. На рис. 4 для прикладу наведено результати обчислення полів швидкостей у газовому струмені, що розповсюджується у повітряне середовище за стандартних умов при надлишковому тиску продувки 100 – 300 кПа. За отриманими результатами було встановлено, що при витіканні з циліндричного сопла у газовому струмені під дією зміни навколишнього тиску формується ущільнена центральна частина – «ядро», де швидкості газу набувають на початковій ділянці надзвукових значень (помаранчевий та червоний колір на рисунку 4). Відмічено, що при надлишковому тиску продувки 200 кПа і вище на початковій ділянці газового струменя формуються періодично повторювані опуклі ущільнення й розрядження – так звані «бочки чи диски Маха». Це свідчить про достатньо високу енергію, яку несе із собою струмінь. Це підтверджується розрахунками: для надлишкового тиску 200 кПа у «ядрі» енергія струменя сягає до 235 кДж, а для 300 кПа – до 244 кДж. Порівняння довжини «ядра» струменя вказує на те, що зі зростанням продувного тиску з 100 кПа до 200 кПа надлишкових довжина «ядра» збільшується на 21,8 % відн. Але в подальшому, із перерозподілом енергії на утворення дисків Маха, при збільшенні продувного тиску до 300 кПа довжина ядра збільшується тільки на 4,5 % відн. у порівнянні із продувкою з тиском 200 кПа.

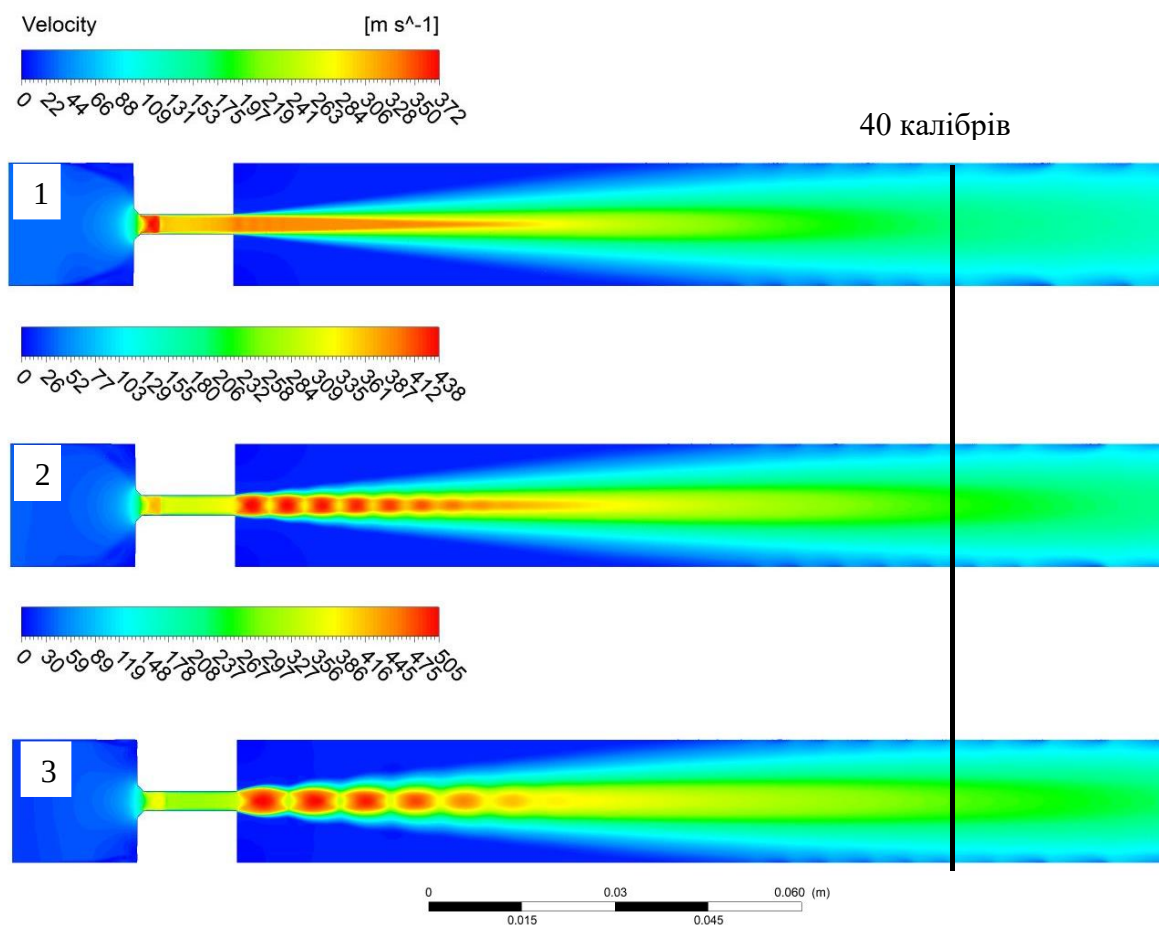


Рисунок 4 – Кольорові поля розповсюдження швидкостей у газовому потоці при витіканні з циліндричного сопла з надлишковим тиском:
1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

На рисунку 4 відмічено відстань за довжиною струменя, що відповідає робочій відстані для продувки реальної ванни – 40 калібрів. Відповідно можна зробити висновок, що на робочій відстані газовий струмінь може чинити необхідний динамічний вплив за умов продувки із тиском вище 300 кПа (за цих умов можна очікувати досягнення газового потоку поверхні ванни із швидкостями на рівні звукових - швидкість звуку 330 м/с у повітрі).

Для оцінки отриманих результатів математичного моделювання було проведено натурне дослідження продувки крізь циліндричне модельне сопло методом тіньової зйомки при розповсюдженні у повітряне середовище. Ключовими моментами тіньової зйомки були: забезпечення лінійності світлового потоку від джерела світла; забезпечення перпендикулярності

джерела світла та газового струменя й екрану. Експериментальні фотознімки були перш за все порівняні з кольоровими полями швидкостей, розрахованих за однакових умов. На рис. 5, як приклад, наведено порівняння для умов надлишкового тиску 300 кПа. На результаті моделювання та фотозйомки вихідний переріз сопла у наведеному форматі рисунку є однаковим для забезпечення адекватної можливості порівняння.

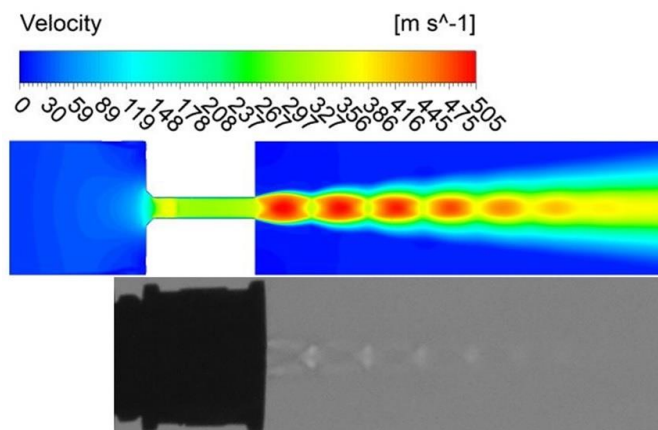


Рисунок 5 – Порівняння результатів математичного моделювання та тіньової зйомки витікання газового струменя крізь циліндричне сопло за тиску продувного газу 300 кПа

Фотознімки мають схожі з результатами математичного моделювання особливості зміни полів швидкостей за довжиною струменя з утворенням «бочкоподібних» структур – дисків Маха, з ділянками ущільнень й розріджень середовища, які на фотознімках проявляються в згущенні або висвітленні інтенсивності кольору. Можна сказати, що результати математичного моделювання більш інформативні. За їх допомогою можна краще оцінити особливості розповсюдження газового струменя з моменту витікання з сопла і далі вздовж струменя. Видно, що саме в центрі кожного «бочкоподібного» утворення швидкість струменя набуває максимального значення. Також видно, що надалі, за областю утворення «бочкоподібних» структур, струмінь дещо розширюється у порівнянні з вихідним перетином (приблизно на 15 – 20 %), зберігаючи достатньо високі значення швидкості (вище звукової швидкості 330 м/с для повітря).

Також слід відзначити, що на рисунках співпадають довжини утворених відповідних за довжиною струменя «бочок»: для першої – 0,012 м,

другої – 0,014 м, третьої 0,013 м, четвертої – 0,012 м (далі за наявних умов зйомки на фото «бочкоподібні» утворення немає можливості точно оцінити). Дещо відрізняється висота «бочкоподібних» утворень за фото від математично отриманих приблизно на 1 мм, що, ймовірно, пов'язано з точністю фотозйомки.

Відповідно до методики оцінювання швидкості газового потоку за тінювими фото, за якої швидкість газового потоку перед ударною хвилею визначається за кутом нахилу дотичної стрибка ущільнення [8], були визначені швидкості за першими трьома «бочкоподібними» утвореннями й отримані результати були співставлені з результатами обчислення швидкості методом математичного моделювання. На рис. 6, А наведено співставлення для умов продувки з надлишковим тиском 300 кПа. Було відзначено, що результати математичного моделювання та ті, що були отримані за тінювими фото, відрізняються на величину порядку 1,6 – 5,5 %. Це дає змогу зробити висновок про адекватність отриманих результатів шляхом математичного моделювання. Слід відзначити, що точність методу визначення швидкості за тінювою зйомкою, як і будь-який метод, у якому бере участь людина, залежить від точності побудови прямих та визначення їх координат перетину осей для встановлення кутів нахилу.

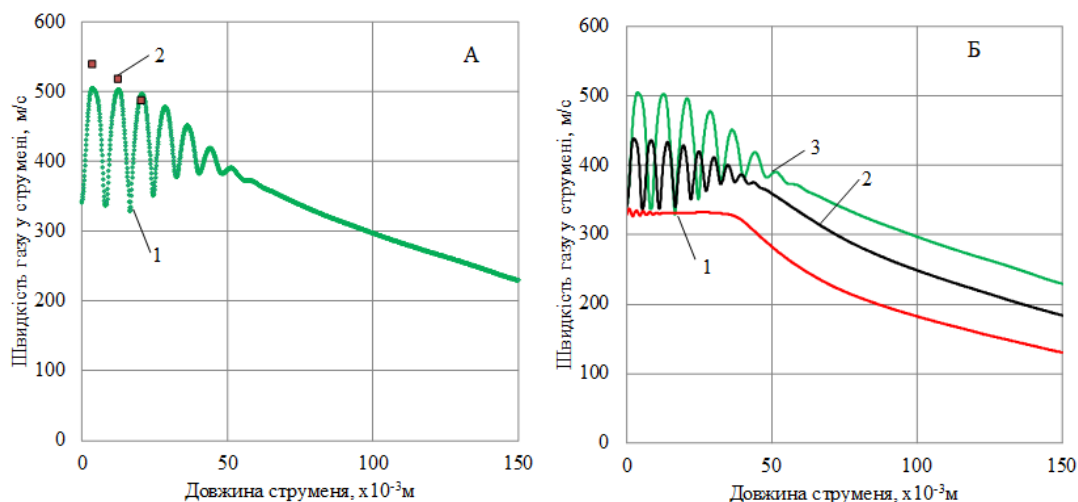


Рисунок 6 – Співставлення результатів (А) математичного обчислення (1) швидкості за горизонтальною віссю струменя та швидкостей, оцінених за тінювими фото (2) та співставлення швидкостей витікання газового струменя за довжиною при різному надлишковому тиску продувочного газу (Б): 1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

Однак, для даного випадку пряме вимірювання не надасть точніших результатів, бо діаметр модельного сопла близький до робочого діаметру отворів стандартних трубок Піто. Крім того наявною є перевага математичного моделювання, яке дозволяє отримати не тільки у окремих точках дані швидкостей газового струменя, але й дізнатися як і з яким характером швидкість змінюється за довжиною струменя. Ці данні дають додаткову корисну інформацію для розуміння поведінки як окремо газових потоків, так і на наступному етапі – у взаємодії із рідкою ванною.

Наступним кроком дослідження було проведення співставлення чисельних результатів розрахунку швидкостей газових струменів за довжиною струменя при різних надлишкових тисках витікання продувного газу: 100, 200 та 300 кПа (рис.6, Б). Відмічено, що характер зміни за довжиною струменя отриманих розрахункових результатів кореспондується з наявними в літературі даними щодо зміни швидкості газового струменя, який витікає з продувних пристроїв за умов електродугової плавки, що є додатковим підтвердженням адекватності розрахункових моделей [17].

Встановлено, що після виходу з продувного сопла за довжиною струменя швидкість продувного газу спочатку має пульсуючий характер із середнім приблизно сталим показником до довжини струменя приблизно $36 - 40 \cdot 10^{-3}$ м, а далі починає знижуватися (рис. 6, Б). Відмічено, що зі збільшенням надлишкового тиску продувного газу з 100 кПа до 300 кПа швидкість газового струменя на початковому етапі, де присутні коливання, збільшується на 29,5 %, а на ділянці спаду - на 62,6 %. При цьому амплітуда коливань швидкості газового потоку на виході збільшується у 21 раз і довжина струменя, впродовж якої присутні коливання, більша у 4,2 рази. Кількість відмічених максимумів швидкості газового струменя при продуванні з надлишковим тиском 200 – 300 кПа була встановлена на рівні 8 із максимальними показниками швидкості при 200 кПа перші п'ять – 435 – 416 м/с, а при 300 кПа – 505 – 451 м/с. Ці величини перевищують звукову швидкість на 31,8 – 26,1 % та 53,0 – 36,6 % відповідно. При продуванні із надлишковим тиском 100 кПа швидкість продувного газу знаходиться на рівні звукової, однак зафіксувати візуально згущення середовища на тінювих фотографіях за

цих умов не вдалося. Вказані швидкості відповідають початковій ділянці струменя. Вподальшому швидкість струменя знижується і на відстані 40 калібрів, що є робочим положенням для промислових верхніх продувних фурм кисневого конвертера, складає при надлишковому тиску 200 кПа 210 м/с, а при 300 кПа – 150 м/с.

Оцінка газодинамічних осрбливостей газового струменя, що витікає з циліндричного сопла певного діаметра за допомогою стенду холодного моделювання з використанням води у якості модельної рідни показала наступне. По-перше, було відмічено значне розбризкування рідини при продуванні з надлишковим тиском більше 100 кПа. Щодо глибини занурення газового струменя у рідину встановлено, що при розміщенні продувного пристрою із циліндричним соплом на висоті 40 калібрів (рис. 7) глибина занурення газового струменя у рідку ванну склала при надлишковому тиску 100 кПа – $76 \cdot 10^{-3}$ м, при 200 кПа – $84,4 \cdot 10^{-3}$ м, а при 300 кПа – $90 \cdot 10^{-3}$ м. Відповідно до отриманих результатів математичного моделювання можна відзначити, що за умов переходу продувки газовим струменем до режиму з утворенням «бочкоподібних» ущільнень при переході режиму продувки з 100 кПа до 200 кПа глибина лунки занурення збільшується приблизно на 12% відн.

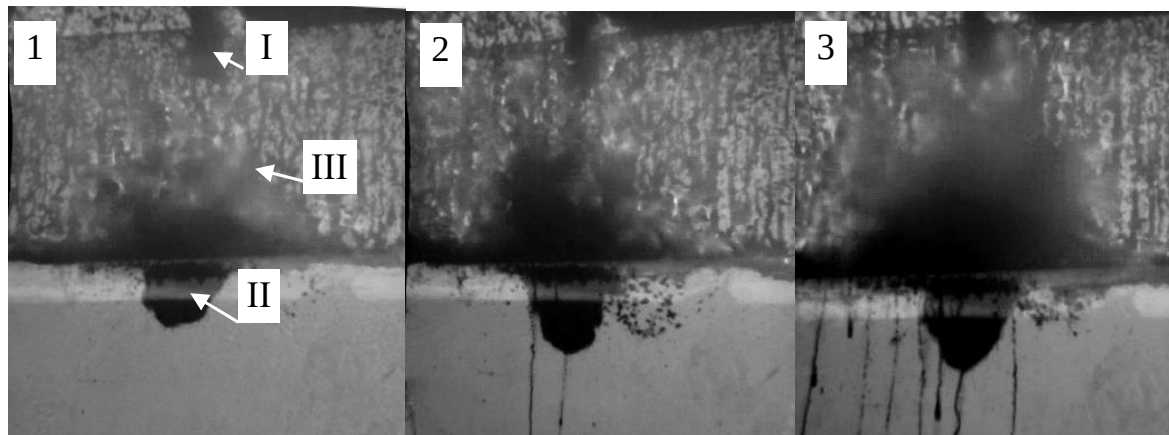


Рисунок 7 – Характерні тіньові фото продувки водної моделі при розміщенні продувного пристрою на висоті 40 калібрів при різному надлишковому тиску продувного газу: 1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа.

I – наконечник продувної фурми, II – лунка занурення газового струменя у рідину,
III – сплески рідини

Подальше збільшення енергії струменя зі збільшенням тиску продувного газу до 300 кПа приводить до меншого ефекту – збільшення глибини занурення на 6 % відн. Відповідно, енергія газового струменя розподіляється на «збільшення» енергії «бочкоподібних» ущільнень. Які, ймовірно, значно відображаються у активному розхитуванні та розбризкуванні ванни.

Відповідно до наявної у [17] методики за даними тиску у газовому струмені та з урахуванням впливу температури на гідродинамічні показники продувного струменя, було проведено розрахунок глибини занурення газового струменя у рідку металеву ванну. Оцінка можливої глибини занурення газових струменів за умов проникнення у рідкі шлаковий (із висотою 0,025 м за умов моделювання у 60 кг моделі кисневого конвертера [18]) та металевий розплави показала наступне. Розрахунки були проведені для умов заглиблення продувного газу у шлакову й металеву фази (рис. 8). Відмічено, що залежність глибини занурення газового струменя має ступеневий характер й при збільшенні надлишкового тиску збільшується достовірність отриманих математичних рівнянь, що описують вказані залежності. Було відмічено, що за умов, обраних для проведення аналізу, можливість проникнення газових струменів, що витікають з циліндричного сопла, при розміщенні продувного пристрою на висоті 40 калібрів при врахуванні і шлакового, і металевого розплаву зможе складати 56 – 65 % середньої висоти шлакового розплаву. Тобто циліндричні сопла сприятимуть перемішуванню шлакового розплаву. При розміщенні продувної фурми на меншій висоті – 30 калібрів продувного сопла, можна очікувати значно глибше занурення газового струменя з повним проникненням крізь шар шлаку при продувці з надлишковим тиском 200 – 300 кПа і, навіть, проникнення у глиб металевого розплаву.

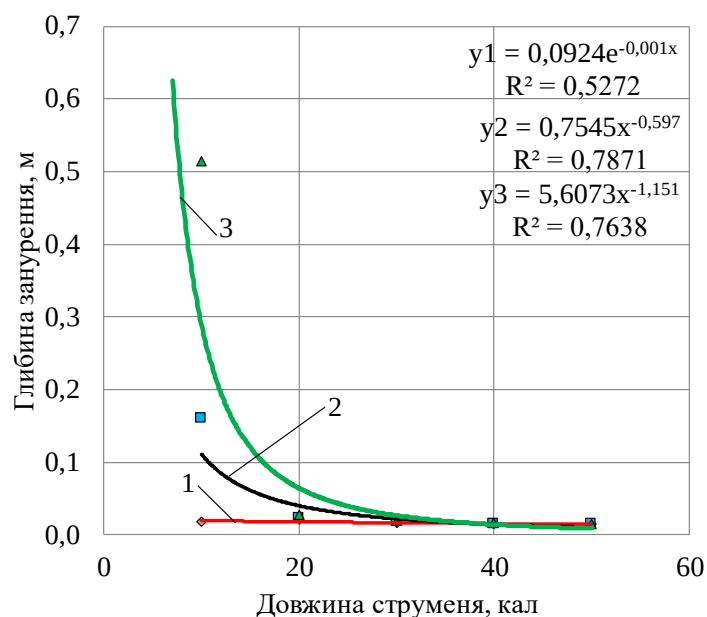


Рисунок 8 – Розрахунок глибини занурення газового струменя у рідку металеву ванну за умов проникнення у шлакову й металеву фази при різному положенні продувного пристрою за висотою при різному надлишковому тиску продувного газу:
1 – 100 кПа, 2 – 200 кПа, 3 – 300 кПа

Висновки.

Проведене комплексне багатопланове дослідження газодинамічних особливостей використання сопел циліндричної конструкції стосовно до умов киснево-конвертерної плавки. Встановлено, що для умов використання циліндричних сопел з висотою розташування на рівні 40 калібрів від поверхні спокійної ванни кінетичної енергії у газового струменя відповідно до встановлених значень швидкостей газового потоку не вистачає для повного пробиття шлакового розплаву. Однак достатньо для активного перемішування шлаку. При цьому при розміщенні продувного пристрою на 25% відн нижче вже сприятиме значному зануренню газового струменя з повним проникненням крізь шлаковий розплав.

Відмічено, що при переході до продувного режиму з утворенням «бочкоподібних» ущільнень у струмені зі зміною продувного тиску зі 100 до 200 кПа глибина занурення у модельну рідину – воду збільшується на 12 %, а при подальшому аналогічному збільшенні тиску до 300 кПа енергія

струменя у значній мірі перерозподіляється на ділянках ущільнення та глибина занурення збільшується тільки на 6 %.

Також проведене дослідження дало змогу зробити висновок, що верифікацію результатів математичного моделювання можливо проводити шляхом тіньової зйомки витікання газових потоків з сопел, які моделюються, за однакових з математичним моделюванням технологічних умов. Відзначено високий рівень візуального співпадіння отриманих результатів та значний рівень співпадіння фактично обчислених результатів за показником швидкості витікання газового струменя на різних ділянках за довжиною. Відмічено, що математичне моделювання має значні переваги як щодо візуалізації загальної картини особливостей розподілу швидкостей у струмені при витіканні з сопла, так і щодо визначення зміни величини швидкості у різних точках за осьовим направленням.

Таким чином, можна підсумувати, що використання циліндричних сопел у якості додаткових сопел, наприклад, другого ряду у дворядних соплових наконечниках, обґрунтовано для активного шлакоутворення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85373-6.00008-9>
2. 2024 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
3. Охотский В.Б., Величко А.Г., Лю Т.И., Молчанов Л.С. Продувочные процессы в сталеплавильных технологиях. Шихтовка. Металлургическая и горнорудная промышленность, 2016. №5. С. 12-15
4. Чернятевич А.Г., Сигарев Е.Н., Чернятевич И.В. Новые разработки конструкций кислородных фурм и способов продувки ванны 160-т конвертеров ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Теория и практика металлургии, 2010. т. 2. С. 31-38
5. Чернятевич А.Г., Мастеровенко Е.Л. Направления совершенствования конструкции кислородной фурмы на основе методов управления качеством. Збірник наукових праць ДДТУ Технічні науки, 2012. №3. С. 15–23
6. Молчанов Л.С., Чернятевич А.Г., Вакульчук В.В., Чубіна О.А. Комплексний техніко-економічний аналіз впливу конструкції верхніх продувальних пристроїв на основні показники виробництва сталі в кисневих конвертерах. Сучасні проблеми металургії, 2019. № 22. С. 62-72. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.07>
7. Golub T., Molchanov L., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the gas dynamic simulation stand. Science and Innovation, 2023. Vol. 19, No.24. P. 79-92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>

8. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications, 2002. 944 p
9. Mazumdar D., Evans J.W. Modeling of steelmaking processes. 1st Edition, 2010, 493 p
10. Яковлев Ю.Н. Физическое и математическое моделирование сталеплавильных процессов. Вопросы теории и практики сталеплавильного производства: Науч. тр. ММИ. М.: Металлургия, 1991. С.32-44.
11. Баптизмаський В.І., Бойченко Б.М., Величко О.Г. та інші. Сталеплавильне виробництво: навч. посібн. К.: ІЗМН, 1996. 400 с.
12. Miller D.R. Atomic and molecular beam methods, edited by Giacinto Scoles. New York: Oxford University press: 1988.
13. Alam M., Naser J., Brooks G., Fontana A. Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process. Metallurgical and Materials Transactions B. , 2010. Vol. 41 (6). P. 1354-1367. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9436-7>
14. Абрамович Г.П. Прикладная газодинамика. М. 1991. 600 с.
15. Isaev S.A., Lysenko D.A. Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2004. Vol. 77. P. 857–860. <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000045174.69463.6f>
16. Rapp-Kindner I., Ösz K., Lente G. The ideal gas law: derivations and intellectual background. ChemTexts., 2025. Vol. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s40828-024-00198-9>
17. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings, 2024. Vol. 14(11). P. 1444. <https://doi.org/10.3390/coatings14111444>
18. Чернятевич А.Г., Молчанов Л.С., Юшкевич П.О. Высокотемпературное моделирование продувки конвертерной ванны с применением трехъярусной фурмы. Металл и литье Украины, 2017. № 6-7. С. 17–21

REFERENCES

1. Visuri V.-V., Holappa L. Converter Steelmaking. Treatise on Process Metallurgy (Second Edition), 2024. Vol.3 Industrial Processes. P. 183-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85373-6.00008-9>
2. 2024 World Steel in Figures. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>
3. Ohotskiy V.B., Velichko A.H., Liu T.I., Molchanov L.S. (2016) Blowing processes in steelmaking technologies. Charging. Metallurgical and mining industry. №5. P. 12-15 [in Russian]
4. Cherniatevych A.H., Sigarev Ye.N, Cherniatevych I.V. (2010) New developments of oxygen lances designs and methods of bath blowing of 160-ton converters of OJSC “ArcelorMittal Kryvyi Rih”. Theory and practice of metallurg. №2. P. 31-38 [in Russian]
5. Cherniatevych A.H., Masterovenko E.L. (2012) Directions for improving the design of an oxygen lances based on quality management methods. Collection of scientific papers of DDTU Technical Sciences. №3. P. 15–23 [in Russian]
6. Molchanov L.S., Cherniatevych A.H., Vakulchuk V.V., Chubina O.A. (2019) Comprehensive technical and economic analysis of the influence of the design of upper blowing devices on the main indicators of steel production in oxygen converters. Modern problems of metallurgy. № 22. P. 62-72. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2019.01.07> [in Ukrainian]

7. Golub T., Molchanov L., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for BOF blowing at the gas dynamic simulation stand. Science and Innovation, 2023. Vol. 19, No.24. P. 79-92. <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>
8. Zel'dovich Ya. B., Raizer Yu. P. (2002) Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Dover Publications. 944 p
9. Mazumdar D., Evans J.W. (2010) Modeling of steelmaking processes. 1st Edition. 493 p
10. Yakovlev Yu.N. (1991) Physical and mathematical modeling of steelmaking processes. Theoretical and Practical Issues of Steelmaking. Moscow: Metallurgy, 1991. P. 32-44. [in Russian]
11. Baptizmanskii V.I., Boychenko B.M., Velichko O.H. and others. (1996) Steelmaking: a textbook. K. 1996. 400 p. [in Russian]
12. Miller D.R. (1988) Atomic and molecular beam methods, edited by Giacinto Scoles. New York: Oxford University press.
13. Alam M., Naser J., Brooks G., Fontana A. (2010) Computational fluid dynamics modeling of supersonic coherent jets for electric arc furnace steelmaking process. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 41 (6). P. 1354-1367. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9436-7>
14. Abramovich H.P. (1991) Applied gas dynamics. 600 p. [in Russian]
15. Isaev S.A., Lysenko D.A. (2004) Testing of the fluent package in calculation of supersonic flow in a step channel. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. Vol. 77. P. 857–860. <https://doi.org/10.1023/B:JOEP.0000045174.69463.6f>
16. Rapp-Kindner I., Ősz K., Lente G. (2025) The ideal gas law: derivations and intellectual background. ChemTexts. Vol. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1007/s40828-024-00198-9>
17. Liu F., Lu S., Zeng S., Zhu R., Wei G., Dong K. (2024). Flow field of supersonic oxygen jet generated by various wear lengths at the Laval nozzle exit. Coatings. Vol. 14(11). P. 1444. <https://doi.org/10.3390/coatings14111444>
18. Cherniatevych A.H., Molchanov L.S., Yushkevich P.O. (2017) High-temperature modeling of converter bath blowing using a three-tier tuyere. Metal and Casting of Ukraine. № 6-7. P. 17–21

Received 09.04.2025.

Accepted 02.05.2025.

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

T. Golub, L. Molchanov, O. Minai

COMPREHENSIVE STUDY OF GASDYNAMIC FEATURES OF JETS OUTFLOW FROM NOZZLES OF CYLINDRICAL DESIGN FOR OXYGEN CONVERTERS CONDITIONS

Abstract. *The oxygen converter process is the only competitive leader in the production of liquid steel. This is primarily due to the available different types of blowing devices that perform various functions during smelting and allow for rapid adaptation to changing technological conditions. The main types of nozzles for top blowing devices are*

Laval nozzles, which are used to supply the main oxygen flow, and cylindrical nozzles, which are more often used for postcombustion of exhaust gases. The results of a multifaceted study of the features of the gas jet outflow from the cylindrical nozzle are presented to clarify the rational limits of their use in the design of the top blown lances of an oxygen converter. It was conducted by shadow shooting methods when the gas stream flows into the free air environment and into a model liquid - water, and by mathematical modeling methods. In accordance with the industrial technological conditions of using nozzles, it was established that when the height of the cylindrical nozzles was 40 calibers from the surface of the calm bath, high indicators of the energy of the blowout gas and, accordingly, the gas flow velocities were achieved when the blowing gas was supplied with an excess pressure of at least 300 kPa. At the same time, the possibility of penetration into a real slag-metal melt under such conditions (when extrapolating calculations to a 60 kg laboratory model of an oxygen converter) was at the level of 56 - 65% of the height of the slag melt. It was noted that to increase the permeability of the gas jet flowing from the cylindrical nozzle, it is necessary to reduce the lance height by 25% relative.

The characteristic features of the change in the shape of the gas jet and the distribution of velocities along the length when the pressure of the blowing gas changes, and their influence on the actual depth of immersion of the gas jet in the model liquid - water, were noted. A conclusion was made about the feasibility of using cylindrical nozzles as second-row nozzles for multi-row upper lances.

Keywords: top blowing, cylindrical nozzle, gas jet, shadow shooting, mathematical modeling, immersion depth.

Голуб Тетяна Сергіївна, к.т.н., старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Молчанов Л.С., к.т.н., заввідділом Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

Мінай О.М., PhD, старший науковий співробітник відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.08

УДК 621.774.3

В.Д. Добряк, Ю.Д. Угрюмов, С.Л. Стасевський, І.А. Мазур, Д.Ю. Угрюмов

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТАЛОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОКАТКИ ТРУБ НА ПІЛІГРИМОВОМУ СТАНІ

Анотація. Розглянуті особливості і перспективи розвитку процесу розкатки пілігримової головки на вільній ділянці дорна. Основною проблемою цього процесу є зміщення ділянки по дорну в напрямку обертання валків пілігримового стану. На основі теорії пружно-пластичного удару пілігримової головки і валків стану розраховані після ударні швидкості і переміщення труб для реальних умов пілігримової прокатки. Розглянуті два способи зменшення переміщення пілігримової головки при її взаємодії з валками: зниження кутової швидкості валків при розкатки п пілігримової головки та застосування гальмівних колодок, які створюють задній натяг труби.

Ключові слова: пілігримовий стан, труба, гільза, дорн, пілігримова головка, валок пілігримового стану, форголлер, подавальний апарат, коефіцієнт витрати метала, пружно-пластичний удар.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процесу гарячої пілігримової прокатки труб характерно підвищений витратний коефіцієнт метала (ВКМ) внаслідок наявності недокатаної задньої частини гільзи – пільгерголовки, яка йде у обрізь, та складає 4-7 % від маси вихідної заготовки.

Пошук шляхів зниження ваги пільгерголовки залишається однією з основних проблем удосконалення процесу гарячої пілігримової прокатки труб широкого розмірного і марочного сортаменту. Особливо актуальна ця проблема стала в зв'язку з переходом на безперервно литу заготовку круглого поперечного перерізу, котра дозволяє економити до 16% метала в порівнянні зі злитками стаціонарної розливки в виливниці.

Можливі способи зниження маси пільгерголовки при прокатці товстостінних і тонкостінних труб приведені в ряді робіт [1-4]. Мінімальне

зменшення маси пільгерголовки можливо за рахунок її повної розкатки на вільній ділянці дорна. Однак цей метод застосовується тільки для отримання товстостінних труб з відношенням $D/S = 6-12,5$. Можливості розкатки пільгерголовки на тонкостінних трубах обмежено граничною стійкістю заднього кінця труби під час вилучення дорна за допомогою шибєрного пристрою та подавального апарата. Повну розкатку пільгерголовки можливо здійснювати тільки на вільній ділянці дорна, що значно ускладнює цей процес.

Процесу розкатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна присвячені роботи вчених Дніпропетровського металургійного інститута: О.П. Чекмарьова, В.М. Данченко, Е.Н. Потапкіна, а також спеціалістів Нижньодніпровського трубопрокатного заводу: А.А. Чернявського, В.Н. Умеренцева, В.В. Березовського та ін. В останні роки цей напрямок розвивався в Українському державному університеті науки і технологій під керівництвом В.Ф. Балакіна. Цей процес істотного зниження втрат металу в пільгерголовку має певні перспективи для розширення його використання.

Постановка задачі дослідження

На основі аналізу особливостей процесу розкатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна необхідно запропонувати нові технологічні рішення для зменшення зміщення розкату по дорну в напрямку обертання валків особливо в перших циклах цього процесу коли практично відсутнє зчеплення розката з дорном.

Особливості процесу гарячої пілігримової прокатки труб

Технологія прокатки труб на пілігримовому стані полягає в наступному. Гільза з дорном подається на передню сторону стана, при цьому хвостовик дорна з'єднується з дорновим замком, який за допомогою ніпеля з'єднаний з плунжером форголлера подавального апарата. Прокатку труб в сталому режимі здійснюють з вибраною швидкістю обертання валків і максимальною величиною подачі, обмеженою для тонкостінних труб ($D/S = 12,5-40$) точністю труб, що прокатуються, а для товстостінних труб ($D/S = 6-12,5$) – навантаженням на кліть стана. Розкатку гільзи в трубу 1 на дорні 2 валками здійснюють з переднім підпором заднього торця гільзи зі сторони дорнового

кільця. На прикінці прокатки на задньому кінці гільзи утворюється недокат в вигляді пілігримової головки, що показано на рис. 1. Пілігерголівка 3 складається з двох основних частин: недокату довжиною l_n і діаметром рівним назовньому діаметру гільзи і змінної частини довжиною l_p , профіль якої відповідає розгортки бойка пілігримового валка з урахуванням випереження.

Передній підпор на задній торець гільзи зі сторони дорнового кільця 4 і дорнового замка 5, в якому закріплений хвостовик 6 дорна 2, здійснюється за рахунок стиснення повітря в повітряному циліндрі форголлера, плунжер якого через ніпель з'єднаний з дорновим замком 5 (рис. 1).

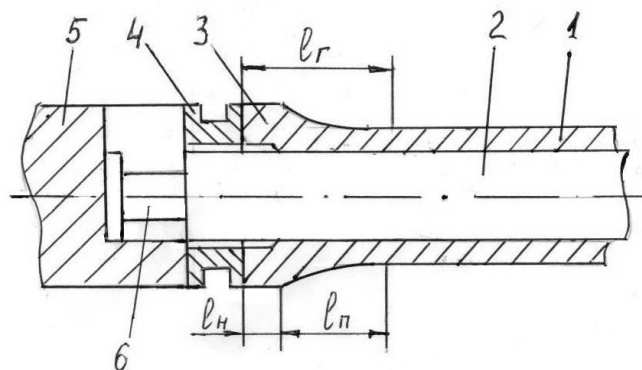


Рисунок 1 – Пілігримова голівка на задньому кінці гільзи після прокатки:
1-труба; 2-дорн; 3-пілігримова голівка; 4- дорнове кільце; 5-дорновий замок;
6-хвостовик дорна

Наявність пілігерголівки суттєво збільшує ВКМ. При цьому втрати металу в обрізь з видаленням пілігерголівки в залежності від сортаменту труб, що прокатуються складає 80-150 кг або 6-8 % від маси вихідної заготовки [5, 6].

Розглянемо більш докладно процес переходу до розкатки пілігерголівки на вільній ділянці дорна.

Вихідне положення пілігримових валків і подавального апарата перед початком розкатки пілігерголівки показано на рис. 2, а. Цей стан характеризується тим, що верхній валок 1 піднятий в верхнє положення, форголлер 5 ходом каретки (на рис. не показана) відведений від кліті так, що опущений шибер 2 входить в паз дорнового кільця 3. При цьому шпindel 4

форголлера 5 знаходиться в крайньому передньому положенні, в якому він опинився в момент закінчення прокатки гільзи в трубу 6.

Наступним етапом переходу до розкатки пільгерголовки 7 є витягування дорна 8 з прокатоної труби 6 за допомогою каретки, яка включається на хід назад, тобто від кліті (рис. 2, б). Величина цього ходу, позначена на рис. 2, б через L , приймається рівною довжині пільгерголовки 7, так як мається на увазі, що сумарна подача каретки для розкатки головки в трубу орієнтовно дорівнює довжині пільгерголовки. Шибер 2 утримує прокату трубу 6 і дорнове кільце 3 від зміщення при витягуванні дорна з труби.

На заключному етапі переходу до розкатки пільгерголовки (рис. 2, в) оператор стана опускає верхній валок 1 в нижнє положення, яке валок займав при прокатці труби, підіймається шибер 2 кліті в верхнє положення, звільнюючи дорнове кільце 3. Увімкненням подачі каретки вперед починається процес розкатки пільгерголовки 7 в трубу. Разом з кареткою до кліті рухається дорн з трубою, яка прокатується, та має на кінці пільгерголовку. Валки, які обертаються здійснюють обтискання головки і відкочування рухомих частин форголлера назад від кліті. В період холостого ходу валків повітряний циліндр форголлера посиляє розкату трубу з головкою вперед до валків з одночасним обертанням її навколо осі на кут, пропорційний ходу рухомих частин. Гідроциліндр подачі каретки в період холостого ходу валків переміщує каретку з форголлером на величину подачі. Так, за декілька подач здійснюється розкатка пільгерголовки в трубу.

При сталому процесі прокатки труби рухомі частини форголлера сприймають удар при зустрічі гільзи з валками як одне ціле разом з гільзою, так як гільза, по-перше, з'єднана з дорном за рахунок обтискання в калібрі валків, а по-друге, вона через дорнове кільце притиснута до дорнової головки.

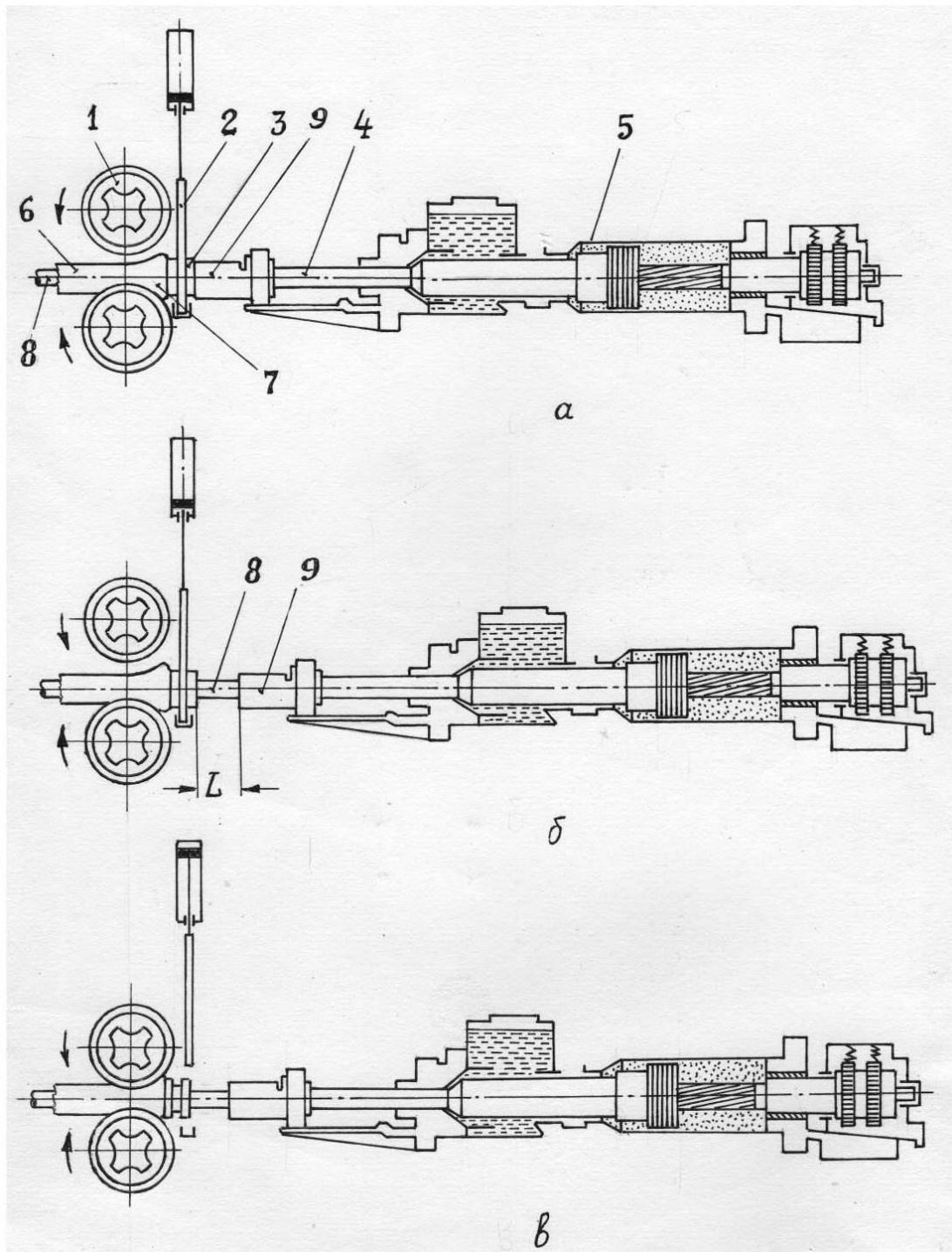


Рисунок 2 – Етапи (а, б,в) підготовки до переходу для розкатки пілігримової головки на вільній ділянці дорна

Проблеми та перспективи розвитку розклатки пільгерголовки

Метод розклатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна використовують разом з методом прокатки гільз у стик в тих випадках, коли внаслідок порушення синхронізації роботи прошивного і пілігримового станів чергова гільза надходить з більш низькою температурою, що не дозволяє здійснити процес стикування двох гільз із-за можливого перевантаження стана. В цьому випадку розклатку пільгерголовки здійснюють на попередньо звільненому від розката дорні з подальшим остаточним вивільненням дорна з труби. Недоліком метода є зменшення зчеплення розката з дорном після попереднього вивільнення останнього, що при розклатці пільгерголовки призводить до значного зміщення заднього торця гільзи при перших ударах валків. Після входу в зону деформації заднього торця гільзи в валки починають надходити поперечні перерізи пільгерголовки зі змінною прощиною. При цьому при постійній величині подачі m об'єм подачі безперервно зменшується в зв'язку зі зменшенням площі вхідного в валки перетину метала. В результаті цього безперервно зменшується і величини відката із-за зменшення коефіцієнта витяжки μ_z що приводить до порушення синхронізації системи «валки – подавальний апарат».

При використуванні безперервно- і центробіжнолитих заготовок розклатка пільгерголовок на тонкостінних трубах, де можлива найбільша ефективність цієї технології, значно ускладняється проблемою зняття труби з дорна шибєрним пристроєм із-за зминання заднього кінця труби. Тому технологія повної розклатки пільгерголовки при прокатці тонкостінних труб не знайшла практичного застосування.

Величина зміщення заднього торця розкату по дорну за один цикл прокатки (один оберт валків) залежить в основному від величини об'єму метала який задається в валки, коефіцієнта витяжки, зусилля протитиску зі сторони повітряного циліндра і умов тертя між розкатом і дорном, що підтверджується лабораторними дослідженнями в роботі [7].

В результаті пластичної течії метала по дорну відбувається зміщення заднього торця розкат в напрямку обертання валків, що зменшує фактичну

величину подачі в черговому циклі прокатки. В загальному випадку це потребує корегування подачі з врахуванням вказаного зміщення.

Загальне зміщення метала відносно дорна $\sum C$ коливається в межах 50-200 мм. Суттєвий вплив на $\sum C$ оказують довжина пільгерголовки і сумарне витягування, причому останній фактор оказує більш сильніший вплив. Так, розкатка пільгерголовок товстостінних труб супроводжується незначним зміщенням $\sum C$. Тому розкатка пільгерголовок для цього сортаменту труб отримала більш широке застосування на практиці.

Серед проблем, які маютьяся при розкатці пільгерголовки можна виділити наступні:

- розкатка пільгерголовки на вільній ділянці дорна потребує його попереднього вилучення із розката на 1,2-1,5 м; при цьому порушується зчеплення розката з дорном, що несприятливо позначається на перших циклах розкатки пільгерголовки, що приводить до зміщення розката в напрямку дорнового замка під дією валків пілігримового стана. Це в свою чергу потребує більш точного визначення величини попереднього вилучення дорна з розката з врахуванням ширини шибера і зміщення метала в кожному циклі розката пільгерголовки;
- відсутня стабілізація дорнового кільця у дорнового замка при розкатці пільгерголовки.

Розкатка пільгерголовки на вільній ділянці дорна дозволяє зменшити масу пільгерголовки на 75 % та більше. Однак при цьому суттєво збільшується час прокатки труби (час «добивання» пільгерголовки складає 20-30% від загального часу прокатки товстостінної труби), а також ускладняється робота вальцювальника стана і не виключена можливість аварії при неприпустимому порушенні синхронизації системи «валки – подавальний апарат».

Зі збільшенням діаметра труб, що прокатуються, збільшується маса пільгерголовок, що призводить до більш суттєвому зниженню ВКМ. Показник виходу годного (ВГ) характеризує ефективність використання метала в технологічному процесі. Розрахунки показали, що при існуючій технології прокатки з пільгерголовкою ВГ дорівнює 73-88%, а при розкатці пільгерголовки

на вільній ділянці дорна ВГ дорівнює 92-94%, що вище на 6-19%. Тому технологію прокатки без пільгерголовак слід вважати достатньо ефективною для більш широкого використання.

При розкатці пільгерголови на вільній ділянці дорна однією з проблем є зняття тонкостінної труби з дорну.

Якщо при товщині стінки труби після розкатки $S \geq 18$ мм зняття труби з дорна може бути здійснено за допомогою шибєрного пристрою, то при зменшенні товщини стінки труби тобто менше $S < 18$ мм, ця операція приводить до утворення «гармошки» на задньому кінці труби та росту ВКМ.

Тому необхідно для стінок з $S < 18$ мм передбачити при прокатці таких труб отримання потовщених задніх кінців зі стінкою 18 мм. Це забезпечить можливість зняття труби з дорна, но в той же час збільшить втрати металу в обрізь.

Для підвищення стабільності розкатки пільгерголови на вільній ділянці дорна за рахунок зменшення довжини L попереднього його вивільнення з розкату необхідно зберегти зчеплення розката з дорном перед розкаткою пільгерголови. Для цього відомо декілька технічних рішень (рис. 3). Одне з них (рис. 3, а) передбачає перестановку хвостовика дорна 2 в дорновій головці 3, при цьому хвостовик 5 розміщений в циліндричній розточці 4 дорнової головки 3, що забезпечує вивільнення ділянки дорна довжиною L разом з розкатом 1. При цьому операція перестановки дорна разом з розкатом здійснюється за допомогою спеціального крана (маніпулятора). Друге рішення (рис. 3, б) передбачає висування хвостовика дорна 2 з дорнової головки 3 за допомогою гідроприводу, поршень 4 якого є хвостовиком дорна. В результаті висування поршня 4 на відстань L вивільняється ділянка дорна між дорною головою 3 і розкатом 1.

Розглянуті рішення з одного боку зберігають зчеплення між розкатом і дорном після утворення пільгерголови, а з іншого – характеризується значним ускладненням конструкції обладнання та збільшенням маси рухомих частин.

Тому необхідний подальший пошук технічних рішень для усунення вказаних недоліків.

Вказане вище значне зміщення розкату по дорну при перших циклах прокатки (до 400 мм) обумовлено динамічним впливом на пільгерголовку зі сторони валків. Очевидно, що зниження впливу можливо за рахунок зниження кутової швидкості валків. Крім того може бути запропоновано створення заднього натягіння на трубу, яка знаходиться в жолобі вивідного столу пілігримового стану шляхом гальмівного впливу колодок, в першому циклі розкатки.

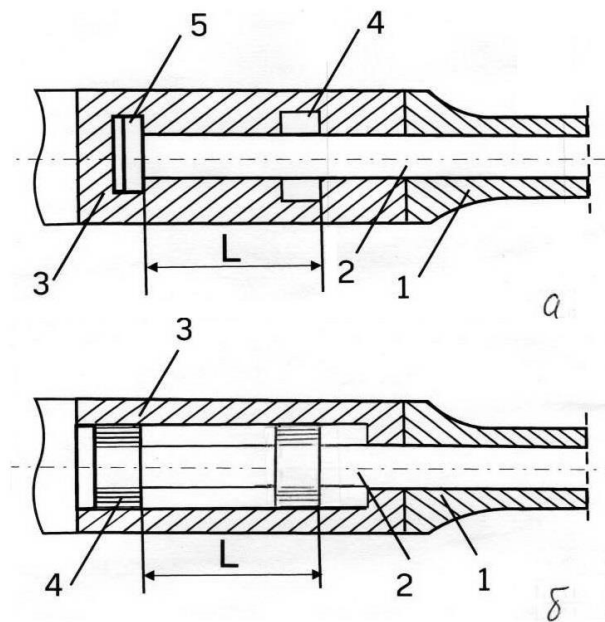


Рисунок 3 – Варіанти вивільнення дорна довжиною L для розкатки пілігримової головки: а) перестановкою хвостовика дорна в дорновій головці; б) висування дорна гідроприводом з дорнової головки

Таким чином, розкатка пільгерголовки на пілігримовому стані зустрічає значні складнощі, котрі пов'язані з її ударною взаємодією з валками стану і, як наслідок цього – зі значним переміщенням труби в напрямку подавального апарата.

Визначення зміщення розката по дорну в перших циклах розкатки пільгерголовки

Аналітичне визначення величини переміщення ускладняється тим, що міцність зчеплення труби з дорном не визначена ані теоретично ані експериментально. Тому в даній роботі прийнято припущення про повну

відсутність зчеплення труби з дорном при розкатці пільгерголовки, а відповідно, і з рухомими частинами подавального апарата, окрім сил тертя.

При розкатці пільгерголовки зчеплення між дорном і трубою порушено витягуванням дорна з труби. Яка частка зчеплення зберіглась при цьому – невідомо. Тому будемо розглядати два варіанта ударної взаємодії валків з пільгерголовкою.

Перший варіант: сили зчеплення дорна і труби після витягування дорна на величину L зберіглись, тому удар сприймають рухомі частини з трубою як одне ціле.

Другий варіант: сили зчеплення дорна і труби повністю відсутні, тому удар сприймає тільки труба.

Примітка: під питомими силами зчеплення дорна і труби мається на увазі граничні дотичні напруження здвигу на контактній поверхні дорна і труби, які залежать від нормальних напружень викликаних обтисканням та температурними деформаціями.

Перший удар валків і пільгерголовки відбувається, як було сказано вище, за рахунок хода каретки вперед, а не за рахунок розгону повітряним циліндром форголлера рухомих частин. Швидкість хода каретки невелика (близько $0,2$ м/с), тому умовно будемо вважати, що перший удар валків о пільгерголовку відбувається при нульовій швидкості рухомих частин і пільгерголовки.

При розгляданні взаємодії гільзи і пілігримових валків як механічного удару двох тіл використовуються два рівняння, які відображають закон збереження кількості руху і закон збереження кінетичної енергії. Спільне рішення цих рівнянь дозволяє отримати формули для післяударних швидкостей мас які соударяються.

Для такого випадку в роботі [8] наведені формули для розрахунку післяударних швидкостей при абсолютно пружному ударі, при якому коефіцієнти відновлення по Ньютону [9] $k = 1$:

$$v_{1m}^{k=1} = \frac{2 \cdot M_{np}}{m + M_{np}} \cdot v_{om}^{np}; \quad (1)$$

та при абсолютно непружному ударі, при якому $k = 0$:

$$v_{1m}^{k=0} = \frac{M_{\text{пр}}}{m + M_{\text{пр}}} \cdot v_{\text{ом}}^{\text{пр}} \quad (2)$$

Тут $M_{\text{пр}}$ – маса двох валків які обертаються приведена в точці А зустрічі пільгримової головки з валками (рис. 4); m – маса рухомих частин, які приймають участь в процесі удару; $v_{\text{ом}}^{\text{пр}}$ – проекція тангенціальної швидкості точки А приведення маси валка на ось прокатки.

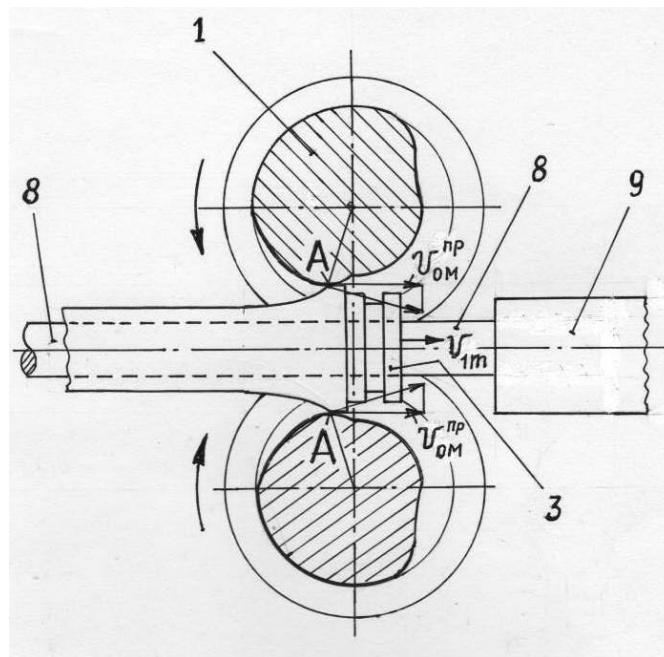


Рисунок 4 – Динамічна взаємодія валків з пільгримовою головою

Вважаємо, що дорнове кільце, яке контактує з торцем пільгерголівки, отримує в результаті удару таку ж швидкість, що і сама пільгерголівка.

Стальна гільза при температурі 1100–1150 °С, як відомо з [10], має не тільки пластичність, но і на 15-20% зберігає пружні властивості від холодного стану.

Отже, в даній взаємодії має місце так званий не цілком пружний удар, який характеризується коефіцієнтом відновлення в межах $0 < k < 1$, в даному випадку ближче до нуля. Теоретичне визначення коефіцієнта відновлення в даному випадку неможливо. Тому після ударну швидкість, яка враховує пружну складову, визначимо по вираженню:

$$v_{1m}^* = v_{1m}^{k=0} + 0,15 \cdot v_{1m}^{k=1}, \quad (3)$$

де $v_{1m}^{k=1}$ – післяударна швидкість рухомих частин форголлера при абсолютно пружному ударі; $v_{1m}^{k=0}$ – післяударна швидкість тих же частин при абсолютно непружному ударі.

Швидкості, розраховані по формулам (1), (2), (3) для двох варіантів ударної взаємодії пільгерголівки і пілігримових валків для п'яти типорозмірів труб, які прокатуються на пілігримовому стані 5÷12", представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Маси і швидкості при ударній взаємодії пільгерголівки з пілігримовими валками

Труба	$M_{пр},$ кг	$v_{ом}^{пр},$ м/с	$m, \text{ кг}$		$v_{1m}^{k=1}, \text{ м/с}$		$v_{1m}^{k=0}, \text{ м/с}$		$v_{1m}^*, \text{ м/с}$	
			I вар.	II вар.	I вар.	II вар.	I вар.	II вар.	I вар.	II вар.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
168×25	7638	1,65	7645	899	1,649	2,95	0,83	1,47	1,077	1,912
219×25	8398	1,67	8978	1549	1,614	2,82	0,81	1,40	1,052	1,823
273×30	9394	1,64	10077	2356	1,582	2,62	0,79	1,31	1,027	1,703
324×33	9902	1,46	11296	3373	1,364	2,18	0,68	1,09	0,885	1,417
377×20	10742	1,41	12698	4447	1,292	1,99	0,65	0,99	0,844	1,288

Слід звернути увагу на ту обставину, що розрахунок швидкостей по вказаним формулам виконаний при кутовій швидкості валків як при сталій прокатці труби.

Як видно з табл. 1 (графи 10, 11), післяударні швидкості рухомих частин, включаючи трубу, в 1,54÷1,78 рази менше, ніж післяударна швидкість труби, непов'язаної в одне ціле з дорном силами зчеплення.

Представляє практичний інтерес величина переміщення прокатаної труби при першому ударі валків по пільгерголівці при умові, що зчеплення між трубою і дорном порушено (варіант II). Після удару труба рухається по інерції з початковою швидкістю v_{1m}^* (табл. 1, графа 11). На трубу діє сила тертя в жолобі і на дорні від ваги труби. Напишемо рівняння руху труби під дією сил інерції і тертя:

$$-m \cdot \ddot{x} + P_{тр} = 0, \quad (4)$$

де $\ddot{x}$ – прискорення гальмування труби; $P_{тр}$ – сила тертя, яка визначається з вираження:

$$P_{тр} = m \cdot g \cdot f.$$

Тут g – прискорення сили тяжіння; f – коефіцієнт тертя.

Представимо прискорення гальмування труби в вигляді вираження:

$$\ddot{x} = v \cdot \frac{dv}{dx}.$$

Тоді рівняння (4) представимо так:

$$m \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} = m \cdot g \cdot f, \quad (5)$$

де v – поточна швидкість труби.

Інтегрування формули (5) дає рівняння:

$$\frac{v^2}{2} + C_1 = g \cdot f \cdot x + C_2, \quad (6)$$

де C_1 та C_2 – постійні інтегрування.

При $x = 0$ $v = v_{1m}^*$, тоді рівняння (6) приймає вид:

$$\frac{(v_{1m}^*)^2}{2} + C_1 = C_2; \text{ звідкіля } C_2 \pm C_1 = \frac{(v_{1m}^*)^2}{2}. \quad (7)$$

При $v = 0$ $x = x_{кон}$, рівняння (6) приймає вид:

$$C_1 = g \cdot f \cdot x_{кон} + C_2; \text{ звідкіля } C_2 \mp C_1 = g \cdot f \cdot x_{кон}. \quad (8)$$

З рівності правих частин формул (7) та (8) отримаємо формулу для розрахунку величини переміщення труби при першому ударі валків по пільгерголовці:

$$x_{кон} = \frac{(v_{1m}^*)^2}{2 \cdot g \cdot f}. \quad (9)$$

Зазвичай в розрахунках, пов'язаних з переміщенням гарячого прокату по шершавій металевій поверхні, коефіцієнт тертя ковзання приймається рівним 0,3. В нашому випадку між дорном і пілігримовою головкою існує більш тісний

контакт з можливістю (ймовірністю) схоплювання гарячого металу с дорном. Тому коефіцієнт тертя f приймаємо не менше 0,4. Величина переміщення труби після першого удару валків по пільгерголівки, розрахована по формулі (9) при $f = 0,4$ і v_{1m}^* по II варіанту, представлена в табл. 2 (графа 5).

Таблиця 2

Переміщення труби від удару пілігримових валків при розкатці пільгерголівки

Труба	Частота обертання пілігримових валків, об/хв	$X_{\text{кон}}$, мм	Частота обертання пілігримових валків, об/хв	$X_{\text{кон}}$, мм
1	2	3	4	5
168×25	68	460	34	116
219×25	66	420	33	106
273×30	64	370	32	92
324×33	59	250	29,5	64
377×20	56	210	28	53

Отримані теоретичним шляхом значення переміщень труби від удару пілігримових валків при розкатці пільгерголівки цілком узгоджуються з практичними спостереженнями.

Зменшення переміщення труби може бути досягнуто зменшенням числа обертів пілігримових валків при розкатці пільгерголівки по відношенню до числа обертів при сталому процесі прокатки труби. Розрахунки показують, що зменшення кутової швидкості валків при розкатці пільгерголівки в 2 рази по відношенню до кутової швидкості при сталому процесі прокатки труби зменшує переміщення труби від удару пілігримовими валками в $3,96 \div 4,02$ рази (див. табл. 2, графи 3, 5).

Дорнове кільце після першого удару пілігримових валків по пільгерголівці зі швидкістю $v_{1m}^* = 1,912$ м/с (див. табл. 1, графа 11) ударяє в дорнову голівку. При цьому енергія удару складає для випадка прокатки труби діаметром $\varnothing 168 \times 25$:

$$E = \frac{m_k \cdot (v_{1m}^*)^2}{2} = \frac{120 \cdot 1,912^2}{2} \approx 219 \text{ Дж},$$

де $m_k = 120 \text{ Нс}^2/\text{м}$ – маса дорнового кільця.

Така енергія удару порівняна з енергією удару пневмо- або гідромолотів малої потужності (200 Дж) і може викликати деформацію зминання контактних поверхонь як дорнового кільця, так і дорнової головки. Окрім того, удар кільця по дорновій головці передається через шліцьове з'єднання шпинделя і дрилі на упорний підшипник дрилі, що сприяє прискореному зносу як шліцьового з'єднання так і упорного підшипника.

Другий і наступні удари пілгеримових валків по пільгерголовці не будуть сприйматися дорновим кільцем, так як в момент удару не буде контакту між пільгерголовкою і дорновим кільцем.

Зменшення переміщення труби в результаті удару валків по пільгерголовці може бути досягнуто гальмівними колодками, притиснутими до труби в двох діаметрально протилежних секторах з визначеною силою. Поставимо умову, що гальмівні сили не повинні викликати пластичні деформації стінки труби, інше кажучи – не повинні приводити до сплюснення труби. Розглянув схему вигину стінки труби при сплюснуванні отримаємо приблизне вираження для визначення радіальної сили для початку сплюснення труби:

$$P_{\text{сп}} = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot h^2}{d_{\text{нар}} + h} \cdot l, \quad (10)$$

де σ_s – межа текучості матеріала труби, в нашому випадку при статичному навантаженні; h – товщина стінки труби; $d_{\text{нар}}$ – зовнішній діаметр труби; l – довжина контакту гальмівної колодки з трубою.

З урахуванням сили гальмування труби гальмівними колодками рівняння руху труби (див. формулу (4)) записується так:

$$-m \cdot \ddot{x} + P_{\text{тр}} + 2 \cdot P_{\text{сп}} \cdot f = 0.$$

Рішення цього рівняння дає наступний результат:

$$x_{\text{кон}} = \frac{(v_{1m}^*)^2}{2 \cdot f \cdot \left(g + \frac{2 \cdot P_{\text{сп}}}{m} \right)}. \quad (11)$$

Знайдемо переміщення труби $x_{\text{кон}}$ для наступних вихідних даних: труба діаметром $\varnothing 168 \times 6$; матеріал труби - сталь 45; $T = 1150^\circ \text{C}$; $f = 0,4$; $m = 899 \text{ Нс}^2/\text{м}$; $v_{\text{lm}}^* = 1,912 \text{ м/с}$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; $\sigma_s = 3 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$; $l = 0,5 \text{ м}$; $d_{\text{нар}} = 0,168 \text{ м}$; $h = 0,006 \text{ м}$.

Спочатку визначимо $P_{\text{сп}}$ по формулі (10):

$$P_{\text{сп}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 0,006^2}{0,168 + 0,006} \cdot 0,5 = 6207 \text{ Н}.$$

Потім по формулі (11) визначимо переміщення труби:

$$x_{\text{кон}} = \frac{1,912^2}{2 \cdot 0,4 \cdot \left(9,81 + \frac{2 \cdot 6207}{899} \right)} = 0,19 \text{ м}.$$

Порівнюючи отримане переміщення труби від удару пілігримових валків по пільгерголовці з даними табл. 2, приходимо до висновку, що зменшення кутової швидкості валків при розкатці пільгерголовки більш ефективно зменшує переміщення труби, чим прикладання до труби гальмівної дії колодок.

Висновки

1. Процес гарячої пілігримової прокатки труб характеризується наявністю недокатанного заднього кінця гільзи, який називається пільгерголовкою, яка видаляється в обрізь, що збільшує ВКМ.

2. Аналіз відомих рішень по зниженню втрат метала в пільгерголовку показав, що найбільш ефективним є метод розкатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна, який в той же час має цілий ряд недоліків, що перешкоджають його більш широкому застосуванню. Одним з головних недоліків є значне зміщення розкату по дорну в перших циклах розкатки пільгерголовки внаслідок динамічної взаємодії з нею валків пілігримового стана.

3. На основі теорії пружно-пластичного удару пільгерголовки і валків пілігримового стана розраховані післяударні швидкості і переміщення труб для реальних умов прокатки на стані $5 \div 12$.

4. Розглянуто два способи зменшення переміщення труби при ударі пільгерголовки і валків: це зниження в 2 рази кутової швидкості валків у

порівнянні зі швидкістю сталого процесу прокатки та застосування гальмівних колодок, які діють на трубу з діаметрально протилежних сторін.

5. Розраховані теоретичним шляхом переміщення труби в наслідок удару пільгерголовки і валків оцінюються як завищені, так як не враховано вплив вертикальних складових сили удару на зміщення труби в районі пільгерголовки і дорна. Врахування цього впливу може стати предметом окремого дослідження.

6. Порівняння розрахованих переміщень труби від удару валків і пільгерголовки для двох способів їх зменшення показує, що більш ефективно зменшує переміщення труби зниження кутової швидкості валків, чим гальмування труби за допомогою колодок. Перший спосіб не пов'язаний з деформацією труби (змінанням) і не потребує матеріальних затрат, так як електрична схема привода валків пільгримового стана забезпечує регулювання швидкості прокатки в достатньо короткий проміжок часу і також відновлення швидкості. Разом з цим поєднання двох запропонованих способів може дати повне гальмування труби, що однак, потребує додаткових досліджень.

7. Якщо допустити деформацію вмінання гальмівних колодок в стінку труби (наприклад, на кінцевій ділянці) то шлях гальмування труби від ударів валків при розкатці пільгерголовки можна звести до мінімуму (до кількох мм).

ЛІТЕРАТУРА

1. Балакин В.Ф., Угрюмов Ю.Д., Угрюмов Д.Ю. Пути снижения массы пильгерголовки при горячей прокатке труб. Теория и практика металлургии. 2012. №1-2. С. 32-36.
2. Развитие методов снижения потерь металла в пилигримовую головку при горячей прокатке труб / В.Ф. Балакин, С.Л. Стасевский и др. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2018. №2. С. 52-59.
3. Balakin V .F. Stasevsky S.L. Ugryumov Y.D. Problem of rolling the pilgrim head and their solution. Message 1. Modern engineering and innovative technologie. 2020. Issue 6. Part 1. P. 67–84. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-14-01-056>.
4. Balakin V .F. Stasevsky S.L. Ugryumov Y.D. Problem of rolling the pilgrim head and their solution. Message 2. ScientificWorld Journal. 2020. Issue 14. Part 1. P. 12–29. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-06-01-006>.
5. Пути уменьшения технологической обрезки на пилигримовом стане / С.Л. Стасевский, Ю.Д. Угрюмов и др. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. №43 (1016). С. 211-219.

6. Павловский Б.Г., Стасевский С.Л., Угрюмов Ю.Д., Гринев А.Ф. Определение технологической обреза на пилигримовых станах и прогнозирование ее уменьшения. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. №3. С. 78-84.
7. Чернявский А.А., Березовский В.В., Угрюмов Ю.Д. Экономия металла при производстве труб нефтяного сортамента. М.: Металлургия, 1987. С. 304.
8. Пути снижения динамических нагрузок пилигримового стана при горячей прокатки труб / В.Ф. Балакин, В.Д. Добряк и др. *Черная металлургия : Бюллетень НТИ «Черметинформация»*. 2011. Вып. 6. С. 53-60.
9. Гарцман С.Д. Сильверстов И.Н., Карпухин И.И. Инженерный расчет коэффициента восстановления при ударе. *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2006. №6. С. 7-10
10. Клименко П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации. Днепропетровск: Пороги, 2011. С. 187.

REFERENCES

1. Balakin V.F., Ugryumov YU.D., Ugryumov D.YU. Puti snizheniya massy pil'gergolovki pri goryachej prokatke trub. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2012. №1-2. S. 32-36.
2. Razvitie metodov snizheniya poter' metalla v piligrimovuyu golovku pri goryachej prokatke trub / V.F. Balakin, S.L. Stasevskij i dr. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2018. №2. S. 52-59.
3. Balakin V .F. Stasevsky S.L. Ugryumov Y.D. Problem of rolling the pilgrim head and their solution. *Message 1. Modern engineering and innovative technologie*. 2020. Issue 6. Part 1. P. 67–84. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-14-01-056>.
4. Balakin V .F. Stasevsky S.L. Ugryumov Y.D. Problem of rolling the pilgrim head and their solution. *Message 2. ScientificWorld Journal*. 2020. Issue 14. Part 1. P. 12–29. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2020-06-01-006>.
5. Puti umen'sheniya tekhnologicheskoy obrezi na piligrimovom stane /S.L. Stasevskij, YU.D. Ugryumov i dr. *Visnik Nacional'nogo tekhnichnogo universitetu "HPI". Seriya: Novi rishennya v suchasniy tekhnologiyah*. 2013. №43 (1016). S. 211-219.
6. Pavlovskij B.G., Stasevskij S.L., Ugryumov YU.D., Grinev A.F. Opredelenie tekhnologicheskoy obrezi na piligrimovyh stanah i prognozirovanie ee umen'sheniya. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2016. №3. S. 78-84.
7. Chernyavskij A.A., Berezovskij V.V., Ugryumov YU.D. *Ekonomiya metalla pri proizvodstve trub neftyanogo sortametnta*. М.: Металлургия, 1987. S. 304.
8. Puti snizheniya dinamicheskikh nagruzok piligrimovogo stana pri goryachej prokatki trub / V.F. Balakin, V.D. Dobryak i dr. *Chernaya metallurgiya : Byulleten' NTI «Chermetinformaciya»*. 2011. Vyp. 6. S. 53-60.
9. Garcman S.D. Sil'verstov I.N., Karpuhin I.I. Inzhenernyj raschet koefficienta vosstanovleniya pri udare. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2006. №6. S. 7-10
10. Klimenko P.L. Uprochnenie stali i cvetnyh metallov pri holodnoj i goryachej deformacii. Днепропетровск: Пороги, 2011. S. 187.

Received 10.04.2025.

Accepted 16.05.2025.

UDC 621.774.3

Volodymyr Dobriak, Yurii Uhriumov, Stanislav Stasevskyi,
Ihor Mazur, Dmytro Uhriumov

IMPROVEMENT OF METAL-SAVING TECHNOLOGY OF PIPE ROLLING ON A PILGRIMM MILL

Abstract. *The features and prospects for the development of the process of rolling a pilgrim head on the free section of the mandrel are considered. The main problem of this process is the displacement of the section along the mandrel in the direction of rotation of the pilgrim mill rolls. Based on the theory of elastic-plastic impact of the pilgrim head and mill rolls, the post-impact velocities and pipe displacements for real conditions of pilgrim rolling are calculated. Two methods of reducing the displacement of the pilgrim head during its interaction with the rolls are considered: reducing the angular velocity of the rolls during rolling of the pilgrim head and using brake pads that create back tension on the pipe.*

Keywords: *pilgrim mill, pipe, sleeve, mandrel, pilgrim head, pilgrim mill roll, forgoller, feeder, metal consumption coefficient, elastic-plastic impact.*

Добряк Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, провідний інженер, Український інститут по проектуванню металургійних заводів.

Угрюмов Юрій Дмитрович, кандидат технічних наук, провідний інженер, Український інститут по проектуванню металургійних заводів.

Стасевський Станіслав Леонідович, кандидат технічних наук, директор, Український інститут по проектуванню металургійних заводів.

Мазур Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра галузевого машинобудування, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Угрюмов Дмитро Юрійович, технічний директор, ТОВ «Морська Сюрвейерська Компанія».

Dobriak Volodymyr, candidate of technical sciences, senior engineer, Ukrainian institute for designing iron and steel works.

Uhriumov Yurii, candidate of technical sciences, senior engineer, Ukrainian institute for designing iron and steel works.

Stasevskyi Stanislav, candidate of technical sciences, director, Ukrainian institute for designing iron and steel works.

Mazur Ihor, candidate of technical sciences, associate professor, department of industrial mechanical engineering, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Uhriumov Dmytro, technical director, LLC «Marine Survey Company».

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.09

УДК 621.771.685.5

О. П. Єгоров, М. В. Михайловський, М. О. Рибальченко

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ІНВАРІАНТНОСТІ СЕПАРАТНИХ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ ШВИДКІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ З ПЕТЛЕЮ НА НЕПЕРЕРВНИХ ДРІБНОСОРТНИХ СТАНАХ

Анотація. *Стан прокату в міжклітинних проміжках неперервних дрібносортних станів визначається різницею швидкостей прокату на виході з попередньої та на вході в наступну кліть. Зміна швидкості прокатки в будь-якій кліті проміжку, що виникає під дією технологічних збурень, призводить до відхилення від початкового режиму прокатки в цьому проміжку. Усунення такого відхилення досягається цілеспрямованою корекцією частоти обертання валків однієї з клітей. Однак, при цьому порушується швидкісний режим у сусідньому по ходу прокатки міжклітинному проміжку, що приводить в дію контур регулювання натягу або петлі, а потім і наступних проміжках, що може дестабілізувати роботу всього стану. Для вирішення цієї проблеми необхідно при зміні частоти обертання валків однієї з клітей неперервної групи, одночасно узгоджено змінювати частоту обертання валків всіх наступних (по ходу прокатки) або всіх попередніх (проти ходу прокатки) клітей. Комп'ютерне моделювання функціонування системи керування швидкісним режимом прокатки у групі клітей підтвердило ефективність запропонованого методу, заснованого на системному аналізі інваріантності роботи сепаратних контурів стабілізації положення петлі прокату.*

Ключові слова: *неперервний дрібносортний стан, швидкісний режим, прокатка з петлею, сепаратні контури керування.*

Постановка проблеми

При виробництві прокату дрібного сорту основними складовими його собівартості є вартість заготовки та енергетичні витрати на її нагрівання, прокатку в головній лінії, різання на штанги та, остаточно, на мірні прутки. Усі операції з прокатки в чорновій і чистовій групах клітей та з різання прокату на летючих ножицях пов'язані зі швидкісним режимом прокатки. Під швидкісним режимом прокатки вважають прокатку в чорновій групі клітей з натягом, а в

©Єгоров О. П., Михайловський М. В., Рибальченко М. О.

чистовій групі – з петлею або прогином прокату. Прокатка з петлею або прогином (малим керованим натягом) прокату є найкращим технологічним режимом, оскільки забезпечує стабільність геометричних параметрів профілю прокату за усією довжиною. При прокатці з натягом у чорновій групі клітей виникає різноширинність прокату, пов'язана з прокаткою передніх і задніх його ділянок без натягу, а середини – з натягом.

Проведені раніше дослідження [1, 2] показали, що за рахунок прокатки з натягом у чорновій групі клітей різноширинність прокату за довжиною може досягати 10 %. Це призводить, в першу чергу, до коливань довжини прокату на виході з останньої кліті стану, а відповідно, і до додаткової обрізі при різанні його на мірні прутки. Також нестабільність геометрії профілю за довжиною викликає необхідність частого відбору проб готового прокату для запобігання прокатки за полем допуску. При цьому порушується швидкісний режим у сусідньому по ходу прокатки міжклітинному проміжку, що приводить в дію контур регулювання натягу в ньому, а потім і наступних проміжках, що може дестабілізувати роботу всього стану.

Системний аналіз роботи сепаратних контурів керування швидкісним режимом прокатки з петлею показав, що для вирішення цієї проблеми необхідно при зміні частоти обертання валків однієї з клітей неперервної групи, одночасно узгоджено змінювати частоту обертання валків всіх наступних (по ходу прокатки) або всіх попередніх (проти ходу прокатки) клітей.

Матеріали і результати дослідження

Налаштування та підтримка заданого швидкісного режиму здійснюється за допомогою системи керування швидкісним режимом прокатки, основні завдання якої:

- Розрахунок частот обертання валків клітей, відповідно до калібрування, для налаштування стану на прокатку в чорновій групі з мінімальним натягом, а в чистовій – з допустимою петлею прокату.
- Контроль та підтримання питомого натягу прокату з мінімально допустимим значенням 9-10 Н/мм².
- Утворення та підтримка заданих значень петель (прогину) прокату в чистовій групі.
- Узгоджена зміна частот обертання приводів валків суміжних клітей при розгоні та гальмуванні стану або корекції режиму прокатки в окремій групі клітей.

Сепаратні контури керування швидкісним режимом прокатки в міжклітинних проміжках пов'язані між собою як через швидкісні параметри режиму обтиснення в осередку деформації кліті, так і через частоти обертання

суміжних клітей. Основні вирази, що характеризують зв'язок натягу та петлі прокату наведені нижче:

$$T_{i,i+1} = T_{н(i,i+1)} + \frac{EQ_i}{\ell_{0i}} \int_0^t (V_{0,i+1} - V_{1i}) dt \quad (1)$$

$$\Delta \ell_i = \int_0^t (V_{1i} - V_{0,i+1}) dt \quad (2)$$

де $T_{i,i+1}$ – натяг прокату в проміжку клітей i та $i+1$; $T_{н(i,i+1)}$ – початковий натяг прокату в міжклітинному проміжку; E – модуль пружності Юнга; Q_i – площа поперечного перерізу прокату; ℓ_{0i} – відстань між валками суміжних клітей; V_{0i}, V_{1i} – відповідно швидкість прокату на вході в кліть і виході з неї; $\Delta \ell_i$ – зміна величини петлі прокату.

У разі натягу прокату змінюється розширення прокату, отже і швидкість входу прокату в кліть наступного проміжку. Крім цього, за рахунок зміни випередження змінюється і швидкість виходу прокату з попередньої кліті. Таким чином, через деякий проміжок часу встановлюється новий швидкісний режим прокатки з новим значенням натягу прокату.

Заданий швидкісний режим при керуванні натягу або петлі забезпечується керуванням частотою обертання валків клітей проти або за напрямком прокатки. Система керування швидкісним режимом прокатки є багатозв'язаною, оскільки кожен сепаратний контур пов'язаний з іншим через частоти обертання валків суміжних клітей і швидкості розкату в цих проміжках. Швидкість прокату на виході з валків попередньої кліті та вході в наступну залежить від таких технологічних факторів як випередження та коефіцієнт його витяжки. Ці параметри змінюються за довжиною прокату немонотонно.

Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування (наприклад, положенням петлі) необхідно передавати керуючий вплив на корекцію частоти обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки прокату в кожній кліті. Структурна схема системи керування швидкісним режимом вільної прокатки зображена на рисунку 1.

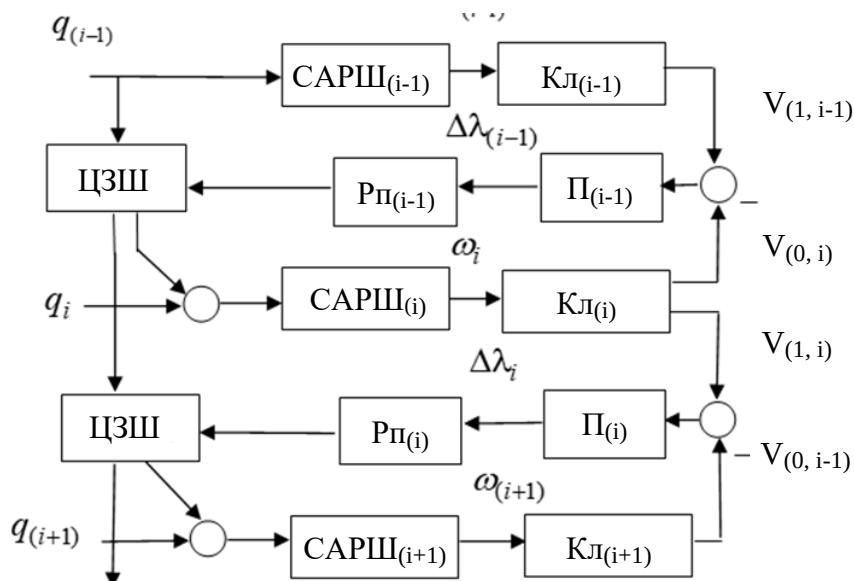


Рисунок 1 – Структурна схема системи керування швидкісним режимом вільної прокатки

Спочатку оператор, відповідно до таблиці калібрування, встановлює початкові (західні) обороти в систему регулювання швидкості валків прокатних клітей q_i . При необхідності групового узгодженого зміни частот обертання валків завдання від i -того приводу передається на всі наступні за допомогою системи групового керування – цифрового завдання швидкості (ЦЗШ). Контроль за положенням петлі прокату здійснюється за допомогою датчиків петлі Π . При відхиленні величини петлі прокату від заданого положення регулятор видає сигнал через пристрої групового керування в «свій привід» і в усі наступні, причому коефіцієнт передачі для кожного приводу повинен відповідати співвідношенню частот обертання валків суміжних клітей. Якщо керуючий вплив регулятора петлі i -тої кліті, що видається в систему автоматичного регулювання швидкості (САРШ) i -тої кліті, є керуючим, то для подальшого міжклітинного проміжку це збурення, що призводить до зміни величини петлі. Якщо одночасно подавати керуючий вплив в САРШ i -тої кліті й в САРШ $(i+1)$ -ої кліті, то в систему петлерегулювання збурювальні впливи внесені не будуть.

Коефіцієнт передачі керуючого впливу від регуляторів петлі САРШ приводів валків залежить від радіусів валків, випереджень, коефіцієнтів витяжки. Зношування калібрів – повільно діючий фактор, випередження в клітях приблизно однакові і не значно змінюються в процесі прокатки. Виняток становить коефіцієнт витяжки, на значення якого впливають режими прокатки, коливання площі поперечного перерізу заготовки та ін. Зі сказаного слід, що необхідно повести дослідження впливу неузгодженості встановленого

коефіцієнта передачі впливу регулятора петлі на наступний привід валків і фактичного, що визначається за виразом

$$\frac{\omega_{i+1}}{\omega_i} = \frac{R_{i+1}(1 + S_{i+1})\lambda_{i+1}}{R_i(1 + S_i)} \quad (3)$$

Аналіз ефективності запропонованого методу узгодженого керування було проведено на комп'ютерній моделі системи керування швидкісним режимом вільної прокатки. Для порівняння на графіках 2 і 3 зображені перехідні процеси в послідовних контурах петлерегулювання. При керуванні положенням петлі в одному контурі збурення передається на наступний сепаратний контур (рис. 2, а), а при узгодженому керуванні цього не відбувається (рис. 2, б).

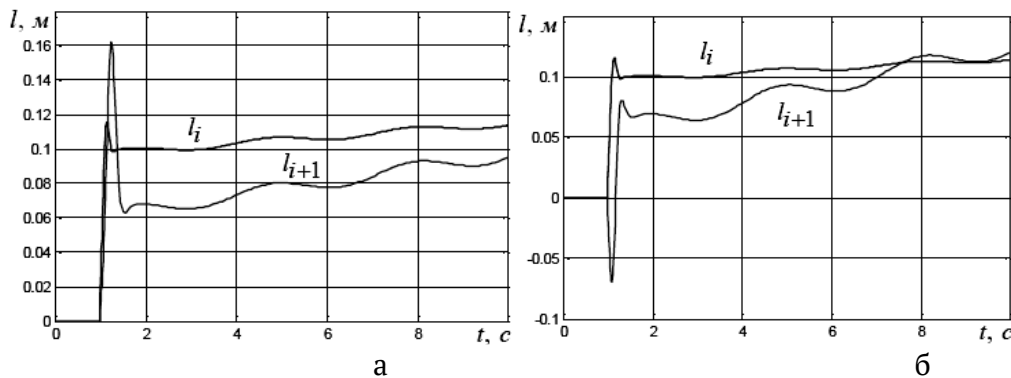


Рисунок 2 – Перехідні процеси петлерегулювання в контурах i та $i+1$:
а) з узгодженою передачею керуючого впливу регуляторів петлі;
б) при незузгодженому керуванні

Розглянемо багатозв'язану систему керування швидкісним режимом групи прокатних клітей.

При розгоні та гальмуванні групи приводів можлива несинхронність їх роботи внаслідок різного завантаження. При розгоні двигуна приводу валків, крім статичної складової струму якорного ланцюга, виникають і динамічні складові. При цьому, в залежності від величини статичного моменту, в одних приводах струм в якорному ланцюзі може перевищити струмообмеження і обмежити темп розгону, а в інших ні. Таким чином, частина приводів буде розганятися із струмообмеженням, а інші ні. Це призведе до різного значення прискорень приводів у групі та порушення узгодженого режиму прокатки. Для

усунення цього явища запропоновано систему керування [3], схему якої зображено на рисунку 3.

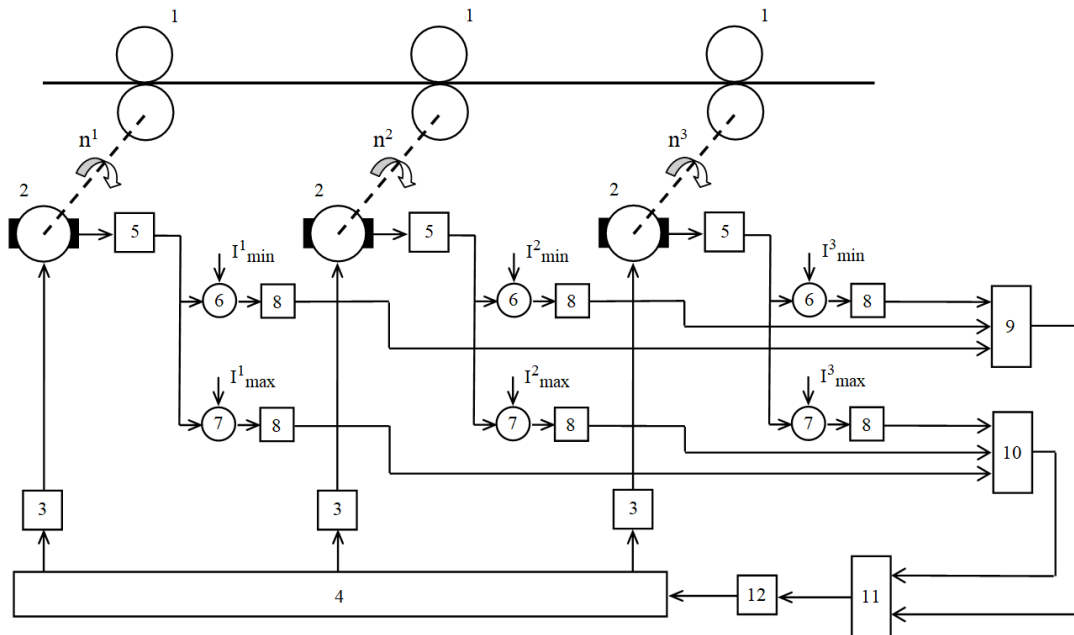


Рисунок 3 – Схема багатозв'язаної системи керування швидкісним режимом групи прокатних клітей

Швидкісний режим прокатки ведеться за рахунок обертання валків прокатних клітей 1 електродвигунами 2. Керування електродвигунами здійснюється відповідними САРШ 3. Завдання на узгоджене керування надходить до САРШ кожної кліті від системи групового керування ЦЗШ 4. Струм якорних ланцюгів контролюється датчиками струму 5. У блоках 6 і 7 поточні значення цих струмів порівнюються, відповідно, з мінімальним та максимальним допустимими значеннями. При цьому повинні дотримуватися такі нерівності:

$$\begin{aligned} I_{\min}^1 &\leq I^1 < I_{\max}^1, \\ I_{\min}^2 &\leq I^2 < I_{\max}^2, \\ I_{\min}^3 &\leq I^3 < I_{\max}^3, \end{aligned} \quad (4)$$

де I^1, I^2, I^3 – сигнали на виходах датчиків струму якорів відповідних двигунів; $I_{\min}^1, I_{\min}^2, I_{\min}^3$ – уставки мінімального струму якорів відповідних

двигунів; $I_{\max}^1$, $I_{\max}^2$, $I_{\max}^3$ – уставки максимального струму якірів відповідних двигунів.

При виконанні нерівностей (4) сигнали на виходах всіх нуль-органів 8 і, отже, на виходах логічних елементів АБО 9 і 10 відсутні. Ці логічні елементи під'єднані до блоку комутації 11, вихід якого через блок керування 12 підключений до входу блоку завдання частоти обертання валків ЦЗШ 4. При налаштуванні прокатного стану на іншу швидкість, якщо нерівності (4) виконуються, то електроприводи змінюють швидкість обертання валків відповідно до зміни завдання. Якщо величина струму досягне свого мінімуму, то підключиться максимально можливий темп зміни сигналу завдання. Це відбувається до тих пір, поки значення струму якоря електродвигуна не повернеться у задані межі.

Для керування швидкісним режимом прокатки розроблена система, схема якої зображена на рисунку 4.

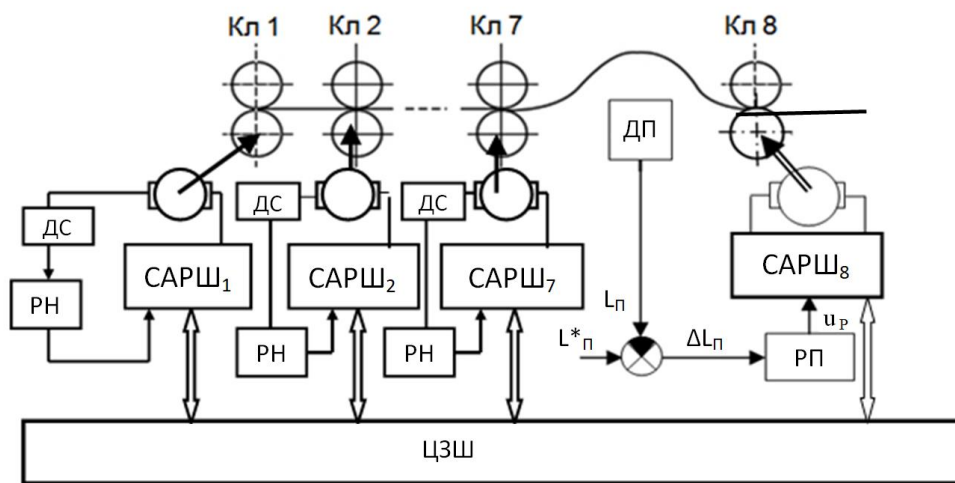


Рисунок 4 – Система керування швидкісним режимом прокатки

Тут, за результатами вимірювання датчиками ДС якірних струмів ланцюгів двигунів приводів валків клітей в чорновій групі, за допомогою регуляторів натягу РН і систем автоматичного регулювання швидкості САРШ валків клітей здійснюється налаштування режиму натягу прокату при заході його передньої ділянки. У чистовій групі клітей за допомогою керуючого

впливу u_P , що виробляється регулятором РП, здійснюється зміна величини петлі прокату L_P , яка вимірюється датчиком петлі ДП.

Розглянемо контур керування петлею прокату (рис. 5). Контроль положення петлі здійснюється за величиною стріли прогину, контрольованої або оптичними, або ємнісними датчиками. При відхиленні петлі від заданого положення регулятор петлі видає завдання або тільки в систему керування частотою обертання валків кліті наступної за регульованим проміжком, або, додатково, в системи керування приводами валків усіх наступних клітей. Таке керування називається керуванням вперед. Можлива також передача керуючого впливу в приводи проти ходу прокатки (керування назад).

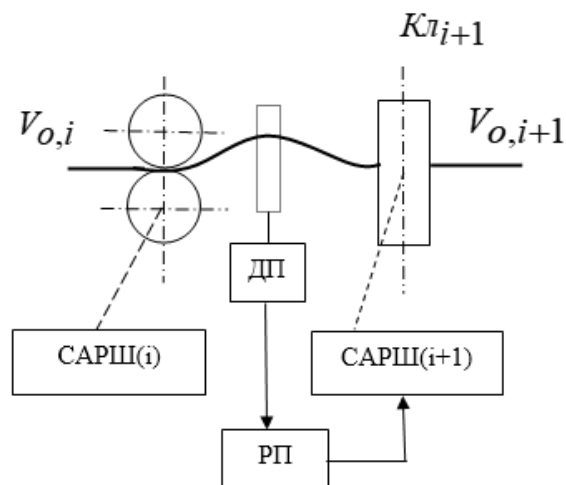


Рисунок 5 – Структурна схема контуру регулювання петлею прокату:

САПШ – система автоматичного регулювання швидкості;

ДП – датчик петлі прокату; РП – регулятор петлі прокату

Усі системи працюють незалежно завдяки системі цифрового завдання швидкостей ЦЗШ, при цьому зміна частоти обертання валків відбувається за збереження співвідношення частот обертання валків суміжних клітей.

Непряму оцінку зміни коефіцієнта витяжки прокату отримаємо, виразивши швидкість розкату через частоту обертання приводів, робочі радіуси та випередження:

$$\Delta \ell_i = \int_0^t \left(\omega_i R_i (1 + S_1) - \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\lambda_{i+1}} \right) dt, \quad (5)$$

де R_i, R_{i+1} – робочі радіуси i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; S_i, S_{i+1} – випередження в i -тій та $(i+1)$ -тій клітях; ω_i, ω_{i+1} – частота обертання приводів i -тої та $(i+1)$ -тої клітей; λ_{i+1} – коефіцієнт витяжки розкату в $(i+1)$ -тій кліті, що визначається як

$$\lambda_{i+1} = \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{d\Delta l_i}{dt}}. \quad (6)$$

Висновки

Системний аналіз процесу регулювання прокатки дозволив суттєво підвищити ефективність роботи кожного контуру стабілізації технологічного режиму у розробленій системі керування. Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування (наприклад, положенням петлі) необхідно передавати керуючий вплив на корекцію частот обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки розкату в кожній кліті. Комп'ютерне моделювання швидкісного режиму прокатки з петлею на неперервному дрібносортному стані підтвердило ефективність запропонованого методу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Егоров А. П. Совершенствование системы автоматического управления многосвязными электроприводами группы прокатных клетей при прокатке с петлерегулированием: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Егоров Александр Петрович. – Днепропетровск: ДМетИ, 1981. – 161 с.
2. Підвищення енергоефективності електромеханічного комплексу виробництва сортового прокату: звіт з НДР (заключ.) : / Національна металургійна академія України; кер. Егоров О. П. – Дніпропетровськ, 2014. – 151 с. – № ДР 0113U003260с.
3. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография / А. С. Бешта, В. Н. Куваев, О. Е. Потап, А. П. Егоров. Днепропетровск: Журфонд, 2014. – 283 с.

REFERENCES

1. Yegorov, A. P. Sovershenstvovanie systemy avtomaticheskoho upravleniya mnohosviaznyimi elektropriyvodami hruppy prokatnykh kletei pry prokatke s petlerehulyrovanyem: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.09.03 / Yegorov Oleksandr Petrovych. – Dnepropetrovsk: DMetI, 1981. – 161 s.
2. Pidvyshchennia enerhoefektyvnosti elektromekhanichnoho kompleksu vyrobnytstva sortovoho prokatu: zvit z NDR / ker. Yegorov O. P. № DR 0113U003260s. Dnipropetrovsk: Natsionalna metalurhiina akademiia Ukrainy, 2014. 151 s.
3. Avtomatyzatsiya tekhnolohicheskikh protsessov na melkosortnykh prokatnykh stanakh: monohrafyia / A. S. Beshta, V. N. Kuvaev, O. E. Potap, A. P. Yegorov. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 2014. 283 s.

Received 20.04.2025.

Accepted 16.05.2025.

UDK 621.771.685.5

O. P. Yegorov, M. V. Mykhailovskyi, M. O. Rybalchenko

**SYSTEMATIC ANALYSIS OF INVARIANCE OF SEPARATE CONTROL
CIRCUITS OF HIGH-SPEED ROLLING WITH A LOOP ON CONTINUOUS
SMALL SECTION MILL**

Abstract. *The condition of the rolled products in the interstand gaps of continuous small-section mills is determined by the difference in rolling speeds at the exit from the previous stand and at the entrance to the next stand. A change in the rolling speed in any of the stands in the gap, arising under the action of process disturbances, leads to a deviation from the initial rolling mode in this gap. Elimination of such a deviation is achieved by targeted correction of the roll speed of one of the stands. However, this disrupts the speed mode in the adjacent interstand gap along the rolling direction, which activates the tension control circuit in it, and then in the subsequent gaps, which can destabilize the operation of the entire mill. To solve this problem, when changing the roll speed of one of the stands of the continuous group, it is necessary to simultaneously change the roll speed of all subsequent (along the rolling direction) or all previous (counter-rolling direction) stands. Computer modeling of the functioning of the high-speed rolling mode control system in a group of stands confirmed the effectiveness of the proposed method, based on a systematic analysis of the invariance of the operation of separate circuits of the rolling loop position stabilization.*

Keywords: *continuous small-section mill, speed mode, rolling with a loop, separate control circuits.*

Єгоров Олександр Петрович, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів.
Український державний університет науки і технологій

Михайловський Микола Володимирович, доцент кафедри автоматизації
виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій

Рибальченко Марія Олександрівна, завідувач кафедри автоматизації виробничих
процесів, Український державний університет науки і технологій

Yegorov Oleksandr Petrovych, associate professor of the Department of Automation of
Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology

Mykhailovskyi Mykola Volodymyrovych, associate professor of the Department of
Automation of Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology

Rybalchenko Mariya Oleksandrivna, head of the Department of Automation of
Production Processes, Ukrainian State University of Science and Technology

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.10

УДК 691.735:620.173.2

Т.В. Кімстач, К.І. Узлов

СИНЕРГЕТИЧНИЙ ТА СЕЛЕКТИВНИЙ ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БРОНЗИ СИСТЕМИ CU-AL-SI-SN-MN

Анотація. Представлено результати досліджень синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості ливарної бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, розплав якої був залитий та охолоджений в піщану та сталеву ливарні форми.

Мета роботи - встановити закономірності синергетичного та селективного впливу легуючих компонентів та умов формування литої термічно не обробленої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при масовому вмісті алюмінію – 6,0...7,5%, кремнію – 1,0...2,5%, марганцю – 0,21...0,45%, олова – 1,0...2,2% на її механічні властивості при нормальній температурі, розплав якої був залитий в піщану та сталеву ливарну форму.

Для визначення комплексного впливу хімічного складу досліджуваної бронзи на її механічні властивості використали критерій, K_R , який є певним співвідношенням легуючих елементів бронзи та її домішок. Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Інтервал температур за яким розраховували середньозважену швидкість охолодження бронзових зразків визначали за результатами диференційного термогравіметричного аналізу, який проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C «Jupiter» фірми NETZSCH (Німеччина). Механічні властивості бронз визначали за результатами руйнування зразків на машині FP-100/1 та маятниковому копрі PSW-30. Твердість за Брінелем визначали на приладі ТШ-2.

Встановлено, що синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на границі міцності та плинності бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn визначається більшою мірою швидкістю охолодження бронзи в ливарній формі, підвищення якої призводить до інверсії характеру селективного впливу легуючих компонентів на міцність. Характер селективного впливу хімічних елементів на границю плинності та твердість лише частково змінюється по відношенню до олова і

зовсім не впливає на характер змін показників пластичності бронзи. При цьому, з підвищенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі ступінь синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn зменшується. З числа легуючих елементів в бронзах системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, за характером впливу на рівень механічних властивостей, твердості та долі хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, алюміній є антиподом до олова, кремнію та марганцю.

Ключові слова: бронза, міцність, пластичність, твердість, властивості, алюміній, кокіль, піщана форма, магнітна проникність

Вступ

Промислові алюмінієві бронзи – сучасні сплави великотоннажного виробництва на основі міді з обов'язковим вмістом алюмінію в кількості 5...14% (за масою). За вмістом алюмінію алюмінієві бронзи поділяють на однофазні (подвійні та потрійні за кількістю компонентів), які містять 5...9% Al та багатофазні (багатокомпонентні) бронзи з вмістом алюмінію 6,5...14%, заліза та/або нікелю (до 6% кожного), марганцю (до 3,5%), кремнію (до 2,5%) та ін.

Алюмінієві бронзи характеризуються високим рівнем механічних властивостей, твердості, стійкості до корозії в природних умовах та багатьох середовищах техногенного походження, низьким рівнем магнітної проникності, іскровою безпекою, бактерицидністю, біостатичністю та ін. Вони придатні як для виготовлення виробів способами лиття та механічної обробки, так і способами деформаційної обробки у холодному та гарячому стані. Все це дозволило використовувати алюмінієві бронзи для виробництва виробів суднобудування, систем опріснення морської води, нафтогазової, хімічної, нафтохімічної, гірничодобувної, оборонної, харчової, аерокосмічної промисловості, тощо. [1, 2]. При цьому маса сучасних виливків з алюмінієвих бронз становить від декількох грамів у ювелірних та художніх виробів до 70 т у суднобудуванні [3].

Тим не менш, для розширення технічних можливостей, підвищення надійності та довговічності сучасної техніки потрібно не лише вдосконалення існуючих, а й створення нових сплавів, зокрема бронз з різними наборами комплексів преференційних властивостей. При створенні таких бронз

особливого значення набувають знання як про синергетичний, так і селективний вплив легуючих компонентів литих бронз, формування структури і властивостей яких може відбуватися за різних умов.

Стан питання

Сучасні підходи до розробки хімічного складу будь-яких бронз базуються на ретельному врахуванні впливу кожного їх хімічного елемента на їх властивості. Це дозволяє обґрунтувати оптимальний або раціональний склад будь-якої бронзи, зокрема, ливарної багатокомпонентної високоміцної корозійностійкої немагнітної. При цьому, вибір кількісних параметрів для легування бронзи залежить від поєднання обраних хімічних елементів, їх взаємодії та впливу на структуру сплаву. Про це, зокрема, свідчать дані таблиці 1.

Виходячи з цього, для встановлення раціонального складу бронзи з заданими пріоритетними властивостями проводять оцінювання індивідуального впливу хімічних елементів на властивості алюмінієвої бронзи, зокрема, використовуючи наступні загально прийняті уявлення [3-6]:

алюміній – основний легувальний немагнітний компонент алюмінієвих бронз, який суттєво підвищує їх механічні та споживчі властивості. При масовому вмісті вище 5% алюміній забезпечує бронзі високу корозійну стійкість в різних середовищах, зокрема, в морській воді. Перевищення вмісту алюмінію за 7,4% призводить до появи в структурі бронз системи Cu-Al β -фази (Cu_3Al) яка підвищує рівень механічних властивостей бронзи, але при вмісті більше 9% алюміній погіршує корозійну стійкість бронзи в вологому повітрі [5, 6]. Виходячи з цього, стандартами багатьох країн світу в таких бронзах затверджено масовий вміст алюмінію 5% та 7% (марки БрА5, БрА7), які мають невисоку корозійну стійкість в перегрітій водяній парі, але, будучи однофазними, дуже пластичні завдяки чому їх переважно використовують для виготовлення виробів методами ОМТ або шляхом механічної обробки деформованих заготовок.

Таблиця 1

Типовий склад та область використання виробів з алюмінієвих бронз
за стандартами Сполучених Штатів Америки

Бронза (стандарт)	Вміст основних хімічних елементів, % (мас.)					Область виробів використання
	Cu	Al	Fe	Ni	Mn	
C95200 (ASTM B505, B271)	91	8,5-9,5	≤0,1	≤0,2	≤0,1	Вироби загального призначення у тому числі ті, що працюють в умовах тертя та підвищених навантажень
C95400 (ASTM B148, B763)	85	10-11,5	3-4	≤0,5	≤0,5	Вироби загального призначення у тому числі деталі для аерокосмічної промисловості та важкого машинобудування
C95500 (ASTM B148)	80	10-11	3-5	4-5	≤0,5	Морські судна та обладнання, що працює в морській воді та соляному тумані, гребні гвинти
C95800 (ASTM B150)	79-81	9-11	4-5	4-5	≤0,5	Вироби з низьким коефіцієнтом тертя, у тому числі підшипники ковзання та втулки

➤ кремній - немагнітний матеріал, який при вмісті до 2% підвищує ливарні властивості, твердість, стійкість до високотемпературного окиснення бронз, покращує оброблюваність лезовим інструментом, але водночас знижує їх герметичність. Додавання Si у невеликій кількості до алюмінієвої бронзи дозволяє отримати однофазну структуру з підвищенням міцністю, твердістю та корозійною стійкістю, а обробка тиском суттєво підвищує рівні її механічних властивостей. Такою бронзою, наприклад, є бронза БрА7К2 (бронза C95600 за стандартом ASTM [7]). Надлишковий вміст кремнію в такій бронзі призводить до виникнення в її структурі β-фази системи Cu-Si, що надає бронзі крихкості. Виходячи з викладеного, вміст кремнію та алюмінію в багатокомпонентних

немагнітних корозійностійких ливарних бронзах доцільно обмежувати, відповідно – 1,0...2,5% і 5,0...7,5%.

➤ марганець - багатофункціональний у бронзі елемент, який підвищує жароміцність, міцність, пластичність, антифрикційні властивості і корозійну стійкість алюмінієвих бронз за нормальної температури, водночас виконуючи функцію розкислювача бронзи. Але Mn при цьому знижує її рідкоплинність та лінійну усадку виливків. До 2% марганець підвищує міцність, ударну в'язкість, корозійну стійкість бронзи. Вміст марганцю понад ~2% за певних умов може сприяти утворенню феромагнітного інтерметаліду Cu_2MnAl , що надає алюмінієвій бронзі магнітних властивостей [8]. Тому, в багатокомпонентній алюмінієвій бронзі доцільно максимальний вміст марганцю обмежити 0,45% з метою уникнення виникнення в структурі бронзи феромагнітного інтерметаліду.

➤ олово – вже невеликий вміст Sn в системі Cu-Al сприяє формуванню в бронзі багатофазної структури, що надає їй ливарних властивостей. За даними [9], олово - активний “регулятор” рівнів механічних властивостей багатофазної алюмінієвої бронзи вміст якого, тим не менш, рекомендовано обмежити 3...4%. В той же час, за даними [10], олово – не типовий легуючий елемент алюмінієвих бронз, який, в порівнянні з залізом, нікелем та марганцем, незначно покращує їх деякі властивості.

➤ цинк – розкислювач для будь-якої бронзи, який підвищує ливарні властивості кремнієвих бронз, знижує лінійну усадку та зменшує інтервал кристалізації, гарячеламкість і газонасиченість олов'яних бронз, поліпшує механічні властивості та якість поверхонь виливків з будь-яких бронз, підвищує їх корозійну стійкість та механічну оброблюваність лезовим інструментом. З точки зору процесу плавки, цинк є небажаним компонентом, що зумовлено токсичністю його пари, яка у великій кількості виникає під час та після введення цинку у розплав [11, 12].

➤ залізо, нікель, кобальт - небажані хімічні елементами для немагнітних бронз, оскільки вони надають бронзам магнітних властивостей. Для забезпечення величини магнітної проникності $\mu_a \leq 1,05$ Гн/м сумарний вміст Fe, Ni та Co в бронзі доцільно обмежити 0,17%.

➤ неминучі домішки, такі як фосфор, миш'як та інші, можуть негативно впливати на структуру і властивості бронзи. Їх загальний вміст має не перевищувати 0,45%, щоб уникнути деградації матеріалу. У цьому контексті особливо важливо щоб сукупний масовий вміст Fe, Ni та Co в сумі неминучих домішок не перевищував 0,17%.

➤ синергетичний вплив елементів через різноманіття комбінацій вмісту легувальних елементів в бронзі дозволяє оптимізувати її хімічний склад за фазовим складом і, завдяки цьому, механічні, технологічні, експлуатаційні, споживчі, корозійні, магнітні та інші різновиди властивостей та показників. Зокрема:

1. Cu-Al – при вмісті алюмінію до 9,25% за масою це однофазні немагнітні корозійностійкі бронзи, які орієнтовані на виготовлення виробів способами ОМТ у зв'язку з їх малою міцністю, великою лінійною усадкою і пластичністю в литому стані.

2. Cu-Al-Si – це однофазні немагнітні корозійностійкі бронзи, які орієнтовані на виготовлення виробів способами ОМТ у зв'язку з їх малою міцністю, високою лінійною усадкою і пластичністю в литому стані, але більш міцні ніж бронзи системи Cu-Al після їх деформаційної обробки.

3. Cu-Al-Fe-Ni – це багатофазні магнітні ливарні бронзи, які мають високі міцність, твердість, корозійну та кавітаційну стійкість, невелику пластичність та лінійну усадку в литому стані, стабілізовану нікелем структуру.

4. Cu-Al-Si-Sn-Mn – це багатофазні бронзи, перспективні як ливарні немагнітні корозійно-стійкі термічно зміцнювані сплави.

За відсутністю даних щодо селективного впливу компонентів бронзи даної системи на її структуру і властивості доцільно прийняти адекватний безрозмірний критерій (масове співвідношення компонентів в бронзі) використання якого дозволить виявити зв'язки між складом і структурою бронз та їх властивостями. При цьому, вміст легуючих елементів доцільно обмежити величинами, які витікають з результатів приведеного вище аналізу селективного впливу обраних легуючих елементів.

Мета роботи

Мета роботи - встановити закономірності синергетичного та селективного впливу легуючих компонентів та умов формування литої термічно не обробленої бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn при масовому вмісті Al=6,0...7,5%, Si=1,0...2,5%, Mn=0,21...0,45%, Sn=1,0...2,2% на її механічні властивості при нормальній температурі, розплав якої був залитий в піщану та сталеву ливарну форму.

Методика досліджень

Дослідження механічних властивостей бронзи проводили при наступному масовому вмісті їх компонентів, %: алюміній – 6,0...7,5, кремній – 1,0...2,5, марганець – 0,21...0,45, олово – 1,0...2,2 та інші домішки (nn) – до 0,45, мідь – залишок.

Для плавки бронз використали: мідь катодна марки М2 (ДСТУ 3211-2009); алюміній марки Al99,7 (ДСТУ ISO 209-1:2002); кремній марки Kp1 (ДСТУ 2963-94); олово марки О1 (ДСТУ EN 610:2004); марганець металевий Mn95 (ГОСТ 6008-90); силікомарганець MnC17 (ДСТУ ГОСТ 16591.4:2009).

Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем металоємністю за міддю 15 кг з використанням деревного вугілля. Після розплавлення наважок шихти температуру розплаву в тиглі підвищували до 1250 ± 10 °C, розкислювали марганцем або силікомарганцем і заливали у піщану ливарну форму та сталевий кокіль. Бронзові виливки в піщаних формах охолоджували впродовж 24 годин, в кокілях - впродовж 6...7 хв. З охолоджених виливків вирізали зразки для проведення хімічного аналізу, виміру магнітної проникності та їх лінійних розмірів, металографічних досліджень та досліджень механічних властивостей.

Хімічний склад виплавлених бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L. Інтервал температур за яким розраховували середньозважену швидкість охолодження бронзових зразків визначали за результатами проведення диференційного термогравіметричного аналізу (ДТГА) певних зразків бронзи. Аналіз бронзових зразків масою 1,2...1,7 г проводили на синхронному термічному аналізаторі STA 449 C «Jupiter» фірми NETZSCH (Німеччина). У ході аналізу досліджувані зразки бронзи нагрівали з 20 °C до 1220 °C та охолоджували до температури ~250 °C в алундових тиглях із швидкістю 20 °C/хв у середовищі аргону. Інтервал за яким в подальшому

проводили розрахунок швидкості охолодження бронзи відповідав температурному інтервалу, в якому під час охолодження відбувалося формування хімічної сполуки в структурі бронзи.

Швидкості охолодження зразків бронзи проводили розрахунком з використанням термограм їх затвердіння та охолодження в ливарній формі з піщано-рідкоскляної суміші (піщана ливарна форма) та сталевому кокіль з початковою температурою 120 ± 10 °С. Термографування проводили на зразках $16 \times 16 \times 110$ мм за схемою на рис. 1.

Термографування проводили з використанням хромель-алюмелевих термопар, що мали діаметр гарячого спаю термоелектродів до 0,3 мм, та електронного потенціометра з автоматичним записом та архівацією електронних протоколів.

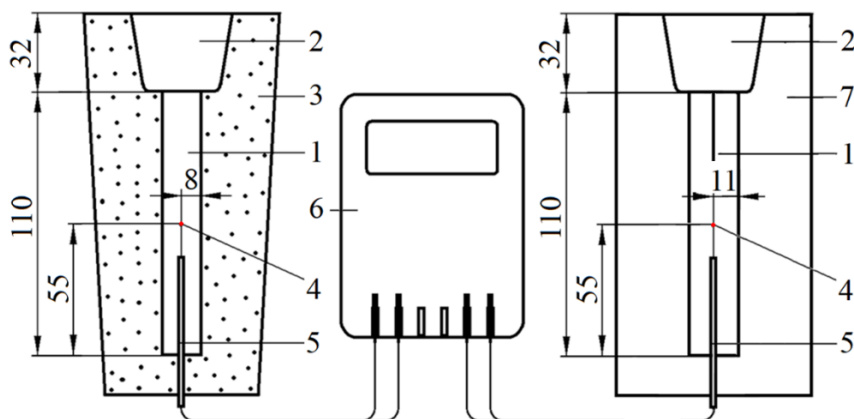


Рисунок 1 – Схема розміщення гарячого спаю термопар в ливарній формі:
1 – виливок (зразок); 2 – надлив; 3 – ливарна форма; 4 – гарячий спай термопар;
5 – керамічна “соломка”; 6 – електронний регістратор температури; 7 – кокіль

Визначення механічних властивостей бронз проводили при 20 ± 1 °С на універсальній випробувальній машині FP-100/1, величину ударної в'язкості розраховували за результатами випробувань зразків на маятниковому копрі PSW-30. Твердість за Брінелем визначали відповідно до ДСТУ EN ISO 6506-1:2019 на приладі ТШ-2 з навантаженням 2452 Н з кулькою індентора $\varnothing 5$ мм. Для визначення твердості використовували зразки, які вирізали з центральної частини виливків, і за схемою, що схематично представлено на рис. 2.

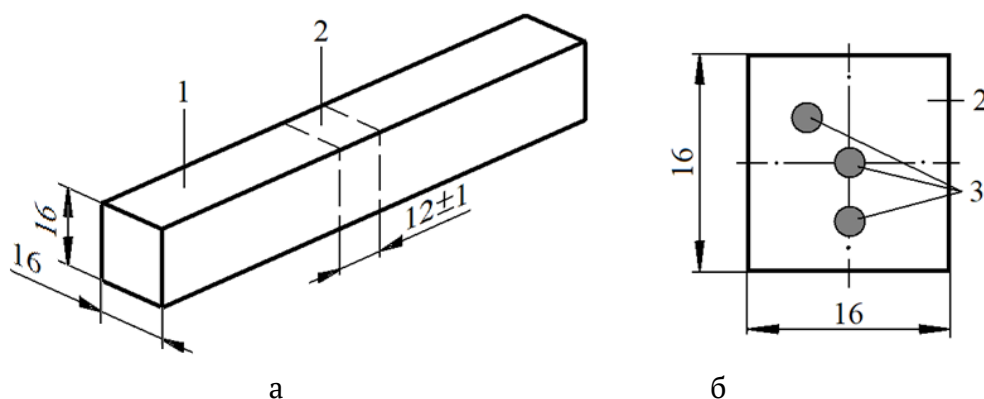


Рисунок 2 – Схема вирізки зразку (а) та місць вимірювання твердості (б):
1 – виливок; 2 – зразок для вимірювання твердості;
3 – місця “наколів” індентора

Для досліджень синергетичного впливу легуючих елементів на механічні властивості за результатами системного аналізу властивостей бронз та експериментальних даних досліджуваної бронзи було прийнято критерій K_R , який являє собою наступне масове співвідношення складових бронзи:

$$K_R = \left(1 - \frac{nn}{100}\right) \times \frac{Al - Si - Mn}{(1 + Sn)^2} \quad (1)$$

де nn , Al , Si , Sn , Mn – масовий вміст домішок, алюмінію, кремнію, олова та марганцю у бронзі, відповідно, %; 100 – балансова константа.

Виявлення селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи проводили за наступною методикою:

- за результатами експериментальних досліджень будували графічні залежності кожного з обраних показників механічних властивостей від величини критерію K_R ;
- після побудування графічних залежностей за допомогою комп'ютерної програми Excel додавали до кожної з побудованих залежностей лінію їх тренду та визначали їх параметри (вид рівнянь та числові величини їх коефіцієнтів, величини достовірності апроксимації);
- використовуючи рівняння ліній тренду, розраховували величини змін параметрів механічних властивостей, для чого попередньо розраховували величини K_R при послідовній зміні кожного з легуючих компонентів

досліджуваної бронзи в прийнятих межах їх змін при незмінних середніх величинах вмісту в бронзі всіх інших легуючих елементів.

Результати досліджень

Відповідно до прийнятої методики, встановлення температур початку та завершення перетворень структури в бронзах з різною величиною критерію K_R , що були залиті в піщану форму, проводили нагрівання бронзи в приладі ДТГА. Результати проведення ДТГА по нагріванню зразків бронз представлено на рис. 3 та рис. 4.

За результатами ДТГА встановлено, що для досліджуваних бронз в інтервалі змін $K_R=0,35...2,07$ температура ліквідус, як і температурний інтервал кристалізації мало залежні від змін хімічного складу бронз. Тобто, в інтервалі змін $K_R=0,35...2,07$ температура ліквідус знаходиться в межах $\sim 997...1019$ °С, а температурний інтервал кристалізації в межах $\sim 32...48$ °С. В той же час, інтерметалідна фаза в структурі досліджуваних бронз виникає в інтервалі температур $611,2...475$ °С який зі зменшенням величини K_R зростає від 1°С при $K_R=2,07$ та $K_R=0,84$ до 31°С при $K_R=0,46$ і до 108,2 °С при $K_R=0,35$.

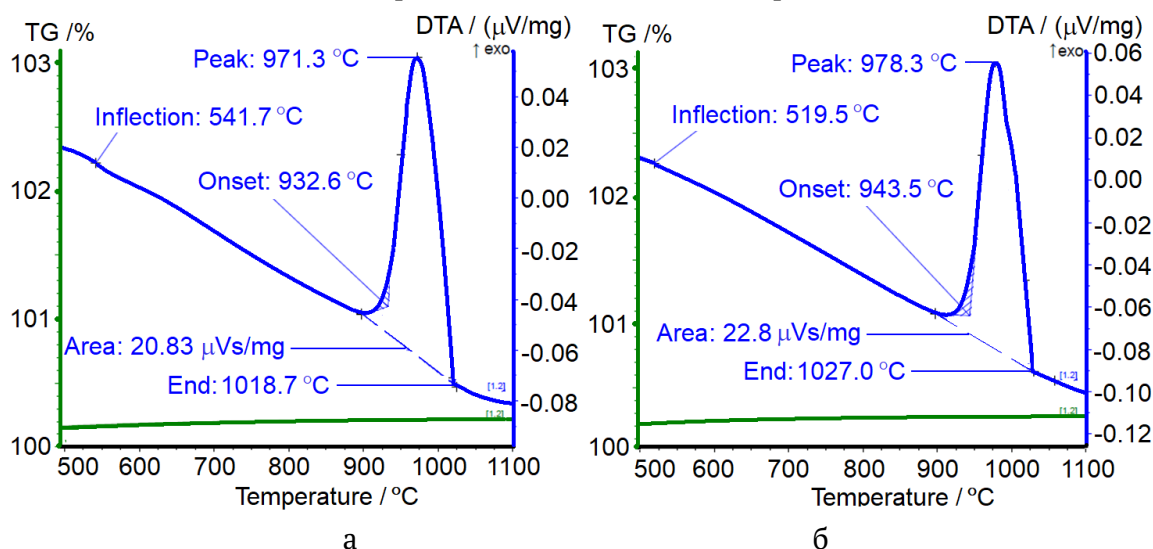
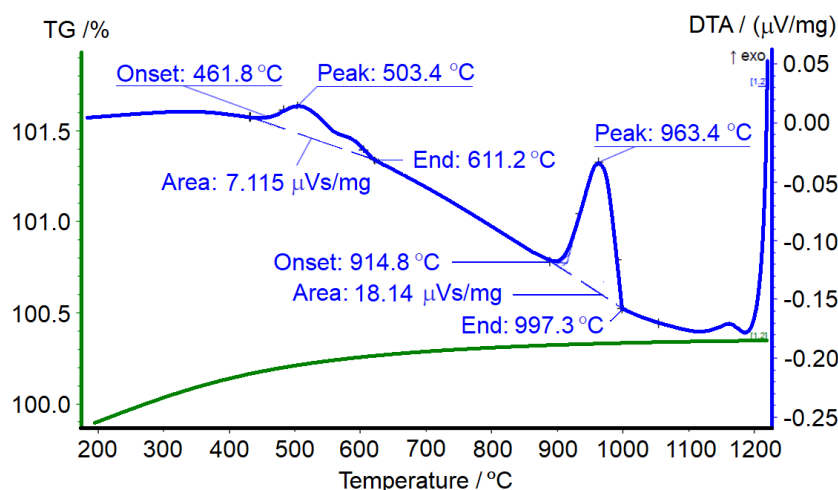
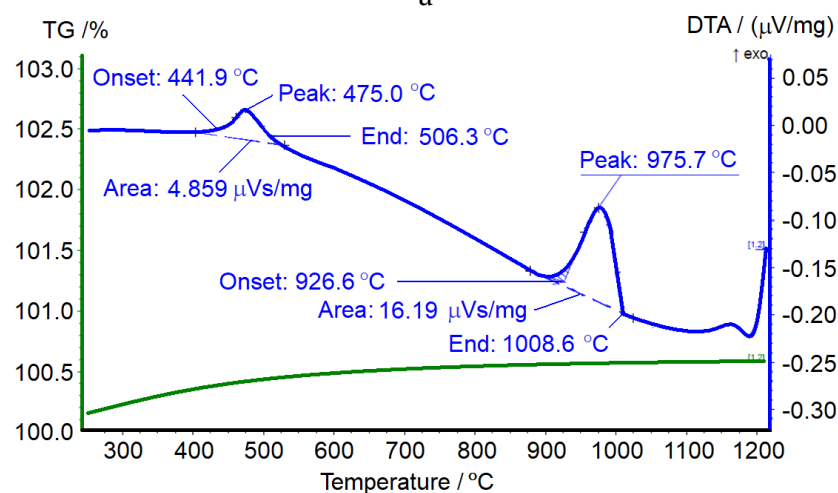


Рисунок 3 – Результати проведення ДТГА бронз з $K_R=2,07$ (а) і $K_R=0,84$ (б) під час їх охолодження зі швидкістю 20 °С/хв в середовищі аргону



a



б

Рисунок 4 – Результати проведення ДТГА бронз з $K_R=0,46$ (а) і $K_R=0,35$ (б) під час їх охолодження зі швидкістю $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ в середовищі аргону

Виходячи з цього, для аналізу впливу швидкості охолодження бронз на їх структуру та властивості, в якості показника швидкості охолодження зразків прийняли середньозважену швидкість зниження температури виливків в інтервалі від 650 до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термограми охолодження виливків в піщаній формі та кокілі, відповідно до схеми на рис. 1, представлено на рис. 5.

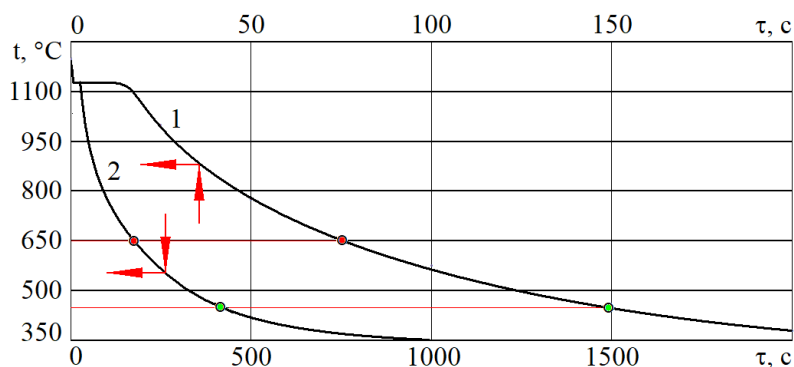


Рисунок 5 – Термограми охолодження зразків бронзи в піщаній формі (1) та кокіль (2)

На основі термограм на рис. 5 провели розрахунки середньозважених швидкостей охолодження бронзових виливків в інтервалі температур від 650 до 400 °С, яка склала $\sim 0,25$ °С/с для виливків, які охолоджувалися в піщаній формі, і $\sim 6,5$ °С/с для виливків, які охолоджувалися в кокіль.

Механічні властивості, величини K_R та ϕ для досліджуваної бронзи, яка була охолоджена в інтервалі 650...400 °С зі швидкістю $w=0,25$ °С/с та $w=6,5$ °С/с приведено в таблиці 2, величини твердості досліджуваної литої бронзи приведено в таблиці 3.

Таблица 2

Механічні властивості, величини K_R та ϕ для бронзи

w=0,25 °С/с (піщана форма)						w=6,5 °С/с (кокіль)				
Механічні властивості				K_R	ϕ	Механічні властивості				K_R
σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²			σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
206	205	0	5	0,32		513	397	3,7	12,9	0,33
310	295	3	6	0,35	59,1	530	355	4,0	15,2	0,35
362	350	4	10	0,35	59,1	550	310	5,0	19,0	0,4
320	306	7	4	0,41	56,8	507	284	5,6	18,5	0,48
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
421	284	13	18	0,42	56,1	512	313	5,6	19,6	0,50
456	390	5	12	0,44	54,7	482	262	5,9	21,1	0,52
465	332	10	19	0,46	53,1	423	279	5,5	20,7	0,56
482	350	9	20	0,55	43,8	440	275	6,1	22,0	0,61
475	350	11	22	0,61	36,5	401	254	6,1	21,0	0,63
492	285	17	23	0,67	29,1	321	248	6,9	21,4	0,73
504	275	19	28	0,77	18,4	281	235	7,8	22,0	0,76
479	250	28	34	0,84	13,3	265	178	8,4	22,4	0,83

Таблиця 3

Твердість досліджуваної литої бронзи

w=0,25 °C/c (залиття в піщану форму)												
K _R	0,34	0,35	0,41	0,57	0,57	0,68	0,71	0,71	0,74	0,77	0,77	0,86
HB, МПа	1100	1070	1210	1120	1150	900	918	832	870	850	810	770
w=6,5 °C/c (залиття в кокінь)												
K _R	0,35	0,40	0,43	0,46	0,48	0,52	0,56	0,61	0,63	0,73	0,76	0,85
HB, МПа	1190	1158	1200	1148	1078	1040	1015	1000	918	872	830	804

Аналіз даних таблиці 2, з точки зору синергетичного впливу легуючих елементів досліджуваної бронзи, показує, що швидкість охолодження бронзи в ливарній формі в інтервалі температур від 650 до 400 °C впливає на рівень, але не впливає на характер зміни більшості показників її механічних властивостей.

Про це, зокрема, свідчить хід кривих на рис. 6, де представлено залежності σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) та КСУ (г) від критерію $K_R=0,32...0,74$ для бронзи, що була залита в піщану ливарну форму (1) і сталевий кокінь (2)

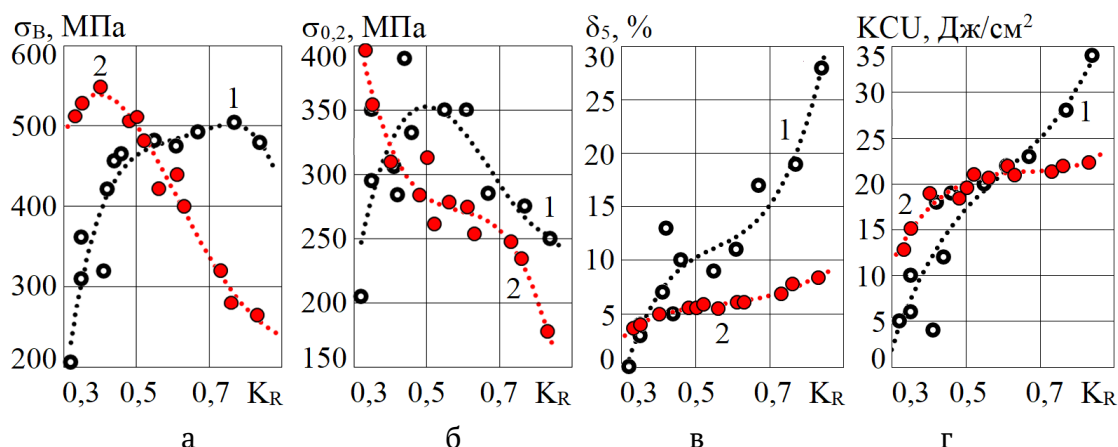


Рисунок 6 – Залежності σ_B (а), $\sigma_{0,2}$ (б), δ_5 (в) та КСУ (г) від критерію K_R для бронзи, що була залита в піщану ливарну форму (1) і сталевий кокінь (2)

В той же час, хід залежностей рівня границі міцності (див. рис. 6,а) та плинності бронзи (див. рис. 6,б) має деякі відмінності. Зокрема, підвищення швидкості охолодження бронзи (при литті в кокінь) призводить до виникнення екстремуму залежності σ_B з боку менших величин $K_R=0,4$ порівняно з аналогічним екстремумом для бронз, які були залиті в піщану форму і охолоджувалися зі значно меншою швидкістю ($K_R=0,75$). Щодо показника

$\sigma_{0,2}$, то співпадіння характеру ходи його залежностей від величини K_R відбувається лише при $K_R \geq 0,5$ (див. рис. 6,б). При цьому, величина показника $\sigma_{0,2}$ для бронз, що залиті в кокіль неухильно знижується в усьому інтервалі змін критерію K_R – від 0,35 до 0,85.

Розбіжності в величинах K_R для екстремумів показника σ_B та взаємопротилежний характер зміни величини $\sigma_{0,2}$ при величині критерію $K_R=0,5$ свідчить про те, що з підвищенням швидкості охолодження бронзи досліджуваної системи кардинально змінюються, як структура, так і, відповідно, характер індивідуального впливу легуючих елементів на її міцність та текучість.

В той же час, підвищення швидкості охолодження литої бронзи знижує синергетичний вплив її хімічного складу на показники пластичності (див. рис. 6,в,г), але не змінює характер впливу. Тобто, показники пластичності бронзи зростають з підвищенням величини критерію K_R .

Для виявлення селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості досліджуваної бронзи за даними таблиці 1, отримали математичні моделі у вигляді поліноміальних рівнянь які представлено в таблиці 4.

Таблиця 4

Поліноміальні функції залежностей механічних властивостей
від величини критерію K_R та ввеличини достовірності апроксимації (R^2)

Ливарна форма	Рівняння	R^2
піщана	$\sigma_B = -23117 \cdot (K_R)^4 + 58607 \cdot (K_R)^3 - 55602 \cdot (K_R)^2 + 23537 \cdot K_R - 3286$, МПа	0,88
	$\sigma_{0,2} = 4578 \cdot (K_R)^3 - 9296 \cdot (K_R)^2 + 5864 \cdot K_R - 827$, МПа	0,55
	$\delta_5 = 518,6 \cdot (K_R)^3 - 862 \cdot (K_R)^2 + 494 \cdot K_R - 86$, %	0,91
	$KCU = 292 \cdot (K_R)^3 - 531 \cdot (K_R)^2 + 357 \cdot K_R - 65$, Дж/см ²	0,88
	$\varphi = 491,73 \cdot (K_R)^3 - 913,53 \cdot (K_R)^2 + 441,88 \cdot K_R - 4,735$, %	1,00
сталева (кокіль)	$\sigma_B = 5359 \cdot (K_R)^3 - 10119 \cdot (K_R)^2 + 5480 \cdot K_R - 380$, МПа	0,98
	$\sigma_{0,2} = -5474 \cdot (K_R)^3 + 9679 \cdot (K_R)^2 - 5774 \cdot K_R + 1434$, МПа	0,95
	$\delta_5 = 86,18 \cdot (K_R)^3 - 146,86 \cdot (K_R)^2 + 87,69 \cdot K_R - 12,29$, %	0,97
	$KCU = 189,4 \cdot (K_R)^3 - 377,1 \cdot (K_R)^2 + 252,1 \cdot K_R - 35,25$, Дж/см ²	0,93

Використовуючи рівняння таблиці 4 побудували залежності зміни величини σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ_5 та KCU бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 від вмісту в ній легуючих

елементів при литті в піщану ливарну форму та сталевий кокінь, які представлено на рис. 7.

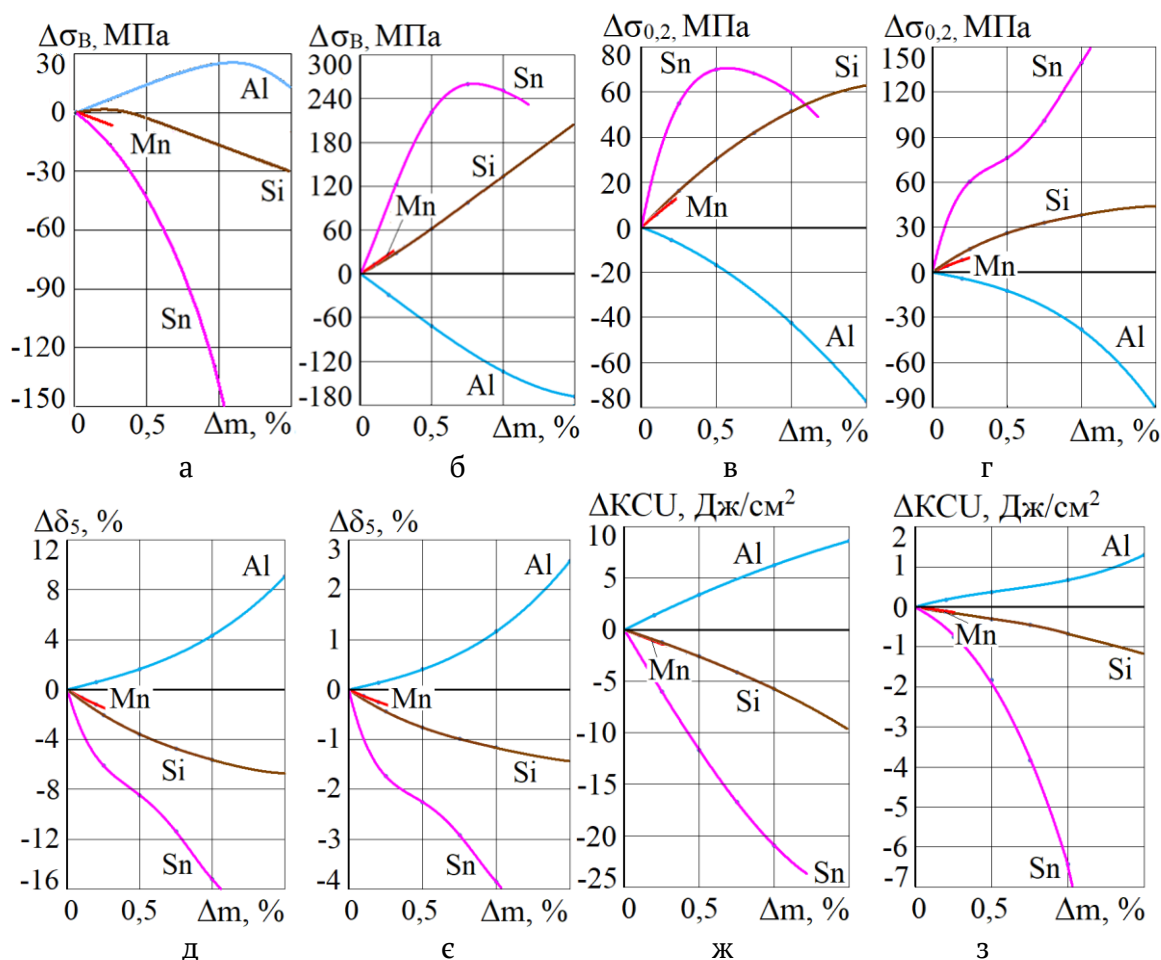


Рисунок 7 – Залежності зміни величин σ_B (а, б), $\sigma_{0.2}$ (в, г), δ_5 (д, е) та KCU (ж, з) бронзи від вмісту в ній легуючих елементів при литті в піщану форму (а, в, д, ж) та кокінь (б, г, е, з)

Поліноміальні функції залежностей твердості за Брінеллем від величини критерію K_R та ввеличини достовірності апроксимації (R^2) приведено в таблиці 5, а залежності твердості бронзи, яка була залита в піщану форму та кокінь, від величини критерію K_R та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи представлені на рис. 8.

Таблиця 5

Поліноміальні функції залежностей механічних властивостей від величини критерію K_R та величини достовірності апроксимації (R^2)

$w=0,25\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (залиття в піщану форму)	
$HB=-15274\cdot(K_R)^4+53652\cdot(K_R)^3-64723\cdot(K_R)^2+31210\cdot K_R-3965$	$R^2=0,96$
$w=6,5\text{ }^{\circ}\text{C/c}$ (залиття в кокінь)	
$HB=4895\cdot(K_R)^3-8404\cdot(K_R)^2+3708\cdot K_R+721$	$R^2=0,97$

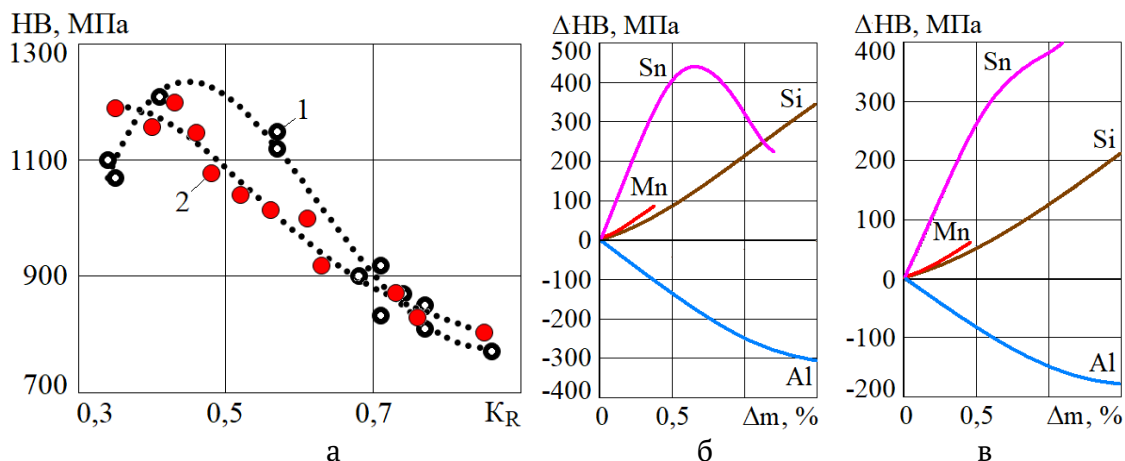


Рисунок 8 – Залежність твердості термічно не обробленої бронзи, яка була залита в піщану форму (1) та кокінь (2), від величини критерію K_R (а), та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи, яка була залита в піщану форму (б) та кокінь (в)

Аналіз ходу залежностей на рис. 7, а, б свідчить, що при литті бронзи в піщану ливарну форму на величину σ_B найбільш впливає лише олово з підвищенням вмісту якого межа міцності при розтягуванні знижується. При цьому Si та Mn також знижують межу міцності бронз, а Al її підвищує лише до масового вмісту 6,5%.

При литті в кокінь навпаки – суттєвому зниженню величини σ_B сприяє Al, а з підвищенням вмісту Sn до 1,75%, Si та Mn величина σ_B значно зростає. При масовому вмісті 1,75% і більше Sn знижує величину показника σ_B .

На відміну від показника σ_B , рівень показника $\sigma_{0,2}$ зростає з підвищенням в бронзі вмісту Si і Mn та зі зниженням вмісту Al за будь-якої швидкості охолодження бронзи у ливарній формі. Щодо Sn, то підвищення його вмісту в бронзі, яка залита в піщану форму, лише на 0,5%, сприяє зростанню $\sigma_{0,2}$, а при подальшому додаванні олова – обумовлює зменшення цього показника. При

литті в сталевий кокіль Sn є єдиним легуючим елементом, який найбільш значно і за будь яким вмістом, в межах марки досліджуваної бронзи, підвищує рівень показника $\sigma_{0,2}$.

Аналіз ходу залежностей на рис. 7, д...з свідчить, що, незалежно від швидкості охолодження бронзи в ливарній формі, вплив легуючих елементів на показники пластичності (δ_5 , KCU) ідентичний, хоча і різний за ступенем впливу. Підвищення вмісту Al в бронзі приводить до зростання як її показника δ_5 , так і показника KCU. В свою чергу, Sn, Si та Mn знижують рівень цих показників.

Найбільшою мірою зниженню показників пластичності сприяє Sn. При цьому, вказаний характер впливу легуючих елементів більшою мірою притаманній бронзі, яка була залита в піщану форму, ніж в кокіль. Тобто, з підвищенням швидкості охолодження литої бронзи в ливарній формі характер впливу легуючих компонентів бронзи на її показники пластичності залишається незмінним, а ступінь їх впливу - зменшується.

Залежності твердості за Брінеллем термічно не обробленої бронзи, яка була залита в піщану форму та кокіль, від величини критерію K_R (див. рис. 8,а), та від зміни масового вмісту легуючих компонентів бронзи, яка була залита в піщану форму (див. рис. 8,б) та кокіль (див. рис. 8,в) ідентичні за ходом, але, як і в попередніх випадках, ступінь їх впливу - зменшується зі збільшенням величини критерію K_R (див. рис. 8,а) і зі збільшенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі. При цьому, найбільш значущий вплив на підвищення твердості демонструють Sn та Si. Зниженню твердості сприяє підвищення вмісту в бронзі алюмінію.

По суті, отримані дані по селективному впливу легуючих елементів на величини механічних властивостей досліджуваної бронзи є зіставними до результатів їх синергетичного впливу. Це свідчить про те, що досліджувана бронза настільки чутлива до швидкості її охолодження в ливарній формі, що це, як на синергетичному, так і селективному рівні, призводить до інверсії характеру впливу легуючих елементів на показники міцності бронзи. З цього витікає, що у досліджуваній бронзі є два суттєві важелі управління її структурою і, відповідно,

рівнем показників механічних властивостей, а саме - її хімічний склад та швидкість її охолодження в ливарній формі. Про це, зокрема, свідчать залежності на рис. 9.

Аналіз ходу залежності на рис. 9,а свідчить, що зі збільшенням величини критерію K_R від 0,35 до 0,85 відносний об'єм інтерметалідних фаз в структурі бронзи зменшується з 59% до 13%, що відповідним чином впливає на величини показників її механічних властивостей та твердість. В той же час (див. рис. 9,б) відносний об'єм хімічної сполуки в структурі бронзи зменшується з підвищенням в ній (в межах марочного складу) вмісту Al і зі зниженням вмісту Si, Mn та, особливо, Sn.

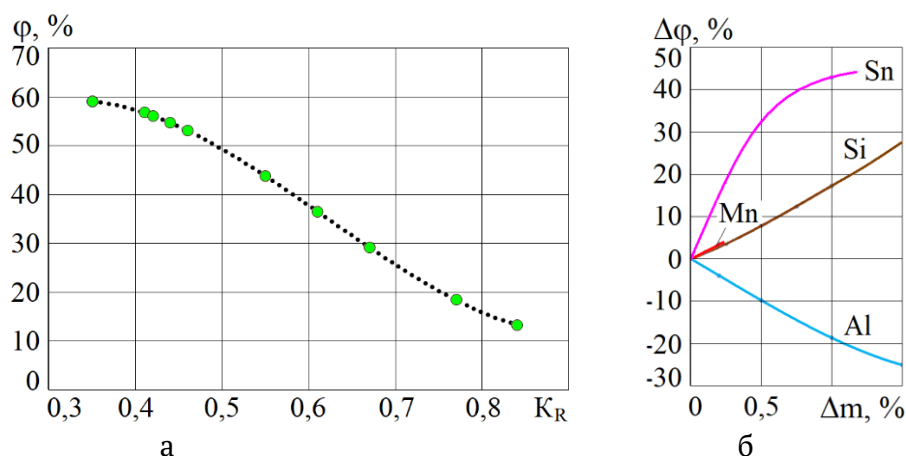


Рисунок 9 – Залежність об'ємної долі інтерметалідної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, від величини критерію K_R (а) та зміни масової кількості її легуючих елементів (б)

Висновки

1. Синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на міцність та плинність бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn не однозначний і визначається більшою мірою швидкістю охолодження бронзи в ливарній формі.

2. Підвищення швидкості охолодження бронзи в ливарній формі призводить до інверсії характеру селективного впливу легуючих компонентів на міцність, що, вірогідно, пов'язано зі зміною типу структури бронз. Тобто, пластичні властивості бронзи залежні від швидкості її охолодження. При цьому швидкість охолодження впливає лише на ступінь зміни цих показників, але не впливає на їх характер.

3. З підвищенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі ступінь синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn зменшується.

4. З числа легуючих елементів в бронзах системи Cu-Al-Si-Sn-Mn за характером впливу на рівень механічних властивостей, твердості та долі хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи алюміній є антиподом до олова, кремнію та марганцю.

5. Об'ємна доля інтерметалідної фази в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, зменшується від 59 до 13% за об'ємом зі збільшенням величини критерію K_R від 0,35 до 0,85.

6. Об'ємна доля хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, що була залита в піщану форму, зростає з підвищенням вмісту в бронзі марганцю, кремнію і, особливо, олова. Підвищення вмісту алюмінію в бронзі знижує долю інтерметалідної фази в її структурі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Composition and properties of aluminum bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/composition-and-properties-of-aluminum-bronze>.
2. Aluminum Bronze: Comprehensive Guide Its Superior Properties. Metal3DP. URL : <https://met3dp.com/aluminum-bronzecomprehensive-guide-superior-properties/>.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL : https://dev.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum_bronze.pdf.
4. Understanding Aluminum Bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/understanding-aluminum-bronze/>.
5. Powell C., Webster P. Copper Alloys for Marine Environments. New York : Copper Development Association, 2012. 29 p.
6. Грешта В.Л., Лисиця О.В., Степанова Л.П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 286 с.
7. Copper.org - C95600 Alloy. Advanced Search for Wrought and Cast Copper Alloys. URL: <https://alloys.copper.org/alloy/C95600>.
8. Magnetic Behavior of Bronze: How Magnetic Are Bronze Alloys? - BOYI. BOYI. URL: <https://www.boyiprototyping.com/materials-guide/is-bronze-magnetic/>.
9. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Мазорчук В. Ф., Усенко Р. В., Іванова Л. Х. Фізичні та ливарні властивості сплавів системи Cu-Sn-Al. Теорія і практика металургії. 2021. № 6 (131). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>.
10. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. В. Оптимізація вмісту олова та алюмінію в олов'яній бронзі за показниками механічних властивостей. Металознавство та термічна обробка металів. 2022. Т. 2. № 2 (97). С. 41–54. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.050722.41.858.

11. Korinko P. S. Bronze Alloy Development for Zinc Vapor Capture. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 490–495. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0265-8> (date of access: 15.03.2025)..
12. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight / S. Hussain et al. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.900740>.

REFERENCES

1. Composition and properties of aluminum bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/composition-and-properties-of-aluminum-bronze>.
2. Aluminum Bronze: Comprehensive Guide Its Superior Properties. Metal3DP. URL : <https://met3dp.com/aluminum-bronze-comprehensive-guide-superior-properties/>.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL : https://dev.copper.org/publications/newsletters/innovations/2002/08/aluminum_bronze.pdf.
4. Understanding Aluminum Bronze. URL : <https://shop.machinemfg.com/understanding-aluminum-bronze/>.
5. Powell C., Webster P. *Copper Alloys for Marine Environments*. New York : Copper Development Association, 2012. 29 p.
6. Greshta V.L., Lysitsya O.V., Stepanova L.P. *Nonferrous metals and alloys based on them: a textbook*. Zaporizhzhia: ZNTU, 2014. 286 p.
7. Copper.org - C95600 Alloy. Advanced Search for Wrought and Cast Copper Alloys. URL: <https://alloys.copper.org/alloy/C95600>.
8. Magnetic Behavior of Bronze: How Magnetic Are Bronze Alloys? - BOYI. BOYI. URL: <https://www.boyiprototyping.com/materials-guide/is-bronze-magnetic/>.
9. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repyakh S.I., Mazorchuk V.F., Usenko R.V., Ivanova L.H. Physical and foundry properties of Cu-Sn-Al system alloys. Theory and practice. 2021. № 6 (131). P. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>.
10. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repyakh S.I., Solonenko L.I. Optimization of tin and aluminum content in tin bronze according to mechanical properties indicators. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*. 2022. V. 2. № 2 (97). P. 41–54. DOI: 10.30838/J.PMHTM.2413.050722.41.858.
11. Korinko P. S. Bronze Alloy Development for Zinc Vapor Capture. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017. Vol. 17, no. 3. P. 490–495. URL: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0265-8> (date of access: 15.03.2025)..
12. Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight / S. Hussain et al. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.900740>.

Received 11.04.2025.

Accepted 14.05.2025.

UDC 691.735:620.173.2

Tetiana Kimstach, Kostiantyn Uzlov

ALLOYING ELEMENTS SYNERGIC AND SELECTIVE EFFECT ON MECHANICAL PROPERTIES OF CU-AL-SI-SN-MN SYSTEM BRONZE

Abstract. *Alloying elements synergic and selective effects on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system cast bronze, which melt was poured and cooled into sand and steel molds, studies results are presented.*

Purpose – to establish regularities of Cu-Al-Si-Sn-Mn system alloying components synergic and selective influence and conditions for forming cast, non-heat-treated bronze with mass content of aluminum - 6.0...7.5%, silicon - 1.0...2.5%, manganese - 0.21...0.45%, tin - 1.0...2.2% on its mechanical properties at normal temperature, which melt has been poured into sand and steel casting mold.

To determine studied bronze chemical composition complex influence on its mechanical properties, criterion K_R has been used. Cast bronzes chemical composition has been determined on EXPERT 4L precision analyzer. Temperature interval for which bronze samples average-weighted cooling rate was calculated has been determined based on differential thermogravimetric analysis results, which has been performed on synchronous thermal analyzer STA 449 C «Jupiter», NETZSCH Co. (Germany). Bronzes mechanical properties have been determined based on samples destruction results on FP-100/1 machine and PSW-30 pendulum impactor. Brinell hardness has been determined on a TIII-2 device.

It has been established that alloying elements synergistic and selective effect on Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes strength limit and yield strength are mainly determined by bronze cooling rate in casting mold, which increasing leads to alloying components selective effect character inversion on strength. Chemical elements selective influence nature on yield strength and hardness only partially changes in relation to tin and does not affect the changes nature in bronze plasticity indicators at all. At the same time, with bronze cooling rate increasing in casting mold, degree of alloying elements synergic and selective influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze decreases. Among alloying elements in Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes, in terms of influence on mechanical properties level nature, hardness and chemical compounds in studied bronze structure amount, aluminum is antipode to tin, silicon, and manganese.

Keywords: *bronze, strength, plasticity, hardness, properties, aluminum, die mold, sand mold, magnetic permeability*

Кімстач Тетяна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій. E-mail: 1375tatyana@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-201X>

Узлов Костянтин Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Матеріалознавства та термічної обробки металів», Український державний університет науки і технологій. E-mail: konst.uzlov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>

Kimstach Tetiana Volodymyrivna –candidate of engineering sciences, associate professor, associate professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Science and Technologies. E-mail: 1375tatyana@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8993-201X>

Uzlov Kostiantyn Ivanovych – doctor of engineering sciences, professor, professor of the Department of Material Science and Heat Treatment of Metals at Ukrainian State University of Science and Technologies. E-mail: konst.uzlov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0744-9890>

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.11

УДК 621.778

Я.В. Фролов, О.С. Бобух, В.В. Бояркін, Д.В. Коноводов, О.М. Кузьміна

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПРОКАТКА-З'ЄДНАННЯ КІРІГАМІ-КОМПОЗИТИВ

Анотація. В роботі досліджено застосування техніки кірігами в інженерії для створення багатошарових композиційних матеріалів з прогнаними механічними властивостями. Основною метою є розробка та перевірка адекватності математичної моделі процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованої сталеву просічно-витяжною сіткою. Модель побудована в середовищі QForm UK з використанням методу скінчених елементів та врахуванням відповідних реологічних характеристик матеріалів і граничних умов. Експериментальні дослідження прокатки-з'єднання проводились на лабораторних станах типу дуо та кварто при температурах до 500 °C та різних ступенях деформації (20–50 %). Результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними щодо зміни геометрії сітки та розподілу деформацій. Встановлено, що навіть при незначному ступені деформації (20 %) можливе формування ефективного з'єднання з проявом “*zircon-bonding*” ефекту, однак таке з'єднання є нестабільним. Тому в процесі прокатки-з'єднання доцільно застосовувати величину ступеня деформації, що перевищує 30 %. Результати дослідження можуть бути використані для подальшої розробки технологій виготовлення функціональних кірігами-структур на основі металевих композицій.

Ключові слова: прокатка-з'єднання, просічно-розтяжна сталеву сітка, алюмінієва матриця, моделювання на основі методу скінчених елементів

Вступ.

Кірігами – це традиційний японський вид мистецтва, який полягає у вирізанні та складанні паперу для створення складних і красивих виробів. В інженерії кірігами використовується для створення інноваційних конструкцій та матеріалів з унікальними механічними, морфологічними та функціональними властивостями [1]. Техніка включає в себе розкрій

та згинання матеріалів з контрольованою деформацією, яка може призвести до отримання необхідних механічних властивостей, а також до бажаної взаємодії з різними хвилями та полями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Застосування таких структур для проектування шаруватих композиційних матеріалів, які можуть бути виготовлені за допомогою прокатки-з'єднання, може усунути ризик надмірної деформації та руйнування одного з шарів. У цьому випадку форма кірігамі, наприклад розширена сталева сітка, що використовується як компонент шаруватого композиту, забезпечує контрольовані проміжки між зонами деформації [2] під час подальшого з'єднання. За схемою розкрою тонкий лист можна розділити на дві зони: зону з великим ступенем деформації та зону з малим ступенем деформації. Кінематичні властивості отриманої структури можуть бути запрограмовані вибором схеми розкрою [1]. Таким чином, техніка кірігамі відкриває шлях до програмованої зміни форми під впливом заданого навантаження [3, 4], набуття нових механічних властивостей, аж до ауксетичної поведінки [5]. Наразі найпопулярнішим ефектом, що досягається за допомогою техніки кірігамі, є суперпружність. Це здатність до тривалої пружної деформації з поверненням до початкової форми після зняття навантаження. Зазвичай наделастичність забезпечують еластомірні компоненти. Більшість металевих матеріалів, зокрема композити, не піддаються значному розтягуванню, що може надати очевидні переваги готовим продуктам або пристроям. Наприклад, традиційні батареї є жорсткими, проте додавання їм еластичності може надати нові можливості в робототехніці [6] та носимих електронних пристроях [7]. Застосування техніки кірігамі для збільшення ефекту пам'яті форми сплаву Ni-Ti було описано в роботі [8]. Автори роботи [9] повідомили про новий клас електромеханічних метаматеріалів, створення яких було надихано трансформованими візерунками кірігамі, що були розроблені для застосування в електромагнітних пристроях. Використання кірігамі-структури – простий у реалізації підхід до надання еластичності, що виходить за межі можливості металевих матеріалів, з яких вони складаються, з можливістю масштабування.

Існує багато успішних реалізацій таких структур на основі жорстких складових матеріалів, таких як графен [10], композитні плівки SiN [11], металеве скло [12] тощо.

Для дослідження процесів прокатки часто використовують математичне моделювання з використанням методу скінчених елементів. Сучасний розвиток програмних продуктів для математичного моделювання пластичної деформації, зокрема QForm UK [13], дозволяє створювати моделі складних процесів пластичної деформації. Вказаний продукт відрізняється швидкістю розрахунків, зручним інтерфейсом і широко використовується саме для моделювання процесів пластичної деформації композитів. Дослідження, проведені авторами роботи [14], вказують на можливість моделювання деформування композиту мідь–сталь–мідь. Побудована авторами роботи математична модель витяжки показала якісні результати щодо розподілу товщини слоїв та розподілу напружень відповідно до проведених експериментальних досліджень. В дослідженні [15] було проведено моделювання холодного осадження гібридних алюмінієвих заготовок з метою аналізу меж формоутворення. Модель дозволила точно оцінити розподіл напружень та потенційні зони розшарування. Результати чисельного аналізу також якісно узгоджувались з експериментальними спостереженнями. В роботі [16] представлено моделювання процесу багатоступеневого диференційного згинання композитних фотогальванічних модулів. Автори проаналізували зони деформації та розподіл напружень, що дозволило оптимізувати параметри процесу для збереження сонячних елементів під час вилучення скла.

Авторами в попередніх роботах використано математичне моделювання процесу прокатки композитних матеріалів з метою аналізу деформаційних процесів і впливу параметрів прокатки на з'єднання алюмінієвих шарів зі звичайною сталевією сіткою [17], також створена модель процесу прокатки тришарової штаби, яка дозволила дослідити вплив температури та ступеня деформації на формозміну та енергосилові параметри процесу [18].

Мета дослідження.

Метою роботи є створення математичної моделі процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою на основі методу скінчених елементів та перевірка її адекватності для подальшого створення технології отримання багатошарових кірігамі-структур.

Основні матеріали дослідження.

В програмному середовищі QForm UK була створена тривимірна модель процесу поздовжньої прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою між алюмінієвими штабами. Товщина алюмінієвої штаби – 3 мм, сталева просічно-витяжна сітчаста вставка з розміром вічка ґратки 2×4 мм. Діаметр прокатних валків зі сталі 40X – 180 мм. Реологічні характеристики сплаву EN AW 6082 матриці, сталі C10 (1.0301 за EN 10277-2) та матеріалу валків бралися з бази QForm UK.

Використання програмного продукту QForm UK [13] відбувається в рамках угоди про між Micas Simulations Limited (м. Оксфорд, Велика Британія) та кафедрою обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова (Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро) – Угода № 1005/23-1 від 10.05.2023 р.

Для моделювання було використано наступні граничні умови:

- фактор тертя на контактних поверхнях «валки-композит» визначається моделлю Леванова та дорівнює 0,8;
- коефіцієнт теплопередачі від металу до валків: 100000 Вт/м³·К
- швидкість обертання валків: 30 об/хв.
- температура валків: 20 °С;
- початкова температура композиту перед прокаткою: 500 °С;
- температура навколишнього середовища: 20 °С.

Геометрична модель просічно-витяжної сітки, яка для скорочення часу розрахунків складалася з послідовності елементів сітки шириною одне вічко, наведена на рисунку 1.

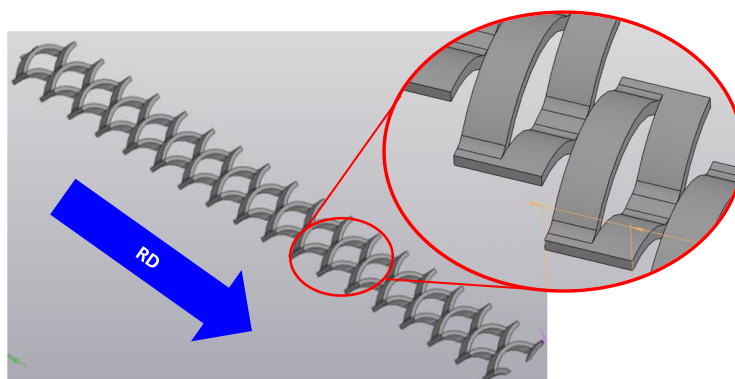


Рисунок 1 – Модель просічно-витяжної сітки (RD – напрямок прокатки)

Під час моделювання було застосовано додаткові інструменти – віртуальні штовхачі, які синхронно задавали всі три шари заготовки в зону деформації. Під час реального процесу прокатки всі шари заготовки також заходять в валки одночасно. Це забезпечується попереднім скріпленням шарів заготовки за допомогою заклепок. Загальний вигляд композиту перед прокаткою наведено на рисунку 2.

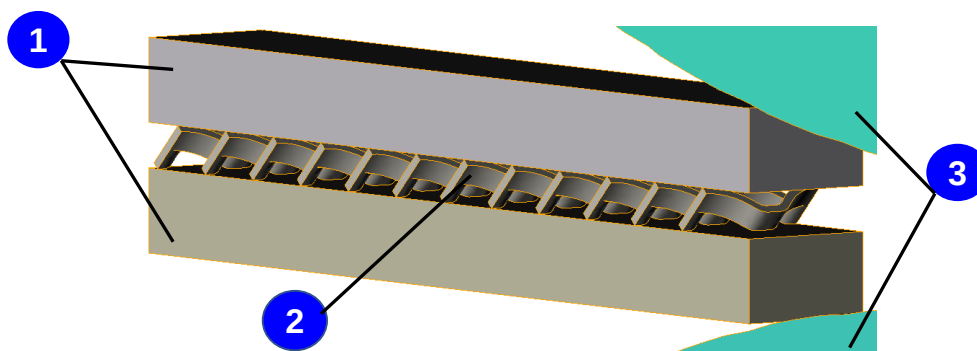


Рисунок 2 – Візуалізація композиту перед моделюванням прокатки-з'єднання
1 – алюмінієва матриця; 2 – просічно-витяжна сітка; 3 – прокатні валки.

Загальний вигляд трансформації сітки в зоні деформації після проведення моделювання наведено на рисунку 3. Видно, що на вході в зону деформації відбувається закриття (скорочення довжини) вічок сітки у напрямку дії нормальної сили прокатки (вісь Z) з їх подальшим витягуванням у напрямку прокатки (Y). Якщо припустити, що при стисканні просічно-витяжної сітки між двома бойками з мінімальним тертям, вона майже повністю закритється, то можна зробити висновок, що скорочення довжини вічка є маркером

вертикальної компоненти сили, що діє на сітку всередині композиту. Це твердження є справедливим за умови відсутності заднього підпору.

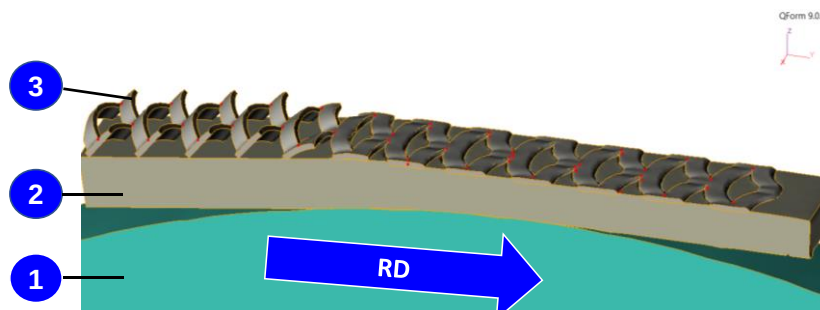


Рисунок 3 – Візуалізація зміни форми нижньої матриці та просічно-витяжної сітки під час прокатки при температурі 500°C (верхні матриця та валок на рисунку відсутні)
1 – валок; 2 – алюмінієва матриця; 3 – просічно-витяжна сітка.

Проекція просічно-витяжної сітки в зоні деформації при прокатці на площину XY (рисунок 3) показує, що довжина вічка у цій проекції спочатку зменшується, а потім збільшується.

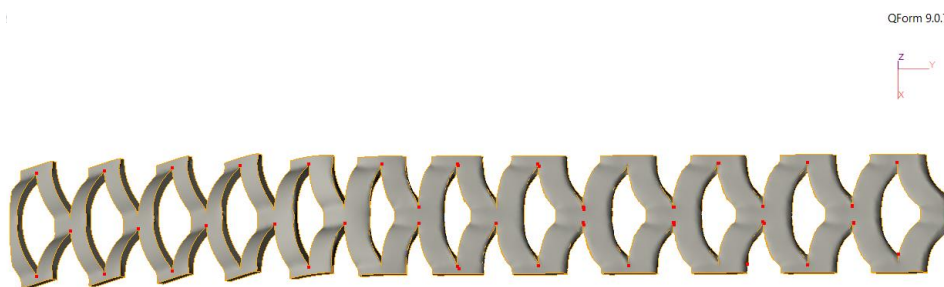


Рисунок 4 – Візуалізація проекції просічно-витяжної сітки під час прокатки при температурі 500°C

Для перевірки адекватності розробленої моделі була проведена серія експериментальних прокаток. Експериментальні прокатки-з'єднання армованих композитів проводились на двох прокатних станах лабораторії кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова: стан дуо з діаметром валків 180 мм і стан кварто з діаметром робочих валків 135 мм. Швидкість обертання валків складала 30 об/хв. Перед прокаткою композити підігрівали в камерній електричній печі опору з цифровим регулюванням температури до температури 500 °C. Потужність печі – 15 кВт. Для точного

відстеження нагрівання композиту до 500° С у печі був розміщений «зразок-свідок» з термопарою всередині. Піч виходила на режим в 500 °С, приблизно за 3 години, композит в печі нагрівався до заданої температури за 20...25 хв.

Під час прокатки за допомогою ноутбука записувались температура і сила прокатки. Температура фіксувалася за допомогою термопари, яка знаходилася в середині зразка. Сила прокатки записувалася по даним месдозі, розташованій під опорним гвинтом верхнього валка.

Для запобігання втраті температури композиту в момент задавання в валки вхідний стіл стану був теплоізолюваний, а для того, щоб зразок не зміщався під час прокатки, застосовували направляючі рейки.

Для прокатки-з'єднання були приготовлені композити, які складалися з трьох шарів: алюмінієва матриця: гарячепресована штаба розмірами (h×b×l) 3×70×200 мм зі сплаву EN AW 6082. В якості вкладеного матеріалу використовувалась просічно-витяжна сітчаста вставка розміром (t×b×l) 0,5×70×200 мм зі сталі C10 (1.0301 за EN 10277-2) з розміром вічка ґратки 2×4 мм. Перед прокаткою композити скріплювали алюмінієвими заклепками (рисунок 4) на відстані 10 мм від кутів. Перед прокаткою сітку піддавали рекристалізаційному відпалу при температурі 720 °С. Будь-якої спеціальної підготовки поверхонь матриці і сітки не проводилося. Груба окалина з поверхні сітки видалялася механічно.

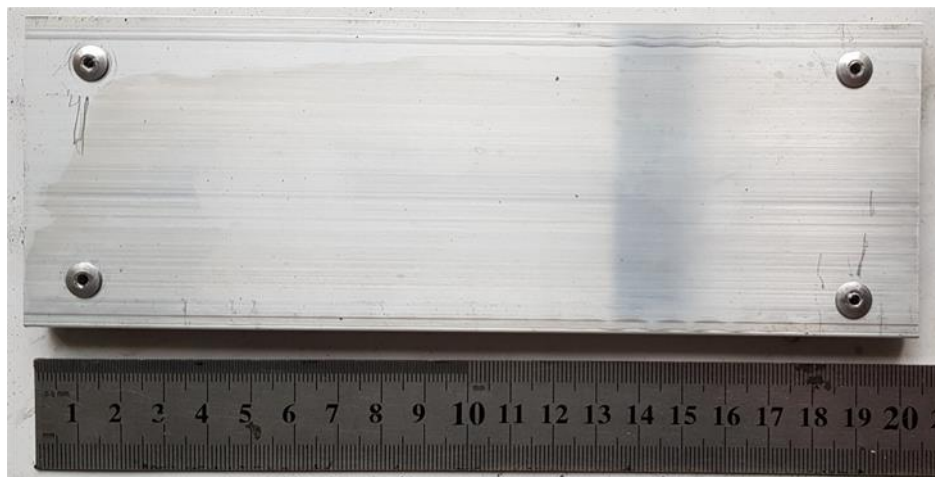


Рисунок 5 – Загальний вигляд композиту перед прокаткою

Прокатку проводили з номінальними ступенями висотної деформації 20, 30 і 40 %. На стані кварто також прокатували армовані композити зі ступенем деформації 50 %. Ступені деформації розраховувалися відносно алюмінієвої матриці без врахування товщини армуючої фази. Тобто початкова товщина композиту для всіх випадків складала 6 мм. Окрім армованих композитів прокатували також й композити без армування з такими точно ступенями деформації.

Зображення прокатаного зі ступенем деформації 40% зразка наведено на рисунку 5, маркером позначені місця замірів товщини та ширини.



Рисунок 6 – Загальний вигляд композиту після прокатки

Результати експериментальних досліджень наведено в таблиці 1. Наведено значення номінальної товщини, що відповідає вказаному ступеню деформації (h_{1n}), фактичної товщини композиту (h_1), фактичної ширини композиту (b_1) та довжини композиту після прокатки (l_1). Маркування типу композиту в таблиці, наприклад 1 – К - 20 означає: 1 – номер прокатки; К – стан кварто (Д – стан дуо); 20 – номінальний ступень деформації. Кожне зі значень, наведених в таблиці 1 отримане як середнє арифметичне наступної кількості замірів: товщина – 6; ширина – 3; довжина – 3.

Таблиця 1

Результати замірів розмірів композитів, отриманих прокаткою-з’єднанням

Тип композиту	h _{1н} мм	h ₁ мм	b ₁ мм	l ₁ мм
Стан кварто				
1– К - 20	4,8	5,03	70,8	250
2– К - 20	4,8	4,92	71,0	255
3– К - 20 без сітки	4,8	4,84	70,81	Сильний вигін
4– К - 20	4,8	4,89	71,2	Сильний вигін
5– К - 20	4,8	4,955	70,83	230
7– К - 20	4,8	4,93	70,76	235
8– К - 30	4,2	4,315	71,17	283
9– К - 30	4,2	4,34	71,074	285
10– К - 30	4,2	4,325	71,16	275
11– К - 30	4,2	4,31	72,01	287
12– К - 40	3,6	3,68	71,63	330
13– К - 40	3,6	3,8	71,6	325
14– К - 50	3	3,36	72,01	367
15– К - 50	3	3,295	72,43	360
Стан дуо				
1– Д - 20	4,8	4,77	71,88	240
2– Д - 20	4,8	4,65	71,45	275
3– Д - 20	4,8	4,82	71,40	260
4– Д - 30	4,2	4,60	71,40	275
5– Д - 30	4,2	4,44	71,52	280
6– Д - 30 без сітки	4,2	4,48	71,02	255
7– Д - 40	3,6	4,11	72,71	300
8– Д - 40	3,6	3,90	71,86	315
9– Д - 40 без сітки	3,6	3,82	72,45	300
10– Д - 20	4,8	4,46	71,55	276
11– Д - 20 без сітки	4,8	4,40	71,60	260

* – середнє значення сили прокатки по довжині зразка.

Розшарування композитів одразу після прокатки не спостерігалось, що свідчить про прояву “zipbonding” ефекту навіть при 20 % деформації. Однак

цей ефект у випадку армування просічно-витяжною сіткою виражений менш явно, ніж при армування дротяною сіткою. Слід зазначити, що з'єднання композитів, прокатаних при 20 % деформації показало себе як нестабільне. Композити розшаровувалися під час вирізання зразків, або навіть мінімального гнуття. При чому слід зазначити, що один шар матриці мав більш сильне зчеплення з армуючою сіткою, ніж інший. На рисунку 5 наведено фото зразка, який розшарувався під час вирізання зразків для подальших випробувань.

Наявність слідів окалини на поверхні контакту двох шарів матриці свідчить про те, що окалина, яка відірвалася від сітки під час її вирівнювання вздовж вісі прокатки на початку процесу послаблює взаємодію двох шарів матриці між собою, а також зменшує прояву “zip-bonding” ефекту.

Порівняння результатів моделювання і експериментальної прокатки-з'єднання армованих композитів проводилось для перевірки адекватності моделі. Порівняння відбувалося за параметрами зміни геометричних розмірів елементів сітки після прокатки. На рисунку 6, як приклад, наведено фото розшарованого композиту після прокатки-з'єднання (збільшення з рисунку 5), на яке накладено зображення двох вічок сітки, отриманих в результаті моделювання (рисунок 3).

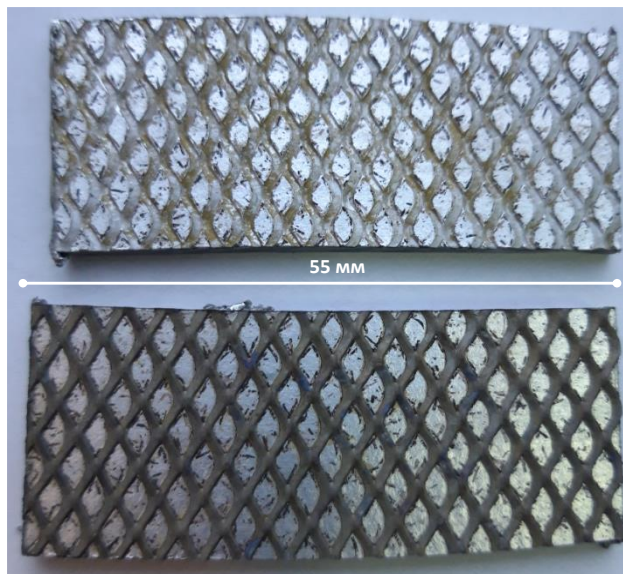


Рисунок 6 – Розшарований зразок після прокатки-з'єднання зі ступенем деформації 20 % при температурі 500 °C

Також на цьому рисунку наведено нумерацію геометричних параметрів сітки, за якими здійснювалося порівняння результатів моделювання і експериментальної прокатки-з'єднання.

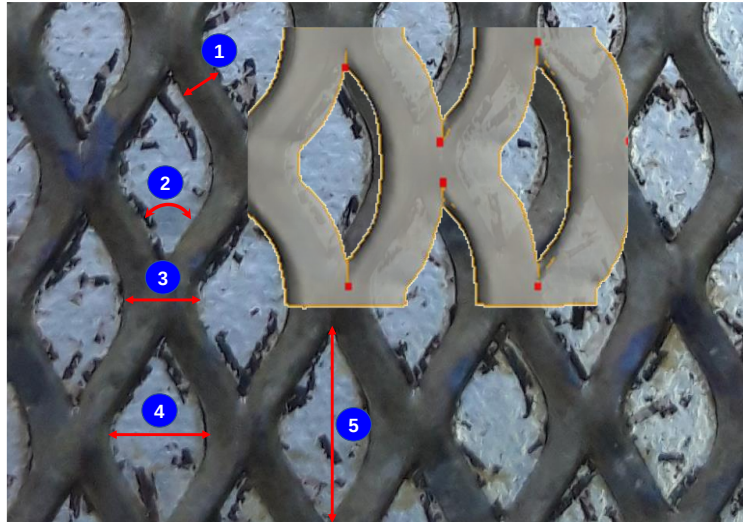


Рисунок 7 – Розширений композит з накладеним зображенням сітки, отриманим в результаті моделювання. 1 – товщина нитки; 2 – величина кута сітки; 3 – довжина перехрестя; 4 – довжина вічка; 5 – ширина вічка

Кількісні результати порівняння геометричних параметрів сітки до і після прокатки між двома алюмінієвими матрицями наведені у таблиці 2.

Отримані результати показують, що у цілому скінчено-елементна модель процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевую просічно-витяжною сіткою, адекватно відтворює реальний процес. Відхилення, які візуально помітні на рисунку, та мають кількісні значення, наведені у таблиці, показують, що для подальшого моделювання потрібно готувати вихідну геометрію у відповідності до реальної геометрії сітки.

Таблиця 2

Розміри сітки після експериментальної прокатки-з'єднання та моделювання

Номер параметру (рисунок 6)	До прокатки		Після прокатки		Відносна зміна параметру під час прокатки, %	
	Експеримент	Моделювання	Експеримент	Моделювання	Експеримент	Моделювання
1, мм	0,75	1	0,8	1,2	6,67	20,00
2, град	56	57	67	65	19,64	14,04
3, мм	1,4	2	1,45	2,1	3,57	5,00
4, мм	1,5	1,3	2	1,68	33,33	29,29
5, мм	4	4	4	4	0,00	0,00

Процес формозміни, який відбувся у сітці, якісно промодельовано вірно, а саме:

– Товщина нитки. Зміни площі поперечного перерізу нитки за такої степені деформації зазвичай взагалі не відбувається. Зміна, яка зафіксована як при експерименті, так і при моделюванні вочевидь пов'язана з округленням форми поперечного перерізу нитки.

– Величина кута сітки. Кут сітки під час прокатки збільшується за даними попередніх досліджень таким чином: в інтервалі 20...30 % деформації кут зростає на один градус за кожний відсоток деформації, в інтервалі 30...40 % - кожний відсоток деформації дає ~ 1,5 градуса, а в інтервалі 40...50 % ~ 0,5 градуса зміни кута сітки. Щоправда це для аустенітної нержавіючої сталі. У цьому дослідженні 20 % деформації призвело до збільшення кута сітки на у середньому на 10 градусів. Це в два рази менше за відомі дані. Причина такої зміни можливо у тому, що феритна сталь, для якої проводилися експерименти є менш пластичною за умов експерименту.

– Довжина перехрестя. Зміна довжини перехрестя є незначною (3,57 та 5 %). Це показали і експерименти і моделювання. Це пов'язане з округленням форми перехрестя в умовах високого гідростатичного тиску в зоні деформації.

– Ширина вічка сітки, як за результатами експериментальної прокатки, так і результатами моделювання не змінилася.

– Зміна довжини вічка сітки дорівнює 1,33 (1,3 при моделюванні). Це корелюється зі зміною кута сітки. Менший кут сітки дає меншу діагональ. З огляду на майже повне співпадіння результатів та моделювання за цим параметром, можна зробити висновок, що зміна довжини вічка сітки під час прокатки залежить не тільки від параметрів деформації, а також і від властивостей матеріалу при температурі обробки.

Наведені вище результати порівнянь у цілому відповідають даним, отриманим під час попередніх досліджень [17].

Висновки

Створено математичну модель процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованою сталевією просічно-витяжною сіткою. Якісну адекватність моделі підтверджено експериментальними прокатками. Модель може бути використана для подальших досліджень трансформації кірігамі-структури, розробки моделей багатошарових кірігамі-структур та розробки технології прокатки-з'єднання композитів.

Фінансова підтримка. Дослідження виконуються в рамках проєкту «Розробка технології застосування кірігамі-структур у деформаційно-термічній обробці штаб з композитного матеріалу», який фінансується Національним фондом досліджень України за кошти державного бюджету (реєстраційний номер 2023.04/0156).

ЛІТЕРАТУРА

1. Engineering by Cuts: How Kirigami Principle Enables Unique Mechanical Properties and Functionalities / J. Tao et al. Advanced Science. 2022. P. 2204733. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202204733> (date of access: 14.01.2025).
2. Transformation of the kirigami-type deformable inlay during roll bonding / Y. Frolov et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2025. No. 1. P. 34–39. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/034> (date of access: 14.01.2025).
3. Kirigami-Inspired Inflatables with Programmable Shapes / L. Jin et al. Advanced Materials. 2020. Vol. 32, no. 33. P. 2001863. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202001863> (date of access: 14.01.2025).

4. Hwang D.-G., Bartlett M. D. Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami Structures. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21479-7> (date of access: 14.01.2025).
5. Neville R. M., Scarpa F., Pirrera A. Shape morphing Kirigami mechanical metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep31067> (date of access: 14.01.2025).
6. Murali Babu S. P., Parvaresh A., Rafsanjani A. Tailoring materials into kirigami robots. *Device*. 2024. Vol. 2, no. 9. P. 100469. URL: <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100469> (date of access: 23.01.2025).
7. Recent Progress in Stretchable Batteries for Wearable Electronics / W. Song et al. *Batteries & Supercaps*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 181–199. URL: <https://doi.org/10.1002/batt.201800140> (date of access: 23.01.2025).
8. Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper / W. Wang et al. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 397–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.030> (date of access: 23.01.2025).
9. A new class of transformable kirigami metamaterials for reconfigurable electromagnetic systems / Y. Yang et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27291-8> (date of access: 11.02.2025).
10. Large deformation behavior and mechanism of graphene kirigami under shear and combined shear-tension loads / P. Shi et al. *Computational Materials Science*. 2025. Vol. 251. P. 113746. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113746> (date of access: 11.02.2025).
11. Tsutsui T., Taguchi Y., Hashimoto M. Quadrant kirigami-type electrothermal MEMS actuator with multi-degree-of-freedom morphing capability. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ada164> (date of access: 11.02.2025).
12. Architected hierarchical kirigami metallic glass with programmable stretchability / D. X. Han et al. *AIP Advances*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 035305. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0084906> (date of access: 11.02.2025).
13. QForm UK. Version 10.2.4. Oxford, UK: Micas Simulations Limited. URL: <https://www.qform3d.com>.
14. Analysis of the deep drawing process of three-layered explosive welded composite / K. Marcin et al. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.029> (date of access: 14.02.2025).
15. Analysis of Forming Limits During Cold Forging of Aluminum Hybrid Billets / K. C. Grötzinger et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2024. P. 371–382. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-58006-2_29 (date of access: 14.02.2025).
16. Simulation modeling of the multistage differential bending process of photovoltaic module composite materials / V. Kamburov et al. 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE TECHSYS 2024 – ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, Plovdiv, Bulgaria. 2025. P. 070005. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0260188> (date of access: 14.04.2025).
17. Deformation of expanded steel mesh inlay inside aluminum matrix during the roll bonding / Y. Frolov et al. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 58. P. 857–867. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.049> (date of access: 14.02.2025).
18. Коноводов Д. В., Сиваш В. І. Моделювання процесу гарячої прокатки тришарових штаб зі сплавів алюмінію та магнію. *Обробка матеріалів тиском*. 2020. № 1(50). С. 259–265. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259) (дата звернення: 14.02.2025).

REFERENCES

1. Engineering by Cuts: How Kirigami Principle Enables Unique Mechanical Properties and Functionalities / J. Tao et al. *Advanced Science*. 2022. P. 2204733. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202204733> (date of access: 14.01.2025).
2. Transformation of the kirigami-type deformable inlay during roll bonding / Y. Frolov et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2025. No. 1. P. 34–39. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-1/034> (date of access: 14.01.2025).
3. Kirigami-Inspired Inflatables with Programmable Shapes / L. Jin et al. *Advanced Materials*. 2020. Vol. 32, no. 33. P. 2001863. URL: <https://doi.org/10.1002/adma.202001863> (date of access: 14.01.2025).
4. Hwang D.-G., Bartlett M. D. Tunable Mechanical Metamaterials through Hybrid Kirigami Structures. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21479-7> (date of access: 14.01.2025).
5. Neville R. M., Scarpa F., Pirrera A. Shape morphing Kirigami mechanical metamaterials. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/srep31067> (date of access: 14.01.2025).
6. Murali Babu S. P., Parvaresh A., Rafsanjani A. Tailoring materials into kirigami robots. *Device*. 2024. Vol. 2, no. 9. P. 100469. URL: <https://doi.org/10.1016/j.device.2024.100469> (date of access: 23.01.2025).
7. Recent Progress in Stretchable Batteries for Wearable Electronics / W. Song et al. *Batteries & Supercaps*. 2019. Vol. 2, no. 3. P. 181–199. URL: <https://doi.org/10.1002/batt.201800140> (date of access: 23.01.2025).
8. Soft composite hinge actuator and application to compliant robotic gripper / W. Wang et al. *Composites Part B: Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 397–405. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.030> (date of access: 23.01.2025).
9. A new class of transformable kirigami metamaterials for reconfigurable electromagnetic systems / Y. Yang et al. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-27291-8> (date of access: 11.02.2025).
10. Large deformation behavior and mechanism of graphene kirigami under shear and combined shear-tension loads / P. Shi et al. *Computational Materials Science*. 2025. Vol. 251. P. 113746. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2025.113746> (date of access: 11.02.2025).
11. Tsutsui T., Taguchi Y., Hashimoto M. Quadrant kirigami-type electrothermal MEMS actuator with multi-degree-of-freedom morphing capability. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ada164> (date of access: 11.02.2025).
12. Architected hierarchical kirigami metallic glass with programmable stretchability / D. X. Han et al. *AIP Advances*. 2022. Vol. 12, no. 3. P. 035305. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0084906> (date of access: 11.02.2025).
13. QForm UK. Version 10.2.4. Oxford, UK: Micas Simulations Limited. URL: <https://www.qform3d.com>.
14. Analysis of the deep drawing process of three-layered explosive welded composite / K. Marcin et al. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 50. P. 153–158. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.029> (date of access: 14.02.2025).
15. Analysis of Forming Limits During Cold Forging of Aluminum Hybrid Billets / K. C. Grötzinger et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham, 2024. P. 371–382. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-58006-2_29 (date of access: 14.02.2025).

16. Simulation modeling of the multistage differential bending process of photovoltaic module composite materials / V. Kamburov et al. 13TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE TECHSYS 2024 – ENGINEERING, TECHNOLOGIES AND SYSTEMS, Plovdiv, Bulgaria. 2025. P. 070005. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0260188> (date of access: 14.04.2025).
17. Deformation of expanded steel mesh inlay inside aluminum matrix during the roll bonding / Y. Frolov et al. Journal of Manufacturing Processes. 2020. Vol. 58. P. 857–867. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.049> (date of access: 14.02.2025).
18. Konovodov D. V., Syvash V. I. Modelyuvannya protsesu haryachoyi prokatky trysharovykh shtab zi splaviv alyuminiyu ta mahniyu. Obrobka materialiv tyskom. 2020. № 1(50). S. 259–265. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1\(50\)259](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2020-1(50)259) (data zvernennya: 14.02.2025).

Received 15.04.2025.

Accepted 18.05.2025.

UDC 621.778

Yaroslav Frolov, Oleksandr Bobukh, Viacheslav Boiarkin,
Dmytro Konovodov, Olga Kuzmina

FEM SIMULATION AND EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR ROLL BONDING OF KIRIGAMI-TYPE COMPOSITES

Abstract. *The study investigates the application of kirigami techniques in engineering to produce multilayer composite materials with programmable mechanical properties. The primary objective is to develop and validate a mathematical model for the roll-bonding process of an aluminum matrix reinforced with a steel expanded metal mesh. The model has been developed in the QForm UK environment using the finite element method, taking into account the relevant rheological properties of the materials and boundary conditions. Experimental roll-bonding studies were carried out on laboratory duo and quarto rolling mills at temperatures up to 500 °C and various degrees of deformation (20–50 %). The results of the numerical simulations are in agreement with the experimental data regarding changes in mesh geometry and strain distribution. It was found that even at a small degree of deformation (20 %), it is possible to form an effective bond with a “zip-bonding” effect; but that such a bond is unstable. It is therefore advisable to apply a degree of deformation greater than 30% in the roll-bonding process. The results of the study can be used for the further development of manufacturing technologies for functional kirigami structures based on metal composites.*

Keywords: roll bonding, expanded steel mesh, aluminum matrix, FEM simulation.

Фролов Ярослав Вікторович, доктор технічних наук, професор кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут,

Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: ya.v.frolov@ust.edu.ua.

Бобух Олександр Сергійович, кандидат технічних наук, завідувач кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0001-7254-3854. E-mail: o.s.bobukh@ust.edu.ua.

Бояркін Вячеслав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Коноводов Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Кузьміна Ольга Михайлівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри обробки металів тиском ім. акад. О.П. Чекмарьова, Дніпровський металургійний інститут, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-0794-0583. E-mail: o.m.kuzmina@ust.edu.ua.

Frolov Yaroslav, doctor of technical science, professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: ya.v.frolov@ust.edu.ua.

Bobukh Oleksandr, candidate of technical science, Head of Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: o.s.bobukh@ust.edu.ua.

Boiarkin Viacheslav, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0009-0005-7582-9504. E-mail: v.v.boiarkin@ust.edu.ua.

Konovodov Dmytro, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0001-8282-4991. E-mail: d.v.konovodov@ust.edu.ua.

Kuzmina Olga, candidate of technical science, assistant professor, Department of Metal Forming named after acad. O.P. Chekmariov, Dnipro Metallurgical Institute, Ukrainian State University of Science and Technologies. ORCID ID: 0000-0003-0794-0583. E-mail: o.m.kuzmina@ust.edu.ua.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.12

УДК 669.18.046.518.411:621.746.3

С.Є. Самохвалов, В.П. Піптюк, С.В. Греков

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ДОБАВКИ НА ТЕПЛОВИЙ СТАН МЕТАЛЕВОЇ ВАННИ У КІВШІ

Анотація. У попередній статті представлені результати математичного моделювання та дослідження з використанням розроблених моделей впливу кількості введених шматкових добавок до ковшової ванни (ємністю 60т і 250т) при обробці сталі на установці ківш-піч (УКП) на її гідродинамічний стан. На прикладі використання кускового феромарганцю марки ФМн78 з урахуванням різної питомої кількості добавки (0,2; 1; 2; 3 кг/т) показано значний вплив досліджуваного фактору на гідродинаміку металевого розплаву протягом розглянутого періоду (до 4,5 с) знаходження феросплаву у ванні.

Ця робота містить результати дослідження впливу кількості добавки на тепловий стан металевого розплаву в умовах обробки на УКП. Викладений матеріал є логічним продовженням попередніх досліджень, у якому збережено вихідні умови, зазначені у попередній статті. Виконання роботи передбачало два етапи досліджень. На першому етапі виконано розрахунково-експериментальну оцінку впливу інтенсивності продування металеві ванни в ковші на її тепловий стан. Визначено вплив (в межах від 0,08 °С до $\approx$ 0,13 °С залежно від інтенсивності продування) на тепловий стан ванни в розглянутий період часу. На другому етапі розроблено математичну модель та проведено чисельні дослідження на комп'ютерній програмі її реалізації з урахуванням наведених вище кількостей добавки в умовах наближених до промислових.

За результатами досліджень та на прикладі наведеної в статті картограми показані зони локальної зміни температури металу в різні моменти часу від моменту введення добавки до розплаву. На наведеній залежності зміни температури розплаву від питомої маси введеної добавки з урахуванням режимів продування ванни підтверджено вплив фактору, що розглядається. З урахуванням результатів дослідження показано пропорційне зниження температури металевого розплаву в зоні контакту добавки усередині ванни після її введення.

Ключові слова: кількість матеріалу-добавки, тепловий стан рідкої металеві ванни

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Раніше з використанням розроблених в Дніпродзержинському державному технічному університеті (ДДТУ) по вихідним даним ІЧМ НАНУ тривимірних математичних моделей гідродинаміки та тепло-масообміну відбувались дослідження процесів позапічної обробки сталі [1-12]. Дослідження, в тому числі, проводили стосовно ківшів ємкістю 60 та 250т, які використовувались відповідно на електрометалургійному заводі «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) і Дніпровському металургійному комбінаті (зараз «КАМЕТ-СТАЛЬ», м. Кам'янське) при обробці сталі спеціального та масового поточного марочного сортаменту на УВП різної потужності.

Результати розрахунків теплового стану для ківшів різної ємкості були виконані за умов з незмінними (середніми) значеннями теплових втрат через кожух незалежно від споживання аргону при його подачі через одну або дві фурми в донному продувному блоці. При цьому виконані дослідження не враховували вплив інтенсивності продувки ванни аргonom на її тепловий стан. Крім того, не враховувався можливий вплив кількості добавки на температуру металу. Тому виявилось доцільним провести додаткові оцінки впливу саме цих факторів. Запланований обсяг роботи по розробці моделі і тестовим її випробуванням стосовно процесів тепло-, масообміну у ванні ківша при обробці металевого розплаву на УВП виконували в два етапи.

На першому етапі з метою перевірки відповідності результатів моделювання та оцінки їх значень в порівнянні з практично отриманими експериментальними вимірами здійснювали промисловий температурний контроль металу і обладнання з фіксацією результатів. Термопарою занурення виконували заміри температури металу до і після продувки ковшової металевий ванни аргonom. На протязі обробки кожної з досліджуваних плавок температуру заміряли (тривалість в межах 3-6 хв.) в певному місті, що відповідає місцю замірів температури в ківші на поверхні ванни і на приблизно однаковій глибині в процесах обробки на УВП. Заміри температури металевий корпусу ківша та його кришки проводили інфрачервоним цифровим пірометром. При цьому не змінювали інтенсивність продування, не здійснювали введення матеріалів-добавок і електродуговий підігрів розплаву.

Експериментальні дослідження виконували для різних фіксованих значень інтенсивності продування в межах від $Q_{\min}$ до $Q_{\max}$, де Q – питома витрата аргону (л/хв.), що відповідає практично застосовуваним на підприємствах витратам для ківша кожної ємності, включаючи режим $Q_{\min} = 0$ л/хв (показано на прикладі ківша ємністю 250т - рис. 1).

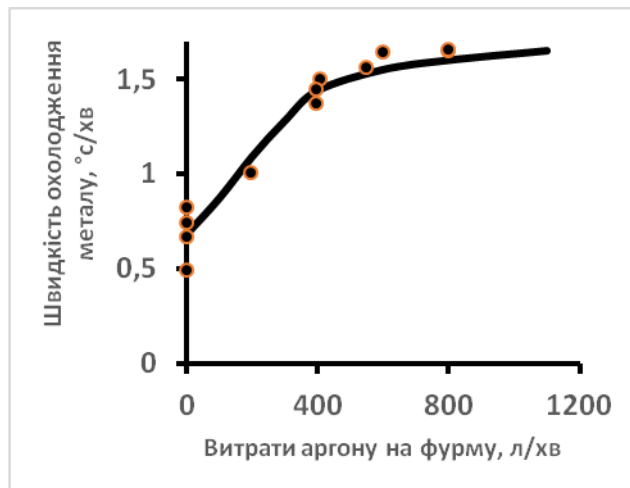


Рисунок 1 - Зміна швидкості охолодження металу на УКП під час продування аргонном через дві донні фурми

Розрахунковими дослідженнями встановлено, що залежність швидкості охолодження металу ($^{\circ}\text{C}/\text{хв}$) по модулю від витрат аргону на ківш (л/хв) має характер функції насичення. Це обумовлено тим, що ефективність теплообміну при обробці на УКП залежить від швидкості перемішування розплаву (в тому числі швидкості металевих потоків вздовж стінок футерівки та теплопередачі через футерівку і кожух ківша), величини випромінювання через оголене дзеркало металу і шлаковий шар, швидкості примусового видалення висхідних потоків газів з-під нагрітої кришки УКП, випромінювання корпусу УКП у навколишнє середовище та інших факторів).

Мета дослідження

На другому етапі ціллю роботи було створення тривимірної математичної моделі тепло- і масопереносних процесів у ківші під час введення матеріалів - добавок, яка враховує гідродинамічний стан металеві ванни, та комп'ютерна реалізація нової моделі при виконанні розрахунків з метою оцінки впливу кількості матеріалів, що вводяться, на тепловий стан розплаву в ківші.

Основні матеріали дослідження

Під час позапічної обробки сталі в ківші різноманітні добавки (модифікуючі, легуючі та рафінуючі) вводяться в ківш колективно, насипом, і кількість їх може досягати сотень кілограмів на порцію. Таке введення суттєво впливає на гідродинаміку розплаву в ківші, що, в свою чергу, повинно впливати на перебіг тепло-, масопереносних процесів. Проте в сучасних математичних моделях, що описують процеси засвоєння добавок при позапічній обробці сталі в ківші такий вплив, здебільшого, не враховується, що при досить великих кількостях введених добавок може приводити до значних похибок в розрахунках.

В роботах [13-15] було розроблено метод колективного опису динаміки дрібнодисперсних фаз в середовищі, який ми і застосували в даній задачі. Запропонована модель враховує ефективну стисливість середовища, взаємний рух, взаємодію і перетворення кількох фаз: розплаву; газу, що захоплюється при подачі добавок та струменем металу, або спеціально вдувається через фурми; твердої дрібнодисперсної фази саме добавок; рідинної дисперсної фази продуктів їх розчинення або плавлення, та інших фаз, в які вона переходить (при необхідності стеження за ними).

Об'ємні густини розплаву, газової, твердої дисперсної фази, рідинної дисперсної фази результатів плавлення твердої дисперсної фази та однією з рідинних дисперсних фаз, в які вона переходить, позначаються як $\gamma, \alpha, \beta, \eta, \chi$, а величини, що до них відносяться, – індексами l, a, b, h та c відповідно. Останні дві фази спочатку позначатимемо спільними індексами l , наприклад, $\eta_l = \eta$ при $l = h$ та $\eta_l = \chi$ при $l = c$. Проте для всіх фаз, що розглядаються, крім газової, будемо використовувати здебільшого масові густини β' та η'_l , які прийнято використовувати в металургії.

В основу математичної моделі, яка розроблялась, покладені наступні основні припущення:

- 1) вздовж стінок ківша і фурми середовище ковзається вільно;
- 2) фазовими перетвореннями газової фази α нехтуємо;

3) при введенні добавок в ківш, як і при входженні струменю розплаву під поверхню розплаву (під час наповнення), відбувається захоплення повітря;

4) колективною складовою швидкості рідких дисперсних фаз η_l відносно розплаву нехтуємо;

5) теплота, що витрачається на прогрів інертного газу, незначна і нею можна знехтувати.

З урахуванням цих припущень гідродинаміка середовища в цілому, а також масоперенос газової фази в нашому випадку визначається системою рівнянь:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} \tilde{p} + \nu_e \Delta \vec{v} + \zeta_e \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) - \alpha \vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = \psi_a - \alpha \xi \rho_0 \vec{g} \cdot \vec{v}_a - \vec{\nabla} \cdot (\alpha \vec{w}_a), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^e)] = \vec{\nabla} \cdot (D_a \vec{\nabla} \alpha) + \psi_a - \xi \rho_0 \vec{g} \cdot [\alpha (\vec{v} + \vec{w}_a^e) + D_a \vec{\nabla} \alpha]. \quad (3)$$

Рівняння переносу фаз, що розглядаються, записується для відносних масових густин фаз:

$$\frac{\partial \beta'}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\beta' (\vec{v} + \vec{w}_b^e)] = \vec{\nabla} \cdot (D_b \vec{\nabla} \beta') + \psi_b' + \Phi_{hb}', \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta_l}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\eta_l \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (D_l \vec{\nabla} \eta_l) + \Phi_l' \quad (5)$$

Відносне масове джерело твердої фази розбите тут на дві складові: $\Phi_b' = \psi_b' + \Phi_{hb}'$, перша з яких ψ_b' використовується для завдання крайових умов у місці подачі добавок в області формування барботажного режиму, а друга Φ_{hb}' пов'язана з фазовим перетворенням між фазами β' та η' .

Теплова сторона процесу, який розглядається, описується рівнянням [15]:

$$C_r \frac{dT}{dt} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_e' \vec{\nabla} T) + \theta, \quad (6)$$

де джерело θ визначається тепловими ефектами початкового прогріву добавок та фазовими перетвореннями і конкретизується при розгляді окремих процесів. Ефективні коефіцієнти C_r та λ_e' враховують присутність у розплаві дисперсних фаз і можуть бути визначені за формулами, наведеними в [15].

Результати дослідження. Обговорення

З використанням розробленої математичної моделі проводили чисельні розрахунки. В якості наведеного об'єкту дослідження розглядалась рідка металева ванна ківша ємністю 250т циліндричної форми, яка описана [16].

Початкові умови введення добавок, які відповідають промисловим умовам, наступні: температура металевого розплаву – 1627 °С. Теплові втрати через відкриту поверхню шлаку з оголеним металом та стінку і днище сталерозливного приводять до зниження температури шлако-металевого розплаву приблизно на 1,6 °С/хв. Останні втрати в подальших дослідженнях будуть уточнювати відповідно до конкретних промислових умов (витрати аргону і оголеність поверхні рідкого металу та ін.) Температура матеріалу, що вводиться, 27 °С.

Попередньо розраховували гідродинамічний стан металевої ванни на 1,5; 3,0; 4,5 с після введення порції добавки [16]. Вибір такого досить короткого терміну (секунди) вимірювання теплового стану металевої ванни обумовлений короткостроковістю процесу охолодження рідкого металу у контактній зоні введення добавки (можливо до утворення твердої шлакової і металевої корочки на поверхні окремих шматків матеріалу, що вводиться) з одночасним її нагріванням.

На рис.2 показана картограма теплового стану рідкої металевої ванни з витратами аргону 800л/хв на фурму в момент введення добавки (0 с) і на 1,5 та 4,5 с. Розрахунками встановлена мінімальна температура теплового стану металевої ванни при різних витратах аргону. Вона становить ~1618 °С, ~1548 °С, ~1452 °С в момент введення добавки; ~1623 °С, ~1578 °С, ~1505 °С на 1,5с; ~1624 °С, ~1593 °С, ~1548 °С на 4,5 с після введення останньої з питомої масою 0,2; 1 і 2 кг/т відповідно. При такій температурі кристалізується скоринка металу на поверхні окремих шматків добавки. При цьому для незначної кількості (менше 1кг/т) матеріалу, що вводиться, буде формуватися скоринка, що обумовить більш складні умови її плавлення і, можливо, змінить рівень її засвоєння. Нижчі витрати аргону на фурму (200, 400, 600 л/хв) незначно змінюють температуру металу, що оточує добавку, тобто фактично не

впливають на процес тепло-, масопереносу у об'ємі ванни, що досліджується у початковий момент (рис. 3).

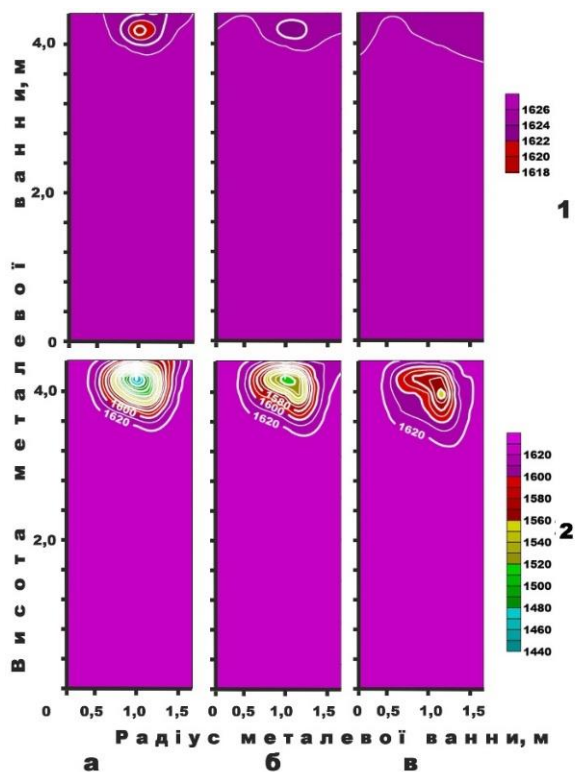


Рисунок 2 - Картограма теплового стану металевого розплаву навколо добавки у радіальному розрізі металевій ванні ківша. Витрати аргону 800 л/хв.

Маса добавки 0,2 (1); 2 (2) кг/т. Момент введення – 0 с (а), після введення добавки через: 1,5 (б), 4,5 с (в).

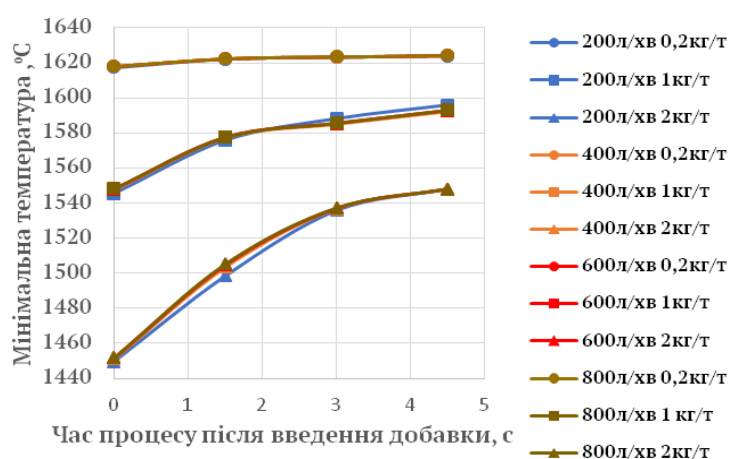


Рисунок 3 - Мінімальні температури в зоні контакту «розплав-добавка» у ківші 250 т під час введення (0 с) та після введення добавки через 1,5; 3,0 та 4,5 с

На рис. 3 представлені екстремальні (мінімальні) температури в момент введення добавки та на протязі 4,5 с перебування добавки в розплаві. Треба зазначити, що при однакових питомих витратах добавки, що вводиться, незалежно від витрат аргону процес нагрівання рідкого і твердого металу проходить з однаковою інтенсивністю (криві лінії на графіках збігаються). Максимальні температури металу на рис. 3 однакові (температура початкових умов 1627 °C) і обумовлені короткостроковістю процесу, що розглядається.

Висновки

1. Розроблено математичну модель і програмний продукт оцінки впливу кількості введеної кускової добавки у рідку металеву ванну в ківші при обробці на УВП на масо-, теплопереносні процеси. Здійснено комп'ютерну реалізацію даної моделі.

Розрахунковими дослідженнями визначено вплив маси введеної добавки на тепловий стан у контактній зоні шлако-металевого розплаву. Показано, що питома маса добавки впливає на градієнт температур рідкого металу у момент введення останньої та на протязі часу (4,5 с), що вивчався.

З використанням розроблених математичних моделей і програмного продукту по дослідженню впливу кількості кускової добавки, що вводиться у металеву ванну ківша на УВП, буде оцінено теплові умови до моменту плавлення твердих матеріалів і ступінь усереднення провідних елементів феросплавів в об'ємі розплаву.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E., Pavlyuchenkov I.A., et al. Experimental testing of the validity of mathematical models of hydrodynamics and transfer for the melt-processing conditions in ladle-furnace unit. Springer. Metallurgist. July 2013, Volume 57, Issue 3–4, pp. 194–198.
2. Использование численных методов в изучении свойств и условий плавления материалов добавок при производстве стали /В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, С.Е. Самохвалов и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2009. - Вып.20. - С.134-147.
3. Моделирование теплового состояния ковшевой ванны установки ковш-печь мощностью 35 МВ·А /В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, В.Ф. Поляков и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2011. - Вып.23. - С.137-141.

4. Исследование тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Часть 2. Результаты моделирования теплового состояния расплава /В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, И.А. Павлюченков и др.// Теория и практика черной металлургии. - 2013. - № 5-6. – С.49-52.
5. Оценка достоверности результатов моделирования теплового состояния ковшовой ванны /В.П. Пиптюк, С.Н. Павлов, В.В. Мощный и др.// Металлургическая и горнорудная промышленность. -2013. -№4. –С. 14-16.
6. Тепловое состояние расплава в разных условиях перемешивания ковшовой ванны /В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, В.В. Мощный и др.// Процессы литья. - № 3 (99). - 2013. - С.37-41.
7. Piptyuk V.P., Polyakov V.F., Samokhvalov S.E. Study of the thermal state of the bath of a ladle-furnace unit. Scopus Feedback: Metallurgist. - 2011. – 55 (7-8), -pp. 483.
8. Исследование тепло- и массообмена в ваннах установок ковш-печь с целью повышения эффективности их использования /В.П. Пиптюк, В.Ф. Поляков, С.Е. Самохвалов и др.// Электрометаллургия. – 2008. - №10. - С.10-17.
9. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E., I.N.Logozinskii, et all. Effect of reinforcing the lining in the impact zone of a steel-pouring ladle on the melt-stirring parameters Scopus Feedback: Metallurgist. -2013. – 57 (7-8). -pp. 586
10. Влияние электромагнитных сил на перемешивание ванны установки ковш-печь переменного тока /В.П. Пиптюк, И.В. Крикент, С.Е. Самохвалов и др.// Металл и литьё Украины. - 2014. - №8. - С.3-6.
11. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E., Pavlyuchenkov I.A. Mass and heat transfer in 140-t AC ladle-furnace unit. Scopus Feedback: Steel in Translation. - 2007. – 37 (11), -pp. 943.
12. Тепловое состояние расплава в разных условиях перемешивания ковшовой ванны /В.П. Пиптюк, С.Е. Самохвалов, В.В. Мощный и др.// Процессы литья. - 2013. - №3 (99) - С.37-41.
13. С.Е. Самохвалов Теплофізичні процеси в багатофазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ. –1994. – 172 с.
14. С.Е. Самохвалов Метод расщепления по физическим факторам для несоленоидального движения газожидкостных сред. Инж.-физ. журнал. – 1998. – Т.71. - №3. – С.454-459.
15. А.П. Огурцов, С.Е. Самохвалов Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. – К.: Наукова думка. – 2001. – 412 с.
16. Вплив кількості добавки на гідродинаміку металевої ванни у ківші /С.Е. Самохвалов, В.П. Пиптюк, С.В. Греков// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. - 2023. - №37. - С.231-245.

REFERENCES

1. Piptyuk V.P., Samokhvalov S.E., Pavlyuchenkov I.A., et all. (2013) Experimental testing of the validity of mathematical models of hydrodynamics and transfer for the melt-processing conditions in ladle-furnace unit. Springer. Metallurgist. 57, 3–4, 7, 194–198 [in Engliendian].
2. Piptyuk V.P., Polyakov V.F., Samokhvalov S.E. et al. (2009). Ispol'zovaniye chislennykh metodov v izuchenii svoystv i usloviy plavleniya materialov dobavok pri proizvodstve stali. – [Use of numerical methods in studying the properties and conditions of melting of additive materials in steel production.] Fundamentalnyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii - Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 20, 134-147. [in Russian].
3. Piptyuk V.P., S.E. Samokhvalov, V.F. Polyakov et al. (2011). Modelirovaniye teplovogo sostoyaniya kovshevoy vannы ustankovki kovsh-pech' moshchnost'yu 35 MV·A - [Modeling the

- thermal state of the ladle bath of a ladle-furnace unit with a capacity of 35 MVA] Fundamentalnyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii - Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. 23, 137-141 [in Russian].
4. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E., Pavlyuchenkov I.A. et al. (2013). Issledovaniye teplo-, massoobmennyykh protsessov v vanne ustanovki kovsh-pech'. Chast' 2. Rezul'taty modelirovaniya teplovogo sostoyaniya rasplava. – [Study of heat and mass transfer processes in the bath of a ladle furnace. Part 2. Results of modeling the thermal state of the melt]. Teoriya i praktika chernoy metallurgii. - Theory and Practice of Ferrous Metallurgy. 5-6, 49-52 [in Russian].
 5. Pityuk V.P., Pavlov S.N., Motsny V.V. et al. (2013). Otsenka dostovernosti rezultatov modelirovaniya teplovogo sostoyaniya kovshovoy vanny. – [Evaluation of the reliability of the results of modeling the thermal state of a ladle bath]. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost - Metallurgical and Mining Industry. 4, 14-16 [in Russian].
 6. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E., Motsny V.V. et al. (2013). Teplovoye sostoyaniye rasplava v raznykh usloviyakh peremeshivaniya kovshovoy vanny – [Thermal state of the melt under different conditions of mixing of the ladle bath]. Protsessy litya - Casting processes 3 (99), 37-41 [in Russian].
 7. Pityuk V.P., Polyakov V.F., Samokhvalov S.E. (2011). Study of the thermal state of the bath of a ladle-furnace unit. Scopus Feedback: Metallurgist. 55 (7-8), 483 [in Engliendian].
 8. Pityuk V.P., Polyakov V.F., Samokhvalov S.E. et al. (2008). Issledovaniye teplo- i massoobmena v vannakh ustanovok kovsh-pech s tselyu povysheniya effektivnosti ikh ispolzovaniya.- [Study of heat and mass transfer in baths of ladle-furnace units in order to increase the efficiency of their use]. Elektrometallurgiya – Electrometallurgiya, 10, 10-17 [in Russian].
 9. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E., I.N.Logozinskii, et all. (2013). Effect of reinforcing the lining in the impact zone of a steel-pouring ladle on the melt-stirring parameters Scopus Feedback: Metallurgist. 57 (7-8), 586 [in Engliendian].
 10. Pityuk V.P., Krikent I.V., Samokhvalov S.E. et al (2014). Vliyaniye elektromagnitnykh sil na peremeshivaniye vanny ustanovki kovsh-pech peremennogo toka. [The influence of electromagnetic forces on the mixing of the bath of the AC ladle-furnace unit]. Metall i li'yo Ukrainy - Metal and casting of Ukraine, 8, 3-6 [in Russian]
 11. Pityuk V.P., Samokhvalov S.E., Pavlyuchenkov I.A. (2007). Mass and heat transfer in 140-t AC ladle-furnace unit. Scopus Feedback: Steel in Translation, 37 (11), 943 [in Engliendian].
 12. Pityuk V. P., Samokhvalov S. E., Motsny V. V., et al. (2013). Teplovoye sostoyaniye rasplava v raznykh usloviyakh peremeshivaniya kovshovoy vanny - [Thermal state of the melt under different conditions of mixing of the ladle bath]. Protsessy litya - Casting Processes, 3 (99), 37-41 [in Russian].
 13. Samokhvalov S.E. (1994). Teplofizychni protsesy v bahatofaznykh seredovyshchakh: teoretychni osnovy kompyuternoho modelyuvannya - [Thermophysical processes in multiphase media: theoretical foundations of computer modeling]. – Dniprodzerzhynsk: DDTU - Dniprodzerzhinsk: DDTU [in Ukrainian].
 14. Samokhvalov S.E. (1998). Metod rasshcheplenyia po fizycheskym faktoram dlya nesolenoydal'noho dvyzheniya hazozhydkostnykh sred – [The splitting method by physical factors for the non-solenoid motion of gas-liquid media]. Inzhenerno-fizicheskii zhurnal - Engineering and Physics Journal, 71, 3, 454-459 [in Ukrainian].
 15. Ogurtsov A.P., Samokhvalov S.E. (2001). Matematychno modelyuvannya teplofizychnykh protsesiv u bahatofaznykh seredovyshchakh – [Mathematical modeling of thermophysical

processes in multiphase environments]. - Kyiv: Naukova dumka - Kyiv: Scientific opinion. [in Ukrainian].

16. Samokhvalov S.E., Piptiuk V.P., Grekov S.V. (2023). Vplyv kilkosti dobavky na hidrodynamiku metalevoyi vanny u kivshi – [The influence of the amount of additive on the hydrodynamics of a metal bath in a ladle]. Fundamentalnyye i prikladnyye problemy chernoy metallurgii - Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, 37, 231-245 [in Ukrainian].

Received 08.04.2025.

Accepted 09.05.2025.

UDC 669.18.046.518.411:621.746.3

Sergey Samokhvalov, Vitaliy Pipyuk, Stanislav Grekov

INFLUENCE OF THE QUANTITY OF THE ADDITIVE ON THE THERMAL CONDITION OF THE METAL BATH IN THE LADLE

Abstract. *The previous article presents the results of mathematical modeling and research using the developed models of the effect of the amount of lump additives introduced into a ladle bath (with a capacity of 250 t) during steel processing in a ladle furnace unit (LFU) on its hydrodynamic state. Using the example of using lump ferromanganese grade FMn78, taking into account different specific amounts of the additive (0,2; 1; 2; 3 kg/t), a significant effect of the studied factor on the hydrodynamics of the metal melt during the considered period (up to 4.5 s) of the ferroalloy additive being in the bath is shown.*

This work contains the results of a study of the effect of the additive amount on the thermal state of the metal melt under LFU processing conditions. The presented material is a logical continuation of previous studies, in which the initial conditions specified in the previous article are preserved. The work included two stages of research. At the first stage, the influence of the intensity of blowing of the metal bath in the ladle on its thermal state was estimated and experimentally assessed. An influence (from ≈ 0.08 °C to ≈ 0.13 °C depending on the intensity of blowing) on the thermal state of the bath in the considered period of time was determined. At the second stage, a mathematical model was developed and numerical studies were carried out on a computer program for its implementation, taking into account the above amounts of additives under conditions close to industrial ones.

Based on the research results and the example of the cartogram given in the article, the zones of local changes in metal temperature at different points in time from the moment

of introducing the additive into the melt are shown. The influence of the factor under consideration is confirmed on the given dependence of the change in melt temperature on the specific gravity of the introduced additive, taking into account the bath blowing modes. Taking into account the research results, a proportional decrease in the temperature of the metal melt in the contact zone of the additive inside the bath after its introduction is shown.

Keywords: *amount of additive material, thermal condition of a liquid metal bath*

Сергій Євгенович Самохвалов, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, ORCID 0000-0002-7362-213X, E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Віталій Петрович Піптюк, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, ORCID 0000-0002-2915-1756, E-mail: office.isi@nas.gov.ua +380678755014

Станіслав Вікторович Греков, науковий співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук, ORCID 0000-0003-2849-0999, E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Sergey Samokhvalov, Doctor Technical Sciences, Senior Researcher, Professor, Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID 0000-0002-7362-213X, E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Vitaliy Pipyuk, Philosophy Doctor (Technical), Senior Researcher, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID 0000-0002-2915-1756, E-mail: office.isi@nas.gov.ua

Stanislav Grekov, Researcher, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID 0000-0003-2849-0999, E-mail: office.isi@nas.gov.ua

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.13

УДК 621.316.925

І. І. Коваленко, В. В. Радченко, О. І. Осаул, А. А. Єрофєєва,
В. О. Піліпенко, В. Л. Прихно

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Абстракт. Метою роботи є всебічний аналіз показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств України, з урахуванням статистичних даних до 2022 року та змін, спричинених повномасштабною війною. Особливу увагу приділено електропостачанню в галузях металургії, хімічної промисловості та машинобудування, де фіксуються найбільші відхилення параметрів PQ.

Методика. Робота базується на порівняльному аналізі результатів вимірювань якості електроенергії на українських промислових підприємствах. Залучено статистику до 2022 року, дані моніторингу в період війни 2022–2023 рр., а також стандарти ДСТУ EN 50160:2014, IEEE 519 та вимоги ENTSO-E. Проведено аналіз основних причин відхилення PQ: гармоніки, флікер, несиметрія, реактивна потужність.

Результати. Виявлено, що до війни найбільші порушення PQ спостерігались у зварювальних і ливарних цехах металургії (THD_U до 12%, несиметрія до 3,6%), на хімічних підприємствах – перевищення гармонік 6–16 порядку, а в машинобудуванні – локальні проблеми з реактивною потужністю. Під час війни основні проблеми змістилися до глибоких провалів напруги, нестабільності частоти при генераторному живленні та зниження $\cos\phi$. Частина промисловості була зупинена, що тимчасово знизило рівень гармонік.

Наукова новизна полягає у вперше проведеному комплексному узагальненні впливу війни на параметри PQ в українській промисловості. В роботі наведено дані по THD , флікеру та несиметрії в умовах кризових режимів.

Практичне значення дослідження полягає в обґрунтуванні потреби у впровадженні сучасних засобів покращення якості електроенергії – активних фільтрів, компенсаторів, систем моніторингу PQ.

Ключові слова: якість електроенергії, промислові мережі, гармоніки, флікер, несиметрія, реактивна потужність, воєнний вплив, металургія

© Коваленко Інна, Радченко Віталій, Осаул Олександр, Єрофєєва Аліна, Піліпенко В'ячеслав, Прихно Валерія

Вступ

Як відомо [1-5], якість електроенергії (Power Quality, PQ) – це сукупність параметрів електричної енергії, що визначають її придатність для споживачів. Для промислових підприємств належний рівень PQ критично важливий, адже від нього залежить надійність роботи обладнання, економічні показники та безпечність технологічних процесів. Згідно з українським стандартом ДСТУ EN 50160:2014, напруга має відхилятися не більше $\pm 10\%$ від номіналу, частота – в межах 50 Гц $\pm 1\%$ (для синхронної роботи з енергосистемою) [1], а довготривалий показник флікера (мерехтіння) має бути $\leq 1,0$ протягом 95% часу спостереження [1]. У ЄС та США діють подібні вимоги (наприклад, IEEE 519 вимагає $\leq 5\%$ гармонічних спотворень напруги на середній напрузі) [2,6,7]. Невідповідність цим нормам може призвести до відмов обладнання, браку продукції та фінансових втрат. Для прикладу, 1 хвилина перерви електропостачання у хімічній промисловості коштує приблизно 135 тис. дол., а в харчовій – близько 2,5 тис. дол. втрат [3].

На якість електроенергії впливають як постачальники (генерація, мережі), так і самі промислові споживачі. Основні параметри PQ включають: напругу (рівень, провали, перенапруги), частоту, гармоніки (спотворення форми сигналу), флікер (мерехтіння, викликане коливаннями напруги) та коефіцієнт потужності/реактивну потужність. Промислові установки часто створюють нелінійні та несиметричні навантаження, що генерують гармонічні струми, споживають значну реактивну потужність і викликають коливання напруги. Наприклад, електродугові печі (ЕДП) є одним з найпотужніших джерел перешкод – вони створюють різкі коливання споживання, які призводять до флікер-ефекту та вищих гармонік [8]. Так само, великі перетворювачі частоти та випрямлячі (тягові приводи, зварювальні випрямлячі тощо) спотворюють синусоїду напруги гармоніками [9,10], а масове застосування електронних систем (ІТ-обладнання, світлодіодне освітлення) призводить до накопичення гармонічних струмів у мережі [12]. Напруга може провалюватися при пусках великих двигунів або коротких замиканнях, частота відхилятися при дизель-генераторному живленні ізолюваних вузлів, флікер проявляється як мерехтіння освітлення через коливання напруги від навантажень типу ЕДП чи

зварювальних апаратів, а низький коефіцієнт потужності (значна споживана реактивна потужність) спричиняє перевантаження мережі і додаткові втрати.

Мета роботи полягає у всебічному аналізі статистичних показників якості електроенергії (Power Quality, PQ) у промислових електричних мережах України та зарубіжних країн, з акцентом на галузі металургії, хімічної, харчової промисловості та машинобудування. Основну увагу приділено українському контексту, із врахуванням специфіки впливу воєнних дій 2022–2023 років на енергетичну інфраструктуру та якість електропостачання.

1. Кількісна оцінка показників якості електроенергії в цехових мережах промислових підприємств до 2022 р. В останні роки українська промисловість поступово запроваджувала європейські стандарти PQ. З 2018 р. нормативні вимоги ДСТУ EN 50160 охоплюють мережі загального призначення [1], а низка досліджень фіксує ситуацію на підприємствах. Проте історично проблема PQ часто недооцінювалась – «українські підприємства борються за виживання і бракує коштів на покращення PQ; належних регуляцій PQ донедавна не було» [11]. Багато заводів експлуатують застаріле обладнання (електропечі, двигуни, трансформатори), коефіцієнт потужності нерідко $<0,9$, а компенсатори реактиву встановлені не всюди. Це призводило до відхилень параметрів якості вже в нормальних умовах.

Металургія (електросталеплавильні та прокатні виробництва). Найбільші відхилення PQ спостерігалися в електромережах підприємств чорної металургії – через потужні дугові печі, прокатні стани та зварювальне обладнання. Так, обстеження ПАТ «Запорізький завод феросплавів» (умовно, ОАО «ЗТЗ» – велике металургійне підприємство в Запоріжжі) виявило значне перевищення гармонічних спотворень напруги у зварювальному й ливарному цехах [12]. У зварювальному цеху ЗТЗ встановлені випрямлячі з мостовою схемою, що генерують вищі гармоніки і збільшують коефіцієнт несинусоїдальності напруги [12]. Виміряні коефіцієнти гармонік (THD_U) становили 8–12% (за норми $\leq 5\%$ для 6–10 кВ), максимальні провали напруги до -9% від номіналу, а коефіцієнт несиметрії (K_{2U}) сягав $3,6\%$ [12]. У ливарному цеху цього ж заводу THD_U був на рівні 7–11%, провали напруги до -7% , несиметрія $\sim 2\text{--}3,5\%$ [12]. Для порівняння, у механічному цеху ЗТЗ, де

переважають асинхронні двигуни, показники були кращими: $THD_U \sim 2-4\%$, відхилення напруги в межах $\pm 5\%$, несиметрія $\sim 1,7-1,9\%$ (в межах норми 2%) [12]. Ці дані свідчать, що саме нелінійні дугові та випрямні установки (зварювальні апарати тощо) були головними винуватцями погіршення PQ в металургії.

Інший приклад – меткомбінат «АрселорМіттал Кривий Ріг», найбільший споживач електроенергії в Україні. Він використовує переважно доменну плавку сталі, але має потужні прокатні стани та електропечі для легованого металу. У мирний час це підприємство споживало $\sim 300-400$ МВт, спричиняючи періодичні просадки напруги в мережі регіону. Публікації конкретних вимірів PQ по ньому обмежені, проте відомо, що під час війни 2022 р. комбінат суттєво знизив виробництво – споживання електроенергії металургією України у 2022 році впало на $\sim 52\%$ [13]. Це, з одного боку, зменшило навантаження на мережу (і відповідно рівень гармонік та флікеру), але з іншого – призвело до нерівномірних режимів через відключення агрегатів та пошкодження мереж. На щастя, показник частоти в об’єднаній енергосистемі вдалося втримати в межах $\pm 1\%$ завдяки синхронній роботі з європейською ENTSO-E з березня 2022 р. [1], хоча в ізолюваних острівних режимах (як-от при роботі від резервних генераторів) стандарт дозволяє відхилення аж до $\pm 15\%$ ($42,5-57,5$ Гц) [1].

Хімічна промисловість. Підприємства хімічної галузі (виробництво добрив, нафтопереробка тощо) зазвичай мають менше нелінійних електропечей, але використовують потужні двигуни, компресори і випрямлячі для електролізу. На прикладі Кременчуцького НПЗ («Укртатнафта») можна простежити якість напруги в різних цехах переробки нафти [12]. Цех крекінгу важких нафтопродуктів живиться від підстанції 6 кВ і має значну концентрацію нелінійних навантажень. Осцилографування напруги показало наявність спектру парних гармонік $6, 8, 10...$ до 16 -ї, деякі з яких перевищили допустимі рівні (напр., 6 -та гармоніка до $0,91\%$ проти норми $0,5\%$) [12]. Втім, сумарний коефіцієнт THD_U не перевищив $3,6\%$, що вписується в норму $\leq 5\%$ [12]. Напруга на виході трималася в межах $\pm 1\%$, несиметрія $\sim 0,5-1,2\%$ (в межах стандарту) [12]. Для відділення ректифікації (очистки фракцій) ситуація схожа: $THD_U \sim 2,3-4,3\%$, гармоніки практично відсутні (домінує 1 -а гармоніка),

відхилення напруги $\sim -1,2...+1\%$, $K_{2U} \sim 1-1,5\%$ [12]. У цеху фільтрації взагалі навантаження переважно лінійні – $THD_U \sim 0,1-0,3\%$, гармоніки $\leq 0,02\%$, напруга $\pm 1\%$, несиметрія $0,2-1,8\%$ [12]. Таким чином, хімічні підприємства за нормальної роботи можуть забезпечувати досить якісну електроенергію (невеликі гармонічні спотворення, стабільна напруга), якщо не використовують потужних нелінійних установок. Однак війна різко змінила ситуацію: значна частина хімічних заводів зупинилася або була пошкоджена. Зокрема, Кременчуцький НПЗ зазнав ракетних ударів і з березня 2022 р. не працює, що усунуло локальні проблеми PQ, але створило дефіцит пального та зміни режимів у мережі.

Машинобудування. Заводи машинобудування та металообробки (важкі пресово-кувальні цехи, виробництво обладнання) також можуть спричиняти проблеми PQ, хоча зазвичай у меншому масштабі, ніж металургія. Приклад – підприємство «Завод монтажних виробів», м. Дніпро, яке досліджували фахівці НМетАУ [12]. У його цеху механічної обробки виявлено високий рівень гармонік через використання великого індукційного нагрівального обладнання: $THD_U \approx 7,4-9,4\%$, що перевищує норму [12]. Водночас напруга там була досить стабільною (коливання всього $\pm 0,5\%$) за рахунок жорсткої підстанції, а несиметрія – $\sim 1-1,5\%$. У допоміжних цехах цього ж заводу показники кращі: напр., ремонтний цех – $THD_U \sim 0,9-2,9\%$, напруга $\pm 1\%$, $K_{2U} \sim 0,3-1,7\%$; інструментальний цех – $THD_U \sim 1,8-3,8\%$, напруга $\pm 1,2\%$, $K_{2U} \sim 1-2\%$ [12]. Це демонструє, що гармонічні спотворення в машинобудуванні суттєво залежать від наявності частотних перетворювачів, електропечей чи індукційних установок. Більшість же навантажень (двигуни, резистивні печі) є лінійними або близькими до таких, тож загальний рівень THD часто вкладається у $3-5\%$. У наведеному прикладі підприємство мало розбаланс споживання реактивної потужності: на деяких ділянках генерувався надлишковий реактив (внаслідок компенсації або холостого ходу трансформаторів), на інших – споживався. За даними дослідження [12], у мережах $0,4-10$ кВ машинобудівних заводів нерідко спостерігається чергування ділянок з генеруванням та споживанням реактивної потужності, що ускладнює підтримання єдиного рівня коефіцієнта потужності по

підприємству. Зведені дані вимірювань PQ на деяких українських підприємствах до 2022 року наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Показники якості електроенергії на вибраних промислових підприємствах
України (до 2022 р.) [12]

Регіон (Україна)	Галузь (підприємство/цех)	Показники PQ (виміряні значення)
1	2	3
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, зварювальний цех)	Напруга $-5...+5\%$ (просадки до -9% при навантаженні); THD _U $> 8-12\%$ (вище норми 5%); флікер помітний; несиметрія $1,5-3,6\%$ (перевищення 2%) Причина: випрямлячі дугових зварювальних апаратів
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, ливарний цех)	Напруга $-7...+5\%$; THD _U $> 7-11\%$ (вище норми); несиметрія $2,0-3,5\%$ Джерела: індукційні печі, гальванічні ванни (випрямлячі) в цеху
Центральна Запоріжжя	Україна, Металургія (феросплавний завод, мех. цех)	Напруга $-5...+4\%$; THD _U $> 2-4\%$ (норма виконана); несиметрія $\sim 1,8\%$ (в нормі) Навантаження: переважно асинхронні двигуни.
Центральна Кременчук	Україна, Нафтопереробка (НПЗ, установка крекінгу)	Напруга $-1...+1\%$; THD _U $> \sim 3,6\%$ ($\leq 5\%$ норми); несиметрія $\sim 0,5-1,2\%$ Вищі парні гармоніки 6–16 присутні.
Центральна Кременчук	Україна, Нафтопереробка (НПЗ, відділення ректифікації)	Напруга $-1,2...+1\%$; THD _U $> 2,3-4,3\%$ (норма виконана); несиметрія $1-1,5\%$.

Продовження таблиці 1

1	2	3
Центральна Україна, Кременчук	Нафтопереробка (НПЗ, цех фільтрації)	Напруга $-1...+1\%$; THD_U $> 0,1-0,3\%$ (дуже низький); гармоніки незначні ($\leq 0,02\%$); несиметрія $0,2-1,8\%$.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, механічний цех)	Напруга $-0,5...+0,5\%$; THD_U $> 7,4-9,4\%$ (високий рівень); несиметрія $\sim 1-1,5\%$ Причина: індукційні нагрівальні пристрої.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, ремонтний цех)	Напруга $-1...+1\%$; THD_U $> 0,9-2,9\%$ (помірний); несиметрія $0,3-1,7\%$.
Центральна Україна, Дніпро	Машинобудування (завод, інструментальний цех)	Напруга $-1,2...+1\%$; THD_U $> 1,8-3,8\%$; несиметрія $1-2\%$.

2. Вплив війни (2022–2023 рр.) на PQ в Україні. Повномасштабна війна різко погіршила ситуацію з електропостачанням. Російські обстріли з осені 2022 р. призвели до масових відключень споживачів і аварійних режимів. За оцінками, загальне споживання електроенергії в Україні впало щонайменше на 50% [14]. Значна частина генерації була зупинена або знищена (ТЕС, ТЕЦ, підстанції) [14]. Для промисловості це означало часті та тривалі перерви електропостачання, роботу від резервних дизель-генераторів і сильні коливання напруги при перепідключеннях. Найбільше постраждали енергоємні галузі – металургійні заводи Донбасу й Придніпров’я (деякі окуповані або зруйновані), хімзаводи (Азот, нафто переробка) та машинобудівні гіганти на прифронтових територіях.

Під час екстрених відключень взимку 2022–23 рр. напруга в мережах часто знижувалася нижче норми через перевантаження уцілілих ліній. Повідомлялося про випадки роботи обладнання на пониженій напрузі (наприклад, $\sim 180-190$ В замість 220 В у низьковольтних мережах під час дефіциту генерації). Частота ОЕС України, на щастя, залишалася близькою до

50 Гц завдяки аварійному експорту/імпорту з ЄС та автоматичі відключень – відхилення не перевищували $\pm 0,2$ Гц (0,4%) навіть у кризові моменти, що відповідає вимогам ENTSO-E. Флікер-ефект в системному масштабі проявлявся як миготіння світла в будівлях при перемиканні схем живлення; його кількісні оцінки відсутні, але суб’єктивно комфорт споживачів погіршувався.

На окремих підприємствах, що працювали під обстрілами або на генераторах, показники PQ могли істотно відхилятися. Наприклад, коли завод живиться від дизель-генератора, частота може коливатися в межах $\pm 2\%$ і більше залежно від навантаження (допустимо до $\pm 15\%$ згідно стандартів для ізольованих систем [1]). Реактивна потужність при роботі на генераторі часто не компенсується повністю, що веде до низького коефіцієнта потужності $\sim 0,7-0,8$ і додаткового падіння напруги. Фактичних публікацій з вимірами PQ на промислових об’єктах під час бойових дій практично немає (з міркувань безпеки та через зупинку багатьох виробництв). Однак можна очікувати, що гармонічні спотворення переважно зменшились (бо відключені основні генератори гармонік – дугові печі, великі приводи), натомість провали напруги та флікер почастишали через нестабільні режими. Найбільшим викликом стало забезпечення живлення критичної інфраструктури: багато заводів перепрофілювали електроспоживання або перейшли на меншу потужність, щоб працювати в умовах дефіциту енергії.

В умовах післявоєнного відновлення на Україну чекає масштабна робота з відбудови електромереж та впровадження сучасних засобів покращення PQ (динамічні компенсатори, фільтри тощо). Вже зараз міжнародні компанії (наприклад, Siemens) передають обладнання для стабілізації напруги та частоти в Україні [14]. Уряд та НКРЕКП працюють над оновленням нормативів і вимог до якості електропостачання з врахуванням досвіду війни. Таким чином, в українській промисловості питання якості електроенергії перейшло з розряду суто технічних у розряд стратегічних – адже стає електропостачання є основою економічного відновлення [1].

3. Причини відхилень PQ та їхні джерела. Типові причини погіршення якості електроенергії в промислових електромережах можна згрупувати так:

Нелінійні навантаження, що генерують гармоніки. Це, передусім, силові перетворювачі: випрямлячі, інвертори, тиристорні перетворювачі частоти. На підприємствах металургії – це електродугові та індукційні печі, великі випрямлячі для гальваніки, зварювальне обладнання. Як зазначено у дослідженні, ЕДП створює значні гармонічні струми і несиметрії [8], а випрямлячі зварювальних апаратів на феросплавному заводі збільшили THD до 12% [12]. Навіть у харчовій і машинобудівній галузях впровадження частотних приводів призводить до появи 5-ї, 7-ї та інших гармонік струму. Джерелом парних гармонік можуть бути нелінійні елементи з насиченням (трансформатори, дугові печі – вони генерують 2-гу, 4-ту, 6-ту тощо). Це призведе до наслідків: гармоніки викликають додаткові нагріви двигунів і трансформаторів, резонанси в конденсаторах, помилки електроніки.

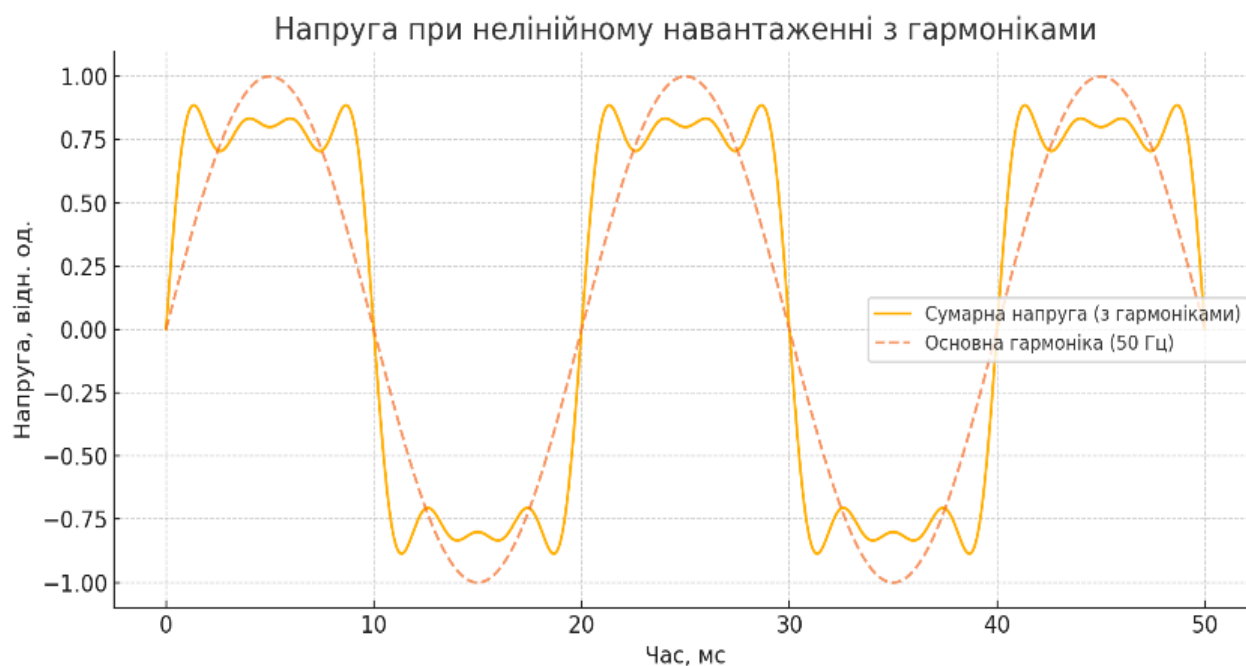


Рисунок 1 - Графік напруги при нелінійному навантаженні, що генерує гармоніки

З рис.1 видно спотворення синусоїди — результат додавання гармонік (3-ї, 5-ї, 7-ї) до основної частоти 50 Гц.

Різко змінні та імпульсні навантаження (флікер). Коливання напруги (мерехтіння) породжуються навантаженнями, що швидко змінюють споживану потужність. Класичний приклад – електродугова сталеплавильна піч: її дуга

горить нестабільно, споживаний струм хаотично коливається, спричиняючи низькочастотні коливання напруги в мережі (флікер) [8].. Флікер вимірюється показниками Pst, Plt. В мережах промислових підприємств України Pst часто перевищує одиницю без компенсації, тобто світло мерехтить помітно для ока. Інші джерела флікера – точкове зварювання (автозаводи), великі електродвигуни при пусках (особливо якщо пуск “директний”), навіть ліфти та крани на слабких живильних лініях можуть викликати миготіння [8]. Наслідки флікера: погіршення самопочуття людей, швидке старіння ламп освітлення, збої автоматики. Як відомо [8], флікер – проблема переважно металургії; в інших галузях Pst зазвичай низький.

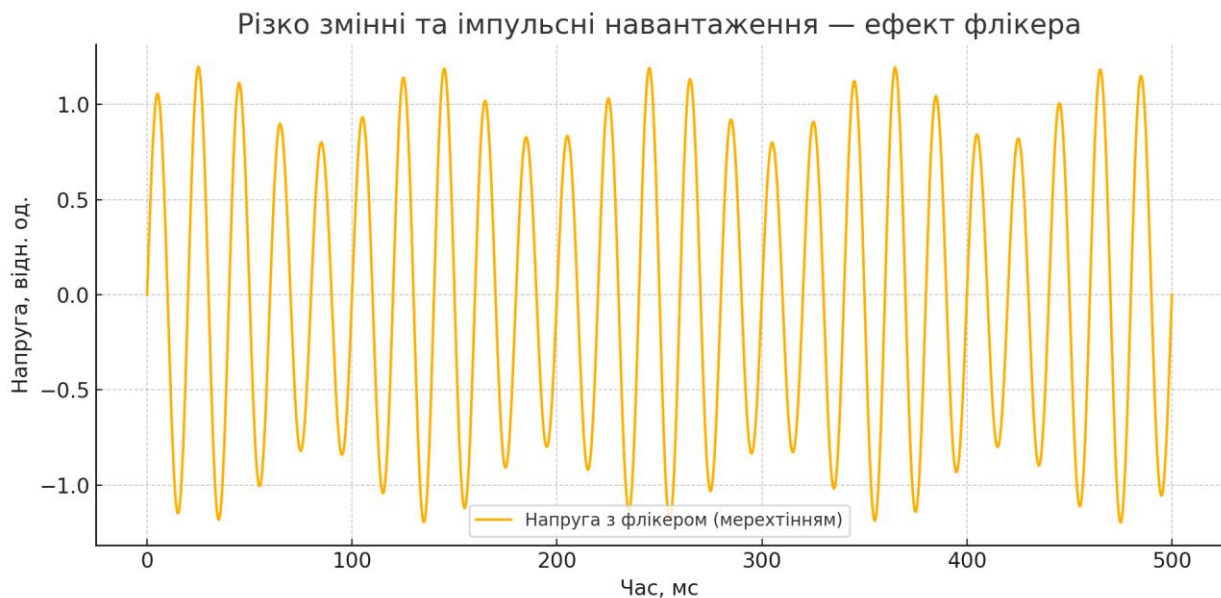


Рисунок 2 - Графік напруги з ефектом флікера — мерехтіння спричинене амплітудною модуляцією на низькій частоті (близько 9 Гц)

Надлишок або нестача реактивної потужності (низький $\cos\varphi$). Велика кількість індуктивних навантажень (двигуни, трансформатори) призводить до споживання реактивної потужності, яке якщо не компенсувати, викликає зниження напруги на шинах підприємства та перевантаження мереж. В Україні були випадки, коли ділянки підприємств генерували реактивну потужність (через перекомпенсацію), в той час як інші споживали – це створювало нерівномірний режим і “гойдало” напругу [12]. Низький $\cos\varphi \sim 0,75$ означає, що струм в 1,3 раза більший за активний – отже, більші втрати і просадка напруги

на лініях. Наприклад, на Дніпровському заводі (механічний цех) до фільтрації $\cos\varphi \approx 0,8$, після – 0,95, і напруга піднялась з -4% до -1% [2]. Джерела реактивної потужності: асинхронні двигуни (особливо при недовантаженні), електрозварювання, печі, дуги. Наслідки: падіння напруги, нагрів проводів, штрафи від постачальника.

Несиметричні навантаження. Викривлення симетрії напруг (коеф. несиметрії K_{2U}) виникає при нерівномірному розподілі однофазних навантажень по фазах або при несправностях (обрив фази і т.д.). В таблиці 1 помітно, що на деяких укр. підприємствах K_{2U} доходив до 3–3,6% [12], що перевищує норму 2%. Це було спричинено однофазними випрямлячами (наприклад, електролізні ванни у феросплавному виробництві живляться двофазно, що створює несиметрію) [12]. Наслідки несиметрії: нагрів роторів двигунів, пульсації моменту, спрацювання захистів. В розвинутих країнах великі однофазні навантаження практично не допускаються до мереж, у той час як в Україні ще зустрічалися застарілі схеми живлення, що створюють несиметрію.

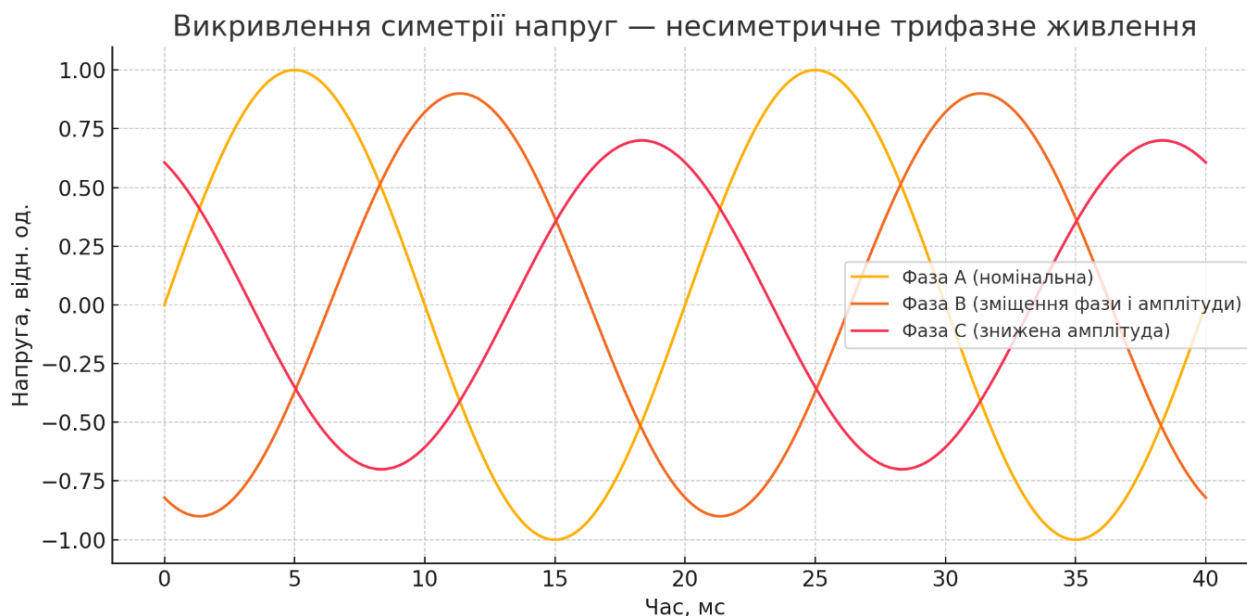


Рисунок 3 - Графік несиметричної трифазної системи напруги

Аварійні та зовнішні впливи. До них відносяться короткі замикання, грозові перенапруги, аварійні відключення ліній. Для промисловості це

неконтрольовані фактори, але вони сильно впливають на PQ. Наприклад, короткі замикання у мережі викликають глибокі провали напруги (sags) на долі секунди, які можуть зупинити чутливі верстати. У мирній Україні середньостатистичне промислове підприємство відчувало 10–20 провалів напруги на рік [1], під час війни ця цифра зросла в рази. Захиститися від цього можна лише установкою UPS або DVR (динамічний регулятор напруги).

Інший аспект – коливання частоти в об’єднаній енергосистемі при раптовому відключенні великих генеруючих потужностей. У Європі та США автоматика підтримує частоту в межах 49,5–50,5 Гц чи 59,5–60,5 Гц, тоді як, наприклад, в Індії 2018 р. були зафіксовані відхилення 48–52 Гц при розділенні мережі (blackout), що позначилося на промислових споживачах (зупинки конвеєрів тощо). Військові дії можна розглядати як екстремальний зовнішній фактор, що призвів до масових аварій – і тут український досвід унікальний для сучасного світу [1].

Підсумовуючи: в Україні до війни основними джерелами проблем PQ були застарілі технології (дугові печі, некомпенсовані двигуни, нерівномірні навантаження). Війна додала фактор зниження надійності живлення – тепер першочергово стоїть питання просто подати напругу, а вже потім – її якість. За кордоном же більшість “рутинних” причин PQ (гармоніки, реактив) локалізовані на підприємствах самими підприємствами, і на передній план виходять питання флікера та провалів напруги, які вимагають спільного вирішення з енергокомпаніями.

Висновки

1. Рівень якості електроенергії на промислових підприємствах України до війни варіювався від прийнятного (THD~2–5%, флікер мінімальний у хімічній і харчовій галузях) до вкрай незадовільного (THD>10%, Pst>>1 на окремих металургійних об’єктах). Дані вимірювань (табл.1) показали перевищення нормативів за гармоніками у зварювальних, електроплавильних підрозділах та випадки низького cosφ без компенсації. Втім, більшість таких проблем мала технічні рішення (встановлення фільтрів, компенсаторів), які часто не реалізовувались через брак фінансів чи пріоритетів

2. Війна 2022–2023 рр. драматично вплинула на PQ в Україні, зрушивши акценти з гармонік на підтримання елементарної напруги та частоти. Масштабні руйнування енергооб’єктів спричинили безпрецедентну кількість провалів напруги, перерв електропостачання, аварійних режимів. Споживання електроенергії промисловістю впало ~50%, що зменшило генерацію гармонік і флікеру (бо багато “важких” навантажень просто вимкнено), але посилило ризики провалів напруги через перенавантаження вузьких місць мережі. Фактично, якість енергії перестала відповідати стандартам у зонах бойових дій та відключень – головним стало забезпечити живлення будь-якої якості. Це підкреслює, що PQ нерозривно пов’язана з надійністю і цілісністю енергосистеми.

3. Причини відхилень PQ носять універсальний характер у світі – нелінійні та динамічні навантаження (печі, випрямлячі, двигуни) і недостатня компенсація – але їх масштаби відрізняються. Для України досі актуальні випадки, коли ціле підприємство працює з низьким $\cos\phi$ чи без фільтрів гармонік, тоді як у розвинених країнах це скоріше виняток. З іншого боку, війна поставила українську промисловість в умови, подібні до блекаутів та природних катаклізмів, з якими стикалися і інші країни.

4. Для покращення PQ на українських підприємствах у майбутньому потрібен комплексний підхід: модернізація обладнання (впровадження технологій з меншою емісією гармонік – перетворювачів з ШІМ, плавних пусків), встановлення компенсаторів реактивної потужності та активних фільтрів, розробка систем моніторингу PQ (на рівні як підприємств, так і операторів систем). Важливою є нормативна база – контроль і стимулювання якості електроенергії. НКРЕКП вже привела правила до європейських, наступний крок – забезпечити їх виконання навіть у складних умовах.

На завершення, зазначимо, що якість електропостачання – це спільна відповідальність енергетиків та промисловців. Війна показала, наскільки критичною вона є для стійкості економіки. Досвід інших країн та власні напрацювання дають змогу після відновлення впровадити сучасні рішення, аби українська промисловість отримала електроенергію належної якості, необхідну для ефективної та безпечної роботи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Якість електричної енергії. Офіційний портал Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Режим доступу: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>
2. Park, B.; Lee, J.; Yoo, H.; Jang, G. Harmonic Mitigation Using Passive Harmonic Filters: Case Study in a Steel Mill Power System. *Energies* 2021, 14, 2278. <https://doi.org/10.3390/en14082278>
3. Bruna R.P. Conrado, Wesley A. de Souza, Eduardo V. Liberado, Helmo K.M. Paredes, Danilo I. Brandao, Alexandre C. Moreira, Towards technical and economic feasibility of power quality compensators, *Electric Power Systems Research*, Volume 216, 2023, 109020, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109020>.
4. Mjorning, L. ABB Drives and Control System for Hot Flat Rolling Mills Improves Yield and Quality; South East Asia iron and Steel Institute (SEAISI): Shah Alam, Malaysia, 2005.
5. Hosoda, H.; Kodama, S.; Tessenorf, R. Large PWM Inverters for Rolling Mills. *Iron Steel Technol.* 2008, 5, 65–73.
6. Emadi, A.; Nasiri, A.; Bekiarov, S.B. Uninterruptable Power Supplies and Active Filters; Illinois Institute of Technology: Chicago, IL, USA; CRC Press: Washington, DC, USA, 2005.
7. Martinez, R., Castro, P., Arroyo, A., Manana, M., Galan, N., Moreno, F. S., Bustamante, S., & Laso, A. (2022). Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review. *Sustainability*, 14(12), 7428. <https://doi.org/10.3390/su14127428>
8. S. Dhivya Various model of flicker measurement methods and static var compensation for power quality improvement. *Malaya Journal of Matematik*, Vol. S, No. 2, 3392-3397, 2020 <https://doi.org/10.26637/MJMOS20/0885>
9. Patel, V.D., Rathor, S.K. (2018). Harmonic Analysis and Simulation of a Chemical Plant—A Case Study. In: Kher, R., Gondaliya, D., Bhesaniya, M., Ladid, L., Atiquzzaman, M. (eds) *Proceedings of the International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing . Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 671. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6977-2_26
10. Kachan, Y. G., Dyachenko, V. V., & Kuznetsov, V. V. (2016). *Sredstva effektivnogo ispol'zovaniya elektricheskoy energii: Monografiya* [Means of Efficient Use of Electric Energy: Monograph]. Zaporizhzhia State Engineering Academy (ZSEA), 156 p.
11. Alexander ABRAMOVITZ , Volodymyr YASKIV, Keyue SMEDLEY Power factor correction as the right step towards a safer environment. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 3a/2013
12. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text] : Monograph . M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p.
13. Металурги України у 2022 році скоротили споживання електроенергії на 52%. <https://gmcenter.ua/news/metallurgi-ukraini-u-2022-roci-skorotili-spozhyvannya-elektroenergi-na-52-r-r>
14. Ткач, Д. (2023). ЯКІ ВТРАТИ ПОНЕСЛА ЕНЕРГОСИСТЕМА УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК МАСОВИХ АТАК З БОКУ РОСІЇ. *Економіка та суспільство*, (52). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-52-41>
15. Siemens to donate cogeneration units to Ukraine. <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-donate-cogeneration-units-ukraine>

Received 16.04.2025.

Accepted 18.05.2025.

UDC 621.316.925

Inna Kovalenko, Vitalij Radchenko, Oleksandr Osaul, Alina Yerofieieva,
Viacheslav Pilipenko, Valeriia Prykhno

ANALYSIS OF POWER QUALITY INDICATORS IN INDUSTRIAL POWER NETWORKS

Abstract. *The aim of this study is to conduct a comprehensive analysis of power quality (PQ) indicators in the electrical networks of industrial enterprises in Ukraine, taking into account statistical data up to 2022 and changes caused by the full-scale war. Special attention is given to power supply in the metallurgical, chemical, and machine-building sectors, where the largest deviations in PQ parameters are recorded.*

The methods. The study is based on a comparative analysis of power quality measurement results at Ukrainian industrial enterprises. It incorporates statistical data up to 2022, monitoring results from the wartime period of 2022–2023, as well as relevant standards such as DSTU EN 50160:2014, IEEE 519, and ENTSO-E requirements. The analysis focuses on key causes of PQ deviations: harmonics, flicker, voltage unbalance, and reactive power issues.

Findings. Prior to the war, the most significant PQ violations were observed in welding and foundry shops of metallurgical plants (THD_U up to 12%, voltage unbalance up to 3.6%), harmonic distortion of the 6th–16th orders at chemical facilities, and localized reactive power issues in machine-building enterprises. During the war, the primary challenges shifted to deep voltage sags, frequency instability under generator supply, and low power factor ($\cos\varphi$). Part of the industrial sector was shut down, temporarily reducing the overall harmonic levels.

The originality lies in the first comprehensive generalization of wartime impact on PQ parameters in Ukrainian industry. The paper presents unique data on THD, flicker, and unbalance under crisis conditions.

Practical implementation of the research is in substantiating the need to implement modern tools for improving power quality — including active filters, reactive power compensators, and PQ monitoring systems.

Keywords: power quality, industrial networks, harmonics, flicker, unbalance, reactive power, war impact, metallurgy.

Коваленко Інна Ігорівна – викладач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: innamorkovochka@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-1526-4610>

Радченко Віталій Васильович – доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.. E-mail: radchvv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>

Осаул Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0007-5672-3143>

Єрофєєва Аліна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: alinazgia@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>

Піліпенко В'ячеслав Олександрович – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. . E-mail: pilipenko992@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

Прихно Валерія Леонідівна – старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: valeria.prihno@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.14

UDC 620.91

Viktor Kovalenko, Inna Kovalenko, Nataliia Minaiilo, Leonid Shevchuk,
Volodymyr Vasetskyi, Volodymyr Bashko, Kopysov Vladyslav

GENERAL PRINCIPLES OF ENERGY CONSUMPTION IN THE METALLURGICAL INDUSTRY

Abstract. *The aim of the study is to explore the theoretical foundations for improving energy consumption efficiency in the metallurgical industry under the conditions of global climate policy challenges, production transformation, and the need to reduce energy costs. The paper analyzes the main technological processes, the level of energy intensity in the industry, as well as international experience in implementing energy-efficient solutions.*

The methods. The research is based on an interdisciplinary analysis of scientific sources, industry reports, statistical data, and the techno-economic characteristics of steel production. Methods of comparative analysis of energy consumption for various technological routes and a systematic approach to assessing innovation potential are applied.

Findings. It has been established that a significant portion of energy consumption is concentrated in blast furnace–converter processes. The transition to electric arc furnace (EAF) production, the implementation of hydrogen metallurgy, the use of secondary raw materials, and digital technologies (Industry 4.0) open up opportunities for a substantial increase in energy efficiency. Examples of successful modernization at enterprises in various countries are provided

The originality. The study systematizes the factors that determine the energy intensity of production processes, reveals the relationship between technological changes and energy consumption structure, and substantiates the need for a comprehensive approach to the transformation of the industry

Practical implementation. The results can be used for strategic planning of enterprise modernization, development of energy-saving investment projects, and the formation of national industrial decarbonization policies.

Keywords: *energy consumption, metallurgy, energy efficiency, decarbonization, hydrogen, electric arc furnace, Industry 4.0, CCUS.*

© Kovalenko Viktor, Kovalenko Inna, Minaiilo Nataliia, Shevchuk Leonid, Vasetskyi Volodymyr, Bashko Volodymyr, Vladyslav Kopysov

Introduction

The modern development of industry is accompanied by increasing challenges in the areas of energy supply, environmental safety, and resource efficiency. In this context, the metallurgical sector-historically one of the largest energy consumers in the economy-receives particular attention due to its significant impact on the energy balance, levels of industrial greenhouse gas emissions, and the overall environmental situation. According to the International Energy Agency (IEA) [1], metallurgical production accounts for approximately 8% of global final energy consumption and about 20% of industrial energy use. The steelmaking sector alone is responsible for up to 7% of global CO₂ emissions, making it a priority target for the implementation of energy-efficient and low-carbon technologies.

Reducing the energy intensity of steel and non-ferrous metal production is a pressing issue for both developed and transition economies. The high energy demand of metallurgical processes is driven not only by the complexity of the technological cycle but also by the substantial specific requirements for thermal and electrical energy at each stage-from raw material preparation to final product rolling. Despite considerable progress in the adoption of energy-saving technologies during the second half of the 20th century, the 2000s saw a marked slowdown in the reduction of specific energy consumption, indicating that the sector is approaching the limits of efficiency achievable through conventional methods.

Current global trends in metallurgy suggest a technological transformation aimed at achieving decarbonization goals and ensuring sustainable development. Innovative approaches are gaining prominence, including hydrogen-based direct reduction of iron (H₂-DRI), electric arc furnace production using scrap metal, carbon capture, utilization and storage (CCUS), and digital solutions within the framework of Industry 4.0. The implementation of such technologies not only affects CO₂ emission levels but also significantly alters the structure and dynamics of energy consumption, introducing new requirements for energy systems and techno-economic planning.

At the same time, the energy efficiency of metallurgical enterprises is directly correlated with their competitiveness. Under conditions of high energy prices and limited access to inexpensive resources, even minor reductions in energy costs can

yield substantial economic benefits. For Ukraine, where the metallurgical industry accounts for over 20% of industrial electricity consumption, the issue of energy modernization is particularly urgent in light of energy security, economic stability, and integration into the European energy space.

Therefore, analyzing energy consumption in metallurgy, evaluating existing technological solutions, and identifying prospects for the development of energy-efficient approaches constitute an important scientific and applied task that requires a comprehensive approach.

1. Energy Intensity of Metallurgy: Global and National Context. Steel is a fundamental building block of modern society. It is used in infrastructure, construction, household appliances, transportation, packaging, and a wide range of other products. Its unique combination of strength, durability, and recyclability makes it difficult to replace with alternative materials. Moreover, steel is relatively inexpensive and widely available. Over the past fifty years, global steel consumption has steadily increased, and, without active and coordinated efforts to reduce demand, steel consumption could rise by more than one-third by 2050 [1].

Due to its heavy reliance on energy and fossil resources, traditional steel production is highly energy-intensive and contributes significantly to carbon emissions. In 2019, the steel sector accounted for 8% of final global energy consumption and 20% of industrial energy use [1]. In 2020, the sector was responsible for 11% of global CO₂ emissions and 7% of total energy use and process-related greenhouse gas emissions [2, 3].

To meet the 1.5°C target set by the Paris Agreement and avoid the most catastrophic consequences of climate change, CO₂ emissions must be halved by the end of this decade and reach net zero by 2050. This requires an immediate reduction in greenhouse gas emissions across all sectors [4].

The steel industry, which operates one of the most energy- and carbon-intensive production processes, faces major challenges on the path to decarbonization. Research indicates that existing solutions to reduce energy consumption and substitute fossil fuels will not be sufficient to achieve the required emission reductions. Transformational change is needed, involving technologies at various stages of development [5–9].

The metallurgical industry remains among the most energy-intensive sectors of the global economy. It accounts for approximately 8% of global final energy consumption and around 20% of industrial energy use [1]. Specifically, the steel sector consumes enormous amounts of energy: in 2019, steel production was estimated to be responsible for ~7% of global CO₂ emissions, largely due to the dominance of fossil fuel-based blast furnace processes [10]. Historically, the industry has made substantial progress in improving energy efficiency - energy consumption per ton of steel has declined by approximately 60% since 1960, driven by the adoption of improved technologies and energy management practices [11].

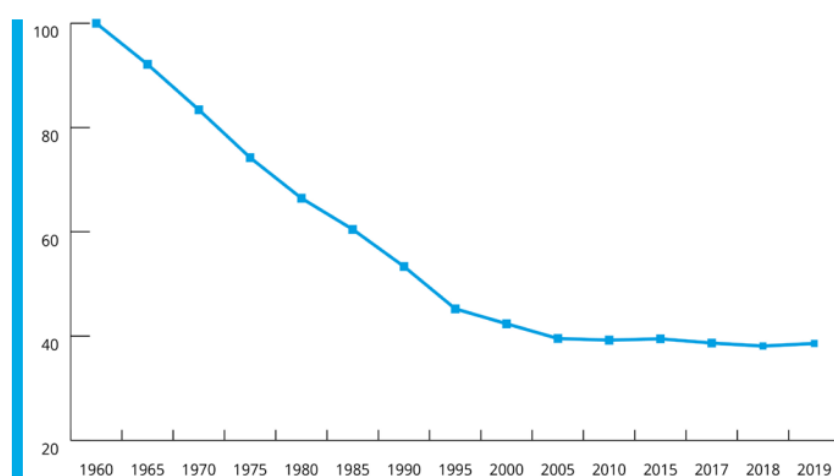


Figure 1 - Indexed global energy consumption per tonne of crude steel production [11]

The chart presented in Fig. 1 illustrates indexed global energy consumption per tonne of crude steel production from 1960 to 2019. From the 1960s to 2000, a substantial decline in energy consumption per tonne of steel is observed. This trend reflects improvements in energy efficiency, the adoption of advanced technologies, and the transition to more efficient steelmaking processes (e.g., replacing blast furnaces with electric arc furnaces). After 2000, the rate of energy reduction significantly slowed, stabilizing at around 40% of the 1960 baseline. This suggests that the industry has approached certain technological limits in reducing energy consumption. In the final segment of the chart (2015–2019), a slight increase in energy consumption is visible. This may be attributed to the increasing difficulty of achieving further improvements beyond existing efficiency levels or temporary factors such as changes in raw material inputs or production processes.

The reduction in energy consumption per tonne of steel has been driven by several factors, including: the implementation of energy-efficient technologies in steel production; a shift toward scrap recycling in electric arc furnaces, which require less energy; improved thermal processes and the utilization of waste heat; global initiatives to reduce CO₂ emissions and improve production efficiency.

Fig. 1 demonstrates a long-term trend toward increased energy efficiency in steelmaking. However, in the near future, the potential for further reductions may be limited without breakthrough technological innovations.

Ukraine is no exception: the metallurgical industry has traditionally imposed a significant load on the national energy system. In 2020–2021, the share of metallurgical enterprises in total national electricity consumption was 23%, second only to household consumption [12]. This underscores the critical importance of energy efficiency for the national economy. At the same time, high energy intensity is also characteristic of the non-ferrous metallurgy sector - for example, producing one tonne of primary aluminum requires, on average, 14,000–17,000 kWh of electricity [13], highlighting the substantial energy demands of the industry.

Therefore, optimizing energy consumption in the metallurgical sector is a pressing task, both in terms of ensuring competitiveness and addressing energy security and environmental concerns.

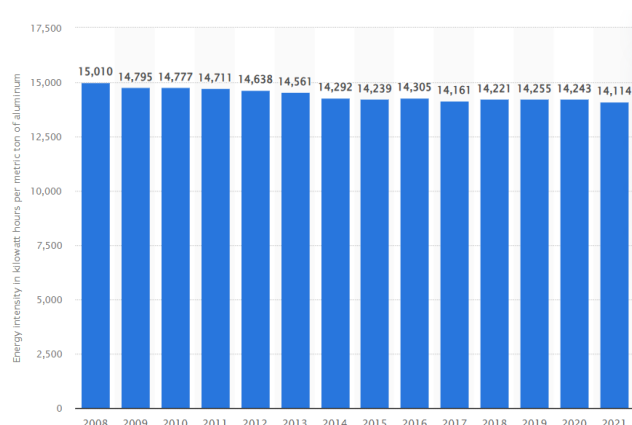


Figure 2 - Energy intensity in kilowatt-hours per metric tonne of aluminum production from 2008 to 2021 [13]

The diagram shown in Fig. 2 illustrates the trends in how, over more than a decade, the global community has sought to make aluminum production more

energy-efficient. In 2008, producing one tonne of primary aluminum required 15,010 kWh of energy - a substantial amount when considering the global scale of aluminum production. However, year by year, the industry became increasingly efficient. By 2014, energy intensity had declined to 14,239 kWh, reflecting improvements in technology, optimization of production processes, and possibly the adoption of more modern equipment.

After 2015, however, the changes became less pronounced. Energy use fluctuated between 14,100 and 14,300 kWh, suggesting the approach of technological limits within conventional aluminum production methods. In 2021, the figure stood at 14,114 kWh - nearly identical to values in preceding years. This indicates that, without breakthrough innovations, further reductions in energy consumption in this sector are becoming increasingly difficult.

Thus, the chart reflects the industry's long journey toward energy efficiency - from marked progress in the early years to a gradual stabilization, signaling the limits of current technological capabilities.

2. Main Processes and Structure of Energy Consumption. Metallurgical production is characterized by a complex technological cycle, with each stage consuming a significant amount of energy. As an example, we consider the features of the blast furnace–converter process. This integrated route includes raw material preparation, pig iron production, steelmaking, and rolling operations [14]. As noted in [14], steel production is a complex technological process that requires substantial energy resources and precise control of chemical reactions. One of the most widely used steelmaking methods in the world is the blast furnace–basic oxygen furnace (BF–BOF) process, which enables the efficient conversion of iron ore into high-quality steel. This process consists of two main stages: pig iron production in the blast furnace, and its conversion into steel in the basic oxygen converter.

Blast Furnace Process. The blast furnace is a tall vertical shaft that operates continuously. Raw materials are charged from the top, and the final products (molten pig iron and slag) are discharged at the bottom. The temperature inside the furnace reaches up to 2000°C, providing the necessary conditions for the reduction of iron from the ore. To produce pig iron, the furnace is charged with three key components: iron ore (hematite Fe_2O_3 or magnetite Fe_3O_4) – the primary source of

iron; coke (C) – serves as the fuel and reducing agent; fluxes (CaCO_3 , dolomite) – help remove impurities and form slag. Impurities are absorbed into the slag, while molten pig iron containing 4–5% carbon accumulates at the bottom of the furnace. The hot metal is then tapped and transported to the oxygen converter for further processing.

Basic Oxygen Furnace Process .The molten pig iron produced in the blast furnace contains an excessive amount of carbon and other impurities, making it brittle and unsuitable for industrial use. To obtain steel, the carbon content must be reduced and other undesirable elements removed. This is achieved in the basic oxygen converter. The converter is a large steel vessel that tilts for charging and tapping. It is loaded with: molten pig iron (75–85%); steel scrap (15–25%) – used to cool the melt; pure oxygen (O_2) under a pressure of 10–12 bar – the primary oxidizing agent, which burns out the impurities.

Key stages in steel production (ferrous metallurgy).

Raw material preparation: Includes agglomeration (sintering) of iron ore, pelletizing, and coal coking. These processes require thermal energy for sintering the ore concentrate and coke production. The theoretical minimum energy consumption at these stages is estimated at ~2.5 GJ per tonne of coke and ~1.0 GJ per tonne of sinter, respectively [14], thus contributing significantly to overall energy intensity.

Pig iron production:The blast furnace (BF) process relies on coke as both fuel and reducing agent. It delivers high productivity but is heavily dependent on energy from coal combustion. For example, approximately 89% of energy in the BF–BOF route comes from coke and coal, while only ~7% comes from electricity [11]. Electricity consumption in the blast furnace is relatively low - about 3–4 kWh per tonne of hot metal [15], as most of the thermal load is supplied by coke.

Steel production: The traditional BOF route utilizes the thermal energy of molten pig iron and only a small amount of auxiliary fuel, whereas the alternative electric arc furnace (EAF) route relies primarily on electricity. Electricity consumption for steelmaking in EAFs is extremely high, typically in the range of 300–400 kWh per tonne of steel [15]. By comparison, open-hearth furnaces (an obsolete technology, now rarely used) consumed ~4 kWh of electricity per tonne of

steel [15], but required significant amounts of fuel, resulting in low efficiency and their replacement by modern technologies.

Rolling and finishing: Hot and cold rolling, heat treatment, etc., also require energy (mainly for billet heating, mill drives, compressors, etc.). Although their share in the total energy balance is lower, optimizing these processes (e.g., through the use of waste heat from hot metal, reduction of idle times) also yields measurable benefits.

Primary steel production from ore is significantly more energy-intensive than secondary production from scrap.

Scrap remelting in electric furnaces requires approximately eight times less energy than the full cycle from iron ore [16]. According to [1], steelmaking from scrap may require only ~12–15% of the energy compared to the ore-based route [16]. This is because the scrap-based process omits the iron oxide reduction stage - the most energy-intensive chemical step. On average, the integrated BF–BOF route consumes ~19–35 GJ per tonne of steel, while the EAF–scrap route requires ~4–7 GJ/t [17, 11].

Exact figures depend on raw material quality, product range, and plant equipment level. Factors such as ore and coke quality, steel yield from slag, and processing depth all affect specific energy consumption. Even indirect costs - such as raw material extraction and transportation - add ~6–9% to the total energy consumption per tonne of metal [11].

Thus, understanding the structure of energy consumption within the production chain allows the identification of "hot spots" - the most energy-intensive stages - and helps direct efforts toward their optimization.

3. Technologies and Energy Efficiency: International Experience. Over the past decades, the metallurgical industry has accumulated extensive international experience in implementing energy-saving technologies. Many of these are reflected in international best practice standards (Best Available Techniques, BAT) and sector-specific reference documents. Studies indicate that the application of modern energy-efficient technologies could reduce steelmaking energy consumption by approximately 20% compared to the global average, if production worldwide were

brought to the BAT level [17]. Half of this improvement potential lies in countries with traditionally higher specific energy consumption - notably China [17].

Key directions for improving energy efficiency include:

Utilization of Secondary Energy Resources. Modern integrated steelworks widely implement waste heat and process gas recovery systems. For instance, blast furnace and converter gases are used for electricity generation or hot blast heating; cogeneration units are installed; coke dry quenching (CDQ) systems are employed to reclaim heat from hot coke; and top-pressure recovery turbines (TRT) are used in blast furnaces. These measures help utilize fuel energy more efficiently and reduce dependency on external energy sources. According to the World Steel Association, up to 60–75% of the energy contained in blast furnace and coke oven gases can be recycled back into the process or used to generate electricity instead of being lost [11].

Equipment and Process Modernization. Transitioning to advanced units - such as furnaces with regenerative burners, more efficient oxygen injection systems, or the replacement of open-hearth furnaces with converters or electric arc furnaces - results in substantial energy savings per tonne of product. For example, the global phase-out of obsolete open-hearth furnaces has eliminated their characteristic low efficiency. In contrast, modern electric arc furnaces (EAFs) equipped with advanced control systems have achieved high productivity with reduced heat losses. Likewise, the implementation of continuous casting instead of multi-stage ingot rolling has significantly reduced the need for reheating, leading to fuel savings.

Energy Management and Digital Technologies (Industry 4.0). Many plants operate automated energy management systems (EMS), which monitor and optimize energy consumption in real time [11]. The use of sensors, big data, and artificial intelligence allows for improved control of furnaces, compressors, rolling mills, and other equipment, minimizing idle periods and peak loads. In the EU, there are documented cases where digitalization led to over 30% improvements in energy efficiency in specific production areas [18]. While the full impact of Industry 4.0 is still being researched, the trend is clear: "smart" factories are capable of using energy more rationally, reducing both consumption and emissions.

Other Measures. These include improvements in thermal insulation and the use of modern materials (e.g., more durable refractories that reduce heat losses); recovery of heat from cooling systems; implementation of high-efficiency electric motors and variable frequency drives for mechanical systems, among others. Together, these steps contribute to establishing a culture of energy conservation within enterprises. Such measures often offer relatively short payback periods and are supported by international energy efficiency programs.

International experience clearly demonstrates the effectiveness of these approaches. In developed countries (e.g., Japan, South Korea, and the EU), the energy intensity of steel production is now approaching theoretical limits, thanks to widespread implementation of BAT. In contrast, developing countries show a broader performance range but are undergoing active modernization - especially China, which accounts for ~50% of global steel output. Notably, more than half of the world's energy-saving potential in steelmaking is concentrated in China [17], which stimulates international technology transfer projects and investments in upgrading steelmaking capacities.

The Ukrainian steel industry is also adopting energy-efficient solutions. In recent years, several projects have been implemented, including process gas recovery, modernization of rolling mills, and installation of more efficient boilers and heaters at multiple plants. Thus, the global trend towards improved energy efficiency also extends to the national level, as reflected in recent publications and studies by Ukrainian researchers over the past five years.

4. Low-Carbon Technologies and Their Impact on Energy Consumption. Contemporary climate policy challenges are driving a technological transformation in the metallurgical industry aimed at decarbonization. These emerging technologies affect not only CO₂ emission levels but also the structure and volume of energy consumption. International experience outlines several key pathways: transitioning to hydrogen as a reducing agent, electrification of processes, the use of biomass, and carbon capture and storage/utilization (CCS/CCUS).

Each of these pathways has distinct energy and economic characteristics:

Hydrogen-Based Direct Reduction (H₂-DRI). Direct reduction technologies using hydrogen instead of natural gas or coke are gaining momentum (notable EU

projects include HYBRIT, H2FUTURE, among others). Hydrogen enables near-complete elimination of CO₂ emissions at the iron ore reduction stage. However, hydrogen production-especially green hydrogen via electrolysis-requires vast amounts of electricity. Studies predict that switching from traditional sinter-blast furnace technology to H₂-DRI and electric arc furnace (EAF) steelmaking would lead to a dramatic increase in electricity consumption. Specifically, Ukrainian researchers estimate that producing 10 million tonnes of steel per year would raise electricity demand from approximately 2.74 to 35.13 billion kWh (a 12.8-fold increase) under a full H₂-DRI + EAF scenario compared to the conventional BF-BOF route [19–21]. Correspondingly, required electrical capacity would surge from ~0.5 GW to 6.15 GW [19]. This presents a massive challenge for energy infrastructure, though it is accompanied by a substantial reduction in greenhouse gas emissions - approximately 2.6 times lower (from ~18 million tonnes to 7 million tonnes of CO₂ per 10 million tonnes of steel) [19]. In the long term, coupling hydrogen-based metallurgy with renewable electricity generation could enable near-zero emissions, although it raises critical issues of generation stability (solar, wind) and energy storage. International pilot projects in Sweden and Germany confirm the technical feasibility of this route, although its economic viability remains under debate.

Scrap-Based Electric Arc Furnace (EAF) Production. Increasing the share of scrap in the raw material mix is one of the simplest ways to reduce both energy consumption and emissions. As previously noted, scrap melting requires approximately one-eighth of the energy compared to ore-based steelmaking [16] and involves minimal use of fossil carbon. As a result, many countries are expanding their EAF capacity; globally, this route accounted for over 26% of total steel production in 2020 and continues to grow. In countries like the USA, Italy, and Turkey, the majority of steel is produced from scrap. In Ukraine, the BF-BOF route has historically dominated, but recent years have seen the commissioning of new EAFs (e.g., at Interpipe Steel in 2012), reflecting the global trend. Expanding EAF-based steelmaking reduces overall primary energy demand but increases electricity consumption - necessitating corresponding development of power grids and generation capacity.

Fossil Fuel Substitution. Partial replacement of coke and natural gas with alternative energy sources is already being tested. One avenue involves using biomass (biocoke, charcoal) in blast furnaces and sintering. Some European blast furnaces now include a certain percentage of biocarbon in the burden, which reduces the fossil carbon input. The impact on the energy balance is relatively modest (the calorific value of biomass is similar to coal), but scale is limited by biomass availability. Another approach involves integrating renewable electricity into thermal processes - for example, using plasma heaters for hot blast generation or electrolyzers for reagent production. While these auxiliary technologies do not drastically lower energy consumption, they help reduce the carbon footprint.

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS). CCUS technologies can be applied at metallurgical facilities to capture CO₂ from blast furnace or converter gases. While they do not reduce energy consumption per se - and in fact slightly increase it due to energy requirements for CO₂ capture and compression - they offer a pathway to drastically cut emissions in processes where eliminating coke use is not yet feasible [23]. Implementing CCS at a steel plant may require an additional ~1–2 GJ of energy per tonne of steel, which must be accounted for in economic assessments. Some projects explore the conversion of captured CO₂ (CCU), for instance into synthetic fuels (e.g., methanol) or its use in the food industry [23]. These applications may generate byproducts and partially offset costs, although such schemes are still at an early development stage.

Overall, low-carbon technologies in metallurgy often lead to increased electricity intensity of processes. Steel is produced with less fossil fuel input, but requires more electricity and capital investment. Therefore, it is critical to assess these innovations comprehensively - considering the availability of affordable low-carbon electricity, grid capacity, and economic incentives (e.g., emission allowances, CO₂ taxes). International experience currently shows that EU countries, Japan, and South Korea are prioritizing hydrogen and EAF expansion, China is actively experimenting with CCUS technologies and increasing scrap use, while the USA and other developed economies already operate with high shares of electric steel and continue improving the energy efficiency of this route.

5. Economic Aspect of Energy Consumption. The cost of energy is a critical factor in determining the competitiveness of the metallurgical industry. According to the World Steel Association, energy carriers account for 20–40% of the total production cost of steel [11]. Therefore, even a modest improvement in energy efficiency directly reduces production expenses and increases profitability. Enterprises implementing energy-saving projects can achieve substantial savings: in many cases, such measures have a payback period of only 1–3 years due to reduced fuel and electricity bills. Furthermore, energy efficiency is closely linked to environmental charges - lower fuel consumption results in lower CO₂ emissions and, consequently, reduced expenditures on emission allowances or carbon taxes under environmental regulations.

Global energy prices significantly influence the steel industry. The years 2021–2022 were particularly challenging for the European sector: a sharp increase in natural gas and electricity prices led to the shutdown of some steelmaking capacities in the EU [24]. For instance, in autumn 2022, energy costs for certain plants escalated to the point where their monthly energy bills equaled those of entire previous years [24]. Companies were forced to reduce steel output to 50% of capacity or temporarily halt electric arc furnaces [24]. This triggered a supply crisis in the steel market and increased the EU's dependence on imports [24]. Hence, extremely high energy prices can pose an existential threat to the steel industry, even in developed economies.

In Ukraine, the war and attacks on energy infrastructure in 2022 also caused an electricity shortage, forcing steel plants to temporarily shut down or operate under consumption quotas while implementing strict energy-saving regimes [12]. These extreme situations highlight the importance of a stable energy supply and the need for production flexibility in response to price shocks.

Investments in energy efficiency and new technologies require substantial capital but pay off in the long run through cost savings and “green” incentives. According to Chinese researchers, by 2030, technical measures aimed at improving energy efficiency in China's steel industry will cost, on average, ~27 yuan per tonne in terms of emission reduction, whereas transitioning to new production structures (e.g., mass deployment of electric or hydrogen-based steelmaking) could cost

up to ~703 yuan per tonne in marginal abatement costs [25]. The high capital intensity of new technologies is a major barrier to their implementation [25]. For this reason, many companies and countries adopt a phased approach to decarbonization: first implementing the most cost-effective energy efficiency measures, and only then moving on to expensive transformational projects. Economic analysis suggests that without additional incentives (such as low-interest loans, subsidies, or carbon market revenues), businesses may postpone the adoption of radical new technologies [25]. The inclusion of metallurgy in emissions trading systems and the tightening of environmental requirements aim to rebalance this situation by making energy-efficient and low-carbon technologies more economically viable.

At the same time, energy management is becoming an integral part of the business strategy in metallurgical companies. Enterprises are adopting ISO 50001 standards, developing portfolios of energy-saving projects, and assessing their profitability. Some Ukrainian researchers propose methods for managing such projects and adaptive energy consumption planning at industrial plants [26, 27], enabling scientifically grounded investment decisions in energy efficiency. Energy saving is thus viewed not only as a means of reducing costs but also as a way to mitigate price volatility risks and comply with environmental standards.

In conclusion, energy consumption in metallurgy is not only a technical challenge but also an economic one: optimal energy management has a direct impact on the financial performance and resilience of enterprises.

Conclusions

A review of the literature from the past five years indicates that energy consumption in the metallurgical industry remains a central focus for researchers and practitioners alike. As one of the most energy-intensive sectors, the industry faces a dual challenge - improving energy efficiency to reduce costs while simultaneously undergoing a transformation to lower its carbon footprint.

International experience demonstrates substantial progress in the deployment of energy-efficient technologies - ranging from waste heat recovery and equipment modernization to digital control systems. As a result, specific energy consumption for conventional steel production has been significantly reduced. In parallel,

research and pilot implementations of breakthrough technologies - such as hydrogen metallurgy (H₂-based processes), ore-based electric smelting, and carbon capture, utilization, and storage (CCUS) - are laying the groundwork for a future shift in the industry's energy balance toward electrification and renewable energy sources.

These changes are already having a tangible impact: new demands are emerging for power systems (e.g., the provision of large volumes of “green” electricity), cost structures at enterprises are evolving, and a new economic model for metallurgy is taking shape - one in which the kilowatt-hour becomes as critical a resource as iron ore or coal.

Ukrainian and international publications consistently emphasize that enhancing energy efficiency is key to strengthening the competitiveness of the metallurgical industry in the global market [11], while reducing energy dependence is essential to ensuring its resilience in the face of external shocks.

In conclusion, the sustainable development of the metallurgical sector is unattainable without the optimization of energy consumption - both through the adoption of advanced technologies and the implementation of sound economic policy and international cooperation in this domain.

REFERENCES

1. IEA (2020), Monthly Electricity Statistics, IEA, Paris, Available at: <https://www.iea.org/reports/monthly-electricity-statistics>
2. Swalec, C. (2022) Pedal to the Metal 2022. It's not too late to abate emissions from the global iron and steel sector. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. Available at: https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/06/GEM_SteelPlants2022.pdf
3. Swalec, C. and Shearer, C. (2021) Pedal to the Metal 2021. No time to delay decarbonizing the global steel sector, Global Energy Monitor. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. doi:10.7551/mitpress/11314.003.0023
4. Calvin, K., Pereira, J.C. de O. de P., Oreane Edelenbosch Johannes Emmerling, S.F., et al. (2018) 'SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 oC Chapter 2 Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development', IPCC special report Global Warming of 1.5 oC, p. 82pp. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_
5. Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M., et al. (2018) 'Net-zero emissions energy systems', Science, 360(6396). doi:10.1126/science.aas9793.

6. Boehm, S., Lebling, K., Levin, L., et al. (2021) State of Climate Action 2021: Systems Transformations Required to Limit Global Warming to 1.5°C. Washington, DC: World Resources Institute. doi:10.46830/wri.rpt.21.00048.
7. Boehm, S., Jeffery, L., Levin, K., et al. (2022) State of Climate Action 2022. Berlin, Germany and Washington, D.C.: Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, World Resources Institute. Available at: <https://www.wri.org/research/state-climate-action-2022> (Accessed: 2 November 2022).
8. Bashmakov, I.A., Nilsson, L.J., Acquaye, A., et al. (2022) ‘Industry’, in Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change - Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Available at: https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_FullReport.pdf.
9. Bataille, C., Åhman, M., Neuhoﬀ, K., et al. (2018) ‘A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement’, Journal of Cleaner Production, 187, pp. 960–973. doi:10.1016/j.jclepro.2018.03.107
10. Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO₂ Emissions from the Steel Industry. Metals, 10(9), 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
11. Energy use in the steel industry. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf>
12. V. Ahapova, “Ukrainian Metallurgy after February 24: Who Will Support the Atlas?” Available at: <https://voxukraine.org/ukrayinska-metalurgiya-pislya-24-lyutogo-hto-pidstavyt-pleche-atlantovi>
13. Global primary aluminum smelting energy intensity 2008-2021. Published by Statista Research Department, Dec 18, 2023. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1116216/aluminum-smelting-energy-intensity/>
14. Na, Hongming, Jingchao Sun, Yuxing Yuan, Ziyang Qiu, Lei Zhang, and Tao Du. 2024. “Theoretical Energy Consumption Analysis for Sustainable Practices in Iron and Steel Industry” Metals 14, no. 5: 563. <https://doi.org/10.3390/met14050563>
15. D. Tymoshenko, V. Kukhar, and I. Volovnenko, “Comparison of Energy Consumption in Steel Production Using Obsolete Sintering–Blast Furnace and Open-Hearth Processes versus Modern Midrex H₂ Direct Reduction and Electric Arc Furnace Technology,” Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Series: Technical Sciences, no. 2, pp. 49–54, 2024. [In Ukrainian]
16. H2FUTURE: decarbonising the steel industry with green hydrogen. By Claudia Patricolo. May 20, 2021 Available at: <https://ceenergynews.com/hydrogen/h2future-decarbonising-the-steel-industry-with-green-hydrogen/>
17. Kun He, Li Wang, A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, 2017, Pages 1022–1039, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>.
18. Tolettini, L.; Di Maria, E. The Impact of Industry 4.0 on the Steel Sector: Paving the Way for a Disruptive Digital and Ecological Transformation. Recycling 2023, 8, 55. <https://doi.org/10.3390/recycling8040055>
19. O. I. Teslenko and K. V. Taranets, “Impact of Low-Carbon Technological Transformation in the Ferrous Metallurgy Sector on Electricity Consumption,” Bulletin of Kherson National Technical University, no. 4, pp. 153–159, 2024. [In Ukrainian] DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.19>

20. Monika Draxler et al. Green Steel for Europe, Technology Assessment and Road mapping. 2021, 88 p. URL: https://www.estep.eu/assets/Projects/GreenSteel4Europe/GreenSteel_Publication/210308_D1-2-Assessment_and_roadmapping_of_technologies_-Publishable-version.pdf
21. Tian Liang, Shanshan Wang, Chunyang Lu, Nan Jiang, Wenqi Long, Min Zhang, Ruiqin Zhang. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. Journal of Cleaner Production. 2020, Vol. 264, 121697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>
22. The facts about steelmaking Steelmakers seeking Green steel. Available at: <https://ieefa.org/sites/default/files/2022-06/steel-fact-sheet.pdf>
23. Holappa, L. (2020). A General Vision for Reduction of Energy Consumption and CO2 Emissions from the Steel Industry. Metals, 10(9), 1117. <https://doi.org/10.3390/met10091117>
24. Steel makers fear deepening crisis from energy crunch as output halted. Available at: <https://www.reuters.com/business/energy/steel-makers-fear-deepening-crisis-energy-crunch-output-halted-2022-09-23/>
25. Gu, Yueqing, Wenjie Liu, Bowen Wang, Borui Tian, Xinyue Yang, and Chongchao Pan. 2023. "Analysis and Prediction of Energy, Environmental and Economic Potentials in the Iron and Steel Industry of China" Processes 11, no. 12: 3258. <https://doi.org/10.3390/pr11123258>
26. S. H. Kiiko, "Energy Consumption Planning in the Implementation of an Energy Saving Project Portfolio at a Metallurgical Enterprise Based on Predictive Adaptation," Collection of Scientific Works of the Kharkiv National Air Force University, vol. 3(65), pp. 97–105, 2020. [In Ukrainian] DOI: 10.30748/zhups.2020.65.15
27. S. H. Kiiko, "Adaptive Management of Energy Saving Project Portfolios at a Metallurgical Enterprise," Current State of Scientific Research and Technologies in Industry, no. 4(14), pp. 56–70, 2020. [In Ukrainian] DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.056>

Received 07.04.2025.

Accepted 14.05.2025.

УДК 620.91

В. Л. Коваленко, І. І. Коваленко, Н. О. Міняйло, Л. І. Шевчук,
В. В. Васецький, В. Кописов, В. Башко

ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Абстракт. Метою роботи є дослідження теоретичних основ підвищення ефективності енергоспоживання в металургійній промисловості в умовах глобальних викликів кліматичної політики, трансформації виробництва та необхідності зниження енергетичних витрат. Проаналізовано основні технологічні процеси, рівень енергоємності галузі, а також міжнародний досвід упровадження енергоефективних рішень.

Методика. Дослідження базується на міждисциплінарному аналізі наукових джерел, галузевих звітів, статистичних даних та техніко-економічних характеристик виробництва сталі. Використано методи порівняльного аналізу енерговитрат для різних технологічних маршрутів, а також системний підхід до оцінки потенціалу інновацій.

Результати. Встановлено, що значна частина енергоспоживання припадає на доменно-конвертерні процеси. Перехід до електропічного виробництва, впровадження водневої металургії, використання вторинної сировини та цифрових технологій (Industry 4.0) відкриває шляхи до істотного підвищення енергоефективності. Наведено приклади успішної модернізації на підприємствах різних країн.

Наукова новизна. У роботі систематизовано фактори, що визначають енергоємність виробничих процесів, розкрито взаємозв'язок між технологічними змінами та структурою енергоспоживання, обґрунтовано необхідність комплексного підходу до трансформації галузі.

Практичне значення. Результати можуть бути використані для стратегічного планування модернізації підприємств, розробки інвестиційних проєктів з енергозбереження та формування національної політики декарбонізації промисловості.

Ключові слова: енергоспоживання, металургія, енергоефективність, декарбонізація, водень, електронік, Industry 4.0, CCUS.

Коваленко Віктор Леонідович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Коваленко Інна Ігорівна – викладач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: innamorkovochka@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0001-1526-4610>

Міняйло Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: kafedra_autp@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>

Шевчук Леонід Ігорович – студент кафедри промислового та цивільного будівництва Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0004-1369-7342>

Васецький Володимир Вячеславович – студент кафедри промислового та цивільного будівництва Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0005-0483-8999>

Кописов Владислав, студент, НТУ “Дніпровська політехніка”, Україна
ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

Башко Володимир, провідний фахівець, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Україна v.bashko7@gmail.com; orcid.org/0009-0007-7820-1944

Viktor Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Inna Kovalenko – Lecturer at the Department of Information Economics, Entrepreneurship and Finance, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
E-mail: innamorkovochka@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1526-4610>

Nataliia Miniailo – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
E-mail: kafedra_autp@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>

Leonid Shevchuk – Student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1369-7342>

Volodymyr Vasetskyi – Student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0483-8999>

Bashko Volodymyr, Leading Specialist, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Ukraine v.bashko7@gmail.com; ORCID: 0009-0007-7820-1944

Kopysov Vladyslav, student, NTU “Dnipro Polytechnic”, Ukraine ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.15

UDC 620.91

Viktor Kovalenko, Nataliia Miniailo, Olena Barishenko, Leonid Shevchuk,
Volodymyr Vasetskyi, Volodymyr Bashko, Vladyslav Kopysov

ENERGY EFFICIENCY IN THE METALLURGICAL SECTOR: CONCEPT AND EVALUATION METRICS

Abstract. *The aim of the study is to provide an analytical synthesis of the theoretical foundations and practical approaches to improving energy consumption efficiency in the metallurgical industry, taking into account modern challenges of climate policy, rising energy prices, the need for decarbonization, and the economic feasibility of production process modernization.*

The methods. The research is based on an interdisciplinary analysis of scientific publications, international reports, statistical data, and techno-economic characteristics of steel production. Structural-comparative methods of analyzing energy consumption across different technological routes were applied, along with a systematic approach to assessing innovation potential and international benchmarking practices.

Findings. The study identifies the main factors contributing to energy intensity in metallurgy and substantiates the technological reserves for improving efficiency, including the transition to electric arc furnace (EAF) steelmaking, the use of secondary raw materials, waste heat recovery, implementation of cogeneration, digitalization, and hydrogen-based metallurgy. Examples of successful modernization and national support programs from leading countries are also presented.

The originality. The paper systematizes current energy efficiency indicators and production routes in steelmaking, characterizes the impact of various technological strategies on integrated energy intensity, and proposes criteria for assessing energy-saving potential at both macro and micro levels.

Practical implementation. The results can be used to substantiate enterprise energy strategies, shape industrial decarbonization policies, prepare investment projects, and support the development of national and international programs to improve energy efficiency in the metallurgical sector.

Keywords: *energy consumption, energy efficiency, metallurgy, electric arc furnace, hydrogen, cogeneration, scrap, Industry 4.0, CCUS.*

Introduction

The metallurgical industry plays a key role in the development of infrastructure, mechanical engineering, energy, and other strategically important sectors of the economy. At the same time, metallurgy is one of the most energy-intensive and resource-dependent industrial activities, placing high demands on effective energy consumption management. As of the early 21st century, the metallurgical sector accounts for approximately 8% of global final energy consumption and more than one-fifth of industrial carbon dioxide emissions [1]. Over the past two decades, global steel production has doubled, leading to a corresponding increase in energy consumption and environmental pressure.

The issue of energy efficiency in metallurgy arises not only as a matter of resource conservation, but also as a factor determining the competitiveness of enterprises in the global market. The specific energy consumption per tonne of steel remains significant, particularly in countries where traditional blast furnace–converter production dominates. In contrast, countries that have prioritized electric arc furnace (EAF) production and scrap-based recycling demonstrate significantly lower energy intensity indicators.

Current trends require not only local optimization of technologies but also a systemic transformation of metallurgical production in line with the principles of sustainable development and decarbonization. The implementation of energy-efficient solutions - from cogeneration and waste heat recovery to digital control technologies and the use of hydrogen as a reducing agent - is regarded as a necessary condition for technological modernization of the sector. In recent years, special attention has been paid to assessing steel production routes based on specific energy consumption. According to estimates by international organizations, the potential for energy savings at existing plants is up to 20% through the application of Best Available Techniques (BAT). Moreover, the transition to EAF production using steel scrap can reduce energy consumption by 60–70% compared to conventional ore-based routes.

At the same time, the industry remains highly heterogeneous: leading countries such as the EU members, Japan, the USA, and South Korea have achieved high energy efficiency through intensive investment in modernization and strong

government support. Meanwhile, metallurgical enterprises in developing countries or those with outdated production bases continue to operate with higher fuel and electricity consumption.

For Ukraine, as for many other countries with a high share of blast furnace production, energy efficiency is a doubly relevant issue - it is directly linked to production costs, access to international markets, and compliance with environmental legislation. In the context of post-war recovery, Ukraine has a unique opportunity to make a technological leap, moving from outdated energy-intensive schemes to modern digitalized and “green” solutions.

In this regard, the analysis of current technological trends, systematization of energy efficiency assessment approaches, and study of international experience in metallurgical innovation become particularly relevant. The successful implementation of such measures will not only reduce energy consumption but also improve economic efficiency, lower greenhouse gas emissions, enhance energy security, and align production with the principles of the circular economy.

The metallurgical industry is among the most energy-intensive sectors: it accounts for around 8% of global final energy use [1] and approximately 21–24% of industrial CO₂ emissions [2]. Steel production is especially energy-demanding - energy and raw materials constitute up to 60–80% of production costs [3]. Over the past 20 years, global steel output has doubled [4], resulting in equivalent increases in energy use and emissions. Despite a certain decline in energy intensity, these improvements lag behind the growing demand [5].

Studies show that since 1900, the specific energy consumption per tonne of steel has decreased by approximately 67%, mainly due to process efficiency gains [6]. However, since the mid-1990s, the pace of global energy efficiency improvements has plateaued - particularly due to the rapid expansion of production in countries with less efficient technologies [6].

Therefore, energy efficiency in metallurgy is currently a priority from both economic (cost reduction) and environmental (GHG mitigation) perspectives. This paper provides an analytical overview of key energy efficiency indicators in metallurgy, modern technologies for improving energy performance, and international experience in implementing such solutions in the sector.

1. Key Indicators of Energy Efficiency in Metallurgy. The primary integral indicator of energy efficiency in the metallurgical sector is the specific energy consumption per unit of output, typically expressed in gigajoules per tonne of crude steel produced (GJ/t). Over the past decades, the global steel industry has made significant progress: according to the World Steel Association, due to the implementation of energy-saving technologies, the average energy consumption per tonne of steel has decreased by approximately 60% compared to 1960 levels [10].

As of the mid-2010s, the global weighted average energy intensity of steel production was estimated at approximately 17.6 GJ/t [7, 8]. This figure varies significantly depending on the technological route and the country. For example, countries with a high share of electric arc furnace (EAF) production demonstrate lower average energy intensity: Italy and Spain recorded some of the lowest values globally, while China had one of the highest [7].

The key reason for this difference lies in the proportion of scrap-based steel production: in Italy and Spain, a large share of steel is produced in electric arc furnaces, whereas in China, blast furnace–converter production still predominates [7, 8].

Global steel production more than doubled between 2000 and 2018 (see Fig. 1).

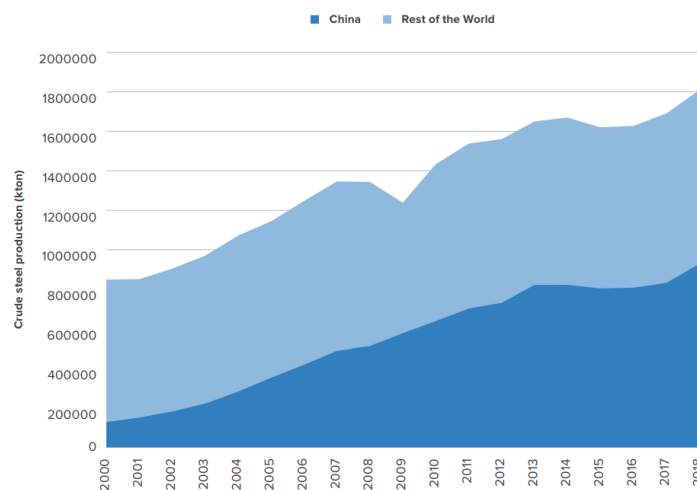


Figure 1 – Crude steel production in China and the rest of the world, 2000–2018
(Source: World Steel Association 2018 [8], 2019a [9])

The chart presented in Fig. 1 illustrates the dynamics of crude steel production in China and the rest of the world over the period from 2000 to 2018. Its structure

clearly demonstrates both the significant growth in global steel output and the substantial change in China's role within the industry. In 2000, total steel production was just over 800 million tonnes, with China representing only a small share of the global volume. However, from the early 2000s onward, China experienced a rapid increase in steel production. Its share in total output grew significantly as a result of intense industrialization and urbanization. Between 2000 and 2007, global steel production rose steadily, reflecting a general period of global economic expansion. In 2008, however, a sharp decline occurred, coinciding with the global financial crisis. This drop in steel production was mainly observed in the rest of the world, while China continued to grow, albeit at a slower pace. After 2009, global steel production recovered relatively quickly, with China contributing the most to this rebound. By 2014, China's steel production had increased to over 800 million tonnes, while output in the rest of the world remained approximately stable.

The noticeable decline in 2014 may be linked to an economic slowdown in China and to government measures aimed at curbing overcapacity and shutting down outdated or illegal production facilities. Nevertheless, China resumed gradual growth, and by 2018, total global steel production exceeded 1.8 billion tonnes. Several important conclusions can be drawn from the chart. First, China has become the undisputed leader in steel production, with a decisive influence on the global metallurgical industry. Second, global steel production is highly sensitive to economic cycles, as clearly seen during the downturns of 2008 and 2014. Finally, although the rest of the world shows moderate growth, its pace is significantly slower than that of China, highlighting China's dominant role in global steel output. In 2018, China accounted for 51% of global steel production, compared to just 15% in 2000. The 2008 decline in production was caused by the global economic recession. The 2014 downturn was primarily due to the deceleration of China's economic growth and chronic overcapacity, which led to the closure of illegal induction furnaces and outdated steel mills in the country. For instance, in the United States, approximately 70% of steel is produced using electric arc furnaces, resulting in an average energy intensity about one-third lower than that of China.

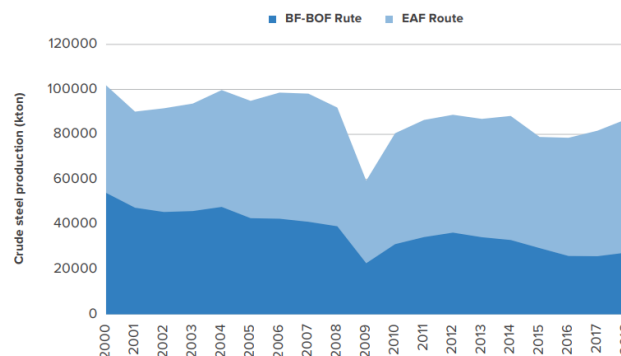


Figure 2 – Crude steel production in the United States by production routes, 2000–2018:
(Source: World Steel Association 2018 [8], 2019a [9])

Throughout the period from 2000 to 2018, crude steel production in the United States underwent significant changes, as illustrated in Fig. 2. Already at the beginning of the 2000s, it was evident that the U.S. steel industry relied on two primary production routes: the blast furnace–basic oxygen furnace (BF–BOF) route and the electric arc furnace (EAF) route.

While both processes were actively used, the traditional BF–BOF method initially accounted for a larger share of production, gradually giving way to the more modern EAF process.

In the early years of the study period, steel production remained relatively stable at around 100 million tonnes per year. However, in 2008, a major turning point occurred that affected not only the U.S. steel sector but the global economy as a whole - the global financial crisis. Demand for steel dropped sharply, leading to a dramatic reduction in output.

The BF–BOF segment was particularly affected, as it requires substantial capital investment and involves longer production cycles. During this time, U.S. steel production fell to its lowest level in two decades.

Nevertheless, like many other industries, steelmaking began to recover gradually. Starting in 2010, production increased again, although pre-crisis levels were not fully restored. However, this period marked a turning point in the structural transformation of the industry. An increasing number of facilities began transitioning to electric arc furnaces (EAF), which are more flexible, economically advantageous, and environmentally friendly. It was primarily through this method

that the U.S. steel industry managed to recover, albeit at a slightly lower production level compared to the early 2000s.

In the final years of the analyzed period - from 2015 to 2018 - the industry entered a relatively stable phase once again. The BF–BOF route continued to lose ground, while EAF technology steadily established itself as the dominant production method. This shift mirrored global trends in the steel industry, as companies favored technologies that allowed faster adaptation to market fluctuations.

Key indicators also include specific fuel consumption by production route and energy efficiency (conversion efficiency). Primary steel production (from ore) is carried out mainly via the blast furnace–basic oxygen converter route (BF–BOF) or through direct reduced iron (DRI) followed by melting in an electric arc furnace (DRI–EAF).

Secondary steel production involves remelting scrap in EAFs. These routes differ significantly in terms of energy intensity. The BF–BOF route consumes on average ~18–20 GJ per tonne of steel, most of which is derived from coking coal. In contrast, the EAF scrap-based route requires several times less energy. According to estimates, steelmaking from scrap uses only ~1/4 to 1/3 of the energy compared to ore-based production [10].

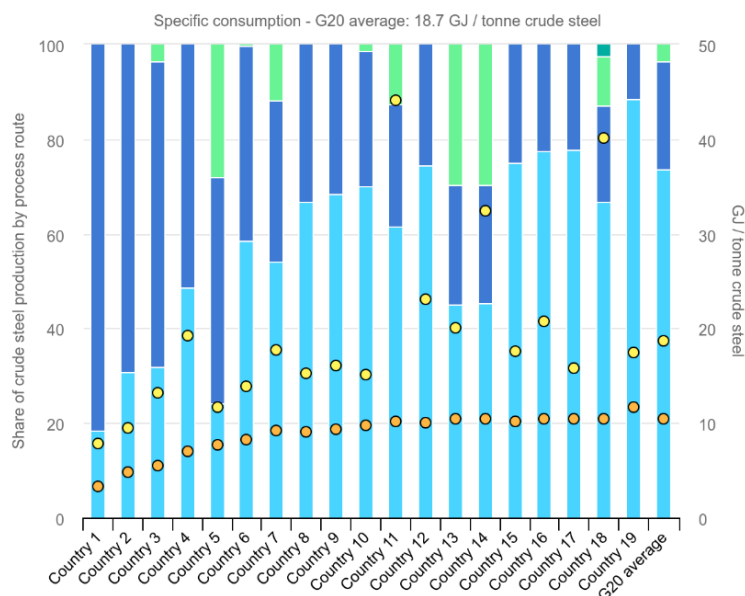


Figure 3 – Final energy consumption and energy intensity under Best Available Technologies (BAT), 2018

The chart presented in Fig. 3 illustrates the final energy consumption and energy intensity of crude steel production across various G20 countries in 2018. It highlights the extent to which different steelmaking technologies are utilized and how much energy is consumed per tonne of finished steel.

On the left vertical axis, the chart shows the share of steel production by technological route, while the right vertical axis indicates energy consumption in gigajoules (GJ) per tonne of steel. Each bar consists of differently colored segments representing various steelmaking processes. Yellow dots indicate the average energy intensity for each country.

The main conclusion from the chart is that both the structure of steel production and the level of energy intensity vary significantly between countries. Some countries lead in the use of energy-efficient technologies, while others continue to rely on more traditional but less efficient methods.

Steel production is one of the key industrial sectors, but it is also among the most energy-intensive. This chart clearly demonstrates the wide disparity in energy consumption across G20 countries in 2018, and how the applied technologies impact production efficiency.

As noted in sources [10–13], different countries employ different production routes. In some, electric arc furnace (EAF) steelmaking dominates - a process that allows for significant energy savings. In others, the conventional basic oxygen furnace route (BF–BOF) still prevails, which requires substantially more energy. This explains the considerable variation in energy intensity, represented by the yellow dots. In some countries, these indicators are below the G20 average of 18.7 GJ per tonne of steel, while in others they exceed this threshold significantly.

One of the most notable observations is the clear distinction between countries that have adopted advanced technologies and those that continue to rely on outdated production methods. Nations that have invested in modernization are already reaping the benefits of reduced energy consumption and, accordingly, lower production costs. Meanwhile, countries that remain heavily dependent on traditional blast furnace routes consume more energy resources, making their steel industries less competitive in the modern market.

The chart also hints at emerging trends. It is becoming increasingly evident that the steel industry is moving toward more energy-efficient solutions. While in some countries the EAF route already dominates, over the coming decades this method may largely replace traditional steelmaking approaches. In addition to economic benefits, this shift also reduces the environmental impact of production.

Secondary steelmaking can save up to 60–70% of energy per tonne [13] - and by some estimates, even as much as 1/8 of the energy required for primary production [14]. In practice, all new steel contains a certain percentage of scrap (in basic oxygen converters, up to ~30% of the charge may be scrap metal) [13], but the key factor for energy efficiency at the sector level is the share of EAF-based production.

Currently, approximately 25% of global steel is produced using electric arc furnaces [10], while around 75% still relies on the more energy-intensive blast furnace route. Thus, increasing the share of EAF production represents one of the main energy efficiency reserves for the industry as a whole.

At the same time, energy performance also depends on the technology level at each production stage. For instance, Best Available Technologies (BAT) offer energy consumption levels of approximately 14.8 GJ/t for the BF–BOF route and about 2.6 GJ/t for scrap-based EAF (thin-slab route), according to estimates by Lawrence Berkeley National Laboratory [15]. Comparing actual national indicators to BAT benchmarks helps assess the potential for efficiency improvement. According to international benchmarking, many G20 countries still have the economic potential to reduce energy use in steel production by 10–20%, approaching BAT performance levels [12].

Therefore, key metrics for monitoring energy efficiency in metallurgy include: specific fuel and electricity consumption per tonne (by production route); share of secondary (scrap-based) steelmaking; composite efficiency index relative to global best practices.

2. Modern Energy-Efficient Technologies in Metallurgy. Reducing energy consumption in the metallurgical industry is achieved through both equipment modernization and the implementation of new processes and control systems. The following are key technological directions for improving energy efficiency at steel plants:

Waste Heat Recovery and Cogeneration. A significant portion of heat in the metallurgical cycle is released through process gases and hot materials. Modern plants implement heat recovery systems to convert this thermal energy into useful energy. For example, by-product gases from blast furnaces and coke plants are redirected from flare stacks to steam and electricity production, covering over 60% of internal energy needs at integrated works [10]. Many integrated steelworks operate their own combined heat and power (CHP) plants fueled by blast furnace and coke oven gas, simultaneously generating both electricity and process steam/hot water. This cogeneration significantly improves overall fuel utilization efficiency: modern CHP systems achieve 65–80% efficiency, compared to approximately 50% for the combined efficiency of separate power and steam generation [16].

Among the most effective heat recovery technologies is coke dry quenching (CDQ), where incandescent coke is quenched not with water but with inert gas, allowing for heat extraction to generate steam. Another proven solution is top-pressure recovery turbines (TRT) installed on blast furnaces, where the energy of pressurized exhaust gas is converted into electricity. These technologies are standard on nearly all modern Japanese blast furnaces and are widely used across the EU and China [17].

Additionally, waste heat from sintering machines, steelmaking furnaces, and rolling mills is increasingly recovered via heat exchangers for secondary applications (e.g., air or water preheating, steam production, or electricity generation via organic Rankine cycle). Collectively, heat recovery systems can reduce specific fuel consumption by 10–20% and yield substantial cost savings. Many such solutions offer short payback periods: according to U.S. DOE energy audit programs, most energy-saving recommendations in steel plants pay back within 2 years, and nearly 40% within 9 months [18]. This explains why waste heat recovery and cogeneration have become standard practices at modern steelworks - not only enhancing efficiency but also providing rapid economic returns.

Energy-Efficient Steelmaking Processes. The stark contrast in energy consumption between the traditional blast furnace route and scrap-based steelmaking has driven significant technological shifts. Electric arc furnaces (EAFs) are now considered a key energy-efficient technology, particularly when combined

with scrap usage. The complete production cycle for one tonne of steel in EAFs consumes on average 60–70% less energy than the BF–BOF route [11]. This is confirmed by practice: countries with a high share of EAF-based steel production (e.g., Turkey, USA) achieve substantially lower energy intensity at the sectoral level [18].

However, the EAF method is constrained by the availability of scrap, which is not unlimited (globally, ~85% of generated scrap is collected) [20]. Thus, primary iron production remains essential to meet demand.

To improve the efficiency of primary ironmaking, technologies such as direct reduced iron (DRI) using natural gas or hydrogen instead of coke are being implemented. The DRI process followed by melting in EAFs offers a partial replacement for blast furnace production. Its energy efficiency depends on the type of fuel: with natural gas, the specific energy consumption can be slightly lower than that of the BF–BOF route, although overall DRI–EAF typically still consumes ~16–18 GJ/t (only slightly less than BF–BOF) [15]. The main advantage of DRI is the reduction in CO₂ emissions when using gas or hydrogen, which is why many Middle Eastern countries with cheap gas have adopted this route (e.g., historically, ~100% of Egypt’s steel has been produced via DRI–EAF) [15].

For the blast furnace process, key energy efficiency improvements include modernization of furnaces and auxiliary equipment: pulverized coal injection (PCI) to replace part of the coke, use of maximum-temperature hot blast, cleaning and recycling of blast furnace gas, and more efficient stove heaters.

Modern blast furnaces in Japan and South Korea have reached such high levels of thermal efficiency that further energy reductions are approaching theoretical limits [20]. Thus, in the long term, breakthrough technologies - such as hydrogen-based reduction, electric melting of iron ore pellets, or plasma/electrolytic methods - are seen as pathways to radically improve energy efficiency and decarbonize the industry [20].

These technologies are currently in the pilot or demonstration phase, with commercial deployment expected closer to the 2030s [20]. Therefore, in terms of currently available solutions, metallurgical companies are focusing on maximizing

scrap usage, transitioning to EAFs where possible, and modernizing existing BF facilities to meet the highest global energy efficiency standards.

Digitalization and Energy Management Systems. In recent years, significant attention has been paid to the use of digital technologies to optimize energy use in industry. Steel plants are implementing monitoring and control systems that track real-time operating parameters of furnaces, rolling mills, motors, and other energy consumers. Advanced software solutions - Advanced Process Control (APC), digital twins, artificial intelligence - allow precise process control, minimizing non-productive fuel and electricity losses [21].

For example, AI models can optimize the thermal regime of electric arc or blast furnaces to reach the target temperature with minimal coke or electricity use. In Europe, several initiatives support the digital transformation of metallurgy. Notably, in 2024, the DIGREEs project was launched with EU support. This collaboration among 12 partners (research institutions and steel manufacturers) aims to develop a digital platform with networked sensors and AI to optimize the full production cycle - from raw material preparation to rolling [21].

The introduction of digital twins and control models at European steel plants is expected to deliver up to €800 million in annual energy cost savings and reduce CO₂ emissions by 6 million tonnes per year in the medium term [21].

Beyond targeted projects, many companies are already implementing Industry 4.0 elements: energy dispatch systems, predictive analytics for equipment (to prevent failures and downtime), optimization of operating schedules to flatten peak loads, etc.

A critical component of this transformation is the adoption of Energy Management Systems (EnMS) in line with ISO 50001. As noted by the IEA, formalized energy management ensures continuous application of best practices at relatively low cost [11]. ISO 50001-certified companies regularly analyze their energy consumption, monitor Energy Performance Indicators (EnPIs), and develop energy efficiency plans - enabling identification of new saving opportunities.

In combination, digital solutions and energy management systems can deliver an additional 5–10% reduction in specific energy consumption by fine-tuning processes and eliminating losses. Therefore, digitalization is emerging as a crucial

technological driver of energy efficiency, effectively complementing hardware modernization efforts.

3. International Experience in the Implementation of Energy-Efficient Technologies. Decades of experience from the world's leading steel-producing countries demonstrate that improving energy efficiency is a mutually beneficial process - it reduces production costs while simultaneously supporting environmental goals. Developed nations have already made significant progress in reducing specific energy consumption, yet improvement potential remains across nearly all regions [11]. According to the IEA, implementing currently available energy-efficient technologies across global steel plants could save up to ~20% of energy per tonne of steel on average [11].

Below is an overview of selected country experiences and global initiatives:

Japan has traditionally been a global leader in energy efficiency in the steel industry. Since the oil crisis of the 1970s, Japanese steelmakers have systematically implemented energy-saving innovations - from comprehensive gas and heat recovery systems to advanced blast furnace technologies. As a result, Japan's steel plants have achieved the highest energy efficiency worldwide [22]. As early as the 2010s, Japan announced its intention to improve steel production efficiency by 35% by 2030 compared to baseline levels - underscoring its ambition to push efficiency boundaries even further [23].

To share best practices, Japan launched a global energy efficiency benchmarking program during its G20 presidency in 2019 [11]. In cooperation with the IEA, an international methodology was developed to compare specific energy consumption per tonne of steel, accounting for differences in production structures. Findings revealed that many countries could significantly reduce their performance gaps through process optimization and the implementation of Best Available Techniques (BAT) [11]. Japanese companies are also active in technology transfer: through joint implementation mechanisms and partnerships, they support the installation of heat recovery systems, advanced tuyères, and automation systems at plants in China, India, and ASEAN nations.

The European Union emphasizes energy efficiency through regulatory and financial mechanisms. The EU Energy Efficiency Directive (EED) obliges member

states to promote industrial efficiency, including mandatory energy audits for large enterprises and support for high-efficiency cogeneration [24]. Sector-specific BAT Reference Documents (BREFs), such as the "Iron & Steel BREF," define technical options for minimizing energy use, which are gradually implemented at EU steelworks.

Many European plants have undergone modernization with support from public funding programs (e.g., Horizon 2020, Innovation Fund), co-financing installations of energy-efficient equipment. Technologies such as coke dry quenching (CDQ), regenerative burners in reheat furnaces, and variable frequency drives for rolling mill motors are widely used. Countries like Germany and France also support digitalization projects (e.g., DiGreeS) aimed at reducing energy consumption. As a result, the energy intensity of European steel is among the lowest globally. For example, the average steel plant in Germany or Italy consumes far less energy per tonne than a typical Chinese facility, largely due to a higher EAF share and BAT adoption [25]. Furthermore, the EU continues to promote fuel switching and electrification/hydrogen-based technologies under the Green Deal and industrial decarbonization programs.

The United States has a different production structure, with a dominance of mini-mills using scrap-based EAFs. As of recent years, about 70% of U.S. steel is produced in EAFs, resulting in a lower sectoral average energy intensity (placing the U.S. among the global top 5 performers) [17]. The U.S. government has historically supported energy efficiency through the Department of Energy (DOE) programs. In the 2000s, the Save Energy Now initiative conducted energy audits at numerous steel plants, identifying tens of millions of dollars in potential energy savings [18]. Notably, many of the recommended measures had a payback period of under two years, prompting widespread implementation [18].

The ENERGY STAR for Industry program offers industry-specific best practice guides (including for steel) and recognizes top-performing plants. A strong emphasis is placed on modernizing energy equipment - replacing outdated boilers, compressors, and motors with high-efficiency models. According to a 2021 BlueGreen Alliance study, the overall energy intensity of the U.S. steel sector is about 33% lower than in China, despite the relatively high average age of U.S. BF–

BOF facilities (oxygen converters average over 30 years). This underscores the effectiveness of combining a high EAF share with targeted energy-efficiency policies.

China, the world’s largest steel producer (accounting for over 50% of global output), is also the largest energy consumer in the steel sector [25]. Between 2000 and the 2010s, China embarked on extensive modernization: thousands of small inefficient furnaces were closed and replaced with modern large-scale BF and BOF units. Over 80% of China’s BF–BOF capacity was built after 2000, many equipped with advanced technologies (gas recovery, pulverized coal injection, automation) [18]. As a result, specific energy consumption at major Chinese plants now approaches levels in developed countries. International benchmarking shows that China ranks second among 15 countries in energy efficiency for the BOF route [18].

However, China’s national average is lower due to a historically low EAF share (<10%). The Chinese government is addressing this by setting targets to raise the EAF share. The 2024–2025 Action Plan aims to increase the EAF share to 15% of total production and raise scrap use to 300 million tonnes/year [26]. By 2025, at least 30% of Chinese steel capacity must reach benchmark energy efficiency levels; underperforming plants are to be upgraded or phased out [26]. All new and retrofitted projects must meet A-level efficiency and environmental standards. China also provides financial incentives: green technology loans, subsidies for heat recovery systems, and strict energy consumption caps. While progress continues, China faces the challenge of rising domestic steel demand, which outpaces the deployment of energy-efficient technologies [6].

India, the world’s second-largest producer, also struggles with high energy intensity (among the highest globally, alongside China and Ukraine) [25], due to reliance on BF and coal-based DRI. The PAT program (Perform, Achieve and Trade) introduces specific energy reduction targets and allows certificate trading, incentivizing modernization or purchase of energy savings from more efficient firms.

Ukraine, historically among the top 10 producers, had an outdated production structure prior to the war (predominantly open-hearth and Bessemer converters until the 2010s, then BF–BOF), resulting in very high energy intensity. International assessments ranked Ukraine among the least energy-efficient producers globally, along with China and India [25]. However, post-war reconstruction is seen as an

opportunity to implement state-of-the-art technologies. National recovery plans include building new EAF capacity, a green hydrogen metallurgy cluster, and other advanced infrastructure - aiming to bring Ukrainian steel to global energy performance levels [27].

At the global level, international organizations play a vital role. UNIDO has implemented multiple energy efficiency projects in steel across developing countries - from Egypt to Vietnam - offering expert support, benchmarking, and funding for BAT deployment [28]. The OECD explores energy policy mechanisms (e.g., 2019 reports on resource efficiency and steel decarbonization). The IEA's 2020 Steel Roadmap emphasized energy efficiency as a foundation for achieving carbon neutrality in the sector [29].

In summary, global experience confirms that countries investing early in energy-efficient technologies (Japan, EU, South Korea, USA) now enjoy competitive advantages and reduced energy price exposure, while those that delayed modernization must now leap toward advanced solutions - often with support from international initiatives.

4. Economic Aspects and Payback of Energy Efficiency Measures. Energy efficiency in the steel industry is closely tied to production economics. Energy carriers constitute a significant share of operating costs at metallurgical enterprises - on average, 20–40% of steel production costs [11]. Therefore, any improvement in efficiency directly reduces costs and enhances product competitiveness. According to IEA estimates, the implementation of readily available energy-saving technologies could save the industry hundreds of millions of dollars through reduced specific fuel consumption [11].

However, the adoption of new technologies requires capital investment, and decisions are often contingent upon the expected payback period. Most "low-hanging fruit" in energy efficiency - such as process optimization, insulation, heat recovery, and auxiliary equipment upgrades - offer relatively short payback periods. As previously mentioned, nearly two-fifths of energy-saving projects in the U.S. steel industry demonstrated a payback of less than one year, and the vast majority paid off within two years [18]. This indicates that such investments typically generate rapid economic returns.

On the other hand, large-scale capital-intensive projects - such as building a new EAF to replace a blast furnace, implementing a hydrogen facility, or comprehensive modernization of a BOF shop - may require hundreds of millions of dollars and have payback periods spanning decades. Companies are often reluctant to undertake these investments without additional incentives, as market-driven benefits alone may not justify the long investment cycles and associated risks (e.g., volatility in steel and energy prices).

Thus, government support programs play a critical role. Many countries have introduced mechanisms such as tax incentives for energy-efficient equipment, preferential loans, decarbonization funds, or direct subsidies. In the EU, for example, the Energy Efficiency Directive (EED) and related regulations explicitly recommend prioritizing support for high-efficiency cogeneration in industrial facilities [24].

In the United States, recent legislation (notably the Inflation Reduction Act of 2022) provides credits for industrial emission reduction, which also cover energy efficiency improvements. Payback times vary depending on the technology: for instance, installing variable frequency drives on motors can recover investment in 1–1.5 years through electricity savings, while coke dry quenching systems are more expensive and may take 5–7 years to pay back, depending on electricity and coal prices. Government grants and tax breaks reduce the effective payback period, making such projects more attractive.

Beyond direct economic benefits such as lower energy bills, improved energy efficiency also yields indirect advantages. These include enhanced energy security (reduced dependence on external fuel sources), lower environmental compliance costs (as CO₂ and pollutant emissions become increasingly taxed), and job creation in the manufacturing and servicing of green technologies [38]. According to the IEA, investments in industrial energy efficiency create approximately 18 jobs per \$1 million invested, thanks to the development of supporting technologies and services [11].

Thus, the economic dimension of energy efficiency is multifaceted: on one hand, it enables cost reduction and fast returns for many measures; on the other, it requires significant capital for deep modernization. Therefore, comprehensive policy

frameworks and financial incentives are essential to facilitate and accelerate this transition in the steel industry.

Conclusions

The steel industry remains one of the most energy-intensive sectors globally, yet it also holds some of the greatest potential for energy savings. In recent years, a substantial body of international experience has been accumulated in improving energy efficiency - ranging from equipment modernization to the implementation of digital control systems. Key indicators, such as specific energy consumption per tonne of steel, demonstrate positive trends, although the pace of improvement varies across regions.

The most successful countries have managed to combine technological innovations (such as heat recovery, electric arc furnaces, and automation) with well-designed public policy frameworks. This has enabled them to reduce the energy intensity of steel production to levels approaching theoretical minimums. On the other hand, a large share of global steelmaking still operates far from Best Available Techniques (BAT), leaving considerable untapped potential for energy savings.

A review of literature and industrial reports indicates that implementing currently available technologies - such as cogeneration, heat recovery, and process optimization - can reduce fuel consumption by 10–20% even at modern facilities [11]. Furthermore, transitioning to advanced production processes (e.g., scrap-based electric steelmaking, direct reduction) can deliver savings of 60–70% compared to outdated routes [11].

Energy efficiency is strongly linked to competitiveness: lower energy use results in reduced production costs and greater resilience to market volatility. Equally important is the role of energy efficiency in decarbonizing the steel industry. According to various estimates, energy-saving and material-efficiency measures (such as increased scrap recycling and reduced process losses) alone could lower the sector's emissions by 15–20% by 2030 [11], contributing significantly to carbon neutrality goals.

International cooperation - including the exchange of best practices, joint research initiatives, and global benchmarking - plays a crucial role in accelerating progress.

In conclusion, the experience of different countries demonstrates that investments in energy efficiency within the steel industry are justified not only in terms of direct economic returns, but also through long-term environmental and energy security benefits. For Ukraine and other countries with energy-intensive steelmaking, the adoption of modern energy-efficient technologies is both an urgent necessity and a unique opportunity for technological leapfrogging - laying the groundwork for the sustainable development of the sector in the years to come.

REFERENCES

1. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 16; Available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
2. Energy efficiency in iron and steel making. Available at: https://www.energyefficiencymovement.com/wp-content/uploads/2023/01/ABB_EE_2022-05-WhitePaper_Metals.pdf
3. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 57; Available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
4. World Steel Association, Public Policy Paper, Water management in the steel industry, 2020, Page 5, Page 7; Available at: <https://worldsteel.org/publications/policy-papers/water-management-policy-paper/>
5. Available at: <https://www.bluegreenalliance.org/work/manufacturing-and-industrial-policy/>
6. Wang P, Ryberg M, Yang Y, Feng K, Kara S, Hauschild M, Chen WQ. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nat Commun.* 2021 Apr 6;12(1):2066. doi: 10.1038/s41467-021-22245-6. PMID: 33824307; PMCID: PMC8024266.
7. Haslechner, R., Stelter, B., Osio, N. 2015. Steel as a Model for a Sustainable Metal Industry in 2050. Boston Consulting Group. Available at: <https://www.bcg.com/publications/2015/metals-mining-sustainability-steel-as-a-model-for-a-sustainable-metal-industry-in-2050>
8. International Energy Agency (IEA). 2019. IEA Technology Roadmap. The global iron and steel sector. International Energy Agency, 29th March 2019, Paris
9. Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2018-World-Steel-in-Figures.pdf>
10. World Steel Association. (n.d.). Energy use in the steel industry. Retrieved March 23, 2025, Available at: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf>
11. Driving Energy Efficiency in Heavy Industries. Global energy efficiency benchmarking in cement, iron & steel. Reports. Available at: <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>
12. IEA (2021), Final energy use and energy intensity possible using best available technologies, 2018, IEA, Paris Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/final-energy-use-and-energy-intensity-possible-using-best-available-technologies-2018>, Licence: CC BY 4.0

13. World Steel Association, Public Policy Paper, Climate change and the production of iron and steel, 2021, page 4; [Climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel.pdf](https://www.worldsteel.org/publications/public-policy-papers/climate-change-and-the-production-of-iron-and-steel.pdf) (worldsteel.org)
14. IEA, Iron and steel technology roadmap, Towards more sustainable steelmaking, October 2020, page 12; Available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
15. Industrial Energy Efficiency Benchmarking Report for Iron and Steel Sector. Available at: <https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking%20Report%20Steel%20Sector.pdf>
16. U.S. Environmental Protection Agency. Available at: <https://www.epa.gov/chp/chp-benefits>
17. Available at: <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>
18. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45815.pdf>
19. Available at: <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>
20. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/industry/steel>
21. Member of the EU DiGreeS project: Saarlust accelerates digitalization in steel production. Available at: <https://en.saarlust.com/news/press-releases/saarlust-accelerates-digitalization-in-steel-production/?id=18538>
22. JAPANESE STEEL INDUSTRY INITIATIVES TO CHALLENGE GLOBAL WARMING. Available at: <https://web.archive.oecd.org/2012-06-15/170753-44252021.pdf>
23. Japanese Industrial Energy Efficiency Best Practices June 2018. Available at: <https://www.aceee.org/sites/default/files/pdf/conferences/intl/2018/ito.pdf>
24. Prioritising the use of high-efficiency cogeneration by industrial operators to reach 2030 climate goals. Available at: <https://www.eurofer.eu/publications/position-papers/prioritising-the-use-of-high-efficiency-cogeneration-by-industrial-operators-to-reach-2030-climate-goals>
25. Steel Climate Impact. Available at: <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>
26. China's 2024-25 Energy Conservation and CO2 Reduction Plan – Compliance Considerations for Businesses. Available at: <https://www.china-briefing.com/news/china-energy-conservation-and-co2-reduction-plan-compliance-considerations-for-businesses>
27. Why green steel should play a vital role in Ukraine's post-war recovery. Available at: <https://www.weforum.org/stories/2024/07/green-steel-vital-role-ukraine-post-war-recovery/>
28. Energy and Resource Efficiency in the Vietnamese Steel Industry Report prepared by UNIDO International Consultant Dr Joe Herbertson, The Crucible Group Pty Ltd, Australia with Mr Chu Duc Khai, UNIDO National Consultant UNIDO Vietnam Mission July 2011. Available at: https://www.unido.org/sites/default/files/2014-06/Energy_and_Res_0.pdf
29. Iron and Steel Technology Roadmap Towards more sustainable steelmaking. Available at: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf

Received 10.04.2025.

Accepted 19.05.2025.

УДК 620.91

В.Л. Коваленко, Н.О. Міняйло, О.М. Барішенко, Л.І. Шевчук,
В.В. Васецький, В. Башко, В. Кописов

ПОНЯТТЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ПОКАЗНИКИ ЇЇ ОЦІНКИ

Абстракт. Метою роботи є аналітичне узагальнення теоретичних засад і практичних підходів до підвищення ефективності енергоспоживання в металургійній промисловості з урахуванням сучасних викликів кліматичної політики, зростання цін на енергоресурси, потреби в декарбонізації та економічної доцільності модернізації виробничих процесів.

Методика. Дослідження базується на міждисциплінарному аналізі наукових публікацій, міжнародних звітів, статистичних даних, а також техніко-економічних характеристик виробництва сталі. Застосовано методи структурно-порівняльного аналізу енерговитрат за різними технологічними маршрутами, системний підхід до оцінки потенціалу інноваційних рішень та міжнародного бенчмаркінгу.

Результати. Визначено основні фактори енергоємності в металургії, обґрунтовано технологічні резерви підвищення ефективності – зокрема, перехід до електросталеплавильного виробництва, використання вторинної сировини, утилізацію втратного тепла, впровадження когенерації, цифровізації та водневої металургії. Розглянуто приклади успішної модернізації та програми стимулювання в провідних країнах.

Наукова новизна. У роботі систематизовано сучасні показники енергоефективності та маршрути виробництва сталі, охарактеризовано вплив різних технологічних стратегій на інтегральну енергоємність, а також запропоновано критерії оцінки потенціалу енергозбереження на макро- і мікрорівнях.

Практичне значення. Результати можуть бути використані для обґрунтування енергетичних стратегій підприємств, формування політик у сфері промислової декарбонізації, підготовки інвестиційних проєктів, а також розвитку державних і міжнародних програм підвищення енергоефективності в металургії.

Ключові слова: енергоспоживання, енергоефективність, металургія, електроніка, водень, когенерація, брукс, Industry 4.0, CCUS.

Коваленко Віктор Леонідович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Міняйло Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: kafedra_autp@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>

Барішенко Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: barishenko.om@np.znu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-6642-6341>

Шевчук Леонід Ігорович – студент кафедри промислового та цивільного будівництва Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0004-1369-7342>

Васецький Володимир Вячеславович – студент кафедри промислового та цивільного будівництва Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. <https://orcid.org/0009-0005-0483-8999>

Кописов Владислав, студент, НТУ “Дніпровська політехніка”, Україна
ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

Башко Володимир, провідний фахівець, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Україна v.bashko7@gmail.com; orcid.org/0009-0007-7820-1944

Viktor Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Nataliia Miniailo – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail:

kafedra_autp@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>

Olena Barishenko - PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: barishenko.om@np.znu.edu.ua;

<https://orcid.org/0000-0002-6642-6341>

Leonid Shevchuk – Student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1369-7342>

Volodymyr Vasetskyi – Student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0483-8999>

Bashko Volodymyr, Leading Specialist, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Ukraine v.bashko7@gmail.com; ORCID: [0009-0007-7820-1944](https://orcid.org/0009-0007-7820-1944)

Kopysov Vladyslav, student, NTU “Dnipro Polytechnic”, Ukraine
ORCID: [0009-0000-4950-4224](https://orcid.org/0009-0000-4950-4224), vlad.kopusta@gmail.com

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.16

УДК 621.771:621.774:621.73

М.В. Губинський, Ю.Д. Угрюмов, О.В. Губінський, І.А. Мазур, Д.Ю. Угрюмов

ПИТАННЯ ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТИ МЕТАЛА ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ТРУБ*

Анотація. Розглянуті основні історичні напрямки економії металу при виробництві гарячекатаних безшовних труб на різних трубопрокатних агрегатах, що досягли практичного використання. Зниження витрати металу є одним з основних напрямків зниження витрат при виробництві труб, так як доля вартості заданого металу за вирахуванням відходів складає від 50 до 85%. Виконаний аналіз металовикористання при виробництві гарячекатаних безшовних труб на різних трубопрокатних агрегатах показав, що найбільші технологічні втрати металу мають місце на пілігримових агрегатах за рахунок обрізи металу на пілігримовому стані в затравку та пілігримову головку. розглянуті основні напрямки зниження цих втрат, при цьому відмічається що найбільш ефективними є прокатка гільзи в стик та розкатка пілігримової головки на вільній ділянці дорна. Також розглянуті питання зменшення окалиноутворення при гарячій прокатці труб шляхом прискореного охолодження виробу водою на виході з чистого калібру та збільшенням швидкості охолодження на повітрі.

Ключові слова: гарячекатана труба, заготовка, гільза, пілігримовий стан, прошивний косовалковий стан, затравка, пільгерголова, окалиноутворення, економія металу, технологічна обрізь, витратний коефіцієнт металу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми ресурсозбереження при виробництві гарячекатаних безшовних труб набувають все більшу актуальність як зараз так і на далеку перспективу. Одним із основних критеріїв сучасної технології і устаткування є енергоємність продукції та екологічна безпека [1]. Тому сьогодні

© М.В. Губинський, Ю.Д. Угрюмов, О.В. Губінський, І.А. Мазур, Д.Ю. Угрюмов

* Присвячується пам'яті відомого педагога, вченого і спеціаліста в галузі теплотехніки доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри теплотехніки та екології металургійних печей Національної металургійної академії України Губинського Володимира Йосифовича (03.11.1930 – 15.01.2012).

першочерговими питаннями металургії є ресурсозбереження та екологія у технологічних процесах виробничого циклу.

Багато технологічних процесів виробництва гарячекатаних безшовних труб досягли своїх можливостей та потребують вдосконалення або кардинального відновлення. Встановлено, що ресурсозбереження сприяє росту ефективності економіки, підвищенню її конкурентоспроможності. Більшість трубних підприємств України мають устаткування для виробництва гарячекатаних труб якому близько 50 років. Одним із головних напрямків в ресурсозбереженні є удосконалення діючих технологічних процесів, а також розробка та впровадження нових на базі сучасного розвитку науки і технології. Є значний доробок нових технологічних процесів, котрі до сьогодні не затребувані з об'єктивних і суб'єктивних причин.

Питання ресурсозбереження і, перш за все поліпшення металовикористання, як у виробника, так і у споживача є одним із основних, що впливає на техніко-економічні показники роботи підприємства, так і на його конкурентоспроможність, що дуже важливо в боротьбі за ринки збуту.

Стаття розглядає шляхи зниження витрат металу при виробництві гарячекатаних безшовних труб на різних трубопрокатних агрегатах (ТПА). Також в роботі розглядаються шляхи зниження витрат металу як у виробника гарячекатаних труб, так і у споживачів за рахунок їх додаткової обробки, що в кінцевому рахунку призводить до економії металу в масштабах різних галузей і в цілому по країні.

При виробництві гарячекатаних труб різних видів вартість металу складає 50÷85 % приведених витрат [1].

При вирішенні питань економії металу необхідно пам'ятати про кінцеву мету виробництва труб – використанні їх в головному виробі і можливій економії, яка може бути одержана при застосуванні труб вищої якості, з більш точними геометричними розмірами, спеціально оброблених, у тому числі термічно оброблених, з покриттям зовнішньої і внутрішньої поверхонь та ін. все це потребує значних вимог до вихідного металу, а також способів виготовлення і обробки труб [2].

Серед основних напрямків скорочення витрат металу необхідно відмітити наступні: використання безперервнолитої заготовки круглого поперечного перетину; зниження втрат металу в окалину при нагріві і підігріві; зниження втрат металу в технологічну обрізь, в тому числі на пілігримовому стані в затравку і пільгерголовку, та потовщені кінці при редукуванні з натягом; підвищення точності труб по діаметру і товщині стінки за рахунок зниження різностінності, а також прокатки труб із середньою товщиною стінки близькою до прокатного номіналу або в поді мінусових допусків; удосконалення обліку руху металу по переділам; застосування диференційної системи здачі і відвантаження труб; захист труб від корозії в процесі виробництва і експлуатації.

У кінцевого споживача сталевих труб велике значення має підвищення їх експлуатаційних характеристик [3]. Встановлено, що більше 50% економії металу при його використанні може бути забезпечено в трубному виробництві здійсненням комплексу заходів з підвищення експлуатаційних характеристик сталевих труб, що передбачає поліпшення якості і збільшення випуску ефективних видів труб. При виробництві гарячекатаних безшовних труб найбільш ефективними є наступні заходи [3]: підвищення міцності та пластичності матеріалу труб за рахунок застосування низьколегованих і легованих марок сталей; впровадження термічної і термомеханічної обробки; освоєння нових екологічних видів продукції, яка забезпечує економію металу за рахунок підвищення конструкційної міцності, експлуатаційної надійності і довговічності; підвищення точності розмірів і якості труб шляхом впровадження нових технологічних процесів їх виробництва, удосконалення методів контролю.

В роботі [4] проаналізовано варіанти виготовлення і можливості використання сталевих труб з різними видами покриттів. Труби з покриттям володіють на порядок більш високими показниками експлуатаційної стійкості в порівнянні зі звичайними трубами. Зниження витрати сталевих труб, економія легованих сталей та кольорових металів в промисловості і капітальному будівництві можуть бути досягнуті шляхом застосування труб із вуглецевих сталей з металевим та неметалевим покриттям (оцинкованих,

алітірованих, алюмінійованих, хромованих, емальованих, склянованих, з покриттям із пластичних мас, епоксидних смол та інших видів протикорозійних матеріалів).

В роботі [5] розглянутий спосіб термічного дифузійного цинкування, який дозволяє наносити захисні покриття на насосно-компресорні труби із нарізними кінцями та на муфти до них. При цьому утворюється захисне покриття із корозійно-ерозійного залізоцинкового сплава на зовнішній та внутрішній поверхнях труб, а також на їх різьбових ділянках. Такі труби легко транспортувати без пошкодження покриття. Довгстрокові промислові випробування насосно-компресорних труб в газомазутній нафтовій свердловині показали, що дифузійні цинкові покриття володіють протикорозійними властивостями і ефектом самозахисту. Використання труб з такими покриттями забезпечує значну економію засобів.

Для короткочасного протикорозійного захисту металопродукату при його транспортуванні та зберіганні в роботі [6] запропоновані нові антикорозійні матеріали, які розроблені на основі ресурсозберігаючих і екологічних «зелених» технологій, котрі вводяться в лакофарбові матеріали.

Постановка задачі і мета дослідження

Виробництво гарячекатаних безшовних труб широкого розмірного і марочного сортаменту здійснюється на різних ТПА з пілігримовими, автоматичними, безперервними та іншими розкатними станами. Прокатка труб на цих агрегатах здійснюється з різним витратним коефіцієнтом металу, що обумовлено складом обладнання і особливостями технології.

Задачею даної роботи є розгляд основних напрямків зниження витрат металу на різних ТПА, і перш за все, на пілігримових, так як це дозволить знизити затрати на виробництво та підвищити конкурентоспроможність продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Особливості процесів виробництва гарячекатаних безшовних труб

Одним з основних напрямків підвищення ефективності гарячої прокатки труб на ТПА різного типу є розробка нових або вдосконалення існуючих технологій з метою зниження витрат металу в процесі виробництва труб.

Витрата металу наряду з продуктивністю процесу є основною складовою техніко-економічних показників роботи ТПА. Основний показник витрати металу – витратний коефіцієнт λ , який представляє відношення маси заданого в виробництво металу до маси готової продукції, отриманої після гарячої прокатки. При цьому

$$\lambda = \frac{1}{1 - Q}, \quad (1)$$

де Q – втрати металу при прокатці від 1 т заготовки, котрі в основному складаються із угару при нагріві і підігріві металу, обрізі кінцевих ділянок і відходів металу при виробництві спеціальних видів труб (нарізних та ін.).

втрати металу при гарячій прокатці труб складаються із технологічно неминучих (угар, обрізь дефектних кінців) і втрат, викликаних низькою якістю металу, порушенням технології, незадовільним станом обладнання та ін.

загальні втрати металу в відходи на всіх технологічних стадіях (операціях) від заготовки до готової труби складають

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i, \quad (2)$$

де q_i – втрати металу на даній стадії технології; n – число стадій (операцій).

Витратний коефіцієнт металу λ може бути представлений в вигляді добутку витратних коефіцієнтів на кожній стадії (операції) технологічного процесу $\lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_n$.

Останній вираз показує, що одним із напрямків зниження втрат металу при прокатці труб є зменшення кількості стадій, що знаходить своє застосування при розробці нових процесів прокатки труб.

В табл. 1 наведені значення λ для найбільш поширених ТПА.

Аналіз значень витратних коефіцієнтів λ , наведених в табл. 1. показує, що найбільші втрати металу мають місце на пілігримових ТПА, що

Таблиця 1

Середні значення витратних коефіцієнтів λ (т/т) при гарячій прокатці катаних і нафтопровідних труб

Вид труб	ТПА з автомат станом 140	ТПА з пілігримо-вим станом 5–12"	ТПА з трьох-валковим розкатним станом	ТПА з безперерв-ним станом 30-102
Вуглецеві	1,067–1,083	1,20	1,060	1,066–1,077
Леговані	1,087–1,103	1,24	1,080	1,087–1,091
Високо-леговані	1,107	1,32	1,100	–

обумовлено наявністю затравки та пільгерголки, котрі видаляються при прокатці на пільгерстані, а також застосування в якості вихідної заготовки злитків стаціонарного розливання, які мають усадочну раковину.

Труби знаходять широке застосування в різних областях техніки і галузях промисловості. Незважаючи на те, що труби виробляють з різних матеріалів, найбільш розповсюдженні безшовні сталеві труби. властивості різних марок сталей і сплавів в поєднанні з різними видами термічного оброблення та захисних покриттів забезпечують застосування сталевих труб при широкому спектрі навантажень і в різних середовищах експлуатації [1, 2].

Найбільш широко застосовуваними способами виготовлення сталевих безшовних труб різного призначення є способи гарячого деформування. Гарячим деформуванням виготовляють труби з вуглецевих, легованих та високолегованих сталей і сплавів, а також багатошарові труби діаметром від Ø28 мм до Ø1000 мм гарячою прокаткою та до Ø1300 мм (у перспективі до Ø1400 мм) гарячим пресуванням.

В залежності від виду і властивостей матеріалу заготовки, розмірів і вимог до якості труб гаряче деформування здійснюють різними способами, кожному з яких притаманні свої технологічні властивості і недоліки.

Однак, незалежно від застосованого способу схема виробництва гарячедеформованих безшовних труб містить наступні основні технологічні операції: нагрівання заготовки; отримання гільзи; підігрів гільзи (за

необхідністю); отримання чорнової труби проміжних розмірів розкаткою або пресуванням; підігрів труби (за необхідністю); отримання чистової труби остаточних розмірів по діаметру і товщині стінки.

З 11 ТПА для виробництва гарячедеформованих труб в Україні, в даний час, знаходяться в експлуатації наступні: один ТПА з пілігримовим станом 5–12”, один ТПА 30–102 з безперервним станом; один ТПА 350 з автоматичним станом, два ТПА 140 зі станами поздовжньої прокатки, один ТПА 80 з безперервним станом, один ТПА 200 з трьохвалковим розкатним станом, а також трубопресові установки зусиллям 31,5 МН, 44 МН та 16 МН.

Попит на високопродуктивні технології змінюється на ресурсо- і енергозберігаючі технології, так як фактор значного збільшення обсягів виробництва діючого агрегату перестав бути домінуючим. На перше місце вийшли такі фактори як: якість продукції, конкурентна ціна, розширення сортаменту труб, виконання замовлень точно в строк, ресурсозбереження та екологія [1].

Отримання вихідної трубної заготовки. Для виробництва гарячедеформованих сталевих труб використовують катану, ковану, сифонні злитки круглого або багатогранного перетину, відцентроволиту і безперервнолиту заготовку (БЛЗ), а також злитки різних видів переплавів.

Одним з переваг пілігримового способу є можливість використання різного виду вихідного матеріалу з урахуванням сортаменту по розмірам і маркам сталі труб при відповідному складі технологічного обладнання ТПА.

Основні вимоги до трубної заготовки можна позначити наступним чином: забезпечення необхідної металургійної якості; мінімальний розкид по хімічному складу і механічним властивостям; необхідна точність геометричних розмірів і якості поверхні; виконання спеціальних вимог, таких як холодо- та корозійна стійкість.

Недоліками злитків стаціонарного розливання в виливниці є: підвищена забрудненість донної частини екзогенними неметалевими включеннями та розвинена центральна пористість верхньої частини.

Ковані трубні заготовки отримують в основному із зливків діаметром більше $\varnothing 270$ мм з важкодеформованих сталей і сплавів. Якість цих заготовок відповідає вимогам, які пред'являються до них.

Широке розповсюдження отримало використання БЛЗ для гарячого деформування труб. Розміри круглих БЛЗ знаходяться в межах 160÷500 мм, розміри квадратних блюмів складають 180×180÷340×340 мм, прямокутних блюмів 200×280÷400×560 мм. БЛЗ застосовують для ТПА практично всіх типів, при цьому вихід годного на 10-15% вищий, аніж при використанні катаних заготовок.

Злитки електрошлакового переплаву (ЕШП) застосовуються для виробництва труб середніх та великих діаметрів з важкодеформованих, складнолегованих і хромистих сталей (08X18P10T, 12X18H12T, 15X1M1Ф, 15X5M, ЭИ961, ЭП517, ЭП609 та ін.), які володіють корозійною стійкістю, порівняно малим коефіцієнтом розширення, високою жароміцністю. Звичайними методами сталеплавильного виробництва не завжди вдається забезпечити високу якість виробу з цих заготовок. Полі заготовки ЕПШ усувають необхідність їх свердління, яке призводить до збільшення собівартості. Полі заготовки ЕПШ після виливання обточують і розточують до видалення окалини та мікротріщин.

Отримання гільзи. Процес поперечно-гвинтової прокатки є найбільш розповсюдженим методом прошивання, хоча на ряді ТПА до теперішнього часу застосовуються і інші способи прошивання: на пресах і прес-валкових станах. В цих випадках не наскрізне прошивання передбачає подальшу розкатку в гільзу на косовалковому стані елонгаторі з прошиванням донця.

В останній час найбільш доцільним вважається технологія прямого прошивання вихідної БЛЗ круглого поперечного перерізу на двох- або трьохвалковому стані поперечно-гвинтової прокатки.

Отримання чорнової труби. Розкатка гільзи в чорнову трубу здійснюється переважно на станах: безперервних, автоматичних, пілігримових, трьохвалкових, розкатних, Асселя, рейкових та ін. розкатка труб на пілігримових станах характеризується підвищеною технологічною обрізю і витратним коефіцієнтом металу.

Отримання чистової труби. Ця операція здійснюється в основному на багатокільцевих станах поздовжньої прокатки. При прокатці труб на редуційних станах, які працюють з натягом має місце підвищена витрата металу в потовщенні кінці. Шляхи зниження втрат металу на цих станах розглянуті в роботі [7].

Особливості процесу прокатки гарячекатаних безшовних труб на ТПА з пілігримовими станами

На рис. 1 наведена схема ТПА з пілігримовим станом 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тюб». ТПА 5–12” пущений в експлуатацію в грудні 1968 року по проекту Укргіпромеза і технологічному завданню ВНДТІ. Відмінною рисою агрегата є отримання гільзи за схемою, яка передбачає прошивання злитка в стакан на пресі з подальшим його підігрівом і розкаткою в гільзу з прошиванням донця стакана на косовалковому стані елонгаторі.

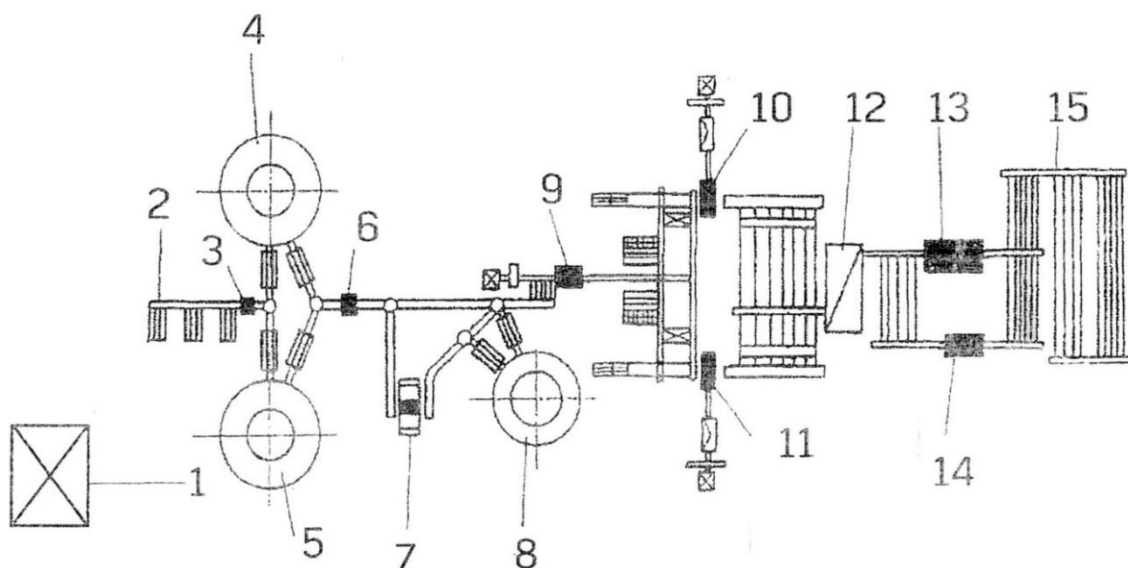


Рисунок 1 – Схема ТПА з пілігримовим станом 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тюб»:

- 1 – пила фірми «LINSINGER»; 2 – рольганг задавання заготовок;
- 3 – ваги; 4, 5, 8 – кільцева нагрівальна піч №1, №2 та №3;
- 6 – установка гідрозбивання окалини;
- 7 – прошивний горизонтальний гідравлічний прес зусиллям 20 МН ;
- 9 – косовалковий стан елонгатор; 10, 11 – пілігримові стани №1 та №2;
- 12 – підігрівальна піч з крокуючими балками; 13,
- 14 – дванадцяти- та п'ятикільцеві калібрувальні стани; 15 – холодильник труб

За останні роки на ТПА з пілігримовим станом 5–12” був встановлений п’ятиклітьовий калібрувальний стан і пила фірми «LINSINGER» (Австрія) для розрізання штанг БЛЗ на мірні довжини. В якості вихідної заготовки з 2011 року на ТПА 5–12” використовується кругла БЛЗ виробництва МЗ «Інтерпайп Сталь». На ТПА 5–12” постачаються штанги БЛЗ довжиною 6÷10 м і діаметром $\varnothing 380 \div 470$ мм. Гільзи можна отримувати за двома схемами: прямим прошиванням БЛЗ на косовалковому стані елонгаторі або за схемою прошивний прес – підігрівальна піч – стан елонгатор. Отримання чорнової труби здійснюється на одному з двох пілігримових станах з індивідуальним приводом, а чистової труби – на одному з двох калібрувальних станах дванадцяти- або п’ятиклітьовому.

На ТПА з пільгерстаном 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» у зв’язку з діючою технологічною схемою отримання гаряче катаних безшовних труб з круглої БЛЗ, яка надходить з МЗ «Інтерпайп Сталь» мають місце наступні втрати металу на ділянці гарячого прокату: втрати металу в стружку на пилі фірми «LINSINGER» при розрізанні штанг БЛЗ на мірні заготовки – 0,7%; втрати металу в угар і окалину на кільцевій нагрівальній печі – 1%; втрати металу в угар і окалину на кільцевій підігрівальній печі – 0,6%; втрати металу в окалину на стані-елонгаторі – 0,25%; втрати металу в повітряну окалину на вихідній стороні пілігримових станів – 0,6%; втрати металу в угар і окалину в підігрівальній печі з крокуючими балками – 0,2%; втрати металу в повітряну окалину на холодильнику труб – 0,2%.

Основні втрати металу на ділянці гарячого прокату мають місце на пільгерстані при видаленні в обрізь затрочочних кінців труб та пілігримових головок.

Загальні втрати металу в затравку і пільгерголовку складають 6-10% від ваги вихідної заготовки, при цьому на затравку приходить приблизно 25÷28%, а на пільгерголовку - 72÷75% від загальних втрат в технологічну обрізь.

Маються втрати металу і при термічній обробці і при холодній обробці труб (нарізання різьби на трубах нафтового сортаменту та ін.), котрі в даній статті не розглядаються.

Методи вдосконалення затравочного режиму пілігримової прокатки

Особливості затравочного режиму. У робочому циклі прокатки труб на пільгерстанах особливу роль відіграє початковий період (так звана «затравка»), який представляє собою несталый процес заповнення осередку деформації [8].

Затравочний режим має такі особливості: під час затравки пільгерстан не видає готову продукцію, а здійснює формування пільгерголівки на гільзі; за тривалістю затравка становить 5÷15% машинного часу пільгерування; відходи металу при обрізі затравочного кінця труби досягають 30% загального технологічного обрізу на пільгерстані; ускладнені умови захоплення гільзи валками, оскільки зустріч металу з валками відбувається перед лінією центрів; ударну дію гребня на метал обумовлюють підвищені динамічні навантаження в робочій лінії стана; відсутня (особливо в початковий період затравки) синхронізація роботи подавального апарата з обертанням робочих валків внаслідок змінної довжини відкату і недокантування гільзи; швидкісний режим прокатки обмежений умовами зчеплення гільзи з дорном і інерційними зусиллями в момент гальмування гільзи на дорні; величина подачі обмежена нерівністю деформації по периметру гільзи при відсутності жорсткого переднього кінця труби; підвищена різностінність на затравочному кінці і далі на деякій частині готової труби.

Таким чином, поліпшення умов затравки є важливим резервом у зниженні витрат металу, підвищенні продуктивності і поліпшенні техніко-економічних показників роботи пілігримових установок.

Шляхи вдосконалення затравочного режиму [9-11]. Серед яких: затравка з підйомом верхнього валка, який використовується для прокатки тонкостінних і особливотонкостінних труб; використання спеціальних кілець із вуглецевих марок сталей при прокатці труб з легованих і спеціальних марок сталі; прокатка гільзи в стик для прокатки товстостінних і особливотовстостінних труб; примусове кантування гільзи на 90° за рахунок застосування спеціального механізму кантування подавального апарата; синхронізація гільзи з валками пільгерстана при затравці, що потребує автоматизації процесу затравки; раціональний режим подачі при затравці для запобігання збільшення подачі; попередня підготовка передніх кінців гільз, що

дозволяє не тільки скоротити час затравки, а й знизити обрізь затравочного кінця труби; усунення зазору між гільзою і дорном на початку процесу затравки, знижує нерівномірність поперечної деформації і зменшує кінцеву обрізь.

Наявність зазору Δ між гільзою і дорном перед пілігримовою прокаткою погіршує умови прокатки в затравочному і сталому режимах, що збільшує витрату метала за рахунок зростання поперечної різностінності.

Раніше пропонувалося підготовка передніх кінців гільз за формою розгортки бойка пільгервалка і з товщиною підготовленого кінця гільзи на торці приблизно $0,5 \div 0,6$ товщини стінки гільзи [9], що потребує значних капітальних витрат (рис. 2, а).

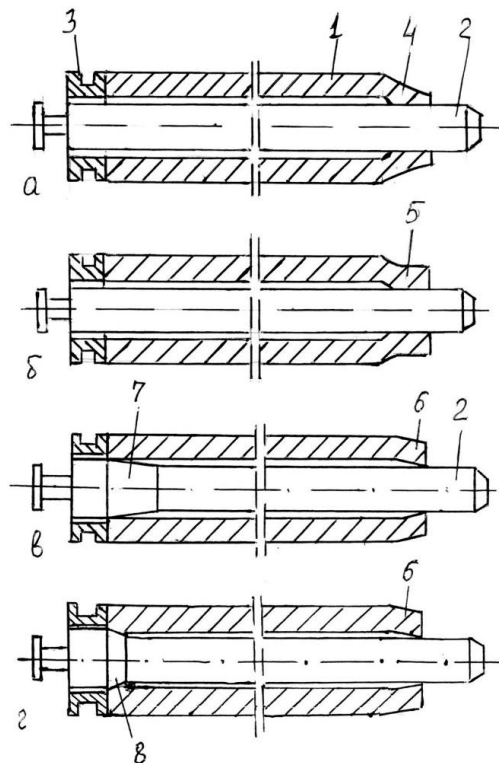


Рисунок 2 – Варіанти (а, б, в, г) підготовки гільз на дорні перед прокаткою на пілігримовому стані:

- 1 – гільза; 2 – дорн; 3 – дорнове кільце;
4, 5, 6 – форми підготовки передніх кінців гільз; 7 – конічний хвостовик;
8 – конічна ділянка дорна

Нове рішення передбачає редукування переднього кінця гільзи на дорні без обтискання по стінці, що знизить енергоємність цього процесу (рис. 2, б). При цьому забезпечується центрування переднього кінця гільзи на дорні. Форми передніх кінців гільз за цією технологією можуть мати наступний вид (рис. 2, б та рис. 2, в). Для центрування заднього кінця гільзи на дорні може бути використано рішення зі збільшеним діаметром хвостовика (рис. 2, в), що одночасно забезпечує зниження маси пільгерголовки, а також дорн з конічною ділянкою (пояском) згідно рис. 2, г. одночасне центрування переднього і заднього кінця гільзи на дорні перед пілігримовою прокаткою підвищує точність труб за рахунок зниження поперечної різностінності.

Методи зменшення пільгерголовки. Відомі напрямки зменшення втрат металу в пільгерголовку наведені в роботах [11, 12] та ін. проблема суттєвого зниження маси пільгерголовки повністю не вирішено до теперішнього часу, особливо для прокатки тонкостінних труб із відношенням $D/S = 12,5 \div 40$. Відомий ряд методів зниження маси пільгерголовки, котрі в даний час використовуються переважно при прокатці товстостінних труб з $D/S = 6 \div 12,5$. Проблема зменшення маси пільгерголовки при прокатці тонкостінних труб обумовлена особливостями існуючої технології прокатки і зняття розкату з дорна шибєрним пристроєм. На практиці в даний час застосовуються наступні методи:

Метод прокатки гільз встик (рис. 3) застосовується при прокатці товстостінних труб, що дозволяє повністю розкатати пільгерголовку і суттєво знизити обрізь;

Зменшення недокату пільгерголовки (рис. 4) використовується як при прокатці тонкостінних, так і товстостінних труб. На рис. 4, а наведена пільгерголовка 1 з недокатом, який зазвичай складає $50 \div 70$ мм, а на рис. 4, б – пільгерголовка без недоката, що знижує масу обрізі;

Спеціальне калібрування хвостовика дорна (рис. 5) знижує масу пільгерголовки, яка видаляється в обрізь за рахунок збільшення діаметру дорна під пільгерголовкою;

Спосіб розкатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна (рис. 6) застосовується при прокатці товстостінних труб і забезпечує повну розкатку пільгерголовки, що суттєво знижує витрату метала;

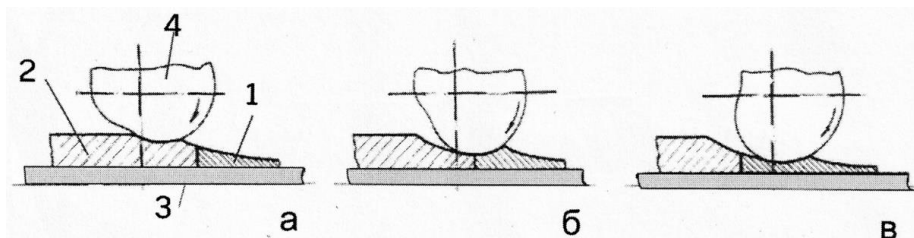


Рисунок 3 – Періоди (а, б, в) розкатки стика гільз:

1 – попередня гільза; 2 – наступна гільза; 3 – дорн; 4 – валок

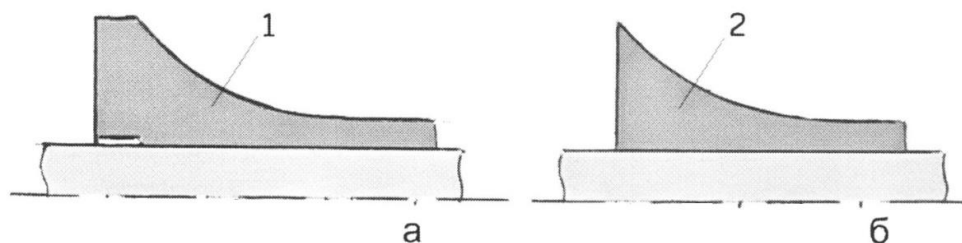


Рисунок 4 – пільгерголовка з недокатом 1 (а) і без недоката 2 (б)

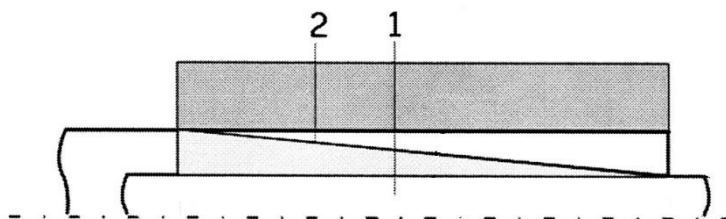


Рисунок 5 – Спеціальне калібрування хвостовика дорна:

1 – звичайний дорн; 2 – дорн з конічним хвостовиком

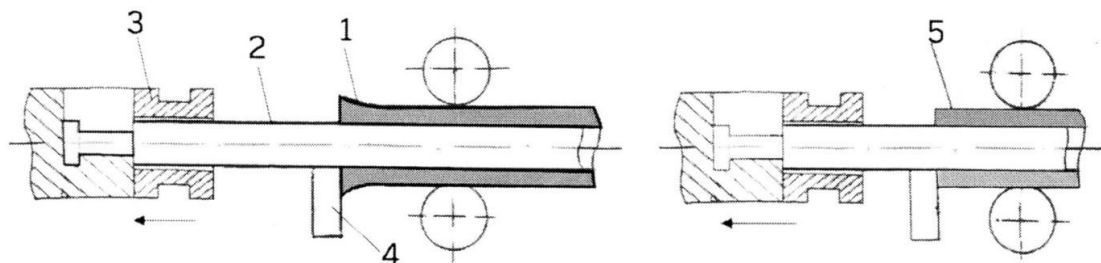


Рисунок 6 – Стадії (а, б) розкатки пільгергововки на вільній ділянці дорна:

1 – пільгерголовка; 2 – дорн; 3 – дорнове кільце; 4 – шибер;
5 – розкатана пільгерголовка

Встановлення вуглецевих кілець, котрі прилягають до заднього торця гільзи при прокатці труб з легованих і спеціальних сталей, що забезпечує економію легovanого металу.

В роботі [13] отримали свій подальший розвиток методи зниження маси пільгерголовки шляхом прокатки гільз встик, нових комбінованих методів і розкатки пільгерголовки на вільній ділянці дорна. Для отримання труб з товщиною стінки меншою 20 мм запропонована нова технологія часткової розкатки пільгерголовки, яка забезпечує зняття труби з дорна за допомогою подвійного шибера.

Одним з основних резервів зниження витрати металу при гарячій прокатці труб є їх виготовлення з середньою товщиною стінки близькою до прокатного номіналу або в полі мінусових допусків. Для регулювання товщини стінки труб в процесі прокатки необхідно встановлення приладів для заміру середньої товщини стінки і створення системи керування валками основного прокатного стану, який формує товщину стінки [14].

Зниження витрати металу є одним з основних напрямків зниження витрат при виробництві гарячекатаних труб. Зниження витрати металу може бути досягнуто як використанням технічних і технологічних рішень, так і шляхом організаційно-технічних заходів. Одним з напрямків удосконалення металовикористання є визначення форми постачання труб споживачу за вагою (фізичною або теоретичною).

Постачання труб за теоретичною масою спрямовано на економію металу у виробника за рахунок виготовлення труб в полі мінусових допусків. В цехах, де це неможливо організувати, необхідно застосувати форму здачі і постачання труб по фізичній (фактичній) масі, що дозволить виключити відвантаження частини несплаченої продукції. Як показали дослідження [15] на ТПА з пільгерстаном 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» прокатка майже всіх видів та розмірів труб бідбується в полі плюсових допусків (від 50% до 95% прокатаних труб).

Використання в цехі з ТПА 5–12” диференційної системи здачі і відвантаження труб показав, що для тонкостінних труб (до 10,5 мм) необхідно

використовувати в обліку фізичну масу, що дає значний економічний ефект, так як виключає відвантаження непроплаченої продукції.

Зменшення окалиноутворення при гарячій прокатці труб

В роботі [16] розглянуті питання зменшення окалиноутворення при гарячій прокатці. Технологія зменшення окалиноутворення на гарячій прокатці передбачає два способи прискореного охолодження виробів: 1 спосіб – охолодження водою на виході з чистового калібра, що рівноцінно зниженню температури кінця прокатки, при якій починається процес охолодження і окиснення виробу на повітрі; 2 спосіб – збільшення швидкості охолодження виробу на повітрі.

Прискорене охолодження прокату (труб) застосовується головним чином в лініях термічного оброблення труб зі спеціального або прокатного нагріву.

В окремих випадках застосовується прискорене охолодження прокату водоповітряною сумішшю, що подається за допомогою осьового спреєра. Інтенсивно розробляються способи термозміцнення для багатьох трубних станів, в тому числі для труб нафтового сортаменту та ін. Для охолодження труб застосовують різні охолоджуючі середовища і способи її подачі на зовнішню та внутрішню поверхні.

Особливості окислення труб полягає в тому, що товщина, структура і властивості окалини, яка утворюється на внутрішній та зовнішній поверхнях, різна. Внутрішня поверхня труб, як правило, вкрита більш щільним і менш пористим, ніж зовнішня поверхня, окисленим шаром. Важко видалити окислений шар з поверхні труб з низько та середньолегованих сталей, які проходять тривалу термічну обробку при високих температурах в пічах без захисної атмосфери. Шар при цьому може досягати товщини більше 1,0 мм.

Окалина, яка утворюється в процесі виробництва безшовних труб, окрім втрат металу ускладнює процес прокатки, і тому необхідно розробляти заходи по її видаленню. Наприклад, для очищення гільз від окалини в гарячому стані рекомендується здійснювати їх продувку сухим водяним паром. Для видалення окалини з зовнішньої поверхні гільзи, яка обертається під час прошивання, пропонується подавати за допомогою форсунок воду під високим тиском.

Одночасно в оправку з осьовими отворами крізь полий стрижень кріплення оправки також подають воду під тиском, стиснене повітря або пар, за допомогою яких видаляють окалину з внутрішньої поверхні труби, яка прокатується.

Після прошивання заготовки на прошивному стані та при проміжному підігріванні на її поверхні утворюється шар окалини, іноді товщиною до 1,0 мм. При подальшій прокатці на оправці вона закатується в стінку труби. Для того, щоб ця окалина легко видалялася, була крихкою, рекомендують стосовно автоматичного та пілігримового станів в гільзу, яка має температуру 850°C вдувати кисень, підігрітий до температури $425\div 550^{\circ}\text{C}$. Потім гільзи завантажують в підігрівальну піч з температурою 1150°C , де завдяки окислювальній дії кисню на внутрішній поверхні гільзи утворюється окалина, яка складається з магнетиту або гематиту, котра потім легко зламується при прокатці. З метою зменшення міцності зчеплення окалини з поверхнею труби і її кращого видалення зі стінок труби в гарячому стані продувають водоповітряною сумішшю безпосередньо в потоці ТПА.

На ряді підприємств окалину з внутрішньої поверхні гільз після прошивання видаляють поза станом за допомогою стисненого повітря або азоту з вдуванням в струмені газу порошкоподібного розкислювача, зазвичай на основі боратів (бура). Цей метод має ряд недоліків, в тому числі той, що окалина накопичується в порожнині гільзи за час її транспортування до розкатного стана. Нове рішення технологія «Incoat» полягає в суміщенні операцій прошивання і обробки внутрішньої порожнини гільзи розкислювачем, що фактично виключає її окислення. Нова технологія [17] полягає в подачі порошкоподібного розкислювача в потоці газу (азоту або повітря) по спеціальному каналу в стрижні для кріплення оправки, котрий нагнітається крізь 6-8 радіальних отворів, розташованих у оправки. Більш рівномірному розподіленню розкислювача сприяє обертання гільзи відносно стрижня оправки. Швидкість подачі розкислювача забезпечує утворення суцільного шару розплавленого порошку по всій довжині гільзи.

Регулювання окислювальних процесів в кінцевому підсумку стабілізує умови тертя, поліпшує якість поверхні продукції, зменшує знос прокатного інструмента, а іноді сприяє підвищенню продуктивності станів.

Безперервне підвищення вимог до якості гарячекатаних труб потребує подальшого розвитку технології виробництва, що неможливо без рішення проблеми зниження окислення металу в процесі виготовлення труб.

Висновки

1. Ресурсо- і енергозбереження наряду з екологічною безпекою є основним напрямком розвитку металургії в сучасних умовах.

2. Розглянуті основні напрямки економії металу при виробництві гарячекатаних безшовних труб. Зниження витрати металу є одним з основних напрямків зниження затрат при виробництві труб, так як доля вартості заданого металу за відрахуванням відходів складає від 50% до 85%.

3. Аналіз металовикористання при виробництві гарячекатаних труб на різних ТПА показав, що найбільші втрати металу мають місце на ТПА з пілігримовими станами за рахунок технологічної обрізі затравки та пільгерголови.

4. Розглянуті основні напрямки зниження втрат металу в затравку і пільгерголовку, при цьому найбільш ефективними є прокатка гільз в стик і розкатка пільгерголови на вільній ділянці дорна.

5. Одним з основних резервів зниження витрати металу при горячій прокатці труб є їх виготовлення з середньою товщиною стінки близькою до прокатного номіналу або в полі мінусових допусків. Крім того удосконалення металовикористання можна досягнути диференційним постачанням труб споживачу по масі (фізичною або теоретичною), що забезпечить економію металу у виробника труб або виключить відвантаження споживачам неоплаченої продукції.

6. Для центрування гільзи на дорні перед пілігримовою прокаткою запропоновані нові процеси підготовки передніх і задніх кінців гільз, що знижує поперечну різностінність труб і зменшує втрати металу.

7. Розглянуті питання зменшення окалиноутворення при гарячій прокатці труб шляхом прискореного охолодження виробів водою на виході з чистового калібра і збільшення швидкості охолодження на повітрі. При цьому прискорене охолодження прокату (труб) застосовується головним чином в лініях термічного оброблення труб зі спеціального або прокатного нагріву, а також в окремих випадках застосовується прискорене охолодження прокату водоповітряною сумішшю, що подається за допомогою осьового спреєра.

8. запобігання утворенню окалини на внутрішній поверхні гільзи при прошиванні на косовалковому стані і її транспортування до розкатного стану забезпечує підвищення якості труб і зниження втрат метала. Перспективною є нова технологія «Incoat», котра полягає в суміщенні прошивки і обробки внутрішньої порожнини гільзи розкислювачем, який подається крізь полий стрижень оправки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стасовський Ю.М., Чухліб В.Л., Бояркін В.В. Ресурсозбереження та екологія в процесах обробки металів тиском : підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2013. 353 с.
2. Современные тенденции развития трубного производства / Ю.Г.Гумев, Е.И.Шифрин и др. Теория и практика металлургии. 2009. № 4. С. 30-36.
3. Друян В.М., Чукмасов С.А., Гуляева И.Ю. повышение эксплуатационных характеристик стальных труб. Теория и практика металлургии. 2001. № 5. С. 32-40.
4. Гуляев Ю.Г., Друян В.М., Чукмасов С.А. Изготовление и использование стальных труб с покрытиями. Теория и практика металлургии. 2001. № 5. С. 40-48.
5. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надежности труб в осложненных условиях нефтегазодобычи. Сталь. 2013. № 9. С. 60-64.
6. Пинчук С.И. Чигринцев Е.Э. Новые антикоррозионные материалы, разработанные на основе ресурсосберегающих и экологических «зеленых» технологий. Теория и практика металлургии. 2012. № 3. С. 173-176.
7. Анализ путей уменьшения концевой обрезки при редуцировании с натяжением / Ю.Г.Гумев, И.А.Шапиро и др. Теория и практика металлургии. 2012. № 1-2. С. 45-48.
8. Угрюмов Ю.Д., Губинский А.В., Угрюмов Д.Ю. Совершенствование неустановившегося – затравочного режимы горячей пилигримовой прокатки труб. Сучасні проблеми металургії. 2005. Том 8. С. 477-481.
9. Балакин В.Ф., Угрюмов Ю.Д., Угрюмов Д.Ю. Методы подготовки передних концов гильз перед прокаткой труб. Теория и практика металлургии. 2012. № 1-2. С. 16-20.
10. Пути снижения расхода металла на пилигримовых трубопрокатных установках / Ю.Д.Угрюмов, П.В.Дрожжа и др. Сучасні проблеми металургії. 2008. Том 11. С. 216-222.
11. Пути уменьшения технологической обрезки на пилигримовом стане / С.Л.Стасевский, Ю.Д. Угрюмов и др. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2013. №43 (1016). С. 211-219.

12. Методы уменьшения массы пылгерголовки при горячей прокатке труб / Ю.Д.Угрюмов, В.Ф.Балакин и др. Черная металлургия : Бюллетень НТИ «Черметинформация». 2011. Вып. 10. С. 68-77.
13. Стасевський С.Л. Удосконалення ресурсозберігаючої технології на основі розвитку розрахунку параметрів виробництва гарячекатаних труб нафтогазового сотаменту : автореф. Дис. На здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.03.05. Кременчук, 2021. 21 с.
14. Пути снижения расходных коэффициентов металла при производстве горячедеформированных труб за счет управления точностью прокатки в цехах ОАО «НТЗ» / В.П.Сокуренько, Е.И.Шифрин и др. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2004. № 5. С. 55-60.
15. Совершенствование использования металла в цехах по производству бесшовных горячедеформированных труб / В.П.Сокуренько, Ю.А.Банник и др. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2008. № 6. С. 43-48.
16. Губинский В.И., Минаев А.И., Гончаров Ю.В. Уменьшение окисления при производстве проката. Київ : Техніка, 1981. 135 с.
17. Innovative solution for improvements in seamless tube production / T.Wagner, M.Toputh and others. AJS Tech proceedings. 2014. P. 2767-2774.

REFERENCES

1. Stasovskyi Yu.M., Chukhlib V.L., Boiarkin V.V. Resursozberezhennia ta ekolohiia v protsesakh obrobky metaliv tyskom : pidruchnyk. Dnipropetrovsk : Porohy, 2013. 353 s.
2. Sovremennye tendencii razvitiya trubnogo proizvodstva / Yu.G.Gumev, E.I.Shifrin i dr. Teoriya i praktika metallurgii. 2009. № 4. S. 30-36.
3. Druyan V.M., Chukmasov S.A., Gulyaeva I.Yu. povyshenie ekspluatatsionnykh harakteristik stalnykh trub. Teoriya i praktika metallurgii. 2001. № 5. S. 32-40.
4. Gulyaev Yu.G., Druyan V.M., Chukmasov S.A. Izgotovlenie i ispolzovanie stalnykh trub s pokrytiyami. Teoriya i praktika metallurgii. 2001. № 5. S. 40-48.
5. Effektivnoe pokrytie dlya povysheniya ekspluatatsionnoy nadezhnosti trub v oslozhnennykh usloviyakh neftegazodobychi. Stal. 2013. № 9. S. 60-64.
6. Pinchuk S.I. Chigrinec E.E. Novye antikorroziionnye materialy, razrabotannyye na osnove resursosberegayushih i ekologicheskikh «zelenykh» tehnologiy. Teoriya i praktika metallurgii. 2012. № 3. S. 173-176.
7. Analiz putei umensheniya koncevoj obrezi pri reducirovanii s natyazheniem / Yu.G.Gumev, I.A.Shapiro i dr. Teoriya i praktika metallurgii. 2012. № 1-2. S. 45-48.
8. Ugryumov Yu.D., Gubinskij A.V., Ugryumov D.Yu. Sovershenstvovanie neustanovivshegosya – zatravochnogo rezhimi goryachej piligrimovoy prokatki trub. Suchasni problemy metalurhii. 2005. Tom 8. S. 477-481.
9. Balakin V.F., Ugryumov Yu.D., Ugryumov D.Yu. Metody podgotovki perednih koncov gilz perez prokatkoj trub. Teoriya i praktika metallurgii. 2012. № 1-2. S. 16-20.
10. Puti snizheniya rashoda metalla na piligrimovykh truboprokatnykh ustanovkakh / Yu.D.Ugryumov, P.V.Drozhzha i dr. Suchasni problemy metalurhii. 2008. Tom 11. S. 216-222.
11. Puti umensheniya tehnologicheskoy obrezi na piligrimovom stane / S.L.Stasevskij, Yu.D. Ugryumov i dr. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu “KhPI”. Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh. 2013. №43 (1016). S. 211-219.
12. Metody umensheniya massy pylgergolovki pri goryachej prokatke trub / Yu.D.Ugryumov, V.F.Balakin i dr. Chernaya metallurgiya : Byulleten NTI «Chermetinformaciya». 2011. Vyp. 10. S. 68-77.

13. Stasevskiy S.L. Udoskonalennia resursozberehaiuchoi tekhnolohii na osnovi rozvytku rozrakhunku parametriv vyrobnytstva hariachekatanykh trub naftohazovoho sotamentu : avtoref. Dys. Na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : 05.03.05. Kremenchuk, 2021. 21 s.
14. Puti snizheniya rashodnykh koefficientov metalla pri proizvodstve goryachedeformirovannykh trub za schetupravleniya tochnostyu prokatki v cehah OAO «NTZ» / V.P.Sokurenko, E.I.Shifrin i dr. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2004. № 5. S. 55-60.
15. Sovershenstvovanie ispolzovaniya metalla v cehah po proizvodstvu besshovnykh goryachedeformirovannykh trub / V.P.Sokurenko, Yu.A.Bannik i dr. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2008. № 6. S. 43-48.
16. Gubinskij V.I., Minaev A.I., Goncharov Yu.V. Umenshenie okalinoobrazovaniya pri proizvodstve prokata. Kiyiv : Tehnika, 1981. 135 s.
17. Innovative solution for improvements in seamless tube production / T.Wagner, M.Toputh and others. AJS Tech proceedings. 2014. P. 2767-2774.

Received 13.04.2025.

Accepted 21.05.2025.

UDC 621.771:621.774:621.73

Mykhailo Hubynskiy, Yurii Uhriumov, Oleksii Gubinskyy,
Ihor Mazur, Dmytro Uhriumov

THE ISSUE OF REDUCING METAL CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF HOT-ROLLED PIPES

Abstract. *Resource and energy conservation, along with environmental safety, are the main historical areas of development for metallurgy in modern conditions.*

This article discusses the main areas of metal saving in the production of hot-rolled seamless pipes using various pipe rolling units, which have reached practical use. Reducing metal consumption is one of the main ways to reduce costs in pipe production, as the share of the cost of a given metal minus waste ranges from 50% to 85%. An increase in metal consumption is one of the main factors in reducing the company's competitiveness in the domestic and foreign markets.

An analysis of metal consumption in the production of hot-rolled seamless pipes at various pipe rolling units has shown that the largest technological metal losses occur at pilgrim mills due to metal cut-off at the pilgrim mill into the billet and pilgrim head. The main directions of reducing these losses are considered, and it is noted that the most effective are rolling the liner into the joint and rolling the pilgrim head on a free section of the mandrel.

One of the main reserves for reducing metal consumption during hot rolling is the manufacture of pipes with an average wall thickness close to the rolling nominal or within the field of negative tolerances. Reducing metal losses by improving pipe accuracy can be achieved by centring the liner on the mandrel before pilgrim rolling. To solve this problem, new processes for preparing the front and rear ends of the sleeves have been proposed.

The article considers the issues of reducing scale formation during hot rolling of pipes by accelerating the cooling of the product with water at the outlet of a clean gauge and increasing the cooling rate in air.

One of the new ways to prevent scale formation on the inner surface of the liner when it is pierced on a rolling mill is to supply deoxidiser through the hollow core of the mandrel directly during the piercing process.

The known and new technical solutions considered in this paper can be used in the development of metal-saving technology.

Keywords: *hot-rolled pipe, billet, liner, pilgrim mill, piercing beam mill, pickling, piercing head, scale formation, metal saving, technological cut, metal consumption factor.*

Губинський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-3770-4397. E-mail: gubinm58@gmail.com.

Угрюмов Юрій Дмитрович, кандидат технічних наук, провідний інженер, Український інститут по проектуванню металургійних заводів. E-mail: ugrumov1946@gmail.com.

Губінський Олексій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0004-3514-0377. E-mail: gubin@inbox.lt.

Мазур Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра галузевого машинобудування, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Угрюмов Дмитро Юрійович, технічний директор, ТОВ «Морська Сюрвейерська Компанія».

Hubynskiy Mykhailo, doctor of technical sciences, professor, department of energy systems and energy management, Ukrainian state university of science and technologies.

ORCID ID: 0000-0003-3770-4397. E-mail: gubinm58@gmail.com.

Uhriumov Yurii, candidate of technical sciences, senior engineer, Ukrainian institute for designing iron and steel works. E-mail: ugriumov1946@gmail.com.

Gubinskyy Oleksii, candidate of technical sciences, senior research fellow, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0009-0004-3514-0377. E-mail: gubin@inbox.lt.

Mazur Ihor, candidate of technical sciences, associate professor, department of industrial mechanical engineering, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Uhriumov Dmytro, technical director, LLC «Marine Survey Company». E-mail: ugriumov1946@gmail.com.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.17

UDC 519.8

Oleksandr Kuzenkov

ALGORITHMS AND METHODS IN DYNAMIC PROBLEMS OF OPTIMAL PLACEMENT OF FIRE GROUPS

Abstract. *The work is devoted to the urgent task of deploying fire groups of air defense forces to cover the lines of air attacks. To solve the problem, modern methods of the theory of optimal set partitioning, mathematical modeling using differential equations and their systems, a specialized software package has been developed, which includes a mobile and browser application, is used. When developing the software package, modern programming languages and technologies were used, an overview and comparison with existing solutions in different countries was made. A retrospective analysis was carried out, criteria for the optimality of the solution being sought were developed, advantages and disadvantages of the approach were determined.*

The use of methods of the theory of optimal set partitioning allows you to analytically determine the criteria for the quality of the solution, conduct an analytical study of admissible solutions and determine the optimal one, and approbation of analytical results in practice and examples with practical input data increases the accuracy and relevance of the results obtained analytically.

Nowadays, the issue of dynamic deployment of fire groups is very relevant for Ukraine. The decision to create and operate fire groups was made and implemented only from the beginning of the full-scale invasion of the aggressor country and became widely used during the massive use of attack drones by the aggressor country against civilian, military and energy facilities of Ukraine. The effectiveness of the use of fire groups has been proven in practice, but the method of their placement, as a rule, is heuristic, that is, not optimal.

Keywords: *optimal partitioning of sets, dynamic problem, fire group, air defense, software complex.*

Entry

Today, the issue of air defense for Ukraine is a matter of the existence of not only the energy system, but also the safety of civilians and the military. Numerous

air raid sirens, which are heard daily in different cities of Ukraine, have unfortunately become commonplace, and only the professional work of air defense servicemen and the aviation command allows you to fight numerous air targets that fly into Ukraine. It should be noted that for almost three years of war, the nature and means of air attack in Ukraine have undergone significant and fundamental changes. Thus, in 2022, attacks with X-101/555 cruise missiles were characteristic. At the end of 2022 and throughout 2023, ballistic missiles, Shahed 136 attack drones and Orlan-10 reconnaissance aircraft were added to the list of air targets. At the end of 2023 and throughout 2024, it was possible to observe a decrease in the number of missile attacks, but a significant increase in the shelling of the territory of Ukraine by attack drones and the use of reconnaissance drones for ballistic strikes by the enemy, on strategically important military and civilian targets. This situation required a prompt response and adaptation of means of detecting and destroying air targets. It should be noted that along with the adaptation of detection means, the means of destruction have also undergone significant changes. In particular, this is due to the lower cost of Shahed-136 attack UAVs compared to surface-to-air missiles typical for the Armed Forces of Ukraine. It is for these reasons that mobile fire groups were used to destroy air targets from small arms of various calibers, as well as detection means other than typical radars.

Subject statement of the problem

Due to the limitations in the use of standard means of detecting air targets and the low altitude of their route, it was decided to develop mobile applications with the help of which, including the civilian population, could promptly notify the air defense forces about the flight of an enemy aircraft, missile, drone, etc. Taking into account the fact that the efficiency of informing in this matter plays an important role, the interface of the program for users is simplified as much as possible (Fig. 1-b). Fig. 1. Here are some examples of software applications used for notifications.

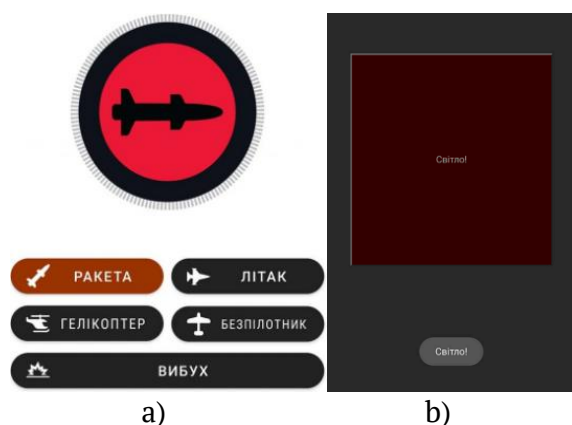


Figure 1 - Graphical interface of warning systems
(a – EPPO appendix, b – alternative notification system "Light").

Figure 1(a) shows the software developed by Odesa programmers, which is widely used on the territory of Ukraine and is designed to inform air defense forces about enemy air targets and their location. The peculiarity of this application is that the user can specify the type of air target if he is informed, and in new versions of the application, specify "UFO" if the type of air target could not be established.

Fig. 1(b) shows the alternative notification system "Light", which was developed and operated in the Dnipropetrovsk region from March 2022 to January 2023 (before the introduction of the EPPO annex throughout Ukraine) and is partially used today. The simplicity and confidentiality of the interface of the alternative warning system was explained by its use at the very beginning of the full-scale invasion, because the owners of this application sometimes had to overcome enemy checkpoints, and their phones could be searched.

As a result of the practical application of the alternative warning system "Light", a significant amount of information was obtained, which was used as a training sample for further improvement of the software package. It should be noted that at the stage when quantitative missile attacks were replaced by numerous attacks by attack drones, and the means of destroying air targets were replenished with mobile fire groups, a number of problems objectively arose that required thorough mathematical, as well as in some cases optimal solutions.

Mathematical statement of the problem

For a rectangular area Ω with perimeter $P=2 \cdot a \cdot b$ (where a - Width of a rectangular area, b - its length) along which an indefinite and unlimited number of enemy air targets can move by air, i.e. without reference to roads, it is necessary to find the following N points

$$(x_i, y_i), i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

for which

$$\sum_{i=1}^{\infty} T_i \cdot f(z_i, p_i) \rightarrow \max, \quad (2)$$

where

$$f(z_i, p_i) = \begin{cases} 1, & \text{if } (z_i, p_i) \in \bigcup_{k=1}^N g_k(x_k, y_k), \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

$g_k(x_k, y_k)$ - circle centered at a point (x_k, y_k) and radius R ,

$$T_i = \frac{t_i}{t_{cur} - t_i}, \quad (4)$$

t_i - date/time of the first crossing (entry) i -th enemy air target in the region Ω ,

t_{cur} - current date/time,

N - Total number of mobile fire groups,

R - range of mobile fire groups.

The need to reduce the problem to the optimization problem is due to the fact that in most cases $\bigcup_{k=1}^N g_k(x_k, y_k)$ do not cover the entire territory of the specified region and even its perimeter.

Overview of existing solutions

Nowadays, there are many programs designed to notify civilians and the military about emergencies, but the features of each of them are focused on a specific place of application, and in the case of military use, focused on the peculiarities of war. Among the best examples of similar systems, the following should be highlighted:

1. WireX Alert System is an integrated alert system designed to address the diverse needs of users. The system supports various forms of notification, including SMS, email, and instant messaging. It is characterized by flexibility in setting priorities and configuring communication channels. The advantages include flexible configuration of alert channels and integration with various sources of information. Among the disadvantages is the limited set of built-in message templates.

2. AlertHub Pro is an operational alert system defined by its ability to combine alerts from different sources into a single interface. It is an integrated solution that allows users to receive and manage messages in real-time, as well as interact with other users through comments and discussions.

3. SafeAlert Plus is a security and alert system specially designed for organizations and enterprises. It provides extensive options for customizing user groups, access levels and events to be notified. The system can integrate with third-party security systems. The advantages include a high degree of customization and flexibility in configuration, as well as the ability to integrate with various security systems. Among the disadvantages, high implementation and support costs should be highlighted.

4. EverSafe Notifications is an alert system that stands out for its ability to provide reliable alerts through a variety of channels, including voice calls, instant messaging, and social media. The system is specifically targeted to the needs of groups with different needs, such as medical institutions and educational institutions. The advantages include a wide range of possible notification channels and adaptability for different types of users. Among the disadvantages is the rather limited function of personalizing messages.

5. NotiSync Enterprise Alerting is an alert system that uses intelligent algorithms to detect and notify about events in real time. The system provides

automatic signal processing and a high level of adaptation to changing conditions. This makes NotiSync an effective solution for large enterprises and dynamic environments. Among its advantages are intelligent event detection algorithms and automatic adaptation to changing conditions. Among the disadvantages is the high cost of implementation and support.

6. NotifyMe360 is an alert system that focuses on the user experience. It allows users to confirm receipt of messages, send feedback, and quickly respond to crisis situations. The advantages include the presence of a mechanism for acknowledging the receipt of messages and real-time interaction with the user. A separate disadvantage is the limited ability to integrate with other systems.

7. Alertify Pro Suite is a comprehensive solution that combines not only an alert system, but also analysis and reporting tools. The system allows you to create dynamic alerts using various media formats and provides advanced tools for analyzing the effectiveness of campaigns. Among the advantages, it is necessary to highlight the wide possibilities for integration with analysis and reporting tools, as well as flexibility in creating dynamic alerts, and among the disadvantages is the high complexity of configuration for beginners.

8. SafeGuard Alert Management is an alert system that contains an advanced set of tools for managing alerts in crisis situations. The system includes automated processes to respond to different types of events and facilitates the rapid deployment of campaigns in emergency situations. Among the advantages are the implementation of automated processes for responding to various types of events and ensuring effective crisis management. Among the disadvantages are limited options for individual settings.

9. The RapidNotify Emergency Alert System is an emergency alert system specifically designed to serve large groups of people. It is distinguished by a high speed of sending messages and the ability to flexibly configure audience selection criteria. Among the advantages are the high speed of sending messages and the ability to flexibly customize the audience. Among the disadvantages is the unreasonably high cost of maintenance for small organizations.

10. OnSolve MIR3 is an integrated solution for crisis management and real-time alerting. The system includes a wide range of emergency response tools,

including integration with security systems. Among the advantages are the availability of integrated crisis management tools and the support of integration with various security systems. Among the shortcomings, it is necessary to highlight the high qualification of personnel for setting up and effective use of the system.

In the course of reviewing various public address systems, it can be determined that there are a significant number of solutions aimed at ensuring effective information of users in a wide variety of scenarios. Each of the defined systems has its own characteristics and advantages, which are important to consider when choosing a solution for a particular case.

The mathematical solution of the problem will be carried out with the involvement of the mathematical apparatus of the theory of optimal set partitioning [1]-[2], mathematical modeling using differential equations and their systems [3]-[4], a number of numerical methods and retrospective analysis [5].

Choosing a platform for implementation

Nowadays, the implementation of warning systems can be implemented, as a rule, on the basis of mobile devices (smartphones, tablets) or in web applications.

Development of a software package for mobile platforms

- designed for specific operating systems such as Android or iOS;
- designed specifically for mobile devices, their extensions and operating and file system specifications;
- can work offline;
- high-speed in working out compared to web applications;
- require permits for posting on trading platforms;
- the cost of development is higher than that of web applications;
- are developed using programming languages such as React Native, Dart, Swift, Kotlin.

The development of a software package in the form of a web application also has its advantages and disadvantages, namely:

- designed for browser access, but can also be used by mobile devices
- do not have access to hardware specifications
- require constant access to the Internet

- slower than mobile apps
- does not require permissions for distribution
- the cost of development is lower than that of mobile applications;
- are developed using programming languages such as: Python, JS, TS, PHP.

Implementation of the software application

The developed software package includes:

- Database
- server part
- client part (mobile application)
- client part (web application)

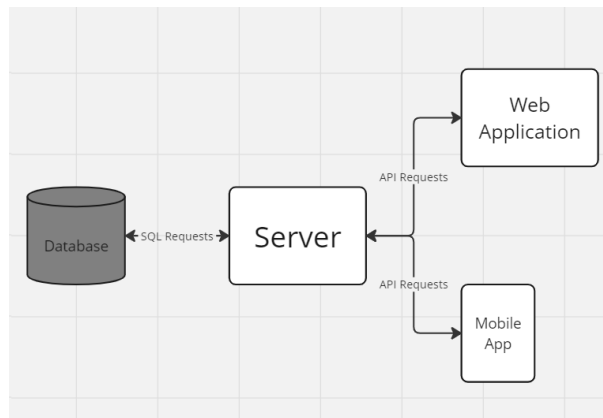


Figure 2 - Structure of the software package

The database was created on top of PostgreSQL, which made it possible to quickly and efficiently create tables and relationships between them. Fig. 2 shows the general structure of the software package, and Fig. 3 shows the structure of the database and the relationships between the tables:

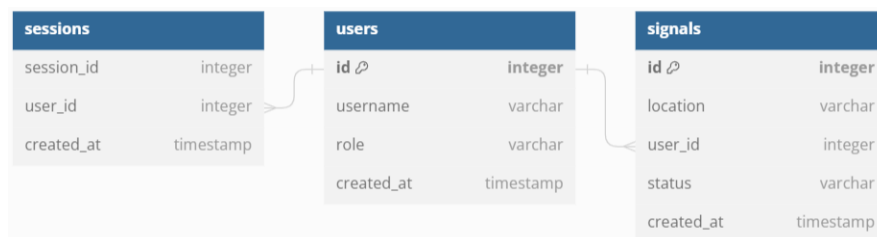


Figure 3 - Database diagram of the software package

This database schema has three main tables, one of which is users, having two roles: operator and user. The signals table stores information about the locations recorded by users and the time of receipt of the message. The session table allows you to keep track of when and which user logged in.

The server part was implemented using Nest.js technology, which is an add-on on top of the Node.js library. The main functional integrations of the backend are:

- authentication and authorization;
- interaction with the mobile application through obtaining locations, their analysis and subsequent storage in the database;
- control of database queries;
- sending locations to the web application, where they can be observed by the operator.

The client part of the mobile application was implemented using React Native technology and the main task of this part of the software is to inform the server part about the appearance of air targets in the visibility of the user of the mobile device.

Results of the program

The operator part of the web application is available only after user authorization and is used by the operator of air defense systems. Two main functional components are implemented in the operational part of the software package. Data is a map that will later display the locations in which users have recorded air targets. People – a map that displays all users of the software package (to understand on which boundaries of the territory users are placed). Fig. 4 shows the interface of the operator chat of the software package.

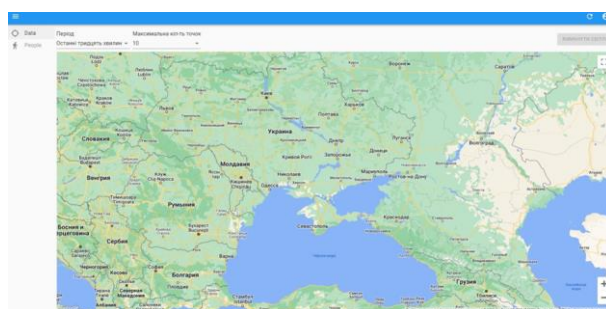


Figure 4 - Interface of the operator part of the software package

Fig. 5 shows the operator's software interface for tracking the number of users involved in the operation of the alternative warning system. We emphasize that the information in Fig. 5 has been changed and does not reflect the real picture. The authors do not have reliable information, so the image in Fig. 5 is a model and reflects only the principles of operation of the corresponding program interface. The number indicated in the black circle reflects the number of users, with a decrease in the scale of the map and significant discrepancies in the location of users, the circles are divided and at a minimum scale become separate with a value of 1 indicated on them.

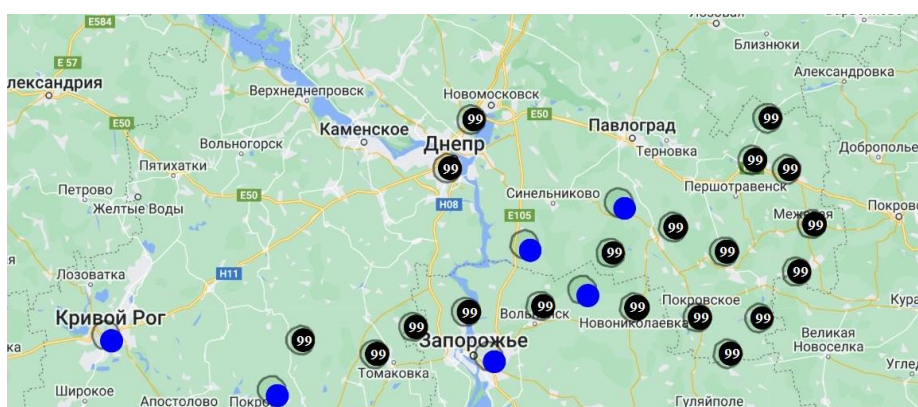


Figure 5 - Interface of the "People" tab of the operator part of the software package

Among the settings of the operator part of the software package, there are filters by the time period of displaying labels about the transferred locations (you can choose one of the options - the last thirty minutes, the last 3 hours, the last day) and a filter by the maximum number of points on the map (10, 25, 50 and 100), which allows you to work with different time periods and the number of observation points. The "Turn off the light" function is also implemented, which allows you to remove all points from the map. Such a functional component is used in massive shelling, when wave after wave reports are received about air targets in the same locations. Fig. 6 shows an example of three users informing the operator about the flight of an air target at different times.

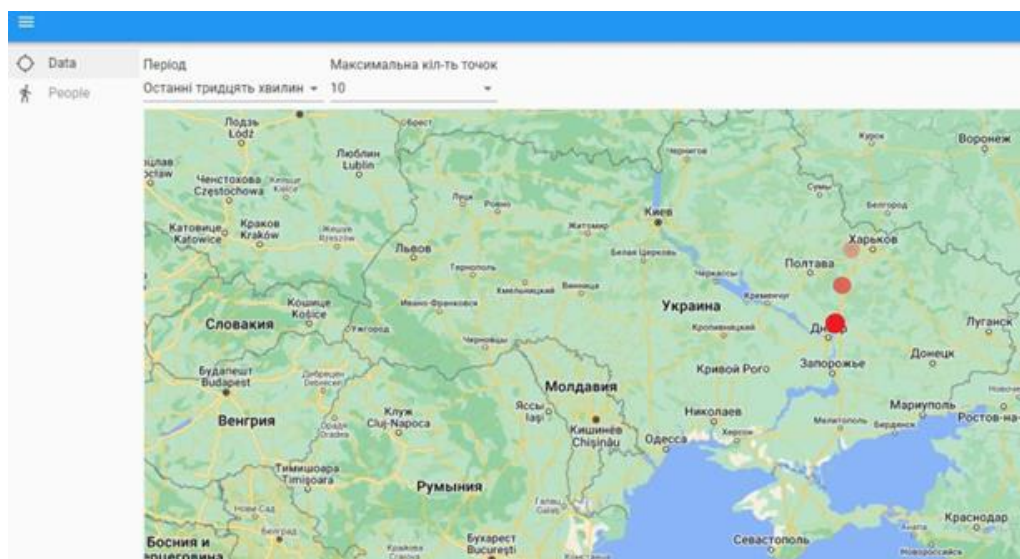


Figure 6 - Illustration of informing in the operator part of the software package

By changing the color intensity of the display of the locations of fixing air targets, the operator can understand the direction of flight of the missile, because the newest points will have a higher color intensity.

Since the map can be scaled, it is possible to display different territories, namely the entire country, region and even city (with lower-speed targets such as UAVs). Fig.7. an example of displaying a moving target within the city of Kamianske is given.

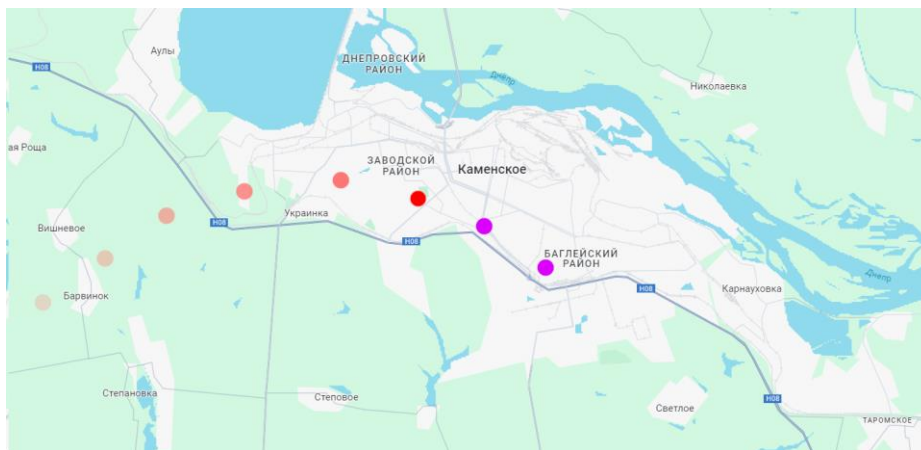


Figure 7 – Visualization of the trajectory of a moving air target within the city of Kamianske.

Solving the problem of optimal placement of fire groups

The paper calculates six examples of solving problems of optimal placement of fire groups in the formulation of the problem described in this work earlier. As initial conditions (training sample). Table 1 presents data calculated for nine different time periods and a different number of mobile groups. We would like to emphasize that the number of fire groups is chosen at random and cannot be considered as reliable information, such information is secret and is not known to the authors.

It should be noted that numerical calculations were obtained on the example of the Dnipropetrovsk region, because it was for it that the largest amount of information about air targets and their routes was previously collected. The range of mobile groups is $R=5$ km, the region is chosen in the form of a rectangle, which fully accommodates the Dnipropetrovsk region, the sides of the rectangle touch its northern, southern, western and eastern extreme points, including parts of adjacent regions. Due to the large amount of information about air targets that were taken into account in each task (more than 20), such information in the table will be presented in the format X:YYY:ZZ. Where X – takes the value "N", "S", "E", "W" if the air target entered the specified area from the north, south, west and east, respectively. YYY the displacement of the entry point (the distance is indicated in kilometers) at the corresponding border (for the western and eastern directions of entry, the coordinates increase upwards, for the northern and southern directions of entry, the coordinates increase to the right), ZZZ is a degree measure of the angle of the direction of movement of the air target at the moment of entering the area, where 0° is up, 90° is left, 180° is right, 270° is down according to the principle of a "single circle".

Table 1

Results of the numerical solution of the problem (1)-(4) for the territory of the
Dnipropetrovsk region

(yy/mm/dd - hh:mm)	Num. of mobile fire gr-ps	Characteristics of aerial targets	Junctions
22/10/04-12:04	6	S:53:112 N:63:209 E:32:-13 E:113:-85 S:24:141 N:89:304 N:110:224 E:10:-18 S:115:163 W:84:219 E:190:44 E:163:-76 N:13:207 N:36:230 E:111:24	(170;115), (196;187), (120;67), (113;25), (293;27), (90;46)
22/11/18-08:01	5	N:146:353 N:135:193 E:144:36 S:141:75 W:184:136 S:93:28 W:85:268 E:65:-63 W:79:150 N:110:213 W:0:101 W:0:185 N:45:352 S:108:41	(122;158), (97;21), (195;162), (180;191), (272;52)
22/12/16-14:12	8	W:9:122 W:11:217 W:56:127 N:124:305 N:95:335 E:58:-79 E:10:-75 N:145:223 N:138:259 S:100:118 E:133:47 W:198:138 N:138:327 W:159:245 S:28:34 S:9:14 S:10:121 W:175:260	(196;27), (40;175), (42;44), (108;77), (174;121), (174;106), (217;173), (89;111),
23/05/12-03:12	6	W:102:233 S:53:131 W:167:96 E:174:10 S:30:36 W:161:182 N:143:241 S:38:114 E:51:-8 E:196:85 N:3:254 W:18:26 W:153:111 S:119:134 N:133:352	(103;2), (99;189), (242;29), (37;197), (43;130), (189;34)
23/06/21-23:05	6	W:92:129 W:6:168 S:115:10 N:128:184 N:71:223 N:50:214 S:54:151 S:26:74 S:50:166 N:132:181 W:82:142 S:20:72 W:17:142 E:169:52 S:11:99	(185;47), (187;105), (90;35), (277;90), (62;165), (268;54)
23/08/03-16:13	4	S:58:34 E:3:32 W:179:257 S:47:128 S:80:110 N:117:315 E:36:17 S:92:70 W:129:198 E:65:69 E:43:13 E:142:-82 N:17:331 S:72:100 N:107:256	(149;152), (204;147), (145;199), (163;113)
24/01/08-18:00	6	S:110:81 E:94:-20 E:59:-67 E:139:77 S:43:153 S:42:164 N:39:322 E:199:72 E:167:-14 E:147:29 W:160:229 N:50:356 S:48:142 E:47:51 N:13:221	(9;153), (231;14), (82;168), (160;198), (125;155), (171;54)
24/03/14-16:42	4	S:127:142 S:46:51 W:180:184 W:88:197 W:1:100 N:18:183 W:171:176 W:46:132 S:77:40 E:138:82 N:78:238 S:124:33 S:29:172 W:14:195 N:86:244	(165;122), (222;160), (146;114), (118;11)
24/08/20-10:19	6	E:111:24 S:11:99 S:109:36 E:101:-4 W:46:254 E:58:71 N:138:352 E:121:-60 W:133:105 W:189:129 E:103:49 N:146:329 S:55:83 S:72:153	(277;182), (217;64), (80;143), (62;133), (289;104), (154;40)

Analysis of the results obtained

Table 1 shows the results of numerical calculations of the problem (1)-(4) with different input data. As we can see, the calculated location of mobile fire groups with their different numbers and different characteristics of air targets has a fairly uniform structure, but differs from the uniform distribution precisely due to taking into account the information about the direction and trajectory of air targets, which are taken into account in the calculation. We would like to emphasize that the number of air targets used in the calculations is not limited and can/should differ significantly from the model ones upwards. Therefore, the results of numerical experiments can be considered reliable, and the model can be taken as a basis for the development of recommendations for the location of mobile fire groups.

Conclusions

The paper formulates and solves the problem of optimal placement of mobile fire groups and develops a mathematical model of the alternative warning system "Light", which was successfully used in the Dnipropetrovsk region from March 2022 to January 2023. A software package with a user and operator part was implemented, a database and a management system were developed. The solved task takes into account information about enemy air targets that were recorded by the alternative warning system "Light" and forms recommendations regarding the location of a given number of mobile fire groups.

Taking into account the substantive applied part of the development and the clearly defined interpretation of the parameters of the model and the system, we see further directions of research in this direction, in particular:

- solving a modified problem with restrictions on repeating configurations for the placement of mobile fire groups;
- solving a modified problem using various metrics, in particular with reference to the roads of the region under study;

development of a software package for visualizing solutions to the problem with the possibility of using an algorithm in the presence of external control of the operator.

REFERENCES

1. Lechowicz P., Koszalka L., Pozniak-Koszalka I., Kasprzak A. Path optimization in 3D printer: Algorithms and experimentation system, 2016
2. Ma Z., Wan W., Song L., Liu C., Liu H., Wu Y. An Approach of Path Optimization Algorithm for 3D Concrete Printing Based on Graph Theory, 2022
3. Fok K.-Y., Cheng C.-T., Ganganath N., Ho-Ching Iu H., K. Tse C. An ACO-Based Tool-Path Optimizer for 3-D Printing Applications, 2016
4. Dreifus G., Goodrick K., Giles S., Patel M., Foster R. M., Williams C., Lindahl J., Post B., Roschli A., Love L., Kunc V. Path Optimization Along Lattices in Additive Manufacturing Using the Chinese Postman Problem, 2017
5. Iori M., Novellani S. Optimizing the Nozzle Path in the 3D Printing Process, 2020
6. Fok KY., Cheng CT., Ganganath N., Iu HHC., Chi KT. Accelerating 3D Printing Process Using an Extended Ant Colony Optimization Algorithm, 2018
7. Cheong KJ., Path Optimization For Cooperative Multi-Head 3d Printing, 2020
8. Kiselova, O.M. Stanovlennia ta rozvytok teorii optymalnoho rozbytta mnozhyn. Teoretychni i praktychni zastosuvannia: monohrafiia. Dnipro: Lira, 2018. 532 s. [Ukrainian]

Received 17.04.2025.

Accepted 15.05.2025.

УДК 519.8

О.О. Кузенков

АЛГОРИТМИ ТА МЕТОДИ В ДИНАМІЧНИХ ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗМІЩЕННЯ ВОГНЕВИХ ГРУП

Анотація. Робота присвячена розв'язанню актуальної задачі розгортання вогневих угруповань сил ППО для прикриття рубежів повітряного нападу. Для вирішення поставленої задачі використовуються сучасні методи теорії оптимального розбиття множин, математичного моделювання з використанням диференціальних рівнянь та їх систем, розроблено спеціалізований програмний пакет, що включає мобільний та браузерний додаток. При розробці програмного комплексу використовувалися сучасні мови та технології програмування, проводився огляд та порівняння з існуючими рішеннями в різних країнах. Проведено ретроспективний аналіз, розроблено критерії оптимальності шуканого рішення, визначено переваги та недоліки підходу.

Використання методів теорії оптимального розбиття множин дозволяє аналітично визначати критерії якості розв'язку, проводити аналітичне дослідження допустимих розв'язків та оцінити оптимальність рішення, а апробація аналітичних результатів на практиці та прикладах з реальними

вхідними даними підвищує точність та релевантність результатів, отриманих аналітично.

На сьогодні питання динамічного розгортання вогневих груп є дуже актуальним для України. Рішення про створення та функціонування вогневих груп було прийнято та реалізовано лише з початку повномасштабного вторгнення країни-агресора та набуло широкого застосування під час масованого застосування країною-агресором ударних безпілотників проти цивільних, військових та енергетичних об'єктів України. Ефективність використання вогневих груп доведена практикою, але спосіб їх розміщення, як правило, є евристичним, тобто не оптимальним.

Ключові слова: оптимальне розбиття множин, динамічна задача, вогнева група, ППО, програмний комплекс.

Oleksandr O. Kuzenkov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics, Faculty of Applied Mathematics and Information Technologies, Dnipro National University named after Oles Honchar, 72 Nauky Avenue, Dnipro, 49000, Ukraine. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6378-7993>, kuzenkov1986@gmail.com, Scopus Author ID: 56154949000

Кузенков Олександр Олександрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики, факультету прикладної математики та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, 72 проспект Науки, Дніпро, 49000, Україна.

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.18

UDC 620.91

Viktor Kovalenko, Kostiantyn Rybka, Yevhen Nikitin, Oleksandr Koliadenko,
Volodymyr Bashko, Vladyslav Kopysov, Viacheslav Pilipenko

CALCULATION OF THE OPTIMAL HYDROPOWER UTILIZATION SYSTEM: A CASE STUDY OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Abstract. *Objective. This research is dedicated to the development, modeling, and optimization of a hydropower recovery system based on the reuse of secondary water resources within an industrial enterprise. The specific focus is on the graphitization workshop of PJSC "Ukrainian Graphite"—a metallurgical facility where substantial volumes of warm process water are discharged as a byproduct of production. The central objective of this study is to determine the optimal configuration of a water collection and energy conversion system that will enable efficient electricity generation at the lowest possible cost, while maintaining high energy performance. The task is conducted under the influence of strict technical and spatial constraints inherent to existing industrial infrastructure.*

Methodology. The study applies a set of engineering, mathematical, and economic methods. Hydraulic analysis is used to model water flow through both pressurized and gravity-fed pipelines, ensuring accurate determination of head losses and flow rates. A combinatorial optimization framework is employed to evaluate various topologies of system configurations, where water sources are matched with potential collection centers in the most effective way. A key feature of the methodology is the use of signature functions—a mathematical tool designed to define “prohibited zones” where placement of system elements is physically or operationally impossible due to safety, accessibility, or layout restrictions. These functions are integrated into the optimization model, enhancing the realism and applicability of the results. Additionally, a comprehensive techno-economic assessment is performed for each configuration, including calculations of capital expenditures, equipment cost, pipeline expenses, operational costs, and unit electricity production cost (LCOE).

Results. The modeling process revealed that the most economically and technically viable system involves a single collection center—Center No. 2—into which water flows from four

© Kovalenko Viktor, Rybka Kostiantyn, Nikitin Yevhen, Koliadenko Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Pilipenko Viacheslav

main technological sources: електрокальцинатори (electric calciners), барабани-охолоджувачі (cooling drums), формувальна машина (molding machine), and підшипники димососів (smoke exhauster bearings). These flows are collected via a pipeline network with a total length of approximately 200 meters. The selected micro-hydropower plant (type 10Пр) is of a modular design and includes a діагональна турбіна (diagonal turbine). According to the calculations, this system is capable of generating over 135,000 kWh of electricity annually. The levelized cost of electricity (LCOE) is just US\$0.30 per kWh, which is substantially lower than the applicable industrial electricity tariff in Ukraine. The total capital investment, including the cost of the micro-HPP unit, pipelines, installation, and commissioning works, is approximately US\$168,800. Maintenance costs are estimated at 5% of capital expenditures annually.

Scientific novelty. The study introduces a new integrated methodology for assessing and designing hydropower recovery systems (HERS) at the local (workshop or facility) level, which takes into account technical parameters, hydraulic behavior, and spatial limitations. For the first time, the concept of signature functions is applied in this context to simulate constrained zones in system layout planning. This approach provides a flexible yet accurate mechanism for system designers to preclude impractical configurations early in the modeling phase, thereby saving resources and improving the efficiency of decision-making.

Practical significance. The developed methodology and the results obtained offer a practical solution for the sustainable use of internal water resources in energy-intensive industries. By implementing optimized HERS configurations, industrial enterprises can reduce dependence on external electricity supplies, enhance operational energy efficiency, and decrease total electricity costs. The approach also contributes to improved environmental performance by reducing heat discharge and enhancing water recycling. Furthermore, the proposed system architecture is modular and adaptable, allowing for scaling and replication in other industrial enterprises with similar infrastructure. This makes it especially relevant in the context of global trends toward decarbonization, resource efficiency, and green transformation of heavy industry.

Keywords: hydropower recovery, secondary water resources, metallurgical enterprise, energy efficiency, micro-hydropower plant, hydraulic calculation, techno-economic assessment, optimization, signature function, collection center, water-energy nexus.

Introduction

In the context of global challenges related to energy security, resource conservation, and the transition to a sustainable development model, there is an increasing demand for the rational use of all available energy sources, particularly secondary resources. One of the most promising areas in this field is hydropower utilization - the process of converting the potential of industrial technical water into useful electrical energy. This approach is especially relevant for energy-intensive industries such as metallurgy, where the volumes of circulating technical water are substantial, and its physical characteristics allow for the extraction of additional energy without relying on external sources.

According to research findings [1], the volume of technical water at metallurgical enterprises in the Zaporizhzhia region that can potentially be used as a hydropower resource amounts to approximately 66% of total water consumption. The cumulative flow power exceeds 1.0 MW, which is comparable to the capacity of small hydroelectric power plants installed on minor rivers. Utilization of this resource could generate up to 10 million kWh of electricity annually. Based on industrial electricity tariffs, this translates into annual savings of around US\$9.24 million. These figures highlight not only the energy potential but also the economic feasibility of incorporating hydropower into the internal energy supply of an enterprise.

Unfortunately, despite the significant potential, most industrial enterprises do not exploit the possibility of converting secondary water flows into electricity due to a lack of adapted technical solutions, efficiency assessment models, and established engineering methodologies. The challenges include uncertainty in system configuration parameters (placement of collection centers, pipeline routing), lack of consideration for specific operating conditions (restricted zones, technological constraints), and underdeveloped methods for calculating the hydraulic and energy characteristics of the system.

In the current era of technological advancement, where advanced digital modeling tools, mathematical analysis, and engineering visualization are readily available, there is a pressing need to integrate these instruments into the design process of utilization systems. Particularly relevant is the use of combinatorial

optimization, algorithms for evaluating pipeline topology, and spatial modeling methods employing signature functions to define equipment placement constraints. This approach enables not only technically feasible system design but also the identification of the most economically viable options.

Moreover, the utilization of secondary hydropower resources offers a range of additional benefits:

- reduction of the load on the general power supply system of the enterprise;
- decreased reliance on expensive external energy sources;
- increased energy autonomy of production processes;
- improved ecological balance through reduced thermal losses in wastewater;
- lower greenhouse gas emissions due to the shift toward renewable energy.

Therefore, the implementation of hydropower utilization systems at metallurgical enterprises is not only an economically justified solution but also a step toward sustainable development, aligned with both national and global "green" transformation trends.

In this context, the aim of the present study is to calculate the optimal system for utilizing secondary hydropower resources at a metallurgical enterprise, using the graphitization shop of PJSC "Ukrainian Graphite" as a case study. The work involves a comprehensive examination of configuration and hydraulic parameters, as well as the economic justification of system variants, to determine the most efficient techno-economic solution for practical implementation.

Problem Statement. The aim of this study is to calculate the optimal system for the utilization of secondary hydropower resources at a metallurgical enterprise, using the graphitization shop of PJSC "Ukrainian Graphite" as a case study.

Main Research Section. At the selected industrial facilities, significant volumes of technical water are available. After being used in production processes, these water flows are discharged by gravity to lower levels. The elevation differences between these levels can reach several tens of meters, and even with relatively low water flow rates, the calculated hydropower potential proves to be considerable [2].

For more precise and objective analysis, it is advisable not to treat the enterprise as a monolithic unit but rather to disaggregate it into its structural components—namely, individual workshops or production sections. This modular

approach allows for a more detailed and localized assessment of the technical and hydraulic parameters relevant to each unit, taking into account their unique configurations, equipment layouts, and specific water usage profiles.

By conducting detailed evaluations of each individual workshop within an industrial facility, it becomes feasible to uncover and analyze localized sources of secondary water flows—those generated as a byproduct of various technological processes such as cooling, washing, and heat exchange. Each of these sources can be characterized in terms of its flow rate, temporal variability, pressure head, and thermal characteristics, allowing for a more precise understanding of their potential for hydropower recovery. Unlike traditional enterprise-wide assessments, this disaggregated approach facilitates a more nuanced, site-specific analysis that aligns with the complex operational dynamics and physical layout of the facility.

The ability to isolate and assess each workshop separately enables the design and implementation of customized hydropower recovery solutions tailored to the specific hydraulic and spatial parameters of that zone. For example, a workshop with high flow and moderate pressure may be well-suited for installing a micro-hydropower plant (micro-HPP) with a radial or diagonal turbine, while another section with low flow but high head may require a different turbine configuration or energy conversion approach. This level of detail is critical in ensuring the technical feasibility and cost-effectiveness of the system, as well as in avoiding the risk of underutilization or overdesign of equipment.

Furthermore, the use of this methodology significantly enhances the precision of engineering calculations. It reduces the potential for overgeneralization, which is a common limitation in large-scale energy audits where heterogeneous water flows are averaged across the facility. By focusing on discrete zones, engineers can more accurately model energy losses, frictional resistance, and localized head drops. Moreover, this approach facilitates the consideration of spatial constraints, such as equipment accessibility, safety zones, prohibited installation areas (which may be defined using signature functions), and technological interdependencies between subsystems.

By accounting for such factors at the workshop level, the methodology enables the development of technically sound and economically rational hydropower

recovery solutions that can be seamlessly integrated into existing operations. The aggregated outcome of individually optimized subsystems provides a robust foundation for estimating the overall energy recovery capacity of the enterprise. This, in turn, supports long-term strategic planning, allowing decision-makers to prioritize investments based on energy return, payback period, and integration costs.

In addition, phased implementation strategies can be developed, beginning with the workshops that offer the highest return on investment or that are easiest to retrofit. As more workshops are integrated into the overall hydropower recovery system, the enterprise gradually moves toward energy self-sufficiency, operational resilience, and reduced environmental impact. Such a modular, scalable approach also allows for adjustments over time in response to changes in production processes, water usage patterns, or external energy market conditions.

Ultimately, the disaggregated analytical approach not only results in more accurate, feasible, and site-specific engineering outcomes, but also creates a data-driven framework for decision-making. It supports the adoption of sustainable energy practices in heavy industry, promotes resource efficiency, and enables enterprises to meet regulatory and environmental targets. In the context of global efforts toward decarbonization and circular economy implementation, this methodology represents a forward-looking tool for achieving both operational excellence and long-term sustainability.

As an example of a hydropower utilization object, the graphitization shop of PJSC "Ukrainian Graphite" was selected. The following equipment is located within its territory: electric calciners, cooling drums, smoke exhauster bearings, a molding machine, and cooling systems - all of which serve as sources of secondary water, with flow rates ranging from 20 to 50 m³/h. The elevation at which water is discharged varies from 4.8 to 17.1 meters.

From a technical standpoint, considering the presence of other technological equipment and auxiliary infrastructure on the shop floor, the placement of water collection centers is feasible only at three specific points. Moreover, the aforementioned equipment is located in so-called "restricted zones," i.e., areas where the installation of hydropower system elements (HPS) is not permitted. As

defined in [3], the spatial constraints of such zones are modeled in the form of parallelepipeds, and the simplest analytical representation of these zones is achieved using a signature function.

The key characteristics of the site, which serve as the input data for the optimization of the hydropower utilization system, are summarized in Table 1.

Table 1

Characteristics of Secondary Water Sources

Water Source	Coordinates of Secondary Water Sources (x; y; z), m	Maximum Flow Rate $Q_{\max}$, m^3/h	Head, m	Coordinates of Collection Centers (x; y), m
Electric Calciners	23.5; 55; 19 36.5; 55; 19 49.5; 55; 19 62.5; 55; 19 75.5; 55; 19 88.5; 55; 19	50	17.1	105; 55
Cooling Drums	21.75; 41.5; 6 34.75; 41.5; 6 47.75; 41.5; 6 60.75; 41.5; 6 73.75; 41.5; 6 86.75; 41.5; 6	30	5.0	95; 32
Molding Machine	65; 28; 11	20	10.0	25; 10
Smoke Exhauster Bearings	108; 26; 6 108; 23; 6 108; 20.5; 6 108; 17.5; 6 108; 14; 6	28.8	4.8	–

Note: Overall dimensions of the facility (shop floor) – $115 \times 60 \times 22$ m.

At the first stage of the computational procedure, the primary focus is placed on determining the characteristics of an optimal hydropower utilization system (HPUS) under the assumption of a conditionally constant maximum water flow rate. This means that the dynamic fluctuations in flow rates—such as temporal variations due to production cycles, equipment downtime, or cleaning procedures—are not initially considered. Instead, the system is analyzed based on peak operating conditions that reflect the highest expected water discharge levels from each source.

This simplification enables the creation of a baseline model, providing a foundation for understanding the system’s theoretical maximum capacity for energy recovery.

Under this assumption, the analysis involves systematically identifying all feasible combinations of linking the available secondary water sources, denoted as nnn , with the potential water collection centers, denoted as mmm , across the facility. Each pairing represents a possible configuration in which the hydraulic potential of one or more water sources can be routed to a designated collection point for energy conversion. The combinatorial nature of this task is non-trivial, particularly in facilities where numerous sources and collection points exist, as the number of potential configurations grows exponentially with system complexity.

To ensure completeness, all technically admissible pairings are enumerated using combinatorial algorithms, which take into account geometric feasibility (e.g., shortest pipeline path), pressure losses due to friction, elevation differences, and the presence of spatial or structural constraints. The goal of this step is to construct a comprehensive solution space that encompasses every possible linkage scenario under steady-flow conditions. Each configuration is then evaluated in terms of its hydraulic performance—specifically, the available head, flow capacity, and anticipated energy output—using classical fluid dynamics equations such as the Bernoulli and Darcy-Weisbach formulations.

Additionally, this stage of analysis allows for the preliminary sizing of micro-hydropower units (micro-HPPs) based on the estimated energy recovery potential at each collection center. By simulating each pairing independently, the research identifies optimal routing paths and suitable turbine types, considering whether radial, axial, or diagonal turbines would yield the highest efficiency for a given flow/head combination. The simplification to constant flow conditions not only streamlines the initial analysis but also establishes a robust framework that will later accommodate dynamic flow modeling.

While this initial model does not yet reflect real-time variability in water discharge patterns, it serves as a necessary starting point for optimization. It allows the research team to narrow down the most promising system topologies before introducing more complex variables in subsequent modeling phases, such as time-dependent flow variations or stochastic input data. Ultimately, the findings from this

stage inform both the technical layout and the economic feasibility of various HPUS configurations, providing a valuable decision-making tool for early-stage project planning and investment assessment.

In this case, the total number of possible combinations is equal to [4–6] (to be specified with a formula or value), which serves as the initial solution set for further optimization aimed at minimizing costs or head losses: $r = m^n$.

For the first combination, the distribution of sources among the collection centers (CC) was carried out as follows:

CC No. 1 – electric calciners;

CC No. 2 – smoke exhauster bearings, cooling drums, molding machine;

CC No. 3 – no sources assigned.

The required diameter of the pipeline from electric calciners No. 1–6 to Collection Center No. 1, ensuring the necessary flow capacity, was calculated using the following formula [7]:

$$d_{kr} = 2 \left(\frac{Q_{k,\max}}{\pi \cdot v_k} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

where $Q_{k,\max}$ – is the value of the maximum flow rate for the given source; v_k – is the fluid velocity in the pipeline. For non-pressurized flow, the water velocity is $v_k = 0.1 \dots 0.3$ m/s, and for pressurized flow, it is $v_k = 1.1 \dots 1.3$ m/s [8].

Based on the calculated diameter d_{kr} , the next larger standard pipeline diameter is selected.

Next, the distance l_{kp} between sources k and collection centers p is determined using their given coordinates. According to the algorithm developed in [9], the shop floor space is divided into cubes with a total number of nodes at their vertices (points for laying pipeline routes):

$$l_{kp} = \left[(x_k - x_p)^2 + (y_k - y_p)^2 + (z_k - z_p)^2 \right]^{0,5}, \quad (2)$$

where $x_k, y_k, z_k, x_p, y_p, z_p$ – coordinates of the sources and collection centers, respectively; Δ – the coordinate increment step is assumed to be $\Delta = 1$ m.

The set of possible pipeline routing paths, passing through the nodes obtained in this way, is generated at the next step. As a result of filtering out routes whose points fall within the restricted zones of the j -th equipment of the IESU (Integrated Energy Supply Unit), using a signature function, it was determined that the shortest path has a length of 83.7 meters.

Then, the characteristics of the fluid flow in the pipeline are determined. Water flow velocity:

$$v_i = \left(\frac{8g}{\lambda} \cdot R \cdot i \right)^{0.5}, \quad (3)$$

where $\left(\frac{8g}{\lambda} \right)^{0.5} = C$ – the Chezy coefficient (determined using Pavlovsky's formula [8]: when $0,1 < R < 3$ m, then $C = R^y/n$, $y = 2,5 n^{0,5} - 0,13 - 0,75 R \cdot (n^{0,5} - 0,1)$, n – roughness coefficient, $n = 0,013$, R – hydraulic radius, $R = \omega/\chi$, ω – cross-sectional area of the flow, χ – wetted perimeter, i – hydraulic gradient.

The cross-sectional area of the flow is defined as:

$$\omega = 0,785 d_{kp}^2 \cdot \frac{\phi}{2\pi} + 0,5 \left(h - \frac{d_{kp}}{2} \right) \cdot 2 \left[\left(\frac{d_{kp}}{2} \right)^2 - \left(h - \frac{d_{kp}}{2} \right)^2 \right]^{0.5}, \quad (4)$$

where ϕ – the angle formed between the longitudinal axis of the pipeline and the tangent point of the free surface of the water, h – flow depth in the pipe.

The total head loss in the pipeline H_{loss} consists of local losses $\sum h_m$ and H_l linear losses:

$$H_{loss} = \sum h_m + H_l. \quad (5)$$

Head losses along the length of the pipeline are determined using the following formulas:

$$H_{l,kp} = \lambda \cdot \frac{l_{kp}}{d_{kp}} \cdot \frac{v_k^2}{2g}, \quad (6)$$

$$H_{l,kp} = \frac{v_k^2 \cdot l_{kp}}{C^2 \cdot K}, \quad (7)$$

where λ – the hydraulic friction coefficient, which accounts for all factors influencing head loss along the length of the pipeline – primarily the fluid viscosity and the condition of the pipe walls – according to the formula by A.D. Altshul [8]: $\lambda = 0,11(\kappa_e / d + 68 / Re)^2$, κ_e – equivalent sand-grain absolute roughness.

During hydraulic calculations of both pressurized and gravity flow networks, local head losses are considered and determined using the Weisbach formula [8]:

$$h_m = \zeta \times \frac{v^2}{2g}, \quad (8)$$

where ζ – the local resistance coefficient, which depends on the Reynolds number

The hydraulic power of the secondary water source $N_{\kappa\gamma}$ taking into account energy losses in the elements of the collection system, it is determined as:

$$N_{\gamma} = \overset{q}{\underset{p=1}{a}} N_{p\gamma}. \quad (9)$$

After determining the parameters of the total secondary water flow entering Central Node No. 1 from the electrocalcinators, equipment for hydropower recovery is selected, namely a modular-type micro-hydropower plant (micro-HPP). For the above-mentioned flow characteristics, a unit of type 20 PrD with a diagonal-type turbine is selected. The nominal flow rates range from 0.08 to 0.17 m³/s, heads from 8.0 to 18.0 m, and power from 10.0 to 20.0 kW.

The energy generated by the micro-HPP generator is determined using the formula [10]:

$$W_p = N_p \cdot T \cdot \eta_{pm} \cdot \eta_{pz}, \quad (10)$$

where T – the enterprise's working time fund (for a three-shift schedule) is equal to 8,760 hours, η_{pm} and η_{pz} – the efficiency of the turbine and generator, respectively.

The capital investments for generating electricity from the given water flow will consist of the costs for the micro-HPP energy module, connecting pipelines, and the cost of installation and routine maintenance works. The cost of installation and commissioning works in this case amounts to 7.5%, while the cost of routine repairs

and maintenance of fixed assets is 5% of the capital expenditures. The cost of the 20 PrD-type micro-HPP produced by MNTO 'INSET' is US\$183 thousand. The specific cost of a 325 mm diameter pipeline, according to BMU 'Zaporizhstalbud-1', is US\$661,992/km.

For Central Node No. 2, the following technical and economic indicators are obtained: the cost of the 10 Pr-type micro-HPP, which is used for the energy recovery from the total water flow with the following parameters $Q_{\Sigma} = 96 \text{ m}^3/\text{sec}$ and $H_{\Sigma} = 5,2 \text{ m}$ amounts to US\$102.4 thousand, while the capital expenditures total US\$159.75 thousand and, accordingly, the operating costs are US\$7.15 thousand. The annual amount of electricity generated is 34,256 kWh.

The cost price of electricity (CEE) produced by the entire hydropower energy recovery system is determined using the following formula:

$$C_{EE} = \frac{K_n}{W}, \quad (11)$$

where K_n – operating costs, $K_n = \sum_{p=1}^q K_{nq}$; W – the amount of electricity generated over time T , $W = \sum_{p=1}^q W_p$.

As a result of computational operations based on the above algorithm, the characteristics of all possible topology variants of the hydropower energy recovery system (HERS) for the considered facility were determined. These variants are defined by combinations of secondary water sources connected to hydropower collection centers, taking into account constraints on the location of system elements. Some of the variants, for which the cost price of electricity generation does not exceed the established grid tariff $C \leq C_M$ for industrial enterprises as of 01.11.2011 – US\$0.9237/(kWh) [11]), the relevant data are presented in Table 2.

It is evident that when determining the optimal hydropower energy recovery system (HERS), the most economically advantageous topology variant is selected based on economic criteria. That is, the following condition must be met: the amount of electricity generated through hydropower recovery must be as high as possible, while its cost price must not exceed the current electricity tariff for the given industrial enterprise.

It was established that the most economically efficient system consists technically of secondary water sources connected via pipelines to Collection Center No. 2 (Figure 1). Collection Centers No. 1 and No. 3 remain unused.

Thus, the anticipated total capital investment in the optimal HERS for the given hydropower recovery facility amounts to US\$168,817.59, with the cost price of electricity being US\$0.30/(kWh), based on the equipment and installation and maintenance costs valid as of 01.11.2021.

Table 2

Technical and Economic Indicators of Hydropower Recovery Projects
for the Graphitization Workshop of PJSC "Ukrainian Graphite"

Option No.	Electricity Generation, thousand (kWh/year)	Electricity Cost Price, US\$/(kWh)
1	135.153	0.28
2	135.200	0.28
3	135.169	0.29
4	134.927	0.29
5	135.054	0.29
6	134.948	0.29
7	134.984	0.29
8	134.626	0.29
9	134.594	0.29
10	135.169	0.29
11	135.216	0.297
12	135.195	0.31
13	134.911	0.32
14	134.885	0.35
15	134.932	0.63
16	134.340	0.72
17	132.139	0.91

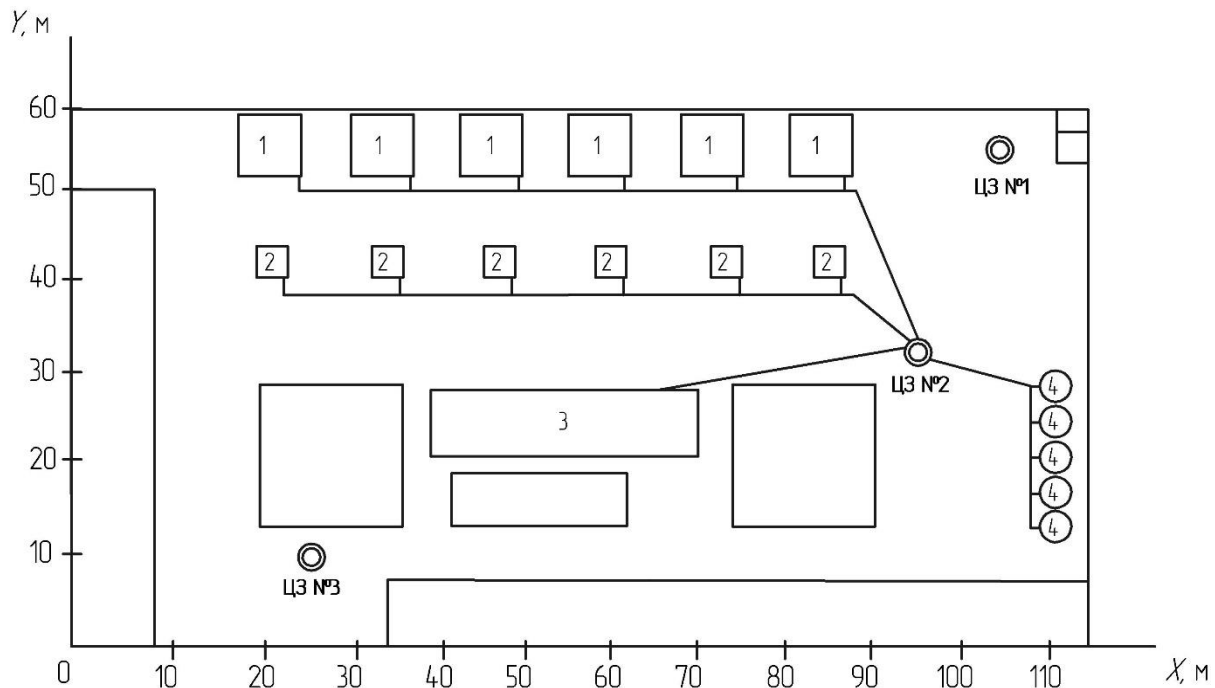


Figure 1 – Equipment layout of the graphitization workshop showing the economically optimal hydropower energy recovery system (HERS)

1 – Electrocalcinators; 2 – Cooling drums; 3 – Molding machine;
4 – Induced draft fan bearings.

The main parameters of the elements of the optimal water resource collection system and the equipment for hydropower recovery are summarized in Table 3.

Table 3

Parameters of the equipment in the optimal HERS for the graphitization workshop of PJSC "Ukrainian Graphite"

Collection Center – Source		Pipeline Diameter d , m	Length l , m	Micro-HPP Type
№ 1	Not used			
№ 2	Electrocalcinators	0.325	76.12	10Pr
	Cooling drums	0.273	73.83	
	Molding machine	0.076	31.06	
	duced draft fan bearings	0.219	22.29	
№ 3	Not used			

Conclusion

Calculations conducted using the example of a metallurgical industrial enterprise have clearly demonstrated that the technical and economic performance

of secondary hydropower recovery systems can vary substantially depending on several key factors. Among the most influential variables are the structural configuration of the water collection network, the spatial topology of the placement of electricity-generating equipment, and the associated capital costs for installation, commissioning, and integration of system components into existing infrastructure.

A detailed analysis of multiple system topology variants has shown that even minor changes in the pipeline layout or the selection of the water sources for recovery can lead to noticeable differences in electricity output, system efficiency, and cost-effectiveness. These differences are further magnified by fluctuations in the prices of construction materials, labor, and energy equipment. Furthermore, the cost of routine maintenance, as well as operational reliability and accessibility for servicing, also significantly affect the overall viability of a given hydropower recovery project.

The study confirms that a properly designed and optimized hydropower energy recovery system, based on accurate hydraulic and economic calculations, can become a valuable component of an industrial enterprise's energy strategy. By utilizing secondary water flows—often considered waste in traditional industrial processes—such systems offer an opportunity to produce renewable, localized electricity with relatively low operational costs. This not only offsets the consumption of grid electricity but also aligns with broader environmental and sustainability goals by reducing dependency on fossil fuels and minimizing waste.

In addition to reducing energy bills, the implementation of such systems contributes to greater energy security and operational autonomy. For industries with high and stable water usage profiles, such as metallurgy, chemical processing, or food production, integrating hydropower recovery into production workflows can significantly improve long-term financial outcomes and reduce vulnerability to fluctuations in electricity tariffs.

Therefore, the introduction of secondary hydropower energy recovery systems—when approached with careful consideration of hydraulic dynamics, equipment efficiency, and economic optimization—is not only technically achievable but also economically justified. It offers a pathway to enhance the sustainability and

competitiveness of industrial enterprises, facilitating their transition toward more energy-resilient and environmentally responsible operations.

REFERENCES

1. Kovalenko, V.L., Kachan, Y.G., 2009. On the assessment of secondary hydropower resource potential of an enterprise. *Renewable Energy*, (2), pp.54–58.
2. Vikhoryev, Y.O., Ilyashenko, A.P., 2002. Prospects for the use of water flow energy in technical water supply and drainage systems. *Problems of General Energy*, (7), pp.29–33.
3. Kovalenko, V.L., Kachan, Y.G., 2009. On setting constraints in the optimization problem of a secondary hydropower resource recovery system. *Integrated Technologies and Energy Saving*, (2), pp.44–46.
4. Anderson, J. A., 2003. *Discrete Mathematics with Combinatorics*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 928 pp.
5. Stanley, R. P. (1997). *Enumerative Combinatorics, Volume 1* (2nd printing). Cambridge University Press.
6. Kreher, D.L., Stinson, D.S., 1998. *Combinatorial Algorithms: Generation, Enumeration and Search*. CRC Press, 329 p.
7. Mezentshev, A.V., Petrova, V.N., 2007. *Hydraulics with Basics of Hydraulic Engineering*. Kyiv: Tekhnika, 234 p.
8. Shterenlikht, D.V., 2004. *Hydraulics: A Textbook for Universities*, 3rd ed., revised and expanded. 656 p.
9. Kovalenko, V.L., Kachan, Y.G., 2010. Algorithm for synthesizing the optimal system for secondary hydropower resource utilization. *Land Reclamation and Hydraulic Engineering Construction: Interdepartmental Scientific and Technical Collection*, Rivne: National University of Water and Environmental Engineering, (34), pp.72–77.
10. Obrezkov, V.I. (Ed.), 1981. *Hydropower Engineering: A Textbook*. 608 p.
11. National Commission for State Regulation of Energy and Utilities of Ukraine, 2011. On the approval of retail electricity tariffs for November. Resolution No. 1267 dated October 22, 2011. [Online]. Available at: <http://www.nerc.gov.ua/control/uk/publish/article> [Accessed June 11, 2025].

Received 16.04.2025.

Accepted 10.05.2025.

УДК 620.91

В. Л. Коваленко, К. Рибка, Є. Нікітін, О. Коляденко,
В. Башко, В. Кописов

РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ГІДРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ: ПРИКЛАД МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Анотація. Мета. Метою даного дослідження є розрахунок оптимальної системи утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів на прикладі цеху графітації металургійного підприємства ВАТ «Український графіт». Основним завданням є

визначення такої конфігурації системи збору та перетворення гідроресурсів, яка дозволяє мінімізувати собівартість виробленої електроенергії та забезпечити енергоефективність підприємства з урахуванням наявних технічних і просторових обмежень.

Методика. У дослідженні використано методи гідравлічного розрахунку, комбінаторну оптимізацію, сигнатурні функції для моделювання обмежень, а також техніко-економічний аналіз для оцінки ефективності різних конфігурацій систем збору гідроресурсів.

Результати. Визначено параметри оптимальної системи гідроенергетичної утилізації для конкретного об'єкта. Встановлено, що найбільш економічно доцільним є варіант із використанням лише одного центру збору (ЦЗ № 2), при загальній довжині трубопроводів близько 200 м. Річне вироблення електроенергії перевищує 135 тис. кВт·год, а собівартість становить 0,30 US\$ /кВт·год, що значно нижче чинного тарифу. Орієнтовні капітальні витрати на обладнання (мікро-ГЕС типу 10Пр) та інфраструктуру становлять US\$ 168,8 тис.

Наукова новизна. Запропоновано нову методику оцінки ефективності системи утилізації гідроенергетичних ресурсів (СГЕУ) на рівні окремого промислового цеху з урахуванням технічних обмежень і просторових характеристик. Уперше застосовано сигнатурну функцію для опису «заборонених зон» у розміщенні обладнання.

Практичне значення. Розроблена методика дозволяє точно та ефективно планувати системи утилізації енергетичного потенціалу вторинних вод на промислових підприємствах. Це сприяє підвищенню енергонезалежності, зниженню витрат на електроенергію, покращенню екологічних показників і раціональному використанню ресурсів. Отримані результати можуть бути адаптовані до інших підприємств із подібною інфраструктурою.

Ключові слова: гідроенергетична утилізація, вторинні водні ресурси, металургійне підприємство, енергоефективність, мікро-ГЕС, гідравлічний розрахунок, техніко-економічне обґрунтування, оптимізація, сигнатурна функція, центр збору.

Коваленко Віктор Леонідович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету,

Запоріжжя, Україна. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Костянтин Рибка – аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: itenn08@gmail.com, orcid.org/0009-0002-7223-6699

Євген Нікітін - аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.

Олександр Коляденко – провідний фахівець кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. kolyadenko.aleks@gmail.com; ORCID iD: 0009-0006-1983-8673

Башко Володимир - провідний фахівець, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Україна, v.bashko7@gmail.com; orcid.org/0009-0007-7820-1944

Владислав Кописов - студент, НТУ "Дніпровська політехніка", Україна, ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

Піліпенко В'ячеслав – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. E-mail: pilipenko992@gmail.com;
<https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

Viktor Kovalenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>

Kostiantyn Rybka – PhD student at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: itenn08@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7223-6699>

Yevhen Nikitin – PhD student at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Oleksandr Koliadenko – Lead Specialist at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

E-mail: kolyadenko.aleks@gmail.com | ORCID:

<https://orcid.org/0009-0006-1983-8673>

Volodymyr Bashko – Lead Specialist, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.

E-mail: v.bashko7@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7820-1944>

Vladyslav Kopysov – Student, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Ukraine. E-mail: vlad.kopusta@gmail.com | ORCID:

<https://orcid.org/0009-0000-4950-4224>

Vyacheslav Pilipenko – Lead Specialist of the R&D Department, Playtika Holding Corp, Dnipro, Ukraine. pilipenko992@gmail.com; ORCID:

<https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.19

UDC 620.91

Oleh Bondar, Serhii Siversky, Yevgen Gurin, Oleksandr Koliadenko,
Volodymyr Bashko, Vladyslav Kopysov, Viacheslav Pilipenko

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A NONLINEAR CIRCUIT OF AN ELECTROLYZER FOR PULSE DEPOSITION OF METAL COATINGS

Abstract. *The primary objective of this study is to construct a comprehensive analytical model describing the electromagnetic processes in a nonlinear electrical circuit of an electrolyzer operating under pulsed electrodeposition conditions. Special attention is given to the influence of reversed rectangular voltage pulse parameters on the near-cathode voltage drop, deposition current, and the general electrochemical behavior of the system. The goal is to identify optimal operation modes of the pulse power supply that ensure high-quality metal coatings while minimizing energy consumption and structural defects.*

Methodology. *The research employs the method of variable transformation to develop a set of differential equations describing the dynamic behavior of voltage and current in a nonlinear electrolyzer circuit during pulsed operation. The model accounts for critical circuit components: resistive, capacitive, and inductive elements of the electrolyte, as well as nonlinear conductances reflecting electrochemical properties. Analytical expressions for voltage drop and deposition current are derived for both the forward and reverse pulse intervals. The model includes the influence of electrolyte inductance—an often-neglected factor—which significantly alters the current front shape and ultimately affects deposition kinetics and coating characteristics. Numerical simulations are performed to validate the analytical solutions.*

Results. *Closed-form analytical expressions were obtained for the time-dependent near-cathode voltage drop and deposition current under pulsed conditions. It was shown that the electrolyte inductance leads to a rounding of the current front, influencing both the amplitude and stability of the electrochemical reactions. A parametric analysis identified that the optimal pulse duty cycle lies in the range of $\tau/T \approx 0.73$ to 0.78 . Within this interval, the maximum near-cathode voltage drop does not exceed 0.6 V, while the peak*

© Bondar Oleh, Siversky Serhii, Gurin Yevgen, Koliadenko Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Pilipenko Viacheslav

voltage and total current remain within safe technological limits (up to 13 V and 150 A, respectively). The average partial discharge current at the cathode remains stable at approximately 70 A, ensuring consistent deposition rates.

Scientific novelty. This work introduces a novel analytical approach to modeling pulsed electrodeposition that, for the first time, includes the effect of electrolyte inductance. Unlike existing models relying heavily on numerical simulations, the proposed model allows for direct computation of key process parameters. It enables the derivation of precise criteria for determining the optimal ranges of input pulse parameters—both in amplitude and duration—necessary to avoid the formation of crystalline defects and to achieve uniform, high-quality coatings. These innovations significantly advance the theoretical understanding of pulsed electrochemical processes.

Practical significance. The developed model provides a valuable tool for industries that utilize electrochemical metal deposition, including microelectronics, galvanics, mechanical engineering, and power systems. It offers a foundation for designing advanced pulse power supplies with optimized operation modes and supports the development of automated control systems for deposition processes. Furthermore, the model can aid in adapting laboratory results for industrial implementation, improving coating quality, process efficiency, and operational reliability.

Keywords: *metal electrodeposition, pulsed electrolysis, reversed rectangular voltage, analytical modeling, near-cathode voltage drop, electrolyte inductance, deposition current, process optimization.*

Introduction

In the field of modern materials science and electrochemical technologies, the process of metal electrodeposition occupies an important place—one of the key methods for creating thin functional layers, coatings, and microstructures that find broad application in microelectronics, mechanical engineering, energy, medicine, and the aerospace industry. The development of this technology is driven by the constant need to improve deposition efficiency, enhance the physicochemical properties of the resulting coatings, and optimize the energy consumption of the process. In particular, there is growing interest in advanced electrodeposition modes that allow precise control over coating parameters—such as thickness, density, uniformity, surface morphology, crystalline structure, and adhesion to the substrate.

Traditional electrodeposition systems widely use direct current (DC) sources. However, over time, it became evident that the constant energy supply mode has limitations in terms of controllability of the coating microstructure. Therefore, there arose a need to introduce alternative methods that would enable more effective control over the kinetics of electrochemical reactions and coating formation. One of these promising approaches is pulse electrochemistry—the use of periodically varying voltage or current to control metal deposition.

A special place among pulse modes is occupied by the use of rectangular pulses, which can be unipolar or reversed. Unipolar rectangular pulses have already found wide application in various industries, as they significantly reduce deposit graininess, increase its density and hardness, decrease porosity, and provide coatings with improved adhesion to the substrate. However, further improvement of the deposition process required even more precise control, especially when applying coatings to complex surfaces or working with microelectronic components.

In this context, the need arises to consider modified pulse deposition methods, particularly the use of reversed rectangular pulse voltage. This approach involves alternating cathodic (negative) and anodic (positive) pulses of specific duration and amplitude, allowing not only deposition but also partial modification of the already formed coating layer. Such a mode enables the implementation of complex electrochemical scenarios: surface cleaning, defect reduction, removal of loosely adhered particles, elimination of excessive crystal growth, as well as suppression of passivation processes or oxide film formation.

As noted in scientific sources [1, 2], the action of reverse pulses during the electrodeposition process has a dual nature, depending on the chemical composition of the electrolyte, the properties of the deposited metal, and the specific parameters of the pulse signal. In some cases, anodic (reverse) pulses can lead to partial dissolution of the deposit, especially if deposition occurred unevenly or with the formation of excessively large crystal structures. This dissolution contributes to surface "smoothing," removing peaks of micro-roughness, ultimately ensuring a more uniform metal distribution in subsequent deposition phases. Thus, the use of reverse voltage allows for optimization of coating morphology and ensures greater uniformity.

Another possible effect of anodic pulses is the passivation of the surface through the formation of salt or oxide films. Under such conditions, active centers on the deposit surface become blocked, and further metal deposition becomes possible only with a sufficiently high cathodic overpotential. This leads to the formation of new crystallization centers, which are distributed evenly across the entire surface, again ensuring uniform coverage and fine-grained structure. This approach is especially important when applying electroplated coatings for functional or decorative purposes, where a homogeneous microstructure with a high-quality surface is required.

The efficiency of pulsed reverse deposition also depends on the signal parameters: amplitude of the cathodic and anodic pulses, their duration, repetition frequency, and the ratio of active to passive phase durations. For example, an excessively long anodic phase can lead to excessive dissolution or oxidation, while short positive pulses have only a minor effect on the surface, providing gentle control over the coating structure. Thus, the development of effective control algorithms for pulsed modes requires a precise understanding of the electrochemical behavior of a specific system.

The influence of reversed pulses on the current distribution in the electrolyte should also be taken into account, as well as the related electromagnetic processes, which can significantly alter the dynamics of mass transfer in the interelectrode space. For example, studies [3, 4] numerically analyzed the features of electric field distribution, current density, and ion concentration in the presence of reversed rectangular pulses. It was shown that such modes can lead to the emergence of complex convective flows and local zones of increased or decreased metal concentration, which directly affects the quality of the deposition.

In this context, studying the mechanisms of action of reversed rectangular pulse voltage is relevant from both theoretical and practical perspectives. The combination of experimental approaches with numerical modeling opens new possibilities for optimizing electrodeposition processes, reducing the cost of coating production, and increasing the reliability of technologies used in high-tech industries. Moreover, such modes can also be applied in systems for electrolytic

polishing, electroforming, nanostructure formation, and the creation of functional composite layers.

Problem Statement. The aim of this study is a detailed analysis of the impact of reversed rectangular pulse voltage on the features of the metal electrodeposition process.

Main Research Section. Pulse power sources with rectangular waveforms have been used in pulse electrolysis for a long time [2, 5]. The gradual improvement of these power supplies has expanded the range of possible electrodeposition modes by enabling adjustments in pulse frequency and duty cycle. In recent years, several studies have also focused on metal electrodeposition using periodic rectangular pulses, including [6]. That work examined the electromagnetic processes during iron deposition under various pulse shapes, including rectangular ones. However, due to the use of numerical methods for calculations, general patterns linking the key indicators of coating quality and growth rate with the electrical parameters of the equivalent circuit remained undetermined. Therefore, we now present an analytical solution to a similar problem using the method of variable transformation. The equivalent circuit of the electrodeposition process is shown in Fig. 1. Unlike the circuit considered in [6], this model includes the inductance of the electrolyte. The necessity of accounting for inductance arises from its role in the phenomenon of “current pulse front rounding,” which significantly affects both the rate and properties of metal deposition in pulse mode [2].

The equivalent circuit of the electrolyzer is shown in Fig. 1. The waveform of the input voltage is presented in Fig. 2.

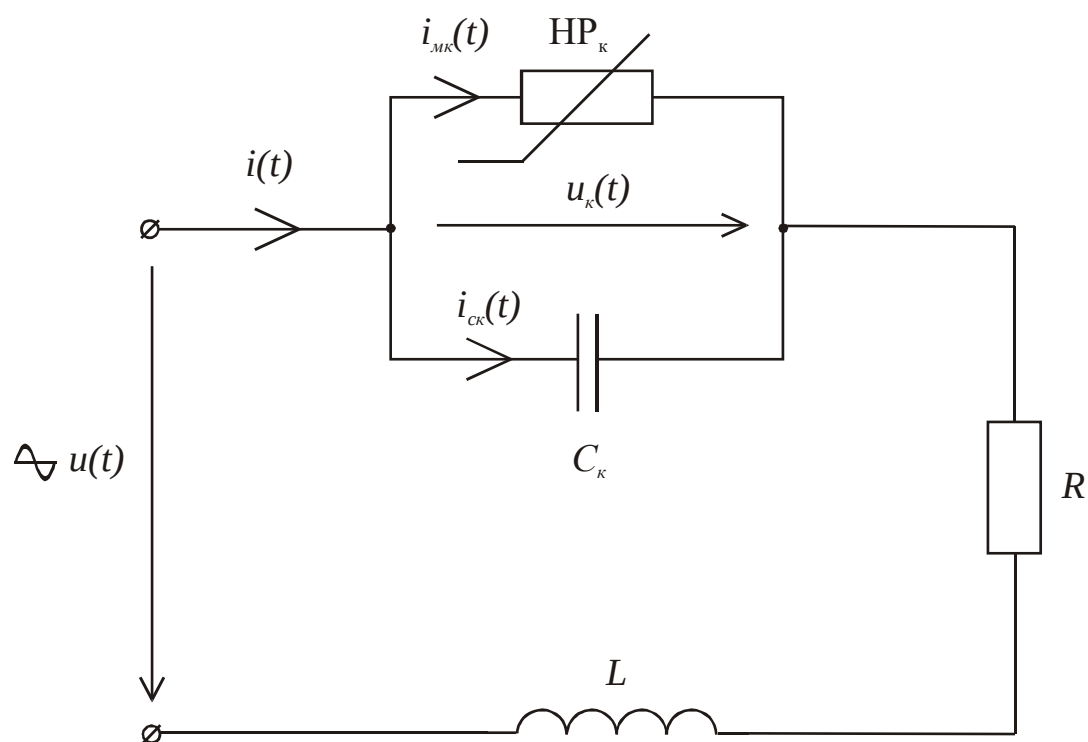


Figure 1 - Equivalent circuit of the electrodeposition process

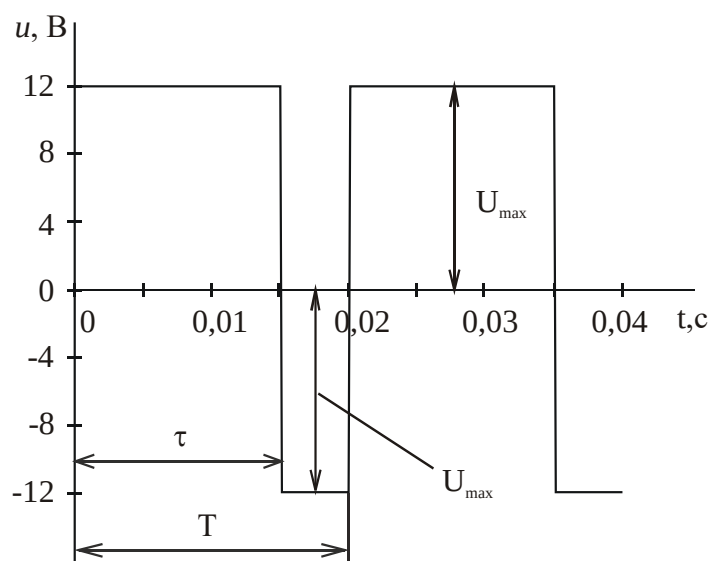


Figure 2 - Waveform of the reversed rectangular voltage $u(t)$

Analytical expression of the input voltage over one period

$$u(t) = \begin{cases} U_{\max, \text{ fwd}} & \text{for } t \in [0, \tau] \\ -U_{\max, \text{ rev}} & \text{for } t \in [\tau, T] \end{cases}, \quad (1)$$

where $U_{\max fwd}$ – maximum value of the input voltage during the forward pulse;

$U_{\max rev}$ – maximum value of the input voltage during the reverse pulse.

Then, in the interval of the forward pulse, the process in the circuit is described by the equation:

$$\ddot{u}_\kappa(t) + N(u_\kappa(t))\dot{u}_\kappa(t) + M(u_\kappa(t)) = \delta_1, \quad (2)$$

where

$$N(u_\kappa(t)) = n_0 + n_2 u_\kappa^2(t), \quad (3)$$

$$n_0 = \frac{R}{L} + \frac{z_1}{C_\kappa}, \quad (4)$$

$$n_2 = \frac{3z_3}{C_\kappa}, \quad (5)$$

$$M(u_\kappa(t)) = m_1 u_\kappa(t) + m_3 u_\kappa^3(t), \quad (6)$$

$$m_1 = \frac{1}{LC_\kappa} + \frac{Rz_1}{LC_\kappa}, \quad (7)$$

$$m_3 = \frac{Rz_3}{LC_\kappa}, \quad (8)$$

$$\delta_1 = \frac{U_{\max np}}{LC_\kappa}. \quad (9)$$

According to the formula

$$N_{cp1} = 2 \cdot n_1 = \frac{\int_0^{U_{\kappa \max}} N(u_\kappa) du_\kappa}{U_{\kappa \max}}, \quad (10)$$

where $U_{\kappa \max}$ – the maximum value of cathodic polarization during the forward pulse interval; we proceed to the equation

$$\ddot{u}_\kappa(t) + 2 \cdot n_1 \dot{u}_\kappa(t) + M(u_\kappa(t)) = \delta_1. \quad (11)$$

Let us write the solution of equation (2) in implicit form:

$$g(u_k) = e^{-n_1 t} \left[G_{m1}^* \cos \lambda t + G_{m2}^* \sin \lambda t \right] + \frac{\delta}{\theta}. \quad (12)$$

Let us choose an alternative form of the so-called amplitude function in the form:

$$g(u_k(t)) = u_k(t) \sqrt{m_1 + \frac{1}{2} m_1 u_k^2(t)}. \quad (13)$$

Then the integration constants are equal to:

$$G_{m1}^* = -\frac{\delta}{\theta}, \quad (14)$$

$$G_{m2}^* = 0. \quad (15)$$

Let us write equation (12) in explicit form:

$$u_k(t) = \sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_1 t} \left(-\frac{\delta_1}{\theta} \cos \lambda_1 t \right) + \frac{\delta_1}{\theta} \right]^2}}. \quad (16)$$

Accordingly, the deposition current is:

$$i_{mk}(t) = z_1 \cdot \sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_1 t} \left(-\frac{\delta_1}{\theta} \cos \lambda_1 t \right) + \frac{\delta_1}{\theta} \right]^2}} + \\ + z_3 \cdot \left(\sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_1 t} \left(-\frac{\delta_1}{\theta} \cos \lambda_1 t \right) + \frac{\delta_1}{\theta} \right]^2}} \right)^3. \quad (17)$$

В рівняннях (12), (17)

$$\lambda_1 = \sqrt{\theta^2 - n_1^2}. \quad (18)$$

In the interval of the reverse pulse, the electromagnetic process in the circuit is described by the equation:

$$\ddot{u}_k(t) + N(u_k(t)) \dot{u}_k(t) + M(u_k(t)) = \delta_2, \quad (19)$$

where
$$\delta_2 = \frac{-U_{\max \text{ rev}}}{LC_K}. \quad (20)$$

Let us simplify equation (19) using the expression:

$$N_{cp2} = 2 \cdot n_2 = \frac{\int_{U_{\kappa \min 2}}^{U_{\kappa \max 2}} N(u_{\kappa}) du_{\kappa}}{U_{\kappa \max 2} - U_{\kappa \min 2}}, \quad (21)$$

where $U_{\kappa \max 2}$, $U_{\kappa \min 2}$ – accordingly, the maximum and minimum values of the near-cathode voltage drop during the reverse pulse interval.

As a result, we obtain:

$$\ddot{u}_{\kappa}(t) + 2 \cdot n_2 \dot{u}_{\kappa}(t) + M(u_{\kappa}(t)) = \delta_2. \quad (22)$$

Proceeding similarly to the previous interval, we write the solution of equation (20) in implicit form:

$$g(u_{\kappa}(t)) = e^{-n_2(t-\tau)} \left(G_{m3}^* \cos \lambda_2(t-\tau) + G_{m4}^* \sin \lambda_2(t-\tau) \right) + \frac{\delta_2}{\theta}, \quad (23)$$

$$\text{where} \quad \lambda_2 = \sqrt{\theta^2 - n_2^2}. \quad (24)$$

To determine the integration constants G_{m3} and G_{m4} , we use the initial conditions for the reverse pulse interval. As these initial conditions, we take the value of the near-cathode voltage drop and its first derivative at the end of the forward pulse interval, i.e., at $t=\tau$. For this purpose, we differentiate equation (12), substituting into it G_{m1} and G_{m2} . We obtain:

$$g'(u_{\kappa}(t)) \cdot \dot{u}_{\kappa}(t) = \theta \cdot \dot{u}_{\kappa}(t) = -n_1 e^{-n_1 t} \left(\frac{-\delta_1}{\theta} \right) \cos \lambda_1 t - \frac{e^{-n_1 t}}{\lambda_1} \cdot \left(\frac{-\delta_1}{\theta} \right) \sin \lambda_1 t = \frac{\delta_1}{\theta} e^{-n_1 t} \left(n_1 \cos \lambda_1 t + \frac{1}{\lambda_1} \sin \lambda_1 t \right), \quad (25)$$

$$\dot{u}_{\kappa}(\tau) = \frac{\delta_1}{\theta} e^{-n_1 \tau} \left(n_1 \cos \lambda_1 \tau + \frac{1}{\lambda_1} \sin \lambda_1 \tau \right), \quad (26)$$

Then

$$G_{m3}^* = g(u_{\kappa}(\tau)) - \frac{\delta_2}{\theta}, \quad (27)$$

$$G_{m4}^* = \frac{1}{\lambda_2} (n_2 \cdot u_{\kappa}(\tau) + \theta \dot{u}_{\kappa}(\tau)). \quad (28)$$

Thus, in the interval $\tau \dots T$, the solution for the near-cathode voltage drop in explicit form can be written as:

$$u_k(t) = \sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_2(t-\tau)} \left[\left(g(u_k(\tau)) - \frac{\delta_2}{\theta} \right) \cos \lambda_2(t-\tau) + \frac{1}{\lambda_2} (n_2 \cdot u_k(\tau) + \theta \dot{u}_k(\tau)) \sin \lambda_2(t-\tau) \right] + \frac{\delta_2}{\theta} \right]^2}} \quad (29)$$

or, in a single-term form

$$u_k(t) = \sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n(t-\tau)} A_{m2}^* \sin(\lambda_2(t-\tau) + \xi_2^*) + \frac{\delta_2}{\theta} \right]^2}}, \quad (30)$$

$$A_{m2}^* = \sqrt{\left(g(u_k(\tau)) - \frac{\delta_2}{\theta} \right)^2 + \left(\frac{1}{\lambda_2} (n_2 \cdot u_k(\tau) + \theta \dot{u}_k(\tau)) \right)^2}, \quad (31)$$

$$\xi_2^* = \text{arctg} \frac{n_2 \cdot u_k(\tau) + \theta \dot{u}_k(\tau)}{\lambda_2 \left(g(u_k(\tau)) - \frac{\delta_2}{\theta} \right)}. \quad (32)$$

Then, the deposition current is

$$i_{mk}(t) = z_1 \cdot \sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_2(t-\tau)} A_{m2}^* \sin(\lambda_2(t-\tau) + \xi_2^*) + \frac{\delta_2}{\theta} \right]^2}} + z_3 \cdot \left(\sqrt{-\frac{m_1}{m_3} + \sqrt{\left(\frac{m_1}{m_3}\right)^2 + \frac{2}{m_3} \left[e^{-n_2(t-\tau)} A_{m2}^* \sin(\lambda_2(t-\tau) + \xi_2^*) + \frac{\delta_2}{\theta} \right]^2}} \right)^3. \quad (33)$$

By using fitting techniques, analytical expressions for the near-cathode voltage drop and deposition current during the second pulse can be obtained. As an example, let us perform calculations using the following parameters of the equivalent circuit for the nickel plating process: ($T = 0.02$ s, $\tau = 0.75T$, $U_{\max, \text{fwd}} = 12$ V, $U_{\max, \text{rev}} = 12$ V, $R = 0.08$ Ohm, $C = 0.8$ F, $z_1 = 8.0$ S, $z_3 = 609.5$ S/V², $L = 5 \cdot 10^{-5}$ H). The accuracy of such a calculation for cathodic polarization and deposition current can be evaluated based on Fig. 3 and Fig. 4.

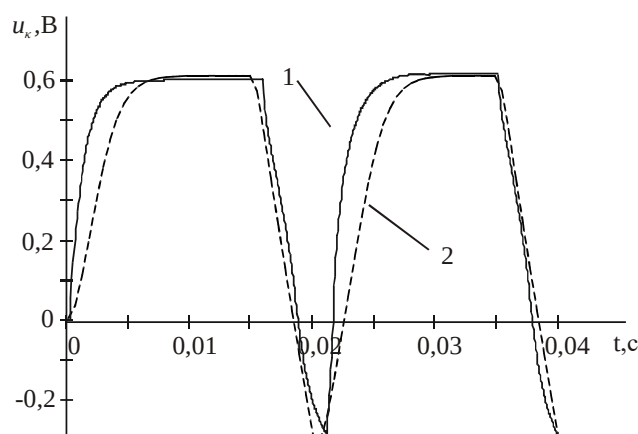


Figure 3 - Time dependence of the near-cathode voltage drop: 1 – analytical calculation; 2 – numerical calculation

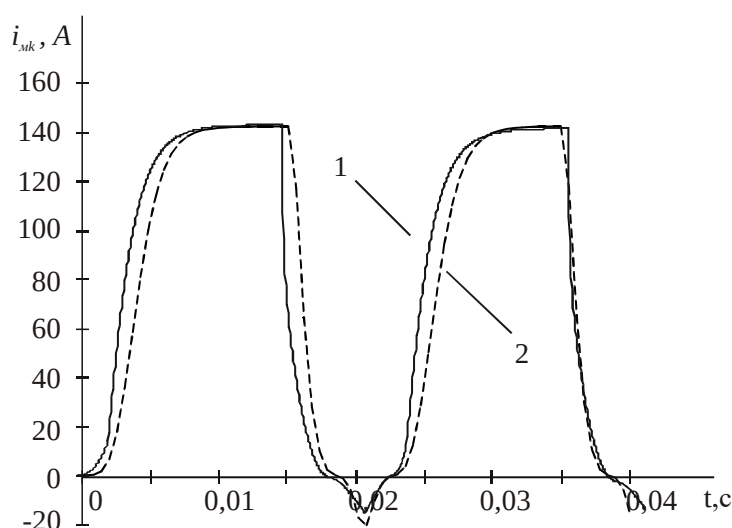


Figure 4 - Time dependence of the deposition current: 1 – analytical calculation; 2 – numerical calculation

Based on the obtained approximate analytical expressions (16), (17), (30), and (33), let us investigate the influence of one of the parameters of the input rectangular periodic pulse voltage (Fig. 2) on the key qualitative and quantitative indicators of coating growth—namely, the duration of the forward and reverse pulses, assuming equal maximum voltages in both pulses, $U_{\text{fwd max}} = U_{\text{rev max}}$. The maximum value of the input voltage will be varied in such a way that the average value remains constant and equal to 6 V. Then, the maximum value of the voltage during the forward pulse is:

$$U_{\text{fwd max}} = \frac{U_{\text{cp}}}{\kappa_{\tau} - \kappa_{U_{n3}} (1 - \kappa_{\tau})}, \quad (34)$$

where $\kappa_{\tau} = \frac{\tau}{T}, \quad (35)$

$$\kappa_{U_{n3}} = \frac{U_{\text{fwd max}}}{U_{\text{rev max}}}. \quad (36)$$

In analyzing the results, we will apply the same criteria used in the previous subsection to assess the influence of duty cycle on the considered indicators. As can be seen from Figs. 5 and 7, at low ratios $\tau/T < 0.55$, the maximum values of the source voltage and the total circuit current are excessively high compared to other operating modes. More importantly, the peak values of the near-cathode voltage drop are also sufficiently high to reliably cause defects in the crystal lattice of the coating.

At the same time, for $\tau/T > 0.81$, the minimum value of the near-cathode voltage drop becomes positive ($U_{\text{kmin}} > 0$), which indicates the disappearance of the passivation effect of the deposited layer (Fig. 6).

Therefore, from the perspective of the analyzed factors, the most favorable operating modes of the pulse voltage source for this electrolyzer lie in the range of approximately $\tau/T \approx 0.73 \dots 0.78$. In this range, the maximum value of U_k does not exceed 0.6 V, and the peak values of the input voltage and total circuit current are relatively low (Figs. 5 and 7), reaching up to 13.0 V and 150 A, respectively.

It should also be noted that the modes within the proposed range provide the same deposition rate, since the average partial discharge current of metal ions at the cathode remains constant (Fig. 8) and is approximately 70 A.

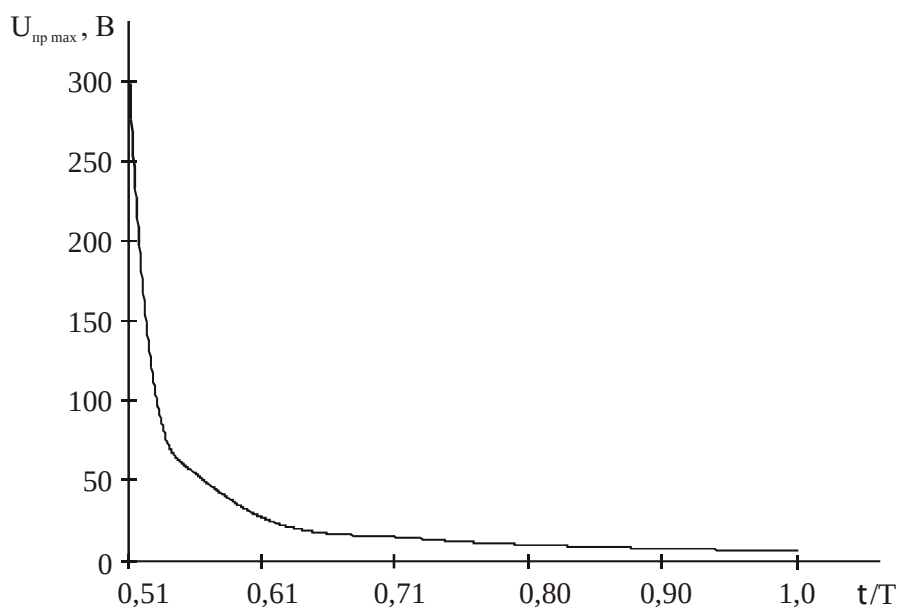


Figure 5 - Dependence of the maximum value of the reversed rectangular input voltage on τ/T at $U_{avg}=\text{const}=6\text{ V}$

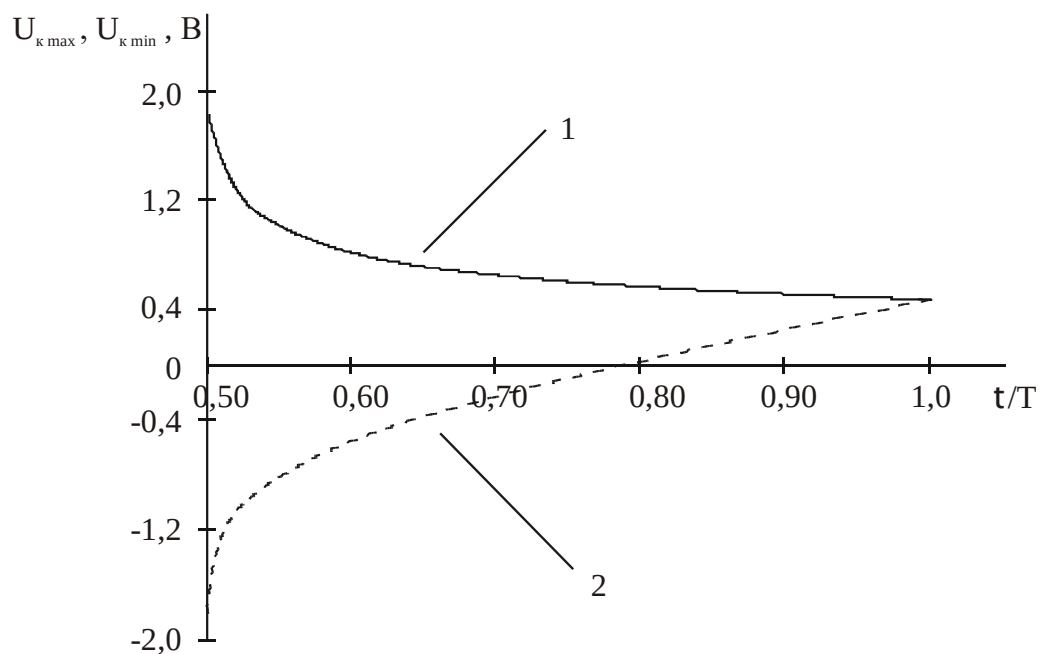


Figure 6 - Dependence of the maximum (1) and minimum (2) values of the near-cathode voltage drop per period on τ/T in the nickel plating electrolyzer at $U_{avg}=\text{const}=6\text{ V}$

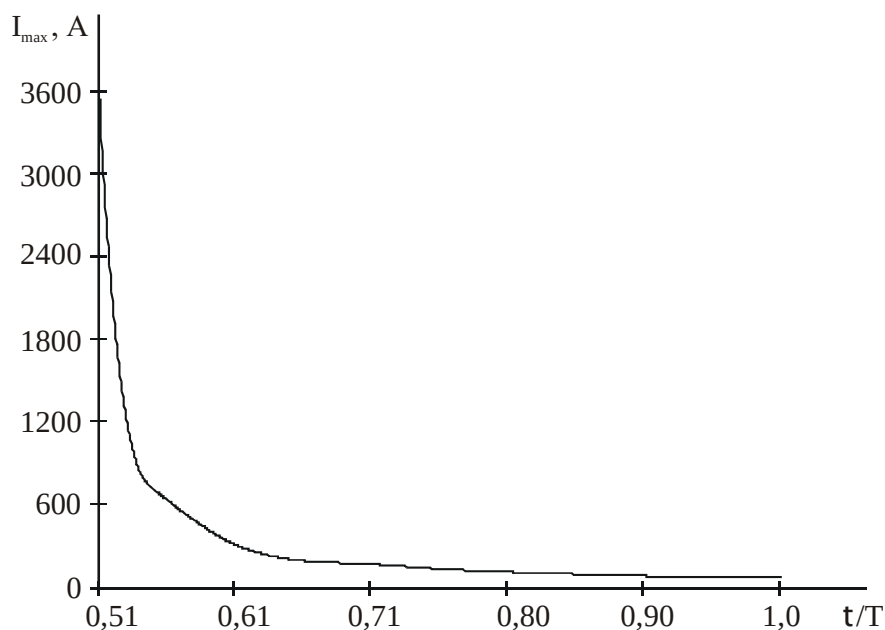


Figure 7 - Dependence of the maximum value of the total current per period in the nickel plating electrolyzer on τ/T at $U_{\text{avg}}=\text{const}=6$ V

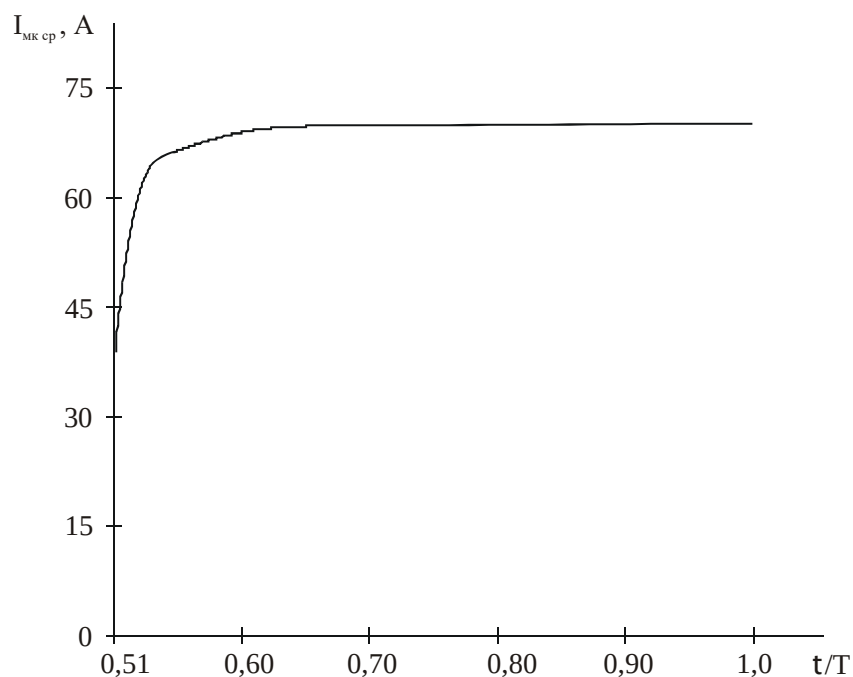


Figure 8 - Dependence of the average discharge current of metal ions per period in the nickel plating electrolyzer on τ/T at $U_{\text{avg}}=\text{const}=6$ V

The above recommendations were obtained purely through theoretical means using analytical calculations. Experimental data regarding the advantages of various deposition modes for iron and nickel, as presented in [2], do not contradict these

findings. Further refinement of the obtained input voltage parameter intervals is possible through investigations using a laboratory model of the electrolyzer and final verification on industrial equipment.

Conclusions

A comprehensive analytical model was developed to describe electromagnetic processes in a nonlinear equivalent circuit of a pulse-mode electrolyzer. In contrast to previous models, this approach takes into account the inductance of the electrolyte, which plays a critical role in shaping the current pulse front and, consequently, in determining the quality and rate of metal deposition. This inclusion improves the accuracy of modeling and allows for better control of the electrochemical process.

General analytical solutions were obtained for the near-cathode voltage drop and the deposition current during both the forward and reverse intervals of rectangular pulse voltage. These solutions provide insight into the transient behavior of the system, making it possible to predict the evolution of key technological parameters, such as maximum and minimum polarization values, peak current levels, and the rate of ion discharge.

A parametric study was conducted to analyze the influence of the pulse duty cycle (expressed as $\frac{\tau}{T}$) on the efficiency and stability of the electrodeposition process. It was shown that for low values of $\frac{\tau}{T} < 0.55$, the peak current and voltage values become excessively high, increasing the risk of structural defects in the coating due to thermal and electrical overloads.

At high values of the duty cycle ($\frac{\tau}{T} > 0.81$), passivation of the cathodic surface is no longer observed, as indicated by the positive minimum polarization. This effect can compromise the uniformity and adhesion of the deposited layer, particularly for coatings requiring fine grain structures and high surface quality.

An optimal range for pulse duration was identified as $\frac{\tau}{T} \approx 0.73 \dots 0.78$, where all evaluated parameters remain within acceptable technological limits. Specifically, the peak near-cathode voltage does not exceed 0.6 V, while the maximum source voltage

and total current are limited to 13 V and 150 A, respectively. Furthermore, the average partial discharge current of metal ions remains stable at approximately 70 A, ensuring a consistent deposition rate across this range.

The validity of the analytical model is supported by comparison with numerical calculations and is qualitatively consistent with experimental results reported in the literature. This confirms the suitability of the model for practical applications and process optimization in pulse electroplating of nickel and iron.

The presented theoretical framework may serve as a foundation for the design of advanced pulse power supplies and control algorithms for electroplating systems. Further enhancement of this work is possible through experimental validation using laboratory-scale electrolyzers and eventual adaptation for industrial systems, enabling improved reliability, cost-efficiency, and coating performance in high-tech manufacturing environments.

REFERENCES

1. Kostin, N. A., & Sheykina, O. G. (2000). Electropulse deposition of metals and alloys. Technical Electrodynamics. Thematic Issue "Problems of Modern Electrical Engineering", Part 1, 74–77.
2. Kostin, N. A., & Kulikov, A. A. (1981). Application of electroplating technology in the repair of rolling stock. Moscow: Transport. 109 p.
3. Artemchuk, V. V. (2002). Improving the reliability of axlebox housings of electric locomotive wheelsets (Ph.D. thesis in Technical Sciences, specialty 05.22.09). Dnipropetrovsk, Ukraine. 203 p.
4. Development of the fundamentals of technologies and equipment for “on-site” electroplating restoration of worn large-sized (housing-type) parts of rolling stock: Final research report / Dnipropetrovsk State Technical University of Railway Transport. – Project No. DR 0199U001431. – Dnipropetrovsk, 2001. – 140 p.
5. Vorobey, A. K. (1958). Study of the process of iron plating in hot chloride electrolytes under periodic reversal of direct current. Minsk: INTIP of the State Planning Committee of the BSSR. 42 p.
6. Kostin, N. A., Bondar, O. I., Mykhailenko, Yu. V., & Artemchuk, V. V. (1999). Modeling of the electrolytic deposition process of iron during the restoration of rolling stock components. Technical Electrodynamics. Thematic Issue: "Modeling of Electronic, Energy and Technological Systems", Part II, 35–38.

Received 19.04.2025.

Accepted 20.05.2025.

УДК 620.91

Олег Бондар, Сергій Сіверський, Євген Гурін, Олександр Коляденко,
Володимир Башко, Владислав Кописов, В'ячеслав Піліпенко

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У НЕЛІНІЙНОМУ
КОЛІ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ІМПУЛЬСНОГО ОСАДЖЕННЯ
МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ**

Анотація. Метою даного дослідження є побудова аналітичної моделі електромагнітних процесів у нелінійному електричному колі електролізера, який працює в режимі імпульсного осадження металевих покриттів. Особливу увагу приділено впливу параметрів реверсованої прямокутної напруги на прикатодний спад напруги, струм осадження та загальні електрофізичні характеристики процесу. Дослідження спрямовано на виявлення оптимальних режимів роботи джерела живлення, які забезпечують найвищу якість осадженого шару при мінімальних енергетичних затратах.

Для опису процесів у колі було використано метод перетворення змінних та побудовано систему диференціальних рівнянь, що відображає динаміку напруги та струму в умовах імпульсного живлення. У моделі враховано ключові елементи кола: активний опір, ємність, індуктивність електроліту, а також нелінійні провідності, що характеризують електрохімічну поведінку системи. Для аналізу якості покриття здійснено моделювання в інтервалах прямого та зворотного імпульсів із подальшим визначенням максимальних і мінімальних значень прикатодного спаду напруги та повного струму. Проведено чисельне порівняння з аналітичними результатами для перевірки точності моделі.

У результаті дослідження отримано замкнені аналітичні вирази, які описують часові залежності напруги та струму осадження. Показано, що індуктивність електроліту суттєво впливає на форму імпульсу струму та, відповідно, на кінетику росту покриття. Встановлено, що оптимальне співвідношення тривалості прямого та зворотного імпульсів лежить у межах $\tau/T \approx 0.73 \dots 0.78$. У цьому діапазоні максимальні значення прикатодного спаду напруги не перевищують 0.6 В, а загальний струм та напруга джерела залишаються у безпечних межах (до 150 А та 13 В відповідно). Водночас середній частковий струм розряду іонів металу на катоді становить приблизно 70 А, що свідчить про стабільну швидкість осадження.

Запропоновано нову аналітичну модель електролізера, яка вперше враховує індуктивність електроліту в імпульсному режимі. Це дозволило розширити існуючі підходи до моделювання електрохімічних процесів та отримати точні формули для ключових параметрів без необхідності повномасштабного чисельного моделювання. Також встановлено кількісні критерії, що визначають граничні значення параметрів напруги й тривалості імпульсів, за яких забезпечується мінімізація дефектів кристалічної структури покриття.

Результати дослідження мають прикладне значення для галузей, де застосовується електрохімічне осадження – зокрема, у мікроелектроніці, гальванотехніці, машинобудуванні та енергетиці. Запропоновану модель можна використовувати як основу для створення сучасних імпульсних джерел живлення з оптимізованими режимами роботи. Крім того, вона стане в пригоді при розробці систем автоматизованого контролю процесів осадження та адаптації лабораторних рішень до умов промислового виробництва.

Ключові слова: електроосадження металів, імпульсний електроліз, реверсована прямокутна напруга, аналітичне моделювання, прикатодний спад напруги, індуктивність електроліту, струм осадження, оптимізація режиму.

Олег Бондар - к.т.н., доцент, кафедра електротехніки та електромеханіки, Український державний університет науки і технологій

Сергій Сіверський – аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.

Євген Гурін - аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна, ORCID: 0009-0006-1346-5191

Олександр Коляденко – провідний фахівець кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. kolyadenko.aleks@gmail.com; ORCID iD: 0009-0006-1983-8673

Башко Володимир - провідний фахівець, Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, Україна, v.bashko7@gmail.com; orcid.org/0009-0007-7820-1944

Владислав Кописов - студент, НТУ "Дніпровська політехніка", Україна, ORCID: 0009-0000-4950-4224, vlad.kopusta@gmail.com

Піліпенко В'ячеслав – провідний фахівець RnD відділу Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна. E-mail: pilipenko992@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

Bondar Oleh - PHD, Associate Professor, department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technologies.

Siversky Serhii - Graduate student, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Zaporizhzhia National University

Gurin Yevgen - Graduate student, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0006-1346-5191

Oleksandr Koliadenko – Lead Specialist at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
E-mail: kolyadenko.aleks@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1983-8673>

Volodymyr Bashko – Lead Specialist, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.
E-mail: v.bashko7@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-7820-1944>

Vladyslav Kopysov – Student, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Ukraine.
E-mail: vlad.kopusta@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4950-4224>

Vyacheslav Pilipenko – Lead Specialist of the R&D Department, Playtika Holding Corp, Dnipro, Ukraine. pilipenko992@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7301-2501>

DOI: 10.34185/1991-7848.2025.01.20

УДК 621.771:621.774:621.73

М.В. Губинський, Ю.Д. Угрюмов, О.В. Губінський, І.А. Мазур, Д.Ю. Угрюмов

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТРУБ*

Анотація. Однією з актуальних проблем України в даний час є нестача первинних енергоносіїв, зокрема природного газу, що обмежує енергоспоживання підприємств. Проблема посилюється поетапним підвищенням вартості енергоносіїв (природного газу, електроенергії), а також іншими причинами, що знижує конкурентоспроможність металургійних підприємств України. Метою даної роботи є аналіз відомих технічних рішень по енергозбереженню в прокатному виробництві, переважно при виробництві гарячекатаних безшовних труб, для подальшого удосконалення виробництва труб. На основі аналізу шляхів енергозбереження при виробництві гарячекатаних труб відзначається головний напрямок енергозбереження в прокатному виробництві – це будівництво прокатних станів поблизу машини безперервного лиття заготовки. В даній роботі розглянуті такі напрямки зниження енерговитрат, як: гарячий посад заготовок в нагрівальні печі трубопрокатних агрегатів; економія природного газу при нагріві термічній обробці; пряме прошивання безперервно литої заготовки на косовалковому стані пілігримового агрегата; термомеханічна обробка труб з прокатного нагріву.

Ключові слова: енергозберігаюча технологія, природний газ, електроенергія, гарячекатана труба, трубопрокатний агрегат, пряме прошивання, гарячий посад, нагрівальна піч, термомеханічна обробка.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Металургійні підприємства України з повним циклом мають затрати палива на рівні $1,4 \div 1,6$ т.у.т/т виробленої продукції, при цьому доля енерговитрат в собівартості прокату складає приблизно 40%. В той же час на

© Губинський М.В., Угрюмов Ю.Д., Губінський О.В., Мазур І.А., Угрюмов Д.Ю.

* Присвячується пам'яті відомого педагога, вченого і спеціаліста в галузі теплотехніки доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри теплотехніки та екології металургійних печей Національної металургійної академії України Губинського Володимира Йосифовича (03.11.1930 – 15.01.2012).

підприємствах Японії і США ці витрати складають $0,7 \div 1,0$ т.у.т/т продукції. Однією з актуальних проблем України в даний час є нестача первинних енергоносіїв, зокрема природного газу, що приводить до введення обмежень на енергоспоживання не технологічних потреб. Поетапне підвищення вартості енергоносіїв (природного газу, електроенергії) знижує конкурентоспроможність продукції [1].

Незважаючи на достатньо складну ситуацію в металургійній галузі України перш за все з підвищеною витратою всіх видів енергоносіїв, сучасний розвиток науки і технологій дозволяє оптимістично дивитися в майбутній розвиток галузі.

Для ефективного вирішення проблем енергозбереження необхідно перш за все проаналізувати і оцінити всі що є резерви в вирішенні цієї проблеми. Значні резерви в питанні економії енергоресурсів є і при виробництві гарячекатаних труб.

Постановка задачі і мета дослідження

Необхідно розглянути відомі технічні рішення для енергозбереження в прокатному виробництві і на їх основі запропонувати використання як відомих, так і нових рішень для удосконалення технологічних процесів виробництва гарячекатаних труб.

Шляхи енергозбереження при виробництві гарячекатаного проката

Для підвищення ефективності використання теплової та електричної енергії при виробництві прокату необхідно скорочення етапів виробництва шляхом використання безперервного розливання сталі, тепла попереднього агрегата за рахунок гарячого посаду заготовок в нагрівальну піч, а також транзитну прокатку. Найбільш ефективно ця задача вирішена на ліварно-прокатних агрегатах (ЛПА) [1].

Головний напрямок енергозбереження в прокатному виробництві – це будівництво прокатних станів поблизу з машиною безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), використання ефективних систем опалення, глибока утилізація теплоти відпрацьованих газів. Загальними засобами, котрі забезпечують зменшення енергетичних витрат в металургійній галузі, є

поліпшення теплових режимів агрегатів, рекуперація енергоємного обладнання, збільшення ступеня рекуперації вторинних енергоносіїв і повернення їх в технологічний процес, використання сучасних вогнетривких матеріалів та збалансованих схем енергозбереження.

Втрати тепла можна зменшити завдяки встановленню ендопанелей (теплових екранів) і термостатів в лініях станів, на передавальних рольгангах та іншому обладнанні.

Втрати енергоносіїв можна знизити за рахунок скорочення пауз в ході прокатки, простоїв стана і часу роботи обладнання на холостому ході. Скорочення пауз і простоїв сприяє збільшенню маси заготовки і швидкості прокатки [2].

При виробництві гарячекатаних труб гарячий посад заготовок в нагрівальні печі не застосовується, що можна пояснити тим, що трубопрокатні агрегати (ТПА) не будувалися в одну технологічну лінію з МБЛЗ. Разом з тим, якщо прокатні стани знаходяться не рядом з МБЛЗ, то необхідно забезпечити доставку метала із збереженням його теплоти, використовують термовагони і раціональний графік транспортування метала.

В даній роботі розглянемо такі напрямки зниження енерговитрат при виробництві гарячекатаних безшовних труб як: гарячий посад заготовок в нагрівальні печі ТПА; економія природного газу при нагрів і термообробці; пряме прошивання безперервно литої заготовки(БЛЗ) на косовалковому стані пілігримового ТПА; термомеханічна обробка труб з прокатного нагріву.

Гарячий посад заготовок після МБЛЗ

На ПАТ «Інтерпайп-НТЗ» і ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» компанії «Інтерпайп» повністю перейшли на виробництво проката (труб і залічних коліс) із БЛЗ круглого поперечного перерізу, яка виробляється на МЗ «Інтерпайп Сталь», побудованого на виробничому майданчику ПАТ «Інтерпайп-НТЗ». Таку заготовку діаметром до Ø500 мм отримують три трубних цеха з ТПА 5–12", ТПА 140 і ТПА 200, та колесопрокатний цех. Знаходження виробника прокату і постачальника заготовки на одному виробничому майданчику створює передумови для аналізу можливостей

здійснення енергозберігаючих технологій виробництва проката з використанням тепла БЛЗ після розливки металу [3-5].

Недоліком існуючої технології прокатки труб на комплексі «МБЛЗ – ТПА 5–12” з пілігримовими станами» є використання холодних заготовок та їх подальше нагрівання в кільцевій печі під прокатку, що призводить до необхідності значної витрати природного газу.

На рис. 1 наведена технологічна лінія для виробництва гарячекатаних безшовних труб діаметром $\varnothing 168 \div 377$ мм з круглої БЛЗ, яка складається з трьох модулів. Перший модуль (М1) є виробником БЛЗ, другий модуль (М2) – забезпечує транспортування гарячої БЛЗ до ТПА 5–12” з пілігримовими станами, третій модуль (М3) – представляє собою ТПА 5–12” з пілігримовими станами для виробництва гарячекатаних труб.

Згідно першого варіанту гарячі заготовки після М1 потрапляють на машину для розділення їх на мірні довжини і далі в кільцеву нагрівальну піч ТПА 5–12” з пілігримовим станом. Згідно другого варіанту гарячі заготовки після МБЛЗ потрапляють в буферну термостатичну піч-накопичувач. Згідно третього варіанту гарячі БЛЗ складаються до повного (неповного) остигання з подальшим розділенням на мірні довжини.

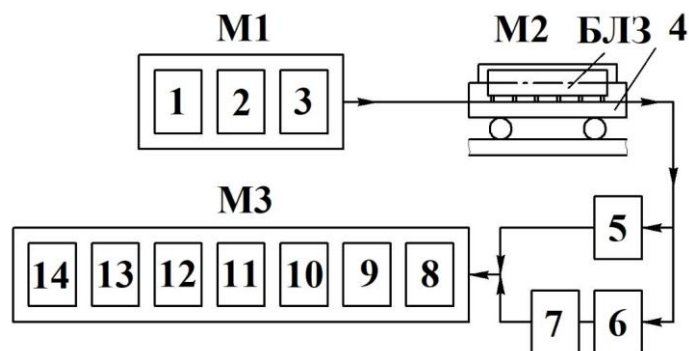


Рисунок 1 – Технологічна лінія виробництва гарячекатаних безшовних труб з круглої БЛЗ:

М1 – модуль виробництва БЛЗ; М2 – транспортний модуль; М3 – ТПА;

1 – електродна піч; 2 – вакууматор; 3 – МБЛЗ; 4 – транспортний засіб;

5 – піч для різання штанг БЛЗ в холодному стані; 6 – піч для різання штанг БЛЗ в гарячому стані; 7 – піч-накопичувач; 8 – нагрівальна піч; 9 – прошивний прес;

10, 13 – підігрівальні печі; 11 – косовалковий стан елонгатор; 12 – пілігримовий стан;

12 – підігрівальна піч з крокуючими балками; 14 – калібрувальний стан

При дослідженні економії палива в печах вихідне температурне поле заготовки після МБЛЗ визначали шляхом прямих вимірів на холодильнику. Середня температура поверхні складала 650°C , а температура центра заготовки – 900°C . Приймаючи параболічну залежність розподілення температурного поля в заготовці, середньомасова температура метала перед транспортуванням складала 775°C [5].

Транспортування передбачається вантажним автомобілем в термоконтейнері чотирьох штанг заготовок одночасно.

При розрахунку процесу охолодження приймали, що втрати теплоти симетричні відносно поздовжньої осі злитка. Температура повітря і внутрішньої поверхні термоконтейнера незмінна і складає 20°C . такий підхід забезпечить визначений запас при розрахунках: закладається збільшення величини теплового потоку з поверхні злитка. При розрахунку враховували променеву і конвективну складову втрати теплоти. В результаті при транспортуванні в продовж 40 хвилин середня температура злитків знизилась на 55°C і склала 725°C . При цьому температурне поле заготовки вирівнялось: температура центра заготовки знизилась до 763°C , температура поверхні зросла до 676°C .

Таким чином, середньомасова температура посада заготовок в кільцеву піч складає близько 700°C . гарячий посад може забезпечувати економію палива в печі або за рахунок підвищення продуктивності, або за рахунок зміни температурного режиму по зонах печі. Так як продуктивність печі визначається роботою стана, та при розрахунках було прийнято, що продуктивність не змінювалась. Економія природного газу може досягатися за рахунок збільшення методичної (неопалювальної) зони печі шляхом відключення ряду горілок. Таким чином, методична зона печі перетворюється в «термос-накопичувач» заготовок, де температура заготовок практично не змінюється. Розрахунок нагрівання метала гарячого посада показав, що довжина методичної зони може бути збільшена і одночасно можуть бути виключені 7 горілок, що дозволяє зекономити $500 \text{ м}^3/\text{год}$ природного газу при нагріванні заготовок до 1280°C і продуктивності печі 45 т/год .

Розділення гарячих БЛЗ на мірні частини може бути здійснено за допомогою установок абразивного різання, які отримують все більше застосування [6].

Нова технологія повинна забезпечити зниження енерговитрат при нагріванні литих заготовок в кільцевій печі для їх деформування і збільшення точності труб.

Це обумовлюється тим, що введення МБЛЗ в лінію в поєднанні з вказаною конструкцією транспортного засобу, який зв'язує цю машину з кільцевою піччю для нагрівання заготовки, дозволяє зберегти і використовувати високу температуру металу за рахунок його внутрішнього тепла, яке є при виливанні заготовок. Як результат – гарячий посад заготовок в кільцеву піч з температурою близькою $600 \div 700^{\circ}\text{C}$, дозволяє вимкнути ряд зон кільцевої печі і тим самим знизити енерговитрати. Крім того, гарячий посад заготовок призведе до їх більш рівномірному нагріву і дасть можливість регулювати температуру заготовок в процесі нагрівання з точністю $\pm 10 \div 20^{\circ}\text{C}$, при нагріванні холодних заготовок під деформування – тільки близько $\pm 40^{\circ}\text{C}$. Останнє повинно підвищити точність труб.

Розглянемо можливості використання енергозберігаючої технології на ТПА 200. На рис. 2 наведена схема модульної технології виробництва труб з недеформованої круглої БЛЗ на ТПА 200 з трьохвалковим розкатним станом ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб». При цьому операції 1 – 7 забезпечують попереднє деформування вихідної заготовки БЛЗ перед прокаткою труб, а операції 1, 8 – 11 – отримання труб на тому ж основному технологічному обладнанні. В склад ТПА 200 входять три косовалкових стана: двохвалковий з чашоподібними валками і напрямними лінійками та два трьохвалкові стани, розкатний і калібрувальний.

Використання такої технології дозволяє вирішити наступні задачі: розширити номенклатуру вихідної БЛЗ по діаметру; поліпшити якість вихідної БЛЗ за рахунок зниження осьової порожнистості від зосередженої, у вигляді окремих усадочних порожнин, до розподільної по всій зоні рівновісних кристалів.

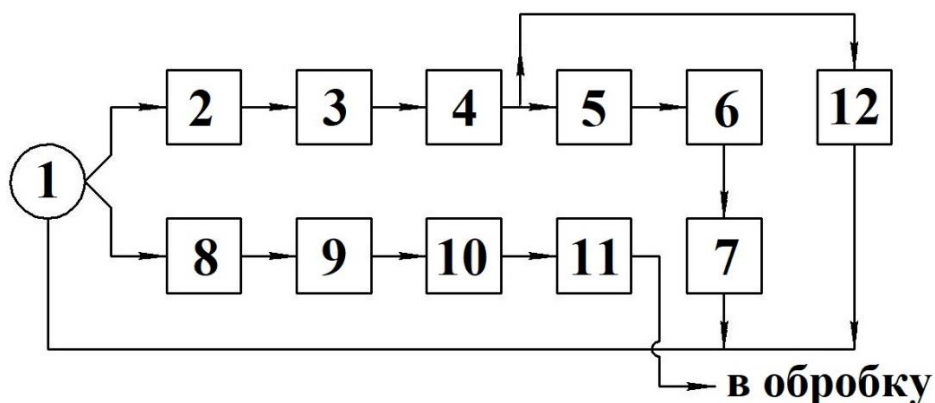


Рисунок 2 – Схема модульної технології виробництва труб із недеформованої круглої БЛЗ на ТПА 200 з трьохвалковим розкатним станом ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб»:
1 – нагрівання заготовки; 2, 3 та 4 – обтискання БЛЗ на двох- та трьохвалкових станах;
5 – охолодження; 6 – складування; 7 – передача заготовки в піч;
8 – прошивка БЛЗ в гільзу на двохвалковому стані;
9 – розкатка гільзи в чорнову трубу на оправці; 10 – калібрування труби; 11 – охолодження труби; 12 – термостатування заготовки після попереднього деформування

На ТПА 200 з трьохвалковим розкатним станом ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» реалізована технологія попередньої деформації вихідної БЛЗ, що дозволило поліпшити якість метала для подальшої прокатки труб на тому ж агрегаті [7].

Аналіз цієї технології показує, що вона має суттєві резерви економії енергоресурсів за рахунок використання тепла заготовок після їх попереднього деформування на ТПА 200. Для того, щоб використовувати тепло заготовок доцільно в технологічній схемі нарис. 1 передбачити операцію 12 термостатування, для збереження тепла заготовки з подальшим її передаванням в нагрівальну піч 1 для нагріву до температури гарячого деформування перед прокаткою труб. При цьому необхідно вирішити ряд логістичних питань з передачі заготовок в термостат, а також подальшої її передачі в нагрівальну піч.

Має перспективи використання нової технології на ТПА 140 зі станами поздовжньої прокатки ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб», який ближче всього знаходиться до МЗ «Інтерпайп Сталь». Найбільш віддалено від МЗ «Інтерпайп Сталь» знаходиться колесопрокатний цех ПАТ «Інтерпайп-НТЗ». Всі вказані

цеха з'єднані з МЗ «Інтерпайп Сталь» розвиненою мережею залізничних та автомобільних комунікацій.

Тут вперше розглядається концепція удосконалення БЛЗ з МЗ «Інтерпайп Сталь» для виробництва прокату в трубних і колесопрокатному цехах кампанії «Інтерпайп».

Ця концепція передбачає будівництво цеха підготовки металу (ЦПМ) на мінімально близькій відстані від МЗ «Інтерпайп Сталь». В цьому цеху передбачається виробляти наступні операції зі штангами БЛЗ довжиною $6 \div 10$ м, що надходять з МЗ «Інтерпайп Сталь»: огляд і відбракування металу, в тому числі з використанням ультразвукового контролю; розрізання гарячих БЛЗ на мірні довжини; зацентрування трубних заготовок перед прошиванням на косовалковому стані; збереження тепла заготовок; зберігання холодних заготовок.

ЦПМ має чотири лінії з підготовки металу для прокатних цехів ПАТ «Інтерпайп-НТЗ» (рис. 3). Кожна лінія має засіб для розділення штанг БЛЗ на мірні заготовки, лінії для підготовки металу для трубних цехів мають пристрій для зацентрування заготовок під прошивання на косовалковому стані. Кожна лінія має піч-термос для металу і ділянки для холодного металу та ін.

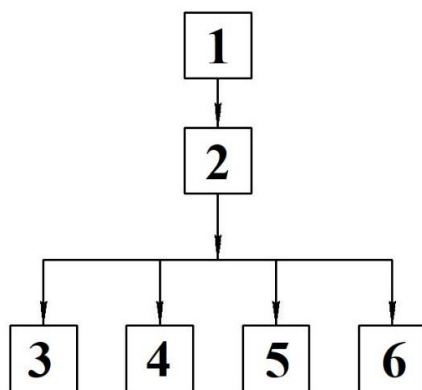


Рисунок 3 – Структурна схема передачі металу з МЗ «Інтерпайп Сталь» в цеха ПАТ «Інтерпайп-НТЗ»:

1 – МЗ «Інтерпайп Сталь»; 2 – цех підготовки металу; 3 – трубопрокатний цех №3;
4 – трубопрокатний цех №4; 5 – трубопрокатний цех №5;
6 – колесопрокатний цех

**Сучасні способи енергозбереження в нагрівальних печах
металургії і машинобудування**

В роботі [8] В.Й.Губинським розглянуті основні сучасні способи економії палива в нагрівальних печах безперервної і періодичної дії: зменшення теплового дефіциту метала що нагрівається; зниження температури продуктів горіння на виході з робочого простору печі; зменшення втрат теплоти на розігрів футерування, і крізь футерування та вікна в навколишнє середовище; використання теплоти газів, які виходять з печі, для підігріву повітря і палива перед подачею їх в пальники, а також для отримання пару і гарячої води в котлах-утілізаторах; оптимальне співвідношення палива і повітря в пальниках з метою повного спалювання палива при мінімальному надлишку повітря; регулювання тиску газів в печі з метою мінімального підсосу атмосферного повітря і вибивання газів з печі.

В.Й.Губинський відмічає, що на прикінці ХХ століття пройшла революційна подія в розвитку конструкції нагрівальних печей, пов'язане з винаходом і промисловим використанням регенеративних пальників [8, 9].

На рис. 4 показана схема такого пальника. Його відмінною рисою є малогабаритний регенератор з кульковою насадкою, розташованою в корпусі пальника. Поверхня нагрівання 1 м^3 кулькового насипу в $10 \div 15$ разів більше, аніж у цегляної насадки типа Siemens. Тому кульковий регенератор має найбільший об'єм і встановлюється напряду в пальнику.

Для того, щоб повернути в піч як можна більше тепла, яке виноситься димовими газами, потрібно не давати кулькам прогріватися по всій висоті насипу. Пальники працюють попарно. Коли температура диму на виході з регенератора підвищується до $100 \div 200^\circ \text{C}$, роблять перекидання клапанів – димових, повітряних та газових. Період між перекиданням складає $1 \div 3$ хвилини і залеже від співвідношення витрати димових газів і об'єму насадки. Температура підігріву повітря в регенераторах всього на 100°C нижче температури диму на виході з печі. Тому регенератори акумулюють $85 \div 90\%$ тепла газів, які виходять з печі, і повертають в піч з повітрям крізь пальники. Витрата палива на опалення печі скорочується в

1,5÷2,0 рази. Найбільший ефект відноситься до печей, які не мають рекуператорів або цегляних регенераторів.

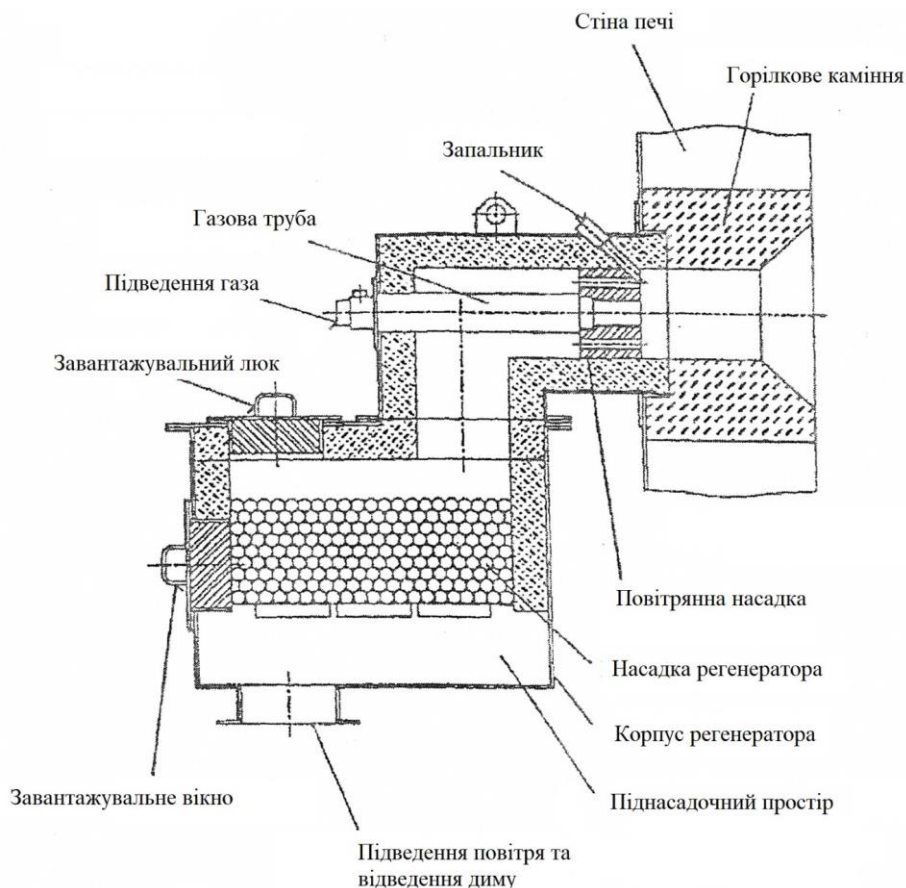


Рисунок 4 – Схема регенеративного пальника

Нагрівальні і термічні печі металургійних та машинобудівних підприємств України мають великі резерви енергозбереження. Реконструкція опалення і футерування печей, сучасні режими їх роботи, глибока утилізація тепла газів, що виводяться, зокрема за допомогою кулькових регенераторів, дозволить скоротити витрату палива в 1,5÷2,0 рази. Можлива економія палива в масштабах України оцінюється в обсязі 500000 т.у.т/рік.

Значну економію енергетичних витрат на нагрівання металу можна отримати шляхом реконструкції пічного господарства з використанням сучасних методів опалення, ефективних пальників, теплообмінних пристроїв (регенераторів та рекуператорів), сучасних вогнетривких і теплоізолюючих

матеріалів, заміни електричних печей газовими, а також камерних печей періодичної дії, які мають малий термічний к.к.д. ($12\div 16\%$), печами безперервного нагрівання. Наприклад, реалізація метода опосередкованого радіаційного нагрівання з використанням плоскополум'яних (дискофакельних, плоскофакельних) пальників дозволяє скоротити витрати палива на $10\div 15\%$. Використання регенеративних пальників дозволяє знизити температуру димових газів на виході з печі до $100\div 150^{\circ}\text{C}$ за рахунок більш ефективного використання вторинних енергоресурсів, що дозволяє підвищити ефективність використання газу на $40\div 50\%$.

Застосування пальників з широким діапазоном регулювання витрати палива забезпечує проведення технологічних операцій при різних температурних режимах і дозволяє скоротити витрату палива на $20\div 25\%$.

Застосування сучасних волоконних теплоізолюючих матеріалів і вогнетривів дозволяє при зменшенні товщини стін печей скоротити в $2\div 3$ рази втрати теплоти в навколишній простір.

Заміна електричних печей на газові в ряді випадків дає можливість в $2\div 3$ рази скоротити витрати на закупівлю енергетичних ресурсів.

Впровадження оптимальних режимів роботи нагрівальних і термічних печей з використанням сучасних пристроїв автоматичного керування і вимірювальних пристроїв також підвищує ефективність використання палива і зменшення втрат металу за рахунок окислення і неякісного нагріву метала (перегрів або недогрів).

Питання вдосконалення режимів роботи і конструкцій нагрівальних печей докладно розглянуто в спеціальній літературі.

Енергозберігаюча технологія отримання гільз на з ТПА 5–12”

ПАТ «Інтерпайп Ніко Тюб»

На ТПА 5–12” з пілігримовими станами використовується проєктна технологія Кальмеса, яка передбачає застосування в якості вихідної заготовки злитка з гранями стаціонарного розливання в виливниці, нагрівання вихідної заготовки до температури гарячого деформування $1250\div 1280^{\circ}\text{C}$, гідрозбив окалини, прошивання заготовки у стакан на горизонтальному гідравлічному

пресі зусиллям 20 МН, підігрів стакану в печі до температури $1250 \div 1280^{\circ}\text{C}$, прокатку стакану у гільзу на косовалковому стані-елонгаторі з прошиванням донця [10].

За останні роки (з 2012 року) відбувся перехід на використання в якості вихідної заготовки БЛЗ круглого поперечного перетину, що поліпшило якість гільз і труб по зовнішній поверхні. В той же час використання операції підігріву стаканів перед станом елонгатором призводить до додаткової витрати енергоресурсів (природного газу), що знижує конкурентоспроможність цієї технології в порівнянні з технологією прямого прошивання БЛЗ на косовалковому стані.

В зв'язку з використанням в якості вихідної заготовки БЛЗ круглого поперечного перетину на цілому ряді закордонних ТПА з пілігримовими станами перейшли на технологію прямого прошивання. Окрім економії природного газу ця технологія дозволяє підвищити точність гільз та труб по товщині стінки за рахунок зниження поперечної різностінності при прошивці суцільної БЛЗ у порівнянні з розкаткою стакану на стані-елонгаторі.

Для здійснення технології прямого прошивання БЛЗ в гільзу на косовалковому стані в умовах ТПА 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» необхідно здійснити заміну існуючого стана-елонгатора, який морально та фізично застарів за період своєї експлуатації (з 1968 року) на сучасний прошивний косовалковий стан з необхідними енергосиловими параметрами. Розрахунки, проведені Інститутом розвитку ПАТ «Інтерпайп-НТЗ» у 2008-2010 роках показав, що при здійсненні прямого прошивання з виводом із експлуатації прошивного преса і кільцевої нагрівальної печі можна буде забезпечити економію природного газу більше чим на 21 млн. грн. на рік, і знизити витрату метала за рахунок підвищення точності труб по товщині стінки на 15 кг/т, що дасть загальний економічний ефект 39 млн. грн. на рік. Розрахунковий період окупності інвестицій був оцінений приблизно в 2,75 роки при загальному обсязі інвестицій в 75 млн. грн.

В умовах, які склалися в теперішній час, використання існуючого стана-елонгатора єдиним правильним рішенням є використання гнучкої технології отримання гільз на ТПА 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб», коли для

отримання труб діаметром більше $\varnothing 273$ мм застосовується вихідна технологія (рис. 5, схема I), а для труб діаметром меншим $\varnothing 273$ мм - технологія прямого прошивання БЛЗ на стані-елонгаторі (рис. 5, схема II).

На рис. 5 наведений виробничий модуль для отримання гільз на ТПА 5–12” ПАТ «Інтерпайп Ніко Тюб» за гнучкою технологією. Для здійснення прямого прошивання на ТПА 5–12” необхідно, для підвищення точності гільз по товщині стінки, встановити на дільниці стана-елонгатора зацентрувальник заготовок та обладнати вихідну сторону стана надійним центрувальником стрижня оправки, і замінити упорно-регулюючий механізм більш потужним.

Гнучка технологія, окрім розглянутих вище двох основних схем отримання гільз, може також включати наступні схеми: пола БЛЗ – нагрів

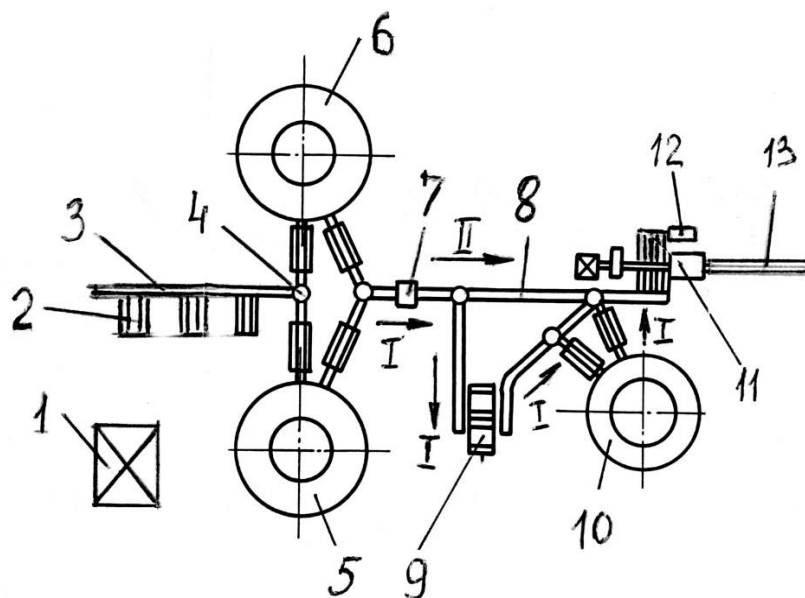


Рисунок 5 – Виробничий модуль для отримання гільз на ТПА 5–12”

ПАТ «Інтерпайп Ніко Тюб»:

- 1 – пила; 2 – приймальні решітки; 3 – рольганг для подачі заготовок;
- 4 – поворотний рольганг; 5 і 6 – нагрівальні печі; 7 – установка гідрозбиву окалини;
- 9 – гідравлічний прес зусиллям 20 МН ;
- 10 – підігрівальна піч; 11 – косовалковий стан-елонгатор;
- 12 – зацентрувальник; 13 – рольганг передачі гільзи до пілігрового стана

– розкатка на стані-елонгаторі; гранований злиток стаціонарного розливання – нагрів – наскрізна прошивка на пресі – підігрів – розкатка на стані-елонгаторі; пола заготовка – нагрів – розкатка на довгій оправці на стані-елонгаторі.

Це розширює технологічні можливості виробничого модуля (рис. 5) для отримання гільз і порожніх заготовок зі збільшенням D/S та підвищенням точності за рахунок зниження різностінності.

Для здійснення прямого прошивання при перемішені нагрітої заготовки від печі до стан-елонгатора по рольгангу довжиною близько 30 м відбувається втрата тепла метала внаслідок його охолодження на повітрі, що в основному залежить від часу перебування на повітрі.

Тому необхідно або збільшити швидкість рольганга, якщо це можливо без втрати надійності його роботи, або встановити теплові екрани, які широко застосовуються, наприклад, на широкоштабових станах, в тому числі і Україні.

Термомеханічна обробка труб [11, 12]

Незважаючи на те, що ще в 1963 році в ВНДТІ було запропонований прогресивний енергозберігаючий процес термічного оброблення гарячекатаних труб в процесі їх прокатки, в даний час в Україні цей процес не застосовується. Тому буде корисним досвід використання цієї технології на ряді закордонних підприємств.

В роботі [12] наведений технологічний процес термомеханічного оброблення і термічне відділення нафтогазових труб в лінії ТПА 140 Синарського трубного заводу, що забезпечує підвищення конструктивної міцності труб, також витрат на їх виробництво.

Гарячедеформовані труби з БЛЗ круглого поперечного перетину на ТПА 140 виробляються послідовно на: прошивному, автоматичному, обкатному, калібрувальному або редуційному станах. На ТПА 140 прокатуються нафтогазові труби діаметром від $\varnothing 89$ мм до $\varnothing 168$ мм зі сталей 20 і 09Г2С. Після прокатки труби в термічному відділенні піддають подвійному загартуванню.

При виборі схеми термомеханічного оброблення необхідно враховувати температурно-деформаційні умови, які забезпечують точність геометричних розмірів, стан зовнішньої внутрішньої поверхонь труби перед охолодженням, спосіб охолодження та розміщення обладнання охолодження, також повинні враховуватися легкість переходу від звичайного прокату до прокату з термомеханічним обробленням та навпаки. Для забезпечення рівномірного охолодження по периметру необхідно обертання труби або струй охолоджувача при переміщенні труб крізь зону охолодження, що зменшує поздовжнє поведіння.

Була застосована схема, яка передбачає прискорене охолодження труб після обкатного стану для феррито-перлитного розпаду з наступним індукційним підігрівом з перекристалізацією перед остаточним деформуванням на калібрувальному (редукційному) стані. Ця схема достатньо проста, так як вимагало тільки встановлення охолоджуючого пристрою за обкатними станами.

При розробці системи охолодження в процесі термомеханічної обробки в лінії ТПА 140 були використані технологічні переваги закалювання за обкатним станом: інтенсивне обертання труби валками стану в процесі її проходження через осередок деформації ($500 \div 700$ об/хв) і можливості суміщення обладнання для зовнішнього і внутрішнього охолодження зі знімним обладнанням стану.

Для зовнішнього охолодження труб за обкатним станом створено двохсекційний спреєр (рис. 6). З метою полегшення вивільнення труби з обкатного стану при аварійних зупинках спреєр виконаний рознімним: з двох половин, які рознімні по горизонтальній площині. Вода на охолодження подається в нижню порожнину, з якої по системі поєднаних отворів направляється в верхню. В якості сопел використовується система циліндричних отворів, які виконано во внутрішній стінці корпусу під кутом 45° в бік осередка деформації.

Спреєр зовнішнього охолодження закріплюється на місці центруючих проводок в перших стійках за обкатними станами.

Для запобігання потрапляння води в трубу крізь її передній кінець, який виходить з обкатного стана, воду на охолодження подають з регульованою затримкою в часі.

Додаткове внутрішнє охолодження труб з товщиною стінки більше 10 мм здійснюється спреєром, поєднаним зі стрижнем, утримуючим оправку. В передній частині стрижня на відстані 150 мм від торця на довжині 0,3 м рівномірно по периметру виконані отвори під кутом 45° в сторону протилежну руху труби. Для забезпечення стабільності процесу термомеханічного оброблення використана система автоматичного керування подачею води на охолодження по довжині труби.

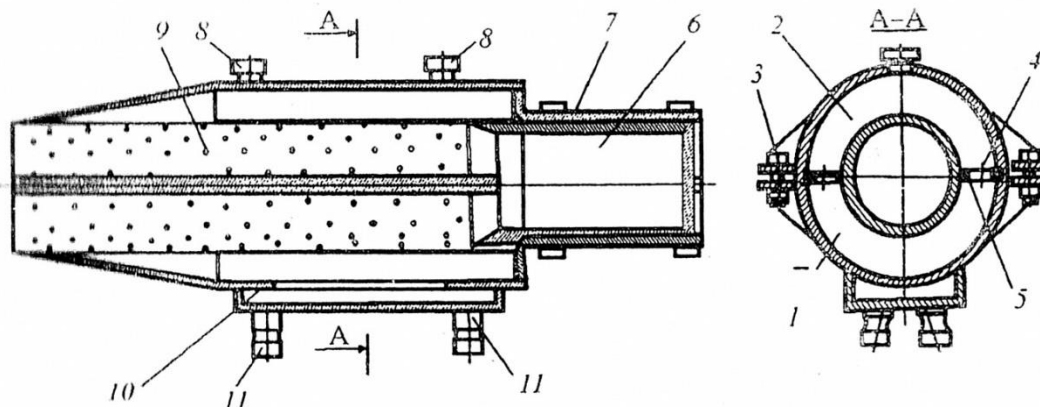


Рисунок 6 – Рознімний спреєр зовнішнього охолодження труб в лінії термомеханічного оброблення:

- 1, 2 – нижня і верхня половини спреєра; 3 – кріплення;
4 – система поєднаних отворів; 5 – ущільнення; 6 – запобіжна вставка;
7 – вузол кріплення спреєра в центруючій проводці; 8, 9 – очисні та соплові отвори;
10 – збірний колектор; 11 – трубопроводи подачі води

В роботі [12] наведений технологічний процес термомеханічного оброблення труб в лінії ТПА 80 Синарського трубного заводу. Технологічний процес включає прошивку БЛЗ круглого поперечного перерізу на прошивному стані, розкатку гільзи в трубу на довгій оправці на безперервному стані, індукційний підігрів, прокатку на редуційному (калібрувальному) стані.

Для підвищення рівномірності охолодження за рахунок зменшення заливання води в середину труби при транспортуванні її крізь лінію спреєрів розроблений спосіб прокатки труби зі зміщенням торцевих ділянок чорнової

труби і остаточного їх закриття на редуційному стані. Після прокатки на безперервному розкатному стані кінці чорнових труб деформують, створюючи ребра жорсткості (первинне ущільнення). При прокатці такої труби в редуційному стані відбувається додаткові зминання торців і остаточне закриття труби. Схема деформування торцевої ділянки наведена на рис. 7.

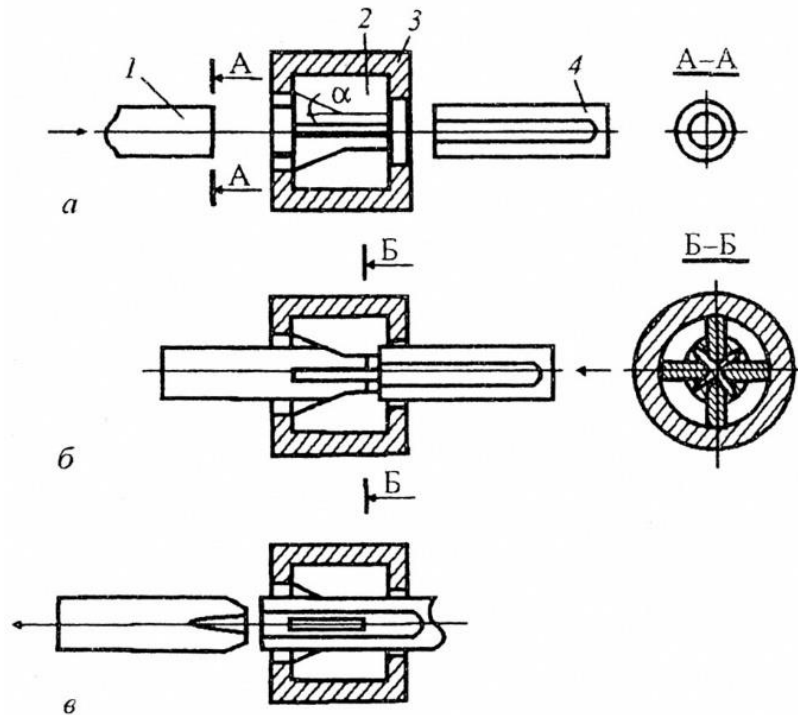


Рисунок 7 – Схема деформування торцевої ділянки. Взаємне розташування чорнової труби і деформуючого інструменту:

- а – вихідне; б – при деформуванні; в – по її закінченню;
- 1 – чорнова труба; 2 – деформуючі ребра; 3 – витискач;
- 4 – корпус деформуючого інструмента;
- А-А і Б-Б – торцеві ділянки до та після деформування

Для первинного ущільнення кінцевих ділянок труб в потоці стана без зниження його продуктивності розроблено пристрій (рис. 8), який монтується в стаціонарних упорах транспортуючих рольгангів. Інструмент деформування виконаний у вигляді кільцевої матриці 1 з похилими клинами 2, закріплений співвісно матриці штовхач 3 пов'язаний з силовим циліндром 5, жорстко закріпленому до корпусу 4. Передбачена також установка рознімної фіксуючої проводки. Ступінь первинного ущільнення регулюється швидкістю задавання

труби в демпфуючий пристрій. Для виключення потрапляння води в трубу додатково використано охолодження труб вбудованими, під кутом до осі переміщення труби, потоками зі спреєра.

Для охолодження труб за редуційним станом змонтована лінія прискореного регульованого охолодження, котра складається з дев'яти спреєрів з індивідуальним приводом, які обертаються, встановлених по три на окремих площадках. Спрейери розташовані в проміжках між транспортуючими роликами і мають можливість регулювання в горизонтальній і вертикальній площинах.

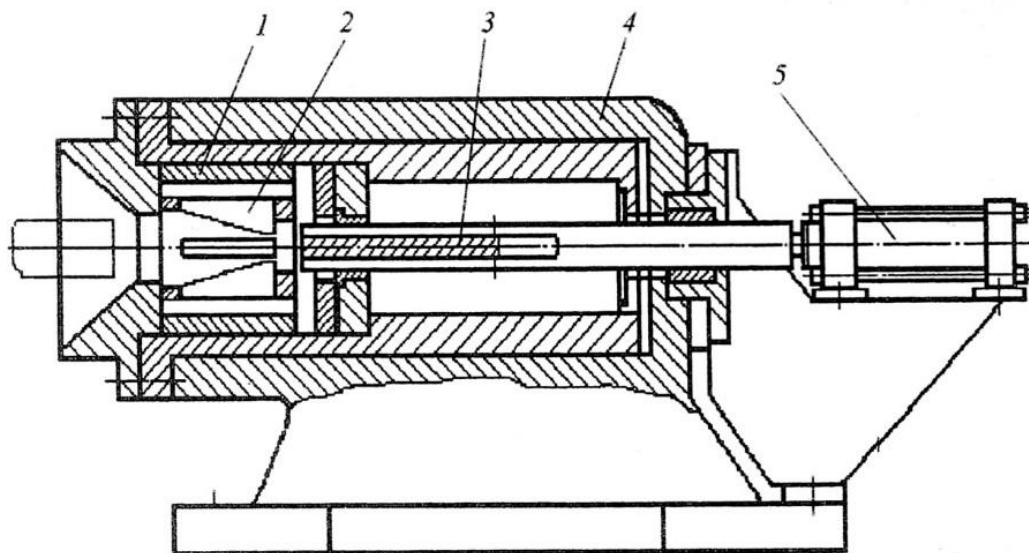


Рисунок 8 – пристрій для первинного ущільнення кінцевих ділянок труб

Транспортують труби в лінії охолодження по рольгангу з біконічних розрізних роликів (рис. 9), що зменшує підстигання нижнього периметра труби. За лінією охолодження встановлені спреєри-відсікачі, які видаляють потік води, що супроводжує трубу із лінії охолодження. Контроль температури труби в лінії охолодження здійснюється двома датчиками температури. Один встановлений після редуційного стану, другий – на виході труби з лінії охолодження.

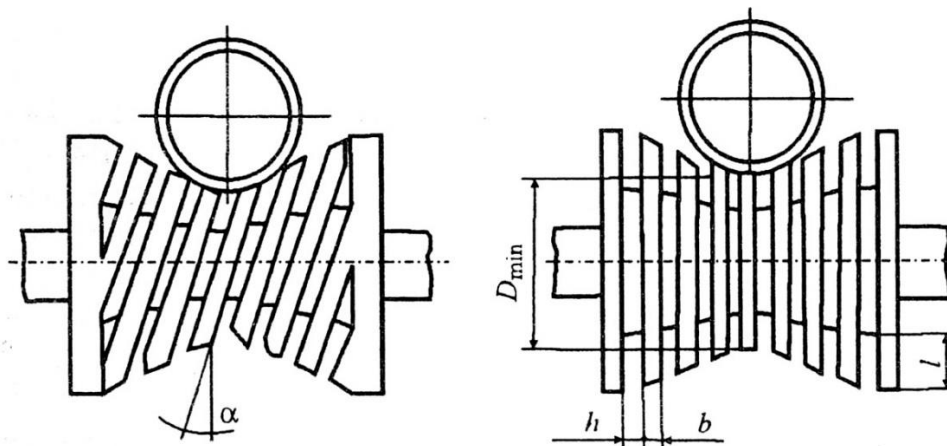


Рисунок 9 – Розрізний біконічний транспортуєчий ролик

В лінії термомеханічного оброблення здійснюється преривання охолодження водою, коли інтенсивне охолодження в продовж $0,2 \div 0,3$ с чергується з паузами $0,2 \div 0,3$ с, що дозволяє регулювати процес охолодження труб, змінюючи тривалість охолодження від $0,5$ с до $1,0$ с і швидкість охолодження від $15^\circ\text{C}/\text{с}$ до $50^\circ\text{C}/\text{с}$.

На рис. 10 представлена конструкція обертового водоповітряного спреєра лінії термомеханічного оброблення насосно-компресорних труб підвищених груп міцності. Швидкість охолодження в спреєрі регулюється співвідношенням води та повітря в водоповітряній суміші, що подається на охолодження. Загальну швидкість охолодження можна підвищити збільшуючи витрату води. Для зменшення (попередження) заливання води крізь торцеві ділянки труб запропонований спосіб охолодження двома зустрічними потоками під кутом до осі труби, яка переміщується. В момент проходження торця труби під зустрічним потоком витрата охолоджувача в ньому зменшується до нуля з одночасним збільшенням його в другому потоці до максимуму. Такий спосіб охолодження забезпечує отримання рівномірних властивостей кінців та тіла труби.

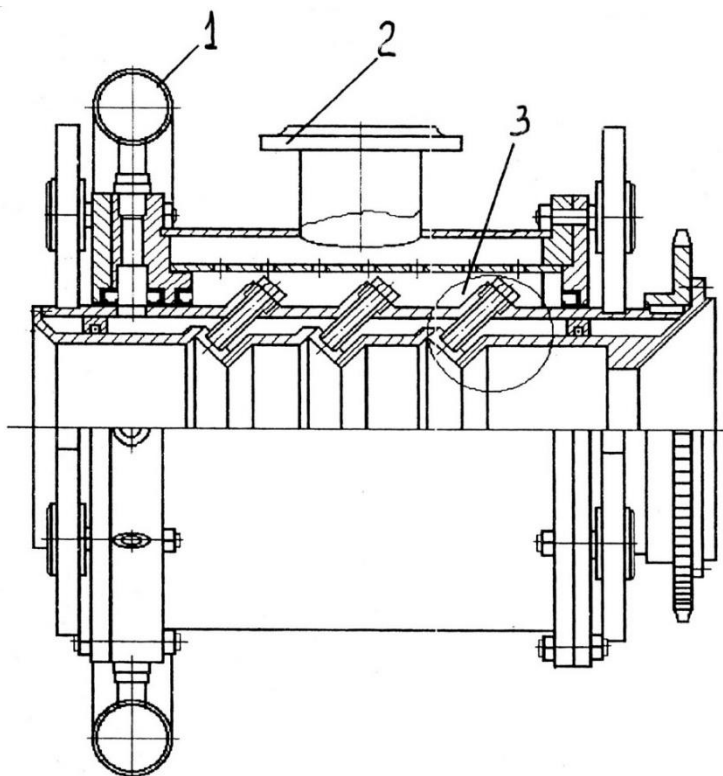


Рисунок 10 – Обертовий водоповітряний спреєр:
1, 2 – відповідно колектори підведення стисненого повітря і води;
3 – водоповітряна формунка

Це дає можливість керувати процесом розпаду аустеніта, отримав як характерну для перерваного закалювання неоднорідну по перетину структуру з поверхневим шаром відпущеного мартенситу, так і більш однорідну по товщині стінки труби.

Висновки

1. Зниження енерговитрат є важливим напрямком підвищення ефективності і конкурентоспроможності процесів виробництва гарячекатаних безшовних труб на агрегатах різного типу.

2. При виробництві проката і труб на комплексі «МБЛЗ – прокатний стан» основним напрямком зниження енерговитрат є гарячий посад заготовок (БЛЗ) в нагрівальні печі прокатного стану. Розглянуті можливості використання цієї технології на ПАТ «Інтерпайп Ніко Тьюб» в цехах з різними ТПА.

3. Розглянуті основні напрямки енергозбереження в нагрівальних і підігрівальних печах прокатних агрегатів. В розвитку конструкції нагрівальних печей революційне значення мав винахід і промислове впровадження регенеративних пальників.

4. Використання на ТПА 5–12” з пілігримовими станами ПАТ «Інтерпайп-НТЗ» прямого прошивання круглою БЛЗ на косовалковому стані дозволяє отримати економію природного газу за рахунок виключення з технології підігріву заготовки перед станом-елонгатором, а також підвищити точність гільз та труб по товщині стінки.

5. Термомеханічна обробка труб з прокатного нагріву забезпечує економію природного газу, однак до теперішнього часу не отримала широкого застосування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Стасовський Ю.М., Чухліб В.Л., Бояркін В.В. Ресурсозбереження та екологія в процесах обробки металів тиском : підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2013. 353 с.
2. Жучков С.М. Возможности сокращения энергозатрат при производстве сортового проката. Сталь. 2006. №7. С. 47-49.
3. Лінія для виробництва гарячекатаних безшовних труб : пат. 79896 Україна : МПК В21В23/00. № u201210700 ; заявл. 12.09.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9.
4. Лінія для виробництва гарячекатаних безшовних труб : пат. 111054 Україна : МПК В21В23/00. № u201605235 ; заявл. 13.05.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
5. Энергосберегающая технология прокатки труб на ТПА 5-12” ПАО «Интерпайп НТЗ» с использованием горячего посада непрерывнолитой заготовки ООО «Интерпайп Сталь» / В.Ф.Балакин, М.В.Губинский и др. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2017. № 7. С. 34-42.
6. Upgrading of existing bar mill in Chonburi for SBQ production by retrofitting a high-performance abrasive cut-off machine / A.K. Chowdhary, V. Akarasanon et all. SEAISI Quarterly Journal. 2015.Vol. 44. № 2. P. 17-22.
7. Освоение проката сплошной заготовки на меньшие диаметры при производстве труб из них в условиях ТПА 50-200 ПАО «Интерпайп НТЗ» / В.Ф.Балакин, А.Н.Степаненко и др. Черная металлургия : Бюллетень НТИ «Черметинформация». 2015. Вып. 6. С. 44-48.
8. Губинский В.И. Современные способы энергосбережения в нагревательных печах металлургии и машиностроения. Сучасні проблеми металургії. 2001. Том 3. С. 311-315.
9. Губинский В.И. металлургическая теплотехника на пороге столетий. Сучасні проблеми металургії. 1999. Том 1. С. 197-207.
10. Развитие производства труб на ПАО «Интерпайп НТЗ» / В.Ф.Балакиг, Ю.Д.Угрюмов и др. Системні технології. 2018. Том 4. № 117. С. 108-112.
11. Упрочняющая термическая и термомеханическая обработка труб / В.М.Янковский, Е.А.Соломадина и др. Черная металлургия : Бюллетень НТИ «Черметинформация». 1985. Вып. 16. С. 11-28.
12. Марченко Л.Г., Выбойщиков М.А. Термомеханическое упрочнение труб. – М : Интермет-Инжиниринг, 2006. 240 с.

REFERENCES

1. Stasovskiy Yu.M., Chukhlib V.L., Boiarkin V.V. Resursozberezhennia ta ekolohiia v protsesakh obrobky metaliv tyskom : pidruchnyk. Dnipropetrovsk : Porohy, 2013. 353 s.
2. Zhuchkov S.M. Vozmozhnosti sokrasheniya energozatrat pri proizvodstve sortovogo prokata. Stal. 2006. №7. S. 47-49.
3. Liniia dlia vyrobnytstva hariachekatanykh bezshovnykh trub : pat. 79896 Ukraina : MPK V21V23/00. № u201210700 ; zaiavl. 12.09.2012 ; opubl. 13.05.2013, Biul. № 9.
4. Liniia dlia vyrobnytstva hariachekatanykh bezshovnykh trub : pat. 111054 Ukraina : MPK V21V23/00. № u201605235 ; zaiavl. 13.05.2016 ; opubl. 25.10.2016, Biul. № 20.
5. Energoberegayushaya tehnologiya prokatki trub na TPA 5-12” PAO «Interpajp NTZ» s ispolzovaniem goryachego posada nepreryvnolitoj zagotovki OOO «Interpajp Stal» / V.F.Balakin, M.V.Gubinskij i dr. Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. 2017. № 7. S. 34-42.
6. Upgrading of existing bar mill in Chonburi for SBQ production by retrofitting a high-performance abrasive cut-off machine / A.K. Chowdhary, V. Akarasanon et al. SEAISI Quarterly Journal. 2015. Vol. 44. № 2. P. 17-22.
7. Osvoenie prokata sploshnoj zagotovki na menshie diametry pri proizvodstve trub iz nih v usloviyah TPA 50-200 PAO «Interpajp NTZ» / V.F.Balakin, A.N.Stepanenko i dr. Chernaya metallurgiya : Byulleten NTI «Chermetinformaciya». 2015. Vyp. 6. S. 44-48.
8. Gubinskij V.I. Sovremennye sposoby energosberezheniya v nagrevatelnykh pechakh metallurgii i mashinostroeniya. Suchasni problemi metallurgiyi. 2001. Tom 3. S. 311-315.
9. Gubinskij V.I. metallurgicheskaya teplotekhnika na poroge stoletij. Suchasni problemi metallurgiyi. 1999. Tom 1. S. 197-207.
10. Razvitie proizvodstva trub na PAO «Interpajp NTZ» / V.F.Balakig, Yu.D.Ugryumov i dr. Sistemni tehnologiyi. 2018. Tom 4. № 117. S. 108-112.
11. Uprochnyayushaya termicheskaya i termomehanicheskaya obrabotka trub / V.M.Yankovskij, E.A.Solomadina i dr. Chernaya metallurgiya : Byulleten NTI «Chermetinformaciya». 1985. Vyp. 16. S. 11-28.
12. Marchenko L.G., Vybojshikov M.A. Termomehanicheskoe uprochnenie trub. – M : Intermet-Inzhiniring, 2006. 240 s.

Received 15.04.2025.

Accepted 21.05.2025.

UDC 621.771:621.774:621.73

Mykhailo Hubynskiy, Yurii Uhriumov, Oleksii Gubinskyy,
Ihor Mazur, Dmytro Uhriumov

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN PIPE PRODUCTION

Abstract. *Ukrainian metallurgical enterprises with a full cycle have fuel costs at the level of 1.4÷1.6 tons of conventional fuel per ton of produced products, while the share of energy costs in the cost of rolled products is approximately 40%. At the same time, at enterprises in Japan and the USA, these costs are 0.7÷1.0 tons of conventional fuel per*

ton of product. One of the current problems of Ukraine is the shortage of primary energy carriers, in particular natural gas, which limits the energy consumption of enterprises. The problem is exacerbated by the gradual increase in the cost of energy carriers (natural gas, electricity), as well as other reasons that reduce the competitiveness of Ukrainian metallurgical enterprises.

The purpose of this work is to consider known technical solutions for energy saving in rolling production, mainly in the production of hot-rolled seamless pipes, for further improvement of pipe production.

Based on the analysis of energy saving methods in the production of hot-rolled pipes, the main direction of energy saving in rolling production is noted - this is the construction of rolling mills near the continuous casting machine of the billet.

This work considers such areas of energy consumption reduction as: hot rolling of billets in the heating furnaces of pipe rolling units; saving natural gas during heating and heat treatment; direct piercing of continuously cast billets on the slanting roll mill of the pilgrim unit; thermomechanical processing of pipes with rolling heating.

The possibilities of hot-rolling of continuously cast billets entering the pipe rolling shop with a 5-12” pilgrim mill of PJSC “Interpipe Niko Tube” were analyzed. A new technology of using the heat of a pre-deformed billet for further rolling of pipes on the same mill was proposed on the pipe rolling shop 200 of PJSC “Interpipe Niko Tube”. The use of the technology of hot-rolling of continuously cast billets is also possible in other shops of PJSC “Interpipe Niko Tube”. To improve the organization of work on the development of the technology of hot-rolling of billets, it is possible to organize a metal preparation shop with wide technological capabilities. The introduction of such technologies as direct piercing of billets on the cross-rolling mill of the pipe rolling shop with a 5-12” pilgrim mill, thermomechanical processing of pipes with rolling heating on various pipe rolling shops will contribute to the reduction of energy consumption.

Keywords: energy-saving technology, natural gas, electricity, hot-rolled pipe, pipe rolling unit, direct piercing, hot-rolling, heating furnace, thermomechanical processing.

Губинський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-3770-4397. E-mail: gubinm58@gmail.com.

Угрюмов Юрій Дмитрович, кандидат технічних наук, провідний інженер, Український інститут по проектуванню металургійних заводів. E-mail: ugriumov1946@gmail.com.

Губінський Олексій Володимирович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0009-0004-3514-0377. E-mail: gubin@inbox.lt.

Мазур Ігор Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра галузевого машинобудування, Український державний університет науки і технологій. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Угрюмов Дмитро Юрійович, технічний директор, ТОВ «Морська Сюрвейерська Компанія».

Hubynskyi Mykhailo, doctor of technical sciences, professor, department of energy systems and energy management, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0000-0003-3770-4397. E-mail: gubinm58@gmail.com.

Uhriumov Yurii, candidate of technical sciences, senior engineer, Ukrainian institute for designing iron and steel works. E-mail: ugriumov1946@gmail.com.

Gubinsky Oleksii, candidate of technical sciences, senior research fellow, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0009-0004-3514-0377. E-mail: gubin@inbox.lt.

Mazur Ihor, candidate of technical sciences, associate professor, department of industrial mechanical engineering, Ukrainian state university of science and technologies. ORCID ID: 0000-0003-2177-7110. E-mail: i.a.mazur@ust.edu.ua.

Uhriumov Dmytro, technical director, LLC «Marine Survey Company». E-mail: ugriumov1946@gmail.com.

<i>Галєнкова Б.О., Єфанов В.С., Завгородній О.В., Бронецька В.І., Шевченко В.Г.</i> Комплексний вплив модифікування на властивості γ -сплаву на основі алюмініду титану <i>Halienkova O., Yefanov V., Zavgorodny O., Bronetska V., Shevchenko V.</i> Complex effect of modification on the properties of γ -alloy based on titanium aluminide	3
<i>Аджамський С. В., Балаханова Т.В., Барановська О. Є., Подольський Р.В., Бадюк С.І.</i> Дослідження особливостей формування дефекту KEY HOLE в залежності від технологічних параметрів виготовлення за LPBF-технологією <i>Adzhamsky S.V., Balakhanova T.V., Baranovskaya O. E., Podolsky R.V., Baduk S.I.</i> Study of the features of key hole defect formation depending on the technological parameters of manufacturing using lpbp technology	12
<i>Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Подольський Р.В., О.А. Сафронова</i> Порівняльний аналіз математичних моделей визначення температур критичних точок економнолегованих сталей <i>Babachenko O.I., Kononenko H.A., Kimstach T.V., Podolskyi R.V., Safronova O.A.</i> Comparative analysis of mathematical models for determining critical point temperatures of economically alloyed steels	24
<i>Ніколенко А., Нежурін В., Куваєв В., Веровкін О., Башко В., Кописов В.,</i> <i>Коліаденко О.</i> Improving the efficiency of the ferroalloy smelting process in electric arc furnaces by improving control and management of technological modes <i>Ніколенко А., Нежурін В., Куваєв В., Веровкін О., Башко В., Кописов В.,</i> <i>Коляденко О.</i> Підвищення ефективності процесу виплавки феросплавів в електродугових печах шляхом вдосконалення контролю та керування технологічними режимами	44
<i>Трипутен М., Кузнецов В., Веровкін О., Івлєв В.</i> Adaptation of a predicate model in control problems of nonstationary static objects <i>Трипутень М., Кузнецов В., Веровкін О., Івлєв В.</i> Адаптація предикатної моделі в задачах керування нестационарними статичними об'єктами	71

Tryputen M., Kuznetsov V., Verovkin O., Koliadenko O.

Increasing the reliability of simulation of asynchronous motor operation based on an adaptive approach

Трипутень М., Кузнецов В., Верьовкін О., Коляденко О.

Підвищення надійності моделювання роботи асинхронного двигуна на основі адаптивного підходу 92

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Мінай О.М.

Комплексне дослідження газодинамічних особливостей струменів, що витікають з сопел циліндричної конструкції, для умов використання в кисневих конвертерах

Golub T.S., Molchanov L.S., Minai O.M.

Comprehensive study of gasdynamic features of jets outflow from nozzles of cylindrical design for oxygen converters conditions 114

Добряк В.Д., Угрюмов Ю.Д., Стасевський С.Л., Мазур І.А., Угрюмов Д.Ю.

Удосконалення металозберігаючої технології прокатки труб на пілігримовому стані

Dobriak V.D., Uhriumov Yu.D., Stasevskyi S.L., Mazur I.A., Uhriumov D.Yu.

Improvement of metal-saving technology of pipe rolling on a pilgrimm mill 132

Єгоров О. П., Михайловський М. В., Рибальченко М. О.

Системний аналіз інваріантності сепаратних контурів керування швидкісним режимом прокатки з петлею на неперервних дрібносортих станах

Yegorov O. P., Mykhailovskyi M. V., Rybalchenko M. O.

Systematic analysis of invariance of separate control circuits of high-speed rolling with a loop on continuous small section mill 152

Кімстач Т.В., Узлов К.І.

Синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn

Kimstach T.V., Uzlov K.I.

Alloying elements synergic and selective effect on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn SYSTEM BRONZE 162

<i>Фролов Я.В., Бобух О.С., Бояркін В.В., Коноводов Д.В., Кузьміна О.М.</i> Комп'ютерне моделювання і експериментальна прокатка-з'єднання кірігами-композитів <i>Frolov Y.V., Bobukh O.S., Boiarkin V.V., Konovodov D.V., Kuzmina O.M.</i> Fem simulation and experimental procedure for roll bonding of kirigami-type composites	184
<i>Самохвалов С.Є., Пінтюк В.П., Греков</i> Вплив кількості добавки на тепловий стан металевої ванни у ківші <i>Samokhvalov S.E., Pityuk V. P., Grekov S. V.</i> Influence of the quantity of the additive on the thermal condition of the metal bath in the ladle.....	21101
<i>Коваленко І., Радченко В., Осаул О., Єрофєєва А., Піліпенко В., Прихно В.</i> Аналіз показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств <i>Kovalenko I., Radchenko V., Osaul O., Yerofieieva A., Pilipenko V., Prykhno V.</i> Analysis of power quality indicators in industrial power networks	213
<i>Kovalenko V., Kovalenko I., Miniailo N., Shevchuk L., Vasetskyi V., Bashko V., Kopysov V.</i> General principles of energy consumption in the metallurgical industry <i>Коваленко В., Коваленко І., Міняйло Н., Шевчук Л., Васецький В., Башко В., Кописов В.</i> Загальні засади енергоспоживання в металургійній промисловості	229
<i>Kovalenko V., Miniailo N., Barishenko O., Shevchuk L., Vasetskyi V., Bashko V., Kopysov V.</i> Energy efficiency in the metallurgical sector: concept and evaluation metrics <i>Коваленко В., Міняйло Н., Барішенко О., Шевчук Л., Васецький В., Башко В., Кописов В.</i> Поняття енергоефективності в металургійній промисловості та показники її оцінки.....	248
<i>Губинський М.В., Угрюмов Ю.Д., Губінський О.В., Мазур І.А., Угрюмов Д.Ю.</i> Питання зниження витрати металу при виробництві гарячекатаних труб <i>Hubynskyi M.V., Uhriumov Yu.D., Gubinskyu O.V., Mazur I.A., Uhriumov D.Yu.</i> The issue of reducing metal consumption in the production of hot-rolled pipes.....	271

Kuzenkov O. O.

Algorithms and Methods in Dynamic Problems of Optimal Placement of Fire Groups

Кузенков О.О.

Алгоритми та методи в динамічних задачах оптимального розміщення
вогневих груп..... 294

Kovalenko Viktor, Rybka Kostiantyn, Nikitin Yevhen, Koliadenko Oleksandr, Bashko

Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Pilipenko Viacheslav

Calculation of the optimal hydropower utilization system: a case study of a
metallurgical enterprise

Коваленко В. Л., Рибка Костянтин, Нікітін Євген, Коляденко Олександр,

Володимир Башко, Кописов Владислав

Розрахунок оптимальної системи гідроенергетичної утилізації: приклад
металургійного підприємства 310

Bondar O., Siversky S., Gurin Y., Oleksandr K., Volodymyr B.,

Vladyslav K., Viacheslav P.

Modeling of electromagnetic processes in a nonlinear circuit of an electrolyzer for
pulse deposition of metal coatings

Бондар О., Сіверський С., Гурін Є., Коляденко О., Башко В., Кописов В., Піліпенко В.

Моделювання електромагнітних процесів у нелінійному колі електролізера
імпульсного осадження металевих покриттів.....329

Hubynskiy M.V., Uhriymov Yu.D., Gubinsky O.V., Mazur I.A., Uhriymov D.Yu.

Energy-saving technologies in pipe production

М.В. Губинський, Ю.Д. Угрюмов, О.В. Губінський, І.А. Мазур, Д.Ю. Угрюмов

Енергозберігаючі технології при виробництві труб.....348

УДК 669.295:669.046.516

Галенкова О.Б., Єфанов В.С., Завгородній О.В., Бронецька В.І., Шевченко В.Г. **Комплексний вплив модифікування на властивості γ-сплаву на основі алюмініду титану.** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.3-12

Методом планування повнофакторного експерименту досліджено вплив модифікуючих елементів Y, Re та B на властивості сплаву на основі алюмініду титану системи Ti-28Al-7Nb-2Mo. Отримано регресійні рівняння, що дають можливість розрахувати хімічний склад сплаву у відповідності до заданого рівня властивостей матеріалу авіаційного виробу.

Бібл.12, іл.1, табл.3.

UDC 669.295:669.046.516

Halienkova O., Yefanov V., Zavgorodny O., Bronetska V., Shevchenko V. **Complex effect of modification on the properties of γ-alloy based on titanium aluminide** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P. 3– 12.

The effect of modifying elements Y, Re and B on the properties of an alloy based on titanium aluminide of the Ti-28Al-7Nb-2Mo system was investigated using the full-factorial experimental design method. Regression equations were obtained that allow calculating the chemical composition of the alloy in accordance with the given level of material properties of the aviation product.

Ref.12, fig. 1, table 3.

УДК 621.763. 623.78.632.64

Аджамський С.В., Балаханова Т.В., Барановська О. Є., Подольський Р.В., Бадюк С.І. **Дослідження особливостей формування дефекту Key Hole в залежності від технологічних параметрів виготовлення за LPBF-технологією** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.13-23

У представленому дослідженні розглянуто вплив параметрів лазерного променя в процесі LPBF на морфологію ванни розплаву та пористість у зразках із нержавіючої сталі 316L. Особливу увагу приділено дефектам типу «Key Hole», які є наслідком надмірної щільності енергії, що перевищує критичне значення (~0,8). Встановлено, що при швидкості сканування понад 600 мм/с такі дефекти практично не виникають. Крім того, показано, що критичне значення параметра щільності енергії не є сталим і залежить від комплексу інших технологічних умов, зокрема діаметра променя, швидкості сканування та властивостей порошку.

Бібл. 13, іл. 4.

UDC 621.763. 623.78.632.64

Adzhamsky S.V., Balakhanova T.V., Baranovskaya O. E., Podolsky R.V., Baduk S.I. **Study of the features of Key Hole defect formation depending on the technological parameters of manufacturing using LPBF technology** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P. 3– 23.

The present study examines the influence of laser beam parameters in the LPBF process on the morphology of the melt pool and porosity in 316L stainless steel samples. Particular attention is paid to “Key Hole” type defects, which are a consequence of excessive energy density exceeding a critical value (~0.8). It was found that at a scanning speed of more than 600 mm/s, such defects practically do not occur. In addition, it is shown that the critical value of the energy density parameter is not constant and depends on a set of other technological conditions, in particular, the beam diameter, scanning speed and powder properties.

Ref. 12, fig. 4.

УДК 629.58. 633.79.623.84

Бабаченко О.І., Кононенко Г.А., Кімстач Т.В., Подольський Р.В., Сафронова О.А. **Порівняльний аналіз математичних моделей визначення температур критичних точок економнолегованих сталей** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.24-43

Приведено результати порівняльного аналізу математичних моделей, що застосовуються для прогнозування температур критичних точок фазових перетворень в економнолегованих конструкційних сталях. Проаналізовано вплив легуючих елементів на значення критичних температур, а також розглянуто умови застосування різних математичних моделей. Порівняння розрахункових і експериментальних значень дозволило виявити моделі, що забезпечують найменші похибки та можуть бути рекомендовані для використання в інженерній практиці при проектуванні режимів термічної обробки. Отримані результати підтверджують перспективність застосування математичних моделей для розрахунку температур фазових перетворень сталей з варіативним легуванням.

Бібл.19, іл. 4, табл.8

UDC629.58. 633.79.623.84

Babachenko O.I., Kononenko H.A., Kimstach T.V., Podolskyi R.V., Safronova O.A. **Comparative analysis of mathematical models for determining the temperatures of critical points of economically alloyed steels** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.24– 43.

The results of a comparative analysis of mathematical models used to predict the temperatures of critical points of phase transformations in economically alloyed structural steels are presented. The influence of alloying elements on the values of critical temperatures is analyzed, and the conditions for the application of various mathematical models are also considered. Comparison of calculated and experimental values allowed us to identify models that provide the smallest errors and can be recommended for use in engineering practice when designing heat treatment regimes. The results obtained confirm the prospects of using mathematical models to calculate the temperatures of phase transformations of steels with variable alloying.

Ref. 19, fig. 4, table 8

УДК 669.184.6:621.373.5

Ніколенко Анатолій, Нежурін Вадим, Куваєв Віктор, Верьовкін Олександр, Володимир Башко, Кописов Владислав, Коляденко Олександр. **Підвищення ефективності процесу виплавки феросплавів в електродугових печах шляхом вдосконалення контролю та керування технологічними режимами** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.44-70

У статті розглянуто проблеми підвищення ефективності виплавки феросплавів в електродугових печах шляхом удосконалення контролю та управління технологічними режимами. Світові тенденції, що спостерігаються останніми роками, такі як збільшення виробництва високоякісних легованих сталей та напівпровідникової продукції, визначили стрімке зростання попиту на феросплави та кристалічний кремній. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають питання інтенсифікації технологічних процесів та оптимізації енергетичних витрат у феросплавних електропечах. Процес виплавки феросплавів базується на карботермічному способі відновлення металів із їх оксидів, що протікає при високих температурах із поглинанням значної кількості тепла. Попри те, що механізм та кінетика основних відновлювальних реакцій добре вивчені, у промислових умовах техніко-економічні показники процесу істотно поступаються лабораторним. Ступінь вилучення цільових елементів знижується до 75–80%, а витрата електроенергії перевищує теоретично необхідну у 1,5–2 рази.

Бібл. 29

UDC 669.184.6:621.373.5

Nikolenko Anatolii, Nezhurin Vadym, Kuvaev Viktor, Verovkin Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Koliadenko Oleksandr. **Improving the efficiency of the ferroalloy smelting process in electric arc furnaces by improving control and management of technological modes** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.44– 70.

The article addresses the issues of improving the efficiency of ferroalloy smelting in electric arc furnaces by enhancing the control and management of technological regimes. Recent global trends, such as the increase in the production of high-quality alloy steels and semiconductor products, have led to a sharp rise in the demand for ferroalloys and crystalline silicon. In this context, the intensification of technological processes and the optimization of energy consumption in ferroalloy electric furnaces have become particularly relevant. The ferroalloy smelting process is based on the carbothermic reduction of metals from their oxides, occurring at high temperatures with significant heat absorption. Although the mechanisms and kinetics of the main reduction reactions have been well studied, in industrial conditions, the techno-economic indicators of the process are significantly inferior to those achieved in laboratory settings. The extraction rate of target elements decreases to 75–80%, and the energy consumption exceeds the theoretically necessary amount by 1.5–2 times.

Ref. 29

УДК 681.3.06

Трипутень Микола, Кузнецов Віталій, Верьовкін Олександр, Івлєв Віталій. **Адаптація предикатної моделі в задачах керування нестационарними статичними об'єктами** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.71-91

У даній роботі розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення ефективності управління статичними та квазістатичними технологічними об'єктами в умовах їх нестационарної поведінки та мінливості зовнішніх впливів. Особлива увага приділяється застосуванню предикатних моделей, які дозволяють формалізовано описувати різноманітні технологічні ситуації, стани та взаємозв'язки параметрів об'єкта управління за допомогою логічних конструкцій. Такі моделі є гнучким інструментом для представлення знань про об'єкт і забезпечують можливість адаптації до зміни параметрів у процесі експлуатації. Запропоновано новий підхід до побудови та адаптації предикатної моделі на основі алгоритму мінімізації опису образів технологічних ситуацій. Його сутність полягає у виявленні та видаленні з моделі інформації, що втратила актуальність, а також у спрощенні логічної структури моделі без втрати якості її опису. Важливою особливістю даного підходу є використання властивості інваріантності кількості параметрів, що визначають гіперпаралелепіпед у факторному просторі незалежно від його розмірів. Це дозволяє суттєво зменшити кількість предикатів у моделі та знизити складність обчислювальних процедур у системах автоматизованого управління. Методика побудови моделі передбачає розбиття факторного простору на елементарні підобласті - гіперпаралелепіпеди, які дозволяють гнучко формувати опис різних ситуацій. При цьому граничні підобласті, що мають найменші розміри, визначають точність роздільної функції. Об'єднання таких підобластей у напрямку осей ознак дозволяє оптимізувати структуру моделі та спростити процес прийняття рішень в системах управління.

Бібл.18, іл. 2

UDC 681.3.06

Tryputen Mykola, Kuznetsov Vitalii, Verovkin Oleksandr, Ivliev Vitalii. **Adaptation of a predicate model in control problems of nonstationary static objects** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.71– 91.

When controlling static objects at the optimization level, pattern recognition methods are used that allow partitioning the factor space into elementary subdomains in the form of n-dimensional hyperparallelepipeds. One of

the main elements of the control structure for this approach to control is the adaptation algorithm, that makes it possible to refine the description of a static object under nonstationarity conditions. Repeated use of the adaptation algorithm to refine the model leads to an unjustified complication of its logical structure and the accumulation of information that has lost its relevance. The paper proposes a method for minimizing the description of images of technological situations, that makes it possible to overcome the indicated disadvantages. The method is based on the property of invariance of the number of parameters defining the hyperparallelepiped to the size of the described area in the factor space. This made it possible to identify significant boundary sub-areas in the description of the image of technological situations and, by their subsequent combination in the direction of the feature axes, to select a description with a minimum number of sub-areas. When performing these operations, “outdated” information is removed and the logical structure of a static control object is simplified as much as possible. The paper shows the possibility of implementing an algorithm for minimizing the description of images on the basis of α -algebra, that makes it possible to integrate its control structures using relational data models. The effectiveness of the proposed algorithm is confirmed by computational experiments in the control of the process of lump crushing for the conditions of a mining and processing plant.

Ref. 18, fig. 2

УДК 681.3.06

Трипутень Микола, Кузнецов Віталій, Верьовкін Олександр, Коляденко Олександр. **Підвищення надійності моделювання роботи асинхронного двигуна на основі адаптивного підходу** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.92-113

Дослідження присвячене підвищенню надійності моделювання роботи асинхронних двигунів під час розв'язання техніко-економічних завдань, пов'язаних із вибором систем захисту електроприводів, що працюють у промислових електричних мережах зі зниженою якістю електроенергії. Наявність напругових асиметрій, гармонічних спотворень та інших проблем якості електроенергії в цехових мережах істотно впливає на ефективність роботи і тривалість служби асинхронних двигунів, збільшуючи втрати енергії та витрати на технічне обслуговування. У статті запропоновано енергетико-економічну модель, яка дозволяє проводити обчислювальні експерименти з метою визначення оптимальних технічних рішень для поліпшення якості енергопостачання. Ключовим елементом моделі є система генерації та контролю параметрів лінійних напруг, яка забезпечує відповідність змодельованих сигналів їх статистичним закономірностям, що спостерігаються у реальних умовах роботи промислових підприємств.

Бібл. 27, іл. 4, табл. 2

UDC 681.3.06

Tryputen Mykola, Kuznetsov Vitalii, Verovkin Oleksandr, Koliadenko Oleksandr. **Increasing the reliability of simulation of asynchronous motor operation based on an adaptive approach** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.92– 113.

This research focuses on improving the reliability of simulating the operation of induction motors when solving technical and economic problems related to the selection of protection systems for electric drives operating in industrial power networks with poor power quality. The presence of voltage asymmetry, harmonic distortions, and other power quality issues in workshop networks significantly affects the performance and service life of induction motors, increasing energy losses and maintenance costs. The article proposes a power and economic model that allows conducting computational experiments to determine the optimal solution for improving power supply quality. A key element of the model is the system for generating and controlling linear voltage parameters, which ensures compliance of the simulated signals with their statistical regularities observed in real industrial conditions.

Ref. 27, fig. 4, table 2

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

Голуб Т.С., Молчанов Л.С., Мінай О.М. **Комплексне дослідження газодинамічних особливостей струменів, що витікають з сопел циліндричної конструкції, для умов використання в кисневих конвертерах** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.114-131

Киснево-конверторний процес є єдиним конкурентоспроможним лідером з виробництва рідкої сталі. Це, насамперед, зумовлено наявними різними типами продувних пристроїв, які виконують за ходом виплавки різноманітні функції та дають змогу оперативно підлаштовуватися під змінні технологічні умови. Основними типами сопел для верхніх продувних пристроїв є сопла Лавала, які використовуються для подачі основного кисневого потоку, та циліндричні сопла, які частіше використовують для допалювання відхідних газів. Представлені результати різнопланового дослідження особливостей витікання газового струменя з циліндричного сопла, які були проведені методами тіньової зйомки при витіканні газового потоку у вільне повітряне середовище та у модельну рідину – воду, та методами математичного моделювання для з'ясування раціональних меж їх використання у конструкції верхніх продувних фурм кисневого конвертера. За результатами досліджень відповідно до промислових технологічних умов використання сопел, встановлено, що при висоті розташування циліндричних сопел на рівні 40 калібрів від поверхні спокійної ванни високі показники енергії продувного газу та відповідно швидкостей газового потоку можуть бути досягнуті при подачі продувного газу з надлишковим тиском не менше 300 кПа. При цьому можливість проникнення у реальний шлако-металевий розплав за таких умов (при екстраполяції розрахунків на 60 кг лабораторну модель кисневого конвертера) складає на рівні 56 – 65 % висоти шлакового розплаву. Відмічено, що для збільшення проникної здатності газового струменя, що витікає з циліндричного сопла, необхідно зменшити висоту розміщення продувного пристрою на 25%відн.

Бібл. 18, іл. 8

УДК 669.184.244.66:669.184.235.083.133

Golub T.S., Molchanov L.S., Minai O.M. **Comprehensive study of gasdynamic features of jets outflow from nozzles of cylindrical design for oxygen converters conditions** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.114– 131.

The oxygen converter process is the only competitive leader in the production of liquid steel. This is primarily due to the available different types of blowing devices that perform various functions during smelting and allow for rapid adaptation to changing technological conditions. The main types of nozzles for top blowing devices are Laval nozzles, which are used to supply the main oxygen flow, and cylindrical nozzles, which are more often used for postcombustion of exhaust gases. The results of a multifaceted study of the features of the gas jet outflow from the cylindrical nozzle are presented to clarify the rational limits of their use in the design of the top blown lances of an oxygen converter. It was conducted by shadow shooting methods when the gas stream flows into the free air environment and into a model liquid - water, and by mathematical modeling methods. In accordance with the industrial technological conditions of using nozzles, it was established that when the height of the cylindrical nozzles was 40 calibers from the surface of the calm bath, high indicators of the energy of the blowout gas and, accordingly, the gas flow velocities were achieved when the blowing gas was supplied with an excess pressure of at least 300 kPa. At the same time, the possibility of penetration into a real slag-metal melt under such conditions (when extrapolating calculations to a 60 kg laboratory model of an oxygen converter) was at the level of 56 - 65% of the height of the slag melt. It was noted that to increase the permeability of the gas jet flowing from the cylindrical nozzle, it is necessary to reduce the lance height by 25%relative.

Ref. 18, fig. 8

УДК 621.774.3

Добряк В.Д., Угрюмов Ю.Д., Стасевський С.Л., Мазур І.А., Угрюмов Д.Ю. **Удосконалення металозберігаючої технології прокатки труб на пілігримовому стані** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.132-151

Розглянуті особливості і перспективи розвитку процесу розклатки пілігримової головки на вільній ділянці дорна. Основною проблемою цього процесу є зміщення ділянки по дорну в напрямку обертання валків пілігримового стану. На основі теорії пружно-пластичного удару пілігримової головки і валків стану розраховані після ударні швидкості і переміщення труб для реальних умов пілігримової прокатки. Розглянуті два способи зменшення переміщення пілігримової головки при її взаємодії з валками: зниження кутової швидкості валків при розклатки п пілігримової головки та застосування гальмівних колодок, які створюють задній натяг труби.

Бібл. 10, іл. 4, табл. 2

UDC 621.774.3

Dobriak V.D., Uhriumov Yu.D., Stasevskiy S.L., Mazur I.A., Uhriumov D.Yu. **Improvement of metal-saving technology of pipe rolling on a pilgrimm mill** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.132 – 151.

The features and prospects for the development of the process of rolling a pilgrim head on the free section of the mandrel are considered. The main problem of this process is the displacement of the section along the mandrel in the direction of rotation of the pilgrim mill rolls. Based on the theory of elastic-plastic impact of the pilgrim head and mill rolls, the post-impact velocities and pipe displacements for real conditions of pilgrim rolling are calculated. Two methods of reducing the displacement of the pilgrim head during its interaction with the rolls are considered: reducing the angular velocity of the rolls during rolling of the pilgrim head and using brake pads that create back tension on the pipe.

Ref. 10, fig. 4, table 2

УДК 621.771.685.5

Егоров О. П., Михайловський М. В., Рибальченко М. О. **Системний аналіз інваріантності сепаратних контурів керування швидкісним режимом прокатки з петлею на неперервних дрібносортих станах** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.152-161

Розроблена багатозв'язана система керування швидкісним режимом групи прокатних клітей, що підвищує ефективність роботи кожного контуру стабілізації технологічного режиму прокатки. Для забезпечення інваріантності сепаратних контурів керування запропоновано передавати керуючий вплив на корекцію частот обертання групи клітей з урахуванням коефіцієнта витяжки розкату в кожній кліті. Ефективність такого рішення підтверджена комп'ютерним моделюванням швидкісного режиму прокатки з петлею на неперервному дрібносортовому стані.

Бібл. 3, іл. 5

UDC 621.771.685.5

Yegorov O. P., Mykhailovskyi M. V., Rybalchenko M. O. **Systematic analysis of invariance of separate control circuits of high-speed rolling with a loop on continuous small section mill** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.152 – 161.

The multi-connected system for controlling the high-speed mode of the group of rolling stands has been developed, which increases the efficiency of each circuit of stabilization of the technological mode of rolling. To ensure the invariance of separate control circuits, it is proposed to transfer the control influence to the correction of the rotation frequencies of the group of stands, taking into account the coefficient of rolling elongation in each stand. The

effectiveness of such solution is confirmed by computer modeling of the high-speed mode of rolling with the loop on a continuous small-size mill.

Bibl. 3, ill. 5

УДК 691.735:620.173.2

Кімстач Т.В., Узлов К.І. **Синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn.** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.162-183

Встановлено, що синергетичний та селективний вплив легуючих елементів на границі міцності та плинності бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn визначається більшою мірою швидкістю охолодження бронзи в ливарній формі, підвищення якої призводить до інверсії характеру селективного впливу легуючих компонентів на міцність. Характер селективного впливу хімічних елементів на границю плинності та твердість лише частково змінюється по відношенню до олова і зовсім не впливає на характер змін показників пластичності бронзи. При цьому, з підвищенням швидкості охолодження бронзи в ливарній формі ступінь синергетичного та селективного впливу легуючих елементів на механічні властивості бронзи системи Cu-Al-Si-Sn-Mn зменшується. З числа легуючих елементів в бронзах системи Cu-Al-Si-Sn-Mn, за характером впливу на рівень механічних властивостей, твердості та долі хімічної сполуки в структурі досліджуваної бронзи, алюміній є антиподом до олова, кремнію та марганцю.

Бібл. 12, іл. 9, табл. 5

UDC 691.735:620.173.2

Kimstach T.V., Uzlov K.I. **Alloying elements synergic and selective effect on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze.** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.162 – 183.

It has been established that alloying elements synergistic and selective effect on Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes strength limit and yield strength are mainly determined by bronze cooling rate in casting mold, which increasing leads to alloying components selective effect character inversion on strength. Chemical elements selective influence nature on yield strength and hardness only partially changes in relation to tin and does not affect the changes nature in bronze plasticity indicators at all. At the same time, with bronze cooling rate increasing in casting mold, degree of alloying elements synergic and selective influence on mechanical properties of Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronze decreases. Among alloying elements in Cu-Al-Si-Sn-Mn system bronzes, in terms of influence on mechanical properties level nature, hardness and chemical compounds in studied bronze structure amount, aluminum is antipode to tin, silicon, and manganese.

Ref. 12, fig. 9, table 5

УДК 621.778

Фролов Я.В., Бобух О.С., Бояркін В.В., Коноводов Д.В., Кузьміна О.М. **Комп'ютерне моделювання і експериментальна прокатка-з'єднання кірігами-композитів** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.184-200

В роботі досліджено застосування техніки кірігами в інженерії для створення багатошарових композиційних матеріалів з програмованими механічними властивостями. Основною метою є розробка та перевірка адекватності математичної моделі процесу прокатки-з'єднання алюмінієвої матриці, армованої сталевую просічно-витяжною сіткою. Модель побудована в середовищі QForm UK з використанням методу скінчених елементів та врахуванням відповідних реологічних характеристик матеріалів і граничних умов. Експериментальні дослідження прокатки-з'єднання проводились на лабораторних станах типу дуо та кварто при температурах до 500 °С та різних ступенях деформації (20–50 %). Результати чисельного моделювання узгоджуються з експериментальними даними щодо зміни геометрії сітки та розподілу деформацій. Встановлено, що навіть при незначному ступені деформації (20 %) можливе формування ефективного з'єднання з проявом “zip-bonding” ефекту, однак таке з'єднання є нестабільним. Тому в процесі прокатки-з'єднання доцільно застосовувати величину ступеня деформації, що перевищує 30 %.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшої розробки технологій виготовлення функціональних кірігамі-структур на основі металевих композицій.

Бібл. 18, іл. 7, табл. 5

UDC 621.778

Frolov Y.V., Bobukh O.S., Boiarkin V.V., Konovodov D.V., Kuzmina O.M. **Fem simulation and experimental procedure for roll bonding of kirigami-type composites** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.184 – 200.

The study investigates the application of kirigami techniques in engineering to produce multilayer composite materials with programmable mechanical properties. The primary objective is to develop and validate a mathematical model for the roll-bonding process of an aluminum matrix reinforced with a steel expanded metal mesh. The model has been developed in the QForm UK environment using the finite element method, taking into account the relevant rheological properties of the materials and boundary conditions. Experimental roll-bonding studies were carried out on laboratory duo and quarto rolling mills at temperatures up to 500 °C and various degrees of deformation (20–50 %). The results of the numerical simulations are in agreement with the experimental data regarding changes in mesh geometry and strain distribution. It was found that even at a small degree of deformation (20 %), it is possible to form an effective bond with a “zip-bonding” effect; but that such a bond is unstable. It is therefore advisable to apply a degree of deformation greater than 30% in the roll-bonding process. The results of the study can be used for the further development of manufacturing technologies for functional kirigami structures based on metal composites.

Ref. 18, fig. 7, table 2

УДК 669.18.046.518.411:621.746.3

Самохвалов С.Є., Піптюк В.П., Греков С.В. **Вплив кількості добавки на тепловий стан металеві ванни у ківші** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.201-212

У попередній статті представлені результати математичного моделювання та дослідження з використанням розроблених моделей впливу кількості введених шматкових добавок до ковшової ванни (ємністю 60т і 250т) при обробці сталі на установці ківш-піч (УКП) на її гідродинамічний стан. На прикладі використання кускового феромарганцю марки ФМн78 з урахуванням різної питомої кількості добавки (0,2; 1; 2; 3 кг/т) показано значний вплив досліджуваного фактору на гідродинаміку металевого розплаву протягом розглянутого періоду (до 4,5 с) знаходження феросплаву у ванні. Ця робота містить результати дослідження впливу кількості добавки на тепловий стан металевого розплаву в умовах обробки на УКП. Викладений матеріал є логічним продовженням попередніх досліджень, у якому збережено вихідні умови, зазначені у попередній статті. Виконання роботи передбачало два етапи досліджень. На першому етапі виконано розрахунково-експериментальну оцінку впливу інтенсивності продування металеві ванни в ковші на її тепловий стан. Визначено вплив (в межах від 0,08 °C до ≈ 0,13 °C залежно від інтенсивності продування) на тепловий стан ванни в розглянутий період часу. На другому етапі розроблено математичну модель та проведено чисельні дослідження на комп'ютерній програмі її реалізації з урахуванням наведених вище кількостей добавки в умовах наближених до промислових.

Бібл. 16, іл. 3

UDC 669.18.046.518.411:621.746.3

Samokhvalov S.E., Piptyuk V. P., Grekov S. V. **Influence of the quantity of the additive on the thermal condition of the metal bath in the ladle** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.201 – 212.

The previous article presents the results of mathematical modeling and research using the developed models of the effect of the amount of lump additives introduced into a ladle bath (with a capacity of 250 t) during steel processing in a ladle furnace unit (LFU) on its hydrodynamic state. Using the example of using lump ferromanganese grade FMn78, taking

into account different specific amounts of the additive (0,2; 1; 2; 3 kg/t), a significant effect of the studied factor on the hydrodynamics of the metal melt during the considered period (up to 4.5 s) of the ferroalloy additive being in the bath is shown. This work contains the results of a study of the effect of the additive amount on the thermal state of the metal melt under LFU processing conditions. The presented material is a logical continuation of previous studies, in which the initial conditions specified in the previous article are preserved. The work included two stages of research. At the first stage, the influence of the intensity of blowing of the metal bath in the ladle on its thermal state was estimated and experimentally assessed. An influence (from ≈ 0.08 °C to ≈ 0.13 °C depending on the intensity of blowing) on the thermal state of the bath in the considered period of time was determined. At the second stage, a mathematical model was developed and numerical studies were carried out on a computer program for its implementation, taking into account the above amounts of additives under conditions close to industrial ones.

Ref. 16, fig. 3

УДК 621.316.925

Коваленко Інна, Радченко Віталій, Осаул Олександр, Єрофєєва Аліна, Піліпенко В'ячеслав, Прихно Валерія.

Аналіз показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С.213 – 228

Метою роботи є всебічний аналіз показників якості електроенергії в мережах промислових підприємств України, з урахуванням статистичних даних до 2022 року та змін, спричинених повномасштабною війною. Особливу увагу приділено електропостачанню в галузях металургії, хімічної промисловості та машинобудування, де фіксуються найбільші відхилення параметрів PQ. Методика. Робота базується на порівняльному аналізі результатів вимірювань якості електроенергії на українських промислових підприємствах. Залучено статистику до 2022 року, дані моніторингу в період війни 2022–2023 рр., а також стандарти ДСТУ EN 50160:2014, IEEE 519 та вимоги ENTSO-E. Проведено аналіз основних причин відхилення PQ: гармоніки, флікер, несиметрія, реактивна потужність. Результати. Виявлено, що до війни найбільші порушення PQ спостерігались у зварювальних і ливарних цехах металургії (THD_U до 12%, несиметрія до 3,6%), на хімічних підприємствах – перевищення гармонік 6–16 порядку, а в машинобудуванні – локальні проблеми з реактивною потужністю. Під час війни основні проблеми змістилися до глибоких провалів напруги, нестабільності частоти при генераторному живленні та зниження $\cos\phi$. Частина промисловості була зупинена, що тимчасово знизило рівень гармонік.

Бібл. 15, іл. 3, табл. 1

UDC 621.316.925

Kovalenko Inna, Radchenko Vitalij, Osaul Oleksandr, Yerofieieva Alina, Pilipenko Viacheslav, Prykhno Valeriia

Analysis of power quality indicators in industrial power networks // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.213 – 228.

The aim of this study is to conduct a comprehensive analysis of power quality (PQ) indicators in the electrical networks of industrial enterprises in Ukraine, taking into account statistical data up to 2022 and changes caused by the full-scale war. Special attention is given to power supply in the metallurgical, chemical, and machine-building sectors, where the largest deviations in PQ parameters are recorded. The methods. The study is based on a comparative analysis of power quality measurement results at Ukrainian industrial enterprises. It incorporates statistical data up to 2022, monitoring results from the wartime period of 2022–2023, as well as relevant standards such as DSTU EN 50160:2014, IEEE 519, and ENTSO-E requirements. The analysis focuses on key causes of PQ deviations: harmonics, flicker, voltage unbalance, and reactive power issues. Findings. Prior to the war, the most significant PQ violations were observed in welding and foundry shops of metallurgical plants (THD_U up to 12%, voltage unbalance up to 3.6%), harmonic distortion of the 6th–16th orders at chemical facilities, and localized reactive power issues in machine-building enterprises. During the war, the primary

challenges shifted to deep voltage sags, frequency instability under generator supply, and low power factor ($\cos\phi$). Part of the industrial sector was shut down, temporarily reducing the overall harmonic levels.

Ref. 15, fig. 3, table 1

УДК 620.91

Віктор Коваленко, Інна Коваленко, Наталія Міняйло, Леонід Шевчук, Володимир Васецький, Башко Володимир, Кописов Владислав. **Загальні засади енергоспоживання в металургійній промисловості** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 229 – 247

Метою роботи є дослідження теоретичних основ підвищення ефективності енергоспоживання в металургійній промисловості в умовах глобальних викликів кліматичної політики, трансформації виробництва та необхідності зниження енергетичних витрат. Проаналізовано основні технологічні процеси, рівень енергоемності галузі, а також міжнародний досвід упровадження енергоефективних рішень. Методика. Дослідження базується на міждисциплінарному аналізі наукових джерел, галузевих звітів, статистичних даних та техніко-економічних характеристик виробництва сталі. Використано методи порівняльного аналізу енерговитрат для різних технологічних маршрутів, а також системний підхід до оцінки потенціалу інновацій. Результати. Встановлено, що значна частина енергоспоживання припадає на доменно-конвертерні процеси. Перехід до електропічного виробництва, впровадження водневої металургії, використання вторинної сировини та цифрових технологій (Industry 4.0) відкриває шляхи до істотного підвищення енергоефективності. Наведено приклади успішної модернізації на підприємствах різних країн.

Бібл. 27, іл. 2

UDC 620.91

Kovalenko Viktor, Kovalenko Inna, Miniailo Nataliia, Shevchuk Leonid, Vasetskyi Volodymyr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav. **General principles of energy consumption in the metallurgical industry** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P. 229 – 247

The aim of the study is to explore the theoretical foundations for improving energy consumption efficiency in the metallurgical industry under the conditions of global climate policy challenges, production transformation, and the need to reduce energy costs. The paper analyzes the main technological processes, the level of energy intensity in the industry, as well as international experience in implementing energy-efficient solutions. The methods. The research is based on an interdisciplinary analysis of scientific sources, industry reports, statistical data, and the techno-economic characteristics of steel production. Methods of comparative analysis of energy consumption for various technological routes and a systematic approach to assessing innovation potential are applied. Findings. It has been established that a significant portion of energy consumption is concentrated in blast furnace–converter processes. The transition to electric arc furnace (EAF) production, the implementation of hydrogen metallurgy, the use of secondary raw materials, and digital technologies (Industry 4.0) open up opportunities for a substantial increase in energy efficiency. Examples of successful modernization at enterprises in various countries are provided

Ref. 27, fig. 2

УДК 620.91

Коваленко Віктор, Міняйло Наталія, Барішенко Олена, Шевчук Леонід, Васецький Володимир, Башко Володимир, Кописов Владислав. **Поняття енергоефективності в металургійній промисловості та показники її оцінки** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 248 – 270

Метою роботи є аналітичне узагальнення теоретичних засад і практичних підходів до підвищення ефективності енергоспоживання в металургійній промисловості з урахуванням сучасних викликів кліматичної політики, зростання цін на енергоресурси, потреби в декарбонізації та економічної доцільності модернізації виробничих процесів. Методика. Дослідження базується на міждисциплінарному аналізі наукових публікацій, міжнародних звітів, статистичних даних, а також техніко-економічних характеристик виробництва сталі. Застосовано методи структурно-порівняльного аналізу енерговитрат за різними технологічними маршрутами, системний підхід до оцінки потенціалу інноваційних рішень та міжнародного бенчмаркінгу. Результати. Визначено основні фактори енергоємності в металургії, обґрунтовано технологічні резерви підвищення ефективності – зокрема, перехід до електросталеплавильного виробництва, використання вторинної сировини, утилізацію втратного тепла, впровадження когенерації, цифровізації та водневої металургії. Розглянуто приклади успішної модернізації та програми стимулювання в провідних країнах. Наукова новизна. У роботі систематизовано сучасні показники енергоефективності та маршрути виробництва сталі, охарактеризовано вплив різних технологічних стратегій на інтегральну енергоємність, а також запропоновано критерії оцінки потенціалу енергозбереження на макро- і мікрорівнях.

Бібл. 29, іл. 3

UDC 620.91

Kovalenko Viktor, Miniailo Nataliia, Barishenko Olena, Shevchuk Leonid, Vasetskyi Volodymyr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav. **Energy efficiency in the metallurgical sector: concept and evaluation metrics** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.248 – 270.

The aim of the study is to provide an analytical synthesis of the theoretical foundations and practical approaches to improving energy consumption efficiency in the metallurgical industry, taking into account modern challenges of climate policy, rising energy prices, the need for decarbonization, and the economic feasibility of production process modernization. The methods. The research is based on an interdisciplinary analysis of scientific publications, international reports, statistical data, and techno-economic characteristics of steel production. Structural-comparative methods of analyzing energy consumption across different technological routes were applied, along with a systematic approach to assessing innovation potential and international benchmarking practices. Findings. The study identifies the main factors contributing to energy intensity in metallurgy and substantiates the technological reserves for improving efficiency, including the transition to electric arc furnace (EAF) steelmaking, the use of secondary raw materials, waste heat recovery, implementation of cogeneration, digitalization, and hydrogen-based metallurgy. Examples of successful modernization and national support programs from leading countries are also presented.

Ref. 29, fig. 3

УДК 621.771:621.774:621.73

Губинський М.В., Угрюмов Ю.Д., Губінський О.В., Мазур І.А., Угрюмов Д.Ю. **Питання зниження витрати метала при виробництві гарячекатаних труб** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 271 – 293

Розглянуті основні історичні напрямки економії метала при виробництві гарячекатаних безшовних труб на різних трубопрокатних агрегатах, що досягли практичного використання. Зниження витрати металу є одним з основних напрямків зниження витрат при виробництві труб, так як доля вартості заданого металу за вирахуванням відходів складає від 50 до 85%. Виконаний аналіз металовикористання при виробництві гарячекатаних безшовних труб на різних трубопрокатних агрегатах показав, що найбільші технологічні втрати металу мають місце на пілігримових агрегатах за рахунок обрізи металу на пілігримовому стані в затравку та пілігримову головку. розглянуті основні напрямки зниження цих втрат, при цьому відмічається що найбільш ефективними є прокатка гільзи в стик та розкатка пілігримової головки на вільній ділянці дорна. Також розглянуті питання зменшення окалиноутворення при

гарячій прокатці труб шляхом прискореного охолодження виробу водою на виході з чистого калібру та збільшенням швидкості охолодження на повітрі.

Бібл. 17, іл. 6, табл. 1

UDC 621.771:621.774:621.73

Hubynskiy M.V., Uhriymov Yu.D., Gubinsky O.V., Mazur I.A., Uhriymov D.Yu. **The issue of reducing metal consumption in the production of hot-rolled pipes** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.271 – 293

Resource and energy conservation, along with environmental safety, are the main historical areas of development for metallurgy in modern conditions. This article discusses the main areas of metal saving in the production of hot-rolled seamless pipes using various pipe rolling units, which have reached practical use. Reducing metal consumption is one of the main ways to reduce costs in pipe production, as the share of the cost of a given metal minus waste ranges from 50% to 85%. An increase in metal consumption is one of the main factors in reducing the company's competitiveness in the domestic and foreign markets. An analysis of metal consumption in the production of hot-rolled seamless pipes at various pipe rolling units has shown that the largest technological metal losses occur at pilgrim mills due to metal cut-off at the pilgrim mill into the billet and pilgrim head. The main directions of reducing these losses are considered, and it is noted that the most effective are rolling the liner into the joint and rolling the pilgrim head on a free section of the mandrel.

Ref. 17, fig. 6, table 1

УДК 519.8

Кузенков О.О. **Алгоритми та методи в динамічних задачах оптимального розміщення вогневих груп** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 294 – 309

Робота присвячена розв'язанню актуальної задачі розгортання вогневих угруповань сил ППО для прикриття рубежів повітряного нападу. Для вирішення поставленої задачі використовуються сучасні методи теорії оптимального розбиття множин, математичного моделювання з використанням диференціальних рівнянь та їх систем, розроблено спеціалізований програмний пакет, що включає мобільний та браузерний додаток. При розробці програмного комплексу використовувалися сучасні мови та технології програмування, проводився огляд та порівняння з існуючими рішеннями в різних країнах. Проведено ретроспективний аналіз, розроблено критерії оптимальності шуканого рішення, визначено переваги та недоліки підходу. Використання методів теорії оптимального розбиття множин дозволяє аналітично визначати критерії якості розв'язку, проводити аналітичне дослідження допустимих розв'язків та оцінити оптимальність рішення, а апробація аналітичних результатів на практиці та прикладах з реальними вхідними даними підвищує точність та релевантність результатів, отриманих аналітично.

Бібл. 8, іл. 7, табл. 1

UDC 519.8

Kuzenkov O. O. **Algorithms and methods in dynamic problems of optimal placement of fire groups** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.294 – 309

The work is devoted to the urgent task of deploying fire groups of air defense forces to cover the lines of air attacks. To solve the problem, modern methods of the theory of optimal set partitioning, mathematical modeling using differential equations and their systems, a specialized software package has been developed, which includes a mobile and browser application, is used. When developing the software package, modern programming languages and technologies were used, an overview and comparison with existing solutions in different countries was made. A retrospective analysis was carried out, criteria for the optimality of the solution being sought were developed, advantages and disadvantages of the approach were determined. The use of methods of the theory of optimal set partitioning allows you to analytically determine the criteria for the quality of the solution, conduct an analytical study of admissible solutions and determine the

optimal one, and approbation of analytical results in practice and examples with practical input data increases the accuracy and relevance of the results obtained analytically.

Ref. 8, fig. 7, table 1

УДК 620.91

Коваленко В. Л., Рибка Костянтин, Нікітін Євген, Коляденко Олександр, Володимир Башко, Кописов Владислав. **Розрахунок оптимальної системи гідроенергетичної утилізації: приклад металургійного підприємства** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 310 – 328

Метою даного дослідження є розрахунок оптимальної системи утилізації вторинних гідроенергетичних ресурсів на прикладі цеху графітації металургійного підприємства ВАТ «Український графіт». Основним завданням є визначення такої конфігурації системи збору та перетворення гідроресурсів, яка дозволяє мінімізувати собівартість виробленої електроенергії та забезпечити енергоефективність підприємства з урахуванням наявних технічних і просторових обмежень. Методика. У дослідженні використано методи гідравлічного розрахунку, комбінаторну оптимізацію, сигнатурні функції для моделювання обмежень, а також техніко-економічний аналіз для оцінки ефективності різних конфігурацій систем збору гідроресурсів. Результати. Визначено параметри оптимальної системи гідроенергетичної утилізації для конкретного об'єкта. Встановлено, що найбільш економічно доцільним є варіант із використанням лише одного центру збору (ЦЗ № 2), при загальній довжині трубопроводів близько 200 м. Річне вироблення електроенергії перевищує 135 тис. кВт•год, а собівартість становить 0,30 US\$ /кВт•год, що значно нижче чинного тарифу. Орієнтовні капітальні витрати на обладнання (мікро-ГЕС типу 10Пр) та інфраструктуру становлять US\$ 168,8 тис.

Бібл. 11, іл. 1, табл. 3

UDC 620.91

Kovalenko Viktor, Rybka Kostiantyn, Nikitin Yevhen, Koliadenko Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Pilipenko Viacheslav. **Calculation of the optimal hydropower utilization system: a case study of a metallurgical enterprise** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.310 – 328

This research is dedicated to the development, modeling, and optimization of a hydropower recovery system based on the reuse of secondary water resources within an industrial enterprise. The specific focus is on the graphitization workshop of PJSC "Ukrainian Graphite"—a metallurgical facility where substantial volumes of warm process water are discharged as a byproduct of production. The central objective of this study is to determine the optimal configuration of a water collection and energy conversion system that will enable efficient electricity generation at the lowest possible cost, while maintaining high energy performance. The task is conducted under the influence of strict technical and spatial constraints inherent to existing industrial infrastructure. Methodology. The study applies a set of engineering, mathematical, and economic methods. Hydraulic analysis is used to model water flow through both pressurized and gravity-fed pipelines, ensuring accurate determination of head losses and flow rates. A combinatorial optimization framework is employed to evaluate various topologies of system configurations, where water sources are matched with potential collection centers in the most effective way. A key feature of the methodology is the use of signature functions—a mathematical tool designed to define “prohibited zones” where placement of system elements is physically or operationally impossible due to safety, accessibility, or layout restrictions. These functions are integrated into the optimization model, enhancing the realism and applicability of the results. Additionally, a comprehensive techno-economic assessment is performed for each configuration, including calculations of capital expenditures, equipment cost, pipeline expenses, operational costs, and unit electricity production cost (LCOE).

Ref. 11, fig. 1, table 3

УДК 620.91

Бондар Олег, Сіверський Сергій, Гурін Євген, Коляденко Олександр, Башко Володимир, Кописов Владислав, Піліпенко В'ячеслав. **Моделювання електромагнітних процесів у нелінійному колі електролізера імпульсного осадження металевих покриттів** // Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 329 – 347

Метою даного дослідження є побудова аналітичної моделі електромагнітних процесів у нелінійному електричному колі електролізера, який працює в режимі імпульсного осадження металевих покриттів. Особливу увагу приділено впливу параметрів реверсованої прямокутної напруги на прикатодний спад напруги, струм осадження та загальні електрофізичні характеристики процесу. Дослідження спрямовано на виявлення оптимальних режимів роботи джерела живлення, які забезпечують найвищу якість осадженого шару при мінімальних енергетичних затратах. Методика. Для опису процесів у колі було використано метод перетворення змінних та побудовано систему диференціальних рівнянь, що відображає динаміку напруги та струму в умовах імпульсного живлення. У моделі враховано ключові елементи кола: активний опір, ємність, індуктивність електроліту, а також нелінійні провідності, що характеризують електрохімічну поведінку системи. Для аналізу якості покриття здійснено моделювання в інтервалах прямого та зворотного імпульсів із подальшим визначенням максимальних і мінімальних значень прикатодного спаду напруги та повного струму. Проведено чисельне порівняння з аналітичними результатами для перевірки точності моделі.

Бібл. 6, іл. 8

UDC 620.91

Bondar Oleh, Siversky Serhii, Gurin Yevgen, Koliadenko Oleksandr, Bashko Volodymyr, Kopysov Vladyslav, Pilipenko Viacheslav **Modeling of electromagnetic processes in a nonlinear circuit of an electrolyzer for pulse deposition of metal coatings** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.329 – 347

The primary objective of this study is to construct a comprehensive analytical model describing the electromagnetic processes in a nonlinear electrical circuit of an electrolyzer operating under pulsed electrodeposition conditions. Special attention is given to the influence of reversed rectangular voltage pulse parameters on the near-cathode voltage drop, deposition current, and the general electrochemical behavior of the system. The goal is to identify optimal operation modes of the pulse power supply that ensure high-quality metal coatings while minimizing energy consumption and structural defects. Methodology. The research employs the method of variable transformation to develop a set of differential equations describing the dynamic behavior of voltage and current in a nonlinear electrolyzer circuit during pulsed operation. The model accounts for critical circuit components: resistive, capacitive, and inductive elements of the electrolyte, as well as nonlinear conductances reflecting electrochemical properties. Analytical expressions for voltage drop and deposition current are derived for both the forward and reverse pulse intervals. The model includes the influence of electrolyte inductance—an often-neglected factor—which significantly alters the current front shape and ultimately affects deposition kinetics and coating characteristics. Numerical simulations are performed to validate the analytical solutions.

Ref. 6, fig. 8

УДК 621.771:621.774:621.73

Губинський М.В., Угрюмов Ю.Д., Губинський О.В., І.А. Мазур, Угрюмов Д.Ю. **Енергозберігаючі технології при виробництві труб**// Сучасні проблеми металургії, № 28 – 2025. С. 348 – 371

Однією з актуальних проблем України в даний час є нестача первинних енергоносіїв, зокрема природного газу, що обмежує енергоспоживання підприємств. Проблема посилюється поетапним підвищенням вартості енергоносіїв (природного газу, електроенергії), а також іншими причинами, що знижує конкурентоспроможність металургійних підприємств України. Метою даної роботи є аналіз відомих технічних рішень по енергозбереженню в прокатному виробництві, переважно при виробництві гарячекатаних безшовних труб, для подальшого удосконалення виробництва труб. На основі аналізу шляхів енергозбереження при виробництві гарячекатаних труб відзначається головний напрямок енергозбереження в прокатному виробництві – це будівництво прокатних станів

поблизу машини безперервного лиття заготовки. В даній роботі розглянуті такі напрямки зниження енерговитрат, як: гарячий посад заготовок в нагрівальні печі трубопрокатних агрегатів; економія природного газу при нагріві термічній обробці; пряме прошивання безперервно литої заготовки на косовалковому стані пілігримового агрегата; термомеханічна обробка труб з прокатного нагріву.

Бібл. 12, іл. 10

UDC 621.771:621.774:621.73

Hubynskyi M.V., Uhriumov Yu.D., Gubinsky O.V., Mazur I.A., Uhriumov D.Yu. **Energy-saving technologies in pipe production** // Modern problems of metallurgy, № 28 – 2025. P.348 – 371

Ukrainian metallurgical enterprises with a full cycle have fuel costs at the level of 1.4÷1.6 tons of conventional fuel per ton of produced products, while the share of energy costs in the cost of rolled products is approximately 40%. At the same time, at enterprises in Japan and the USA, these costs are 0.7÷1.0 tons of conventional fuel per ton of product. One of the current problems of Ukraine is the shortage of primary energy carriers, in particular natural gas, which limits the energy consumption of enterprises. The problem is exacerbated by the gradual increase in the cost of energy carriers (natural gas, electricity), as well as other reasons that reduce the competitiveness of Ukrainian metallurgical enterprises.

The purpose of this work is to consider known technical solutions for energy saving in rolling production, mainly in the production of hot-rolled seamless pipes, for further improvement of pipe production.

Based on the analysis of energy saving methods in the production of hot-rolled pipes, the main direction of energy saving in rolling production is noted - this is the construction of rolling mills near the continuous casting machine of the billet.

Ref. 12, fig. 10

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ

НАУКОВІ ВІСТІ

№ 28

Технічна редакція: Островська К.Ю.
Комп'ютера верстка: Бімалов Д.В., Селівьорстова Т.В.

Здано в набір 07.04.25. Підписано до друку 30.05.25.
Формат А4. Гарнітура Шкільна. Тираж 300. Зам. № 07/25.

Український державний університет науки і технологій
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
49005, Дніпро
st@nmetau.edu.ua

Свідоцт во про державну реєст рацію друкованого засобу масової інформації:
Серія КВ № 8684