

УДК 697.133

DOI: <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2023-1-03>

**Петрик Олексій Анатолійович**, кандидат технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-5824-6287

**Назаренко Ірина Анатоліївна**, кандидат технічних наук, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0003-4200-4424

**Петрик Богдан В'ячеславович**, студент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-9528-4610

## МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЖИМІВ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ АГРЕГАТАХ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ

В статті розглянуто методичні засади оцінювання режимів нагрівання металу у високотемпературних агрегатах, що впливають на якість продукції. Розглянуто основні фактори, які впливають на якість продукції, а саме: температура нагріву, час утримання металу в режимі нагріву, швидкість нагріву та інші. Описані методичні засади можуть бути використані в промисловості для вдосконалення процесу виробництва та підвищення якості продукції. Дослідження режимів нагріву металевих злитків в нагрівальних колодцях є актуальною в контексті підвищення ефективності виробництва металевих виробів та зменшення затрат на виробництво. Основна проблема полягає в нестабільності теплових процесів в нагрівальних колодцях при змінних технологічних режимах. Метою проведених досліджень є вдосконалення теплових режимів нагрівання металевих злитків в нагрівальних колодцях з метою підвищення ефективності виробництва та зниження витрат. Було проведено дослідження впливу технологічних затримок на теплові процеси в нагрівальних колодцях. Для аналізу теплових процесів в нагрівальних колодцях було використано математичну модель процесу нагріву металу, що дозволило оцінити вплив зміни технологічних режимів на теплові процеси. Встановлено, що при нагріванні металевих злитків з урахуванням додаткового часу знаходження в колодязі від 1 до 25 год, маса шлаку змінюється від 10,7 до 40,8 кг/т, а товщина кірки, що оплавляється змінюється від 5,56 до 14,1 мм. Отримані залежності товщини кірки, що вигорає за умови знаходження металевих злитків при температурі 1380 °С, від тривалості знаходження металевих злитків в колодязі, допоможуть превентивно керувати процесом нагрівання металу і попереджати розтин та окислення підкіркових газових пазирів. Що допоможе уникнути утворення дефектів рвана кромка та знизити кількість металу, що оплавляється, а також знизити витрати металу зі шлаком. Отримані результати можуть бути використані в виробництві металевих виробів для подальшого дослідження та удосконалення технологічних режимів нагріву металевих злитків в нагрівальних колодцях.

Ключові слова: режими нагрівання металу, високотемпературні агрегати, якість продукції, температура нагріву, швидкість нагріву, вдосконалення, теплові режими, нагрівальні колодці, технологічні затримки, енергоефективність

*Постановка проблеми у загальному вигляді.* Однією з головних завдань сучасного виробництва є пошук зниження собівартості виробництва [1; 2]. Якість продукції після та витратний коефіцієнт, яких підраховується після проходження прокатного переділу є однією з складових собівартості виробництва сталі. В сучасних умовах, є багато факторів, що впливають на підвищення тривалості знаходження металевих злитків у нагрівальних агрегатах, як технологічних (черговість видачі за сортаментом), так і зовнішніх (повітряні тривоги, знеструмлення станів та інше), що призводить до його

пересиджування (відхилення від мінімального потрібного часу (за технологією) знаходження металевих злитків у колодязі). При цьому злитки знаходяться в них тривалий час при температурах вище 1300 °С, що призводить до значних втрат металу за рахунок оплавлення та окалиноутворення (спалювання кірки), що в свою чергу впливає на підвищення собівартості продукції.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Створення і дослідження раціональних та перспективних режимів нагрівання металевих злитків при тривалому знаходженню в нагрівальних колодязях, з вдосконаленням технологічного процесу, є актуальним завданням [3; 4].

Процес нагрівання металевих злитків у нагрівальному колодязі розглядало багато авторів. У статті [5] розглянутий рекуперативний нагрівний колодязь. Так як ця установка є складним об'єктом, тому були розглянуті її властивості та відображення цих властивостей у математичній моделі, яка описує параметри об'єкта, однак не описано вплив теплових характеристик на кількість зварювального шлаку та товщину кірки, що сплавляється. Також цей метод потребує додаткового обладнання.

В [6] розглянуто модель витрат теплоти з поверхні регенеративного нагрівального колодязя на витрату змішаного газу, а в [7] проведено комплексні дослідження роботи печей у термічному цеху, направлених на зниження втрат палива; можливість здійснювати прогноз роботи печей; автоматизація прийому замовлень; здійснення доступу до будь-якого осередку цеху; координація роботи цеху; узгодження роботи термічних камерних печей між собою й з іншим технологічним устаткуванням; можливість ухвалення рішення про завантаження печей. Автори [8] розглянули нерівномірність нагрівання металу, що обумовлено організацією процесу горіння палива у печі. Та встановили, що зміщення зони інтенсивного виділення теплоти призводить до суттєво нерівномірного розподілу теплових потоків на поверхні металу, що нагрівають. Проте в [6–8] не розглядається фактор впливу наднормативної тривалості знаходження металу у нагрівальному агрегаті, не описано вплив теплових характеристик на якість продукції та витрати зварювального шлаку.

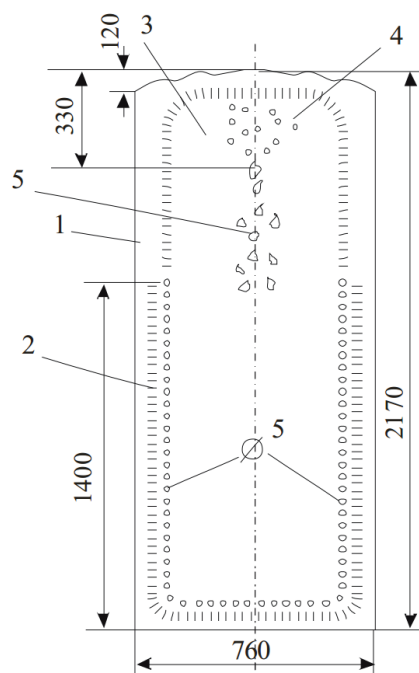
Слід зазначити, що практичне застосування розрахунково-аналітичних методів не отримало досить широкого поширення у виробничій практиці, тому актуальною є розробка прикладних методів розрахунку характеристик технологічних процесів з використанням емпіричних формул на якість продукції, які можуть бути застосовані технологами в умовах промислового підприємства.

На металургійних підприємствах [9] технологію нагріву злитків різної маси, розмірів і марок сталей розробляють і регламентують у вигляді інструкцій на базі результатів промислових досліджень. При цьому сталі з приблизно однаковим хімічним складом, теплопровідністю, питомим опором деформації, пластичність, схильність до перегрівання, перепалу та зневуглецювання об'єднують в одну групу. Злитки кожної групи нагрівають за одним і тим же технологічним режимом.

Розглянемо 1 групу марок сталі, на прикладі марки сталі 0,8кп. Схема кристалічного злому зливків маловуглецевої сталі масою 18 т (сталь 08кп) зображена на рисунку 1.

Недоліками киплячих сталей є периферійне та занадто близьке розташування газових пузирів до зовнішньої кірки зливків, які до того ж ще мають хімічну неоднорідність і значну степінь ліквідації та деградації. Як, видно, з рис. 1, для зливків киплячої сталі характерними є п'ять зон. Вони спрямовані від кірки до центра зливка. Довжина газових пузирів складає 30–70 мм [9].

Слід відмітити, що на практиці газові пузири, залежно від якості перемішування металу у зливниці та ряду інших факторів, при здоровій кірці злитків залягають на відстані від 12 до 29 мм.



Зони: 1 – зовнішня без пузирів щільна кірка, яка складається із рівномірних і рівновісних кристалів; 2 – зона сочових (щільникових) газових пузирів, що мають витягнуту повздовжню форму; 3 – щільна зона суцільного кристалічного тіла злитка; 4 – зона вторинних (глибинних) газових пузирів; 5 – зона осьових (центральных) газових пузирів (серцевина зливка) [9]  
Рисунок 1 – Схема кристалічного злому злитків маловуглецевої сталі масою 18 т (сталь 08кп)

При нагрівання металевих злитків у нагрівальних колодязях при відхиленнях від мінімального потрібного часу (за технологією) знаходження металу у колодязі можуть виникати надмірні температурні навантаження на метал, відбувається розтин та окислення газових пузирів, що призводить в прокатному переділі, до утворення дефекту «рвана кромка». Згідно [10; 11] «рвана кромка» – це дефект поверхні листа та стрічки у вигляді розриву металу по краях листа та стрічки. Цей дефект може утворюватися внаслідок розтину та окислення підкіркових газових пузирів.

На металургійних підприємствах для нагрівання злитків перед прокаткою на обтискних станах (блюмінгах та слябінгах) застосовуються нагрівальні колодязі. Завданням нагрівальних колодязів є отримання доведених до температури прокатки та рівномірно прогрітих за перерізом злитків [12]. Перший період називають періодом нагріву, а другий період – періодом витримки. Тепловий потік на метал у початковому періоді має понижені значення, а температура поверхні злитка підвищується з швидкістю нагрівання поверхні, що постійно знижується [7]. У нагрівальні колодязі зазвичай надходить до 95% злитків гарячого посада з температурою поверхні, що не перевищує 950–1000 °С. При цьому велика частка металу, що нагрівається, пересиджує від готовності довше 1-ї години і проводиться томління при температурах вище 1300 °С по два рази.

*Метою* досліджень є вдосконалення теплових режимів нагріву металу в нагрівальних колодязях з метою підвищення ефективності виробництва та зниження витрат.

*Матеріали та методи дослідження.* Згідно методики [14] виконано розрахунок витрат зварювального шлаку та товщини кірки, що вигорає при нагріванні злитків у нагрівальних колодязях.

Розрахунок виконаємо для наступних умов:

- регенеративний нагрівальний колодязь;
- маса зливка 16,0 т;

- час транспортування злитків (розглядаємо: 1 групу марок сталі, на прикладі сталі марки 08кп) перед посадженням у нагрівальні колодязі 2 год 45 хвилин;
- вид посаду: гарячий посад, температура злитку перед посадженням в нагрівальні колодязі складає 900 °С;
- марка сталі: 08кп;
- кінцева температура нагрівання 1380 °С;
- мінімальний час знаходження металу у колодязі 3 год 10 хвилин;
- розглянутий час пересиджування злитків металу у колодязі від 1 до 25 годин;
- додатковий час (ДЧ) знаходження злитків при кінцевій температурі нагрівання (1380 °С) від 0 до 5 год (ДЧ=0 ... ДЧ=5 год).

Результати розрахунку внесені в таблицю 1. На основі даних, наведених у таблиці 1 побудовані залежності, зображені на рисунках 2 та 3.

Таблиця 1 – Витрати шлаку та товщина кірки, що вигорає при нагріванні злитків

Час затримки, год		0	1	2	3	7	10	15	20	25
Товщина кірки зливка, що вигорає, мм	ДЧ = 0 год	3,7	4,4	5,1	5,2	6,4	7,4	8,3	9,7	11,4
	ДЧ = 1 год	3,9	5,6	6,1	6,2	7,2	8,1	9,0	10,3	11,9
	ДЧ = 2 год	4,1	6,1	7,0	7,0	8,0	8,8	9,6	10,8	12,4
	ДЧ = 3 год	4,3	6,6	7,7	7,8	8,7	9,4	10,2	11,3	12,8
	ДЧ = 4 год	4,5	7,1	8,3	8,5	9,3	10,0	10,7	11,8	13,3
	ДЧ = 5 год	4,7	7,6	8,9	9,0	9,9	10,5	11,2	12,3	13,7
Витрата зварювального шлаку, кг/т	ДЧ = 0 год	8,4	11,0	14,4	15,0	20,4	25,3	29,8	35,5	40,8
	ДЧ = 1 год	8,8	13,8	17,4	17,9	23,1	27,9	32,2	37,6	42,5
	ДЧ = 2 год	9,3	15,1	19,8	20,4	25,4	30,2	34,3	39,5	44,2
	ДЧ = 3 год	9,7	16,3	22,0	22,6	27,6	32,3	36,4	41,4	45,8
	ДЧ = 4 год	10,2	17,6	23,8	24,6	29,7	34,4	38,4	43,2	47,4
	ДЧ = 5 год	10,7	18,8	25,5	26,1	31,5	36,3	40,2	44,9	48,9

Примітка: ДЧ – додатковий час знаходження злитків при кінцевій температурі нагрівання (1380 °С)

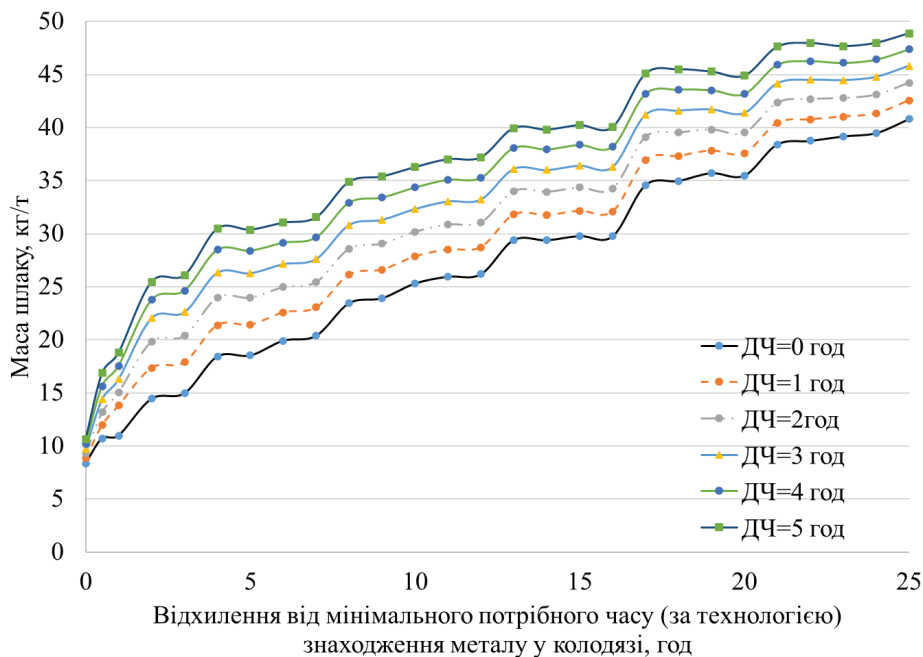


Рисунок 2 – Залежність маси зварювального шлаку від тривалості знаходження металу злитків в колодязі

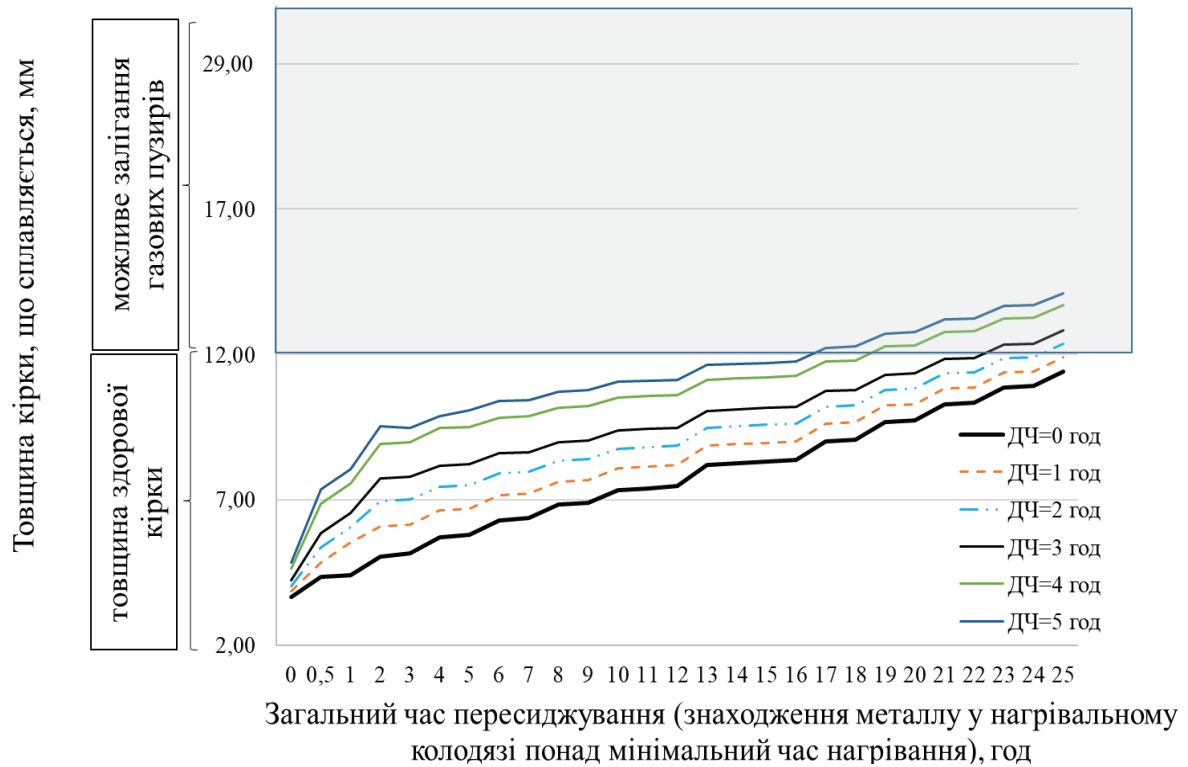


Рисунок 3 – Залежність товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металу в колодязі

За результатами проведених розрахунків можна визначити такі основні положення:

1. При базовому режимі нагрівання без відхилення за часом від номінального, товщина кірки становить 3,67 мм (з кожної грані зливку). При нагріванні з урахуванням додаткового часу пересиджування металу злитків від 1 до 25 год, товщина кірки, що оплавляється змінюється від 4,42 до 11,43 мм. Маса зварювального шлаку, який утворюється при нагріванні металу злитків при базовому режимі нагрівання (без відхилення за часом від номінального), становить 8,37 кг/т. При нагріванні з урахуванням пересиджування металу злитків від 1 до 25 год, маса зварювального шлаку змінюється від 10,7 до 40,8 кг/т.

2. При нагріванні злитків, які додатково знаходилися (від 1 до 5 год) перед видачою в прокат при температурі 1380 °С, товщина кірки, що оплавляється змінюється від 5,56 до 14,1 мм.

Знаючи залежність товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металу злитків в колодязі можна превентивно керувати процесом нагрівання металу (не більше 13–16 годин) і попереджати розтин та окислення підкіркових газових пазирів. Що допоможе уникнути утворення дефектів рвана кромка та знизити кількість зварювального шлаку, що оплавляється.

На основі вищенаведеного розрахунку можна спрогнозувати товщину кірки, що вигорає, залежно від тривалості знаходження металевих злитків в колодязі. Знаючи мінімальне значення «здорової» кірки на зливку перед нагріванням (від 12 до 29 мм) можна попередити розтин та окислення підкіркових газових пазирів.

На підставі розрахункових даних отримані регресійні залежності для визначення товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металу в колодязі при різному ДЧ, що злитки грілися за температури 1380 °С перед видачою у прокат (таблиця 2).

Таблиця 2 – Рівняння залежності товщини кірки, що вигорає, від тривалості додаткового часу знаходження злитків в колодязі при температурі 1380 °С

№ п/п	Додатковий час знаходження при температурі 1380 °С перед видачою, год	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
1	0	$\delta = 0,2756 \cdot \tau + 3,8252$	0,99
2	1	$\delta = 0,2628 \cdot \tau + 4,6972$	0,97
3	2	$\delta = 2,3852 \ln(\tau) + 3,2898$	0,93
4	3	$\delta = 2,387 \ln(\tau) + 3,8607$	0,94
5	4	$\delta = 2,4061 \ln(\tau) + 4,8633$	0,96
6	5	$\delta = 2,4166 \ln(\tau) + 5,322$	0,96

**Примітка:**  $\tau$  – тривалість знаходження металу у колодязі при температурі 1380 °С, год;  $\delta$  – товщина кірки зливка, що вигорає, мм

*Висновки.* Виконано розрахунок товщину кірки, що вигорає та зварювального шлаку при нагріванні злитків у нагрівальних колодязях.

На основі проведених досліджень встановлено, що при базовому режимі нагрівання без відхилення за часом від номінального, товщина кірки становить 3,67 мм (з кожної грані зливку). При нагріванні з урахуванням додаткового часу пересиджування металу злитків від 1 до 25 год, товщина кірки, що оплавляється змінюється від 4,42 до 11,43 мм.

При нагріванні злитків, які додатково знаходилися (від 1 до 5 год) перед видачою в прокат при температурі 1380 °С, товщина кірки, що оплавляється змінюється від 5,56 до 14,1 мм.

Маса зварювального шлаку, який утворюється при нагріванні металевих злитків у колодязі, при базовому режимі нагрівання (без відхилення за часом від номінального), становить 8,37 кг/т. При нагріванні, з урахуванням пересиджувань злитків від 1 до 25 год, маса шлаку змінюється від 10,7 до 40,8 кг/т.

Знаючи залежність товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металевих злитків в колодязі можна превентивно керувати процесом нагрівання металу і попереджати розтин та окислення підкіркових газових пузирів. Що допоможе уникнути утворення дефектів рвана кромка та знизити кількість металу, що оплавляється (зі зварювальним шлаком).

На підставі розрахункових даних отримані регресійні залежності для визначення товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металевих злитків в колодязі при різному додатковому часі знаходження при максимальній температурі нагрівання.

### Бібліографічний перелік

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року. Спецвипуск інформаційно-аналітичного бюлетеня. 23 березня 2006 р. Київ : Відомості Мінпаливенерго України, 2006. 144 с.
2. Нікіфорова В. Економічний огляд металургійної галузі України / Інститут економіки промисловості НАН України. URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metallurhijnoi-haluziukrainy/#> (дата звернення 22.10.2022).
3. Черная металлургия Украины и перспективы развития научных исследований / В.И. Большаков, Л.Г. Тубольцев. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Дніпропетровськ : ІЧМ НАН України, 2007. Вип. 15. С. 3–18.
4. Тришкевский О. Стан та напрями розвитку і вдосконалення виробництва гарячекатаного листа в Україні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Харків: ХНАУ, 2018. № 80. С. 67–73.
5. Гостищев В.О. Автоматична система регулювання рекуперативного нагрівального колодязя. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький : ХНУ, 2021. № 1. С. 31–37.

6. Одайський А., Барішенко О.М., Овчіннікова І.А. Дослідження впливу теплових втрат з поверхні регенеративного нагрівального колодязя на витрату змішаного газу. *Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука-2021»*. Запоріжжя : ЗНУ, 2021. Т. 5. С. 122–123.
7. Ревун М.П., Барішенко О.М., Сорока А.Ю., Пазюк Ю.М. Розробка прогнозуючої системи управління нагріву металу в термічних печах з метою економії палива. *Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. Днепропетровск : Новая идеология, 2009. Выпуск 1 (16). С. 155–165.
8. Ревун М.П., Каюков Ю.М., Чепрасов О.І., Иванов В.І., Пульпинський В.Б. Дослідження теплової роботи камерної нагрівальної печі за умови імпульсного подавання палива у період витримки. *Металлургическая теплотехника* : сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепр : Новая идеология, 2012. Вып. 4 (19). С. 158–164.
9. Середа Б.П., Прищип М.Г., Кругляк І.В., Васильченко Т.О. Прокатка листів та штаб : навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 6.05040104, 7.05040104, 8.05040104 «Обробка металів тиском». Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 184 с.
10. ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. Дата введения 1990-01-01. Изд. оф. Москва : Издательство стандартов, 1989. 61 с.
11. ДСТУ 8781:2018. Виливки зі сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2019-01-01. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2018. 33 с.
12. Технологическая инструкция №25050.00037 «Термическая обработка отливок, сварных металлоконструкций, поковок и заготовок из проката в термообрубном цехе № 9». Днепропетровск : ОАО «Днепротяжмаш», 2008. 52с.
13. Гребельный, В.Н. Повышение эффективности работы нагревательных колодцев прокатных цехов. Киев : Техника, 2007. 192 с.
14. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е издание, дополненное и переработанное. Москва : Металлургия, 1975. 368 с.

### References

1. Energy strategy of Ukraine for the period up to 2030. Special edition of the information and analytical bulletin. March 23, 2006. Kiev : Vidomosti of the Ministry of Energy of Ukraine, 2006. 144 p.
2. Nikiforova V. Economic review of the metallurgical gallery of Ukraine / Institute of Industrial Economics of the National Academy of Sciences of Ukraine. URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metallurhijnoi-haluziukrainy/#> (accessed 10/22/2022).
3. Ferrous metallurgy of Ukraine and prospects for the development of scientific research / V.I. Bolshakov, L.G. Tuboltsev. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Dnipropetrovsk : IChM NAS of Ukraine, 2007. Vip. 15. S. 3–18.
4. Trishkevsky O. Directly developing and thoroughly manufacturing hot-rolled sheet in Ukraine. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Road University*. Kharkiv : KhNAU, 2018. No. 80. P. 67–73.
5. Gostishchev V.O. Automatic control system of the recuperative heating well. *Vimiryuvalna that obchislyuvalna tekhnika in technological processes*. Khmelnytsky : KhNU, 2021. No. 1. S. 31–37.
6. Odaisky A., Barishenko O. M., Ovchinnikova I. A. Further analysis of the influx of heat inputs from the surface of a regenerative heating well on the ventilated gas. *Collection of scientific work of students, graduate students, doctoral students and young scientists “Young Science-2021”*. Zaporizhia : ZNU, 2021. Vol. 5. P. 122–123.
7. Revun M.P., Barishenko O.M., Soroka A.Yu., Pazyuk Yu.M. Development of a predictive control system for heating metal in thermal furnaces with a method of saving fire. *Collection of scientific works of the National Metallurgical Academy of Ukraine*. Dnepropetrovsk : New ideology, 2009. Issue 1 (16). P. 155–165.
8. Revun M.P., Kayukov Yu.M., Cheprasov O.I., Ivanov V.I., Pulpinsky V.B. Research of the thermal robot of the chamber heating furnace for the removal of the pulsed supply of fire at the period of the heating chamber. *Metallurgical heat engineering* : collection of scientific papers of the National Metallurgical Academy of Ukraine. Dnepr : New ideology, 2012. Iss. 4 (19). P. 158–164.
9. Sereda B.P., Prishchip M.G., Kruglyak I.V., Vasilchenko T.O. Rolling of sheets and headquarters : introductory manual for students of ZDIA specialty 6.05040104, 7.05040104, 8.05040104 “Processing of metal with a vise”. Zaporozhzhya : ZDIA, 2012. 184 p.

10. GOST 21014-88. Rolled ferrous metals. Terms and definitions of surface defects. Date of introduction 1990-01-01. Ed. Of. Moscow : Standards Publishing House, 1989. 61 p.
11. DSTU 8781:2018. Forks made of steel. Deep technical mind. Chinniy vid 2019-01-01. View. official. Kyiv : Derzhspozhivstandart of Ukraine, 2018. 33 p.
12. Technological instruction No. 25050.00037 "Heat treatment of castings, welded metal structures, forgings and blanks from rolled products in the heat-cut shop No. 9". Dnepropetrovsk : JSC "Dneprotyazhmash", 2008. 52 p.
13. Grebelny, V.N. Improving the efficiency of the heating wells of rolling shops. Kyiv : Technique, 2007. 192 p.
14. Kazantsev E.I. Industrial ovens : reference guide for calculations and design. 2<sup>nd</sup> edition, enlarged and revised. Moscow : Metallurgiya, 1975. 368 p.

**Petryk Oleksiy Anatoliyovych**, Candidate of Technical Sciences, National University "Zaporizhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-5824-6287

**Vorobiov Pavlo**, Candidate of Technical Sciences, National University "Zaporizhia Polytechnic", ORCID: 0000-0003-4200-4424

**Vorobiov Pavlo**, Student, National University "Zaporizhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-9528-4610

### **METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR ASSESSING METAL HEATING MODES IN HIGH-TEMPERATURE UNITS THAT AFFECT PRODUCT QUALITY**

This article discusses the methodical principles of evaluating metal heating modes in high-temperature units that affect product quality. The main factors influencing the quality of products are considered, namely: heating temperature, time of holding the metal in the heating mode, heating speed, and others. The methodological principles described can be used in industry to improve the production process and improve product quality. The research topic of metal heating modes in heating wells is relevant in the context of increasing the efficiency of the production of metal products and reducing production costs. The main problem is the instability of thermal processes in heating wells under variable technological regimes. The purpose of the study is to improve the thermal regimes of metal heating in heating wells in order to increase production efficiency and reduce costs. A study of the influence of technological delays on thermal processes in heating wells was conducted. For the analysis of thermal processes in heating wells, a mathematical model of the metal heating process was used, which made it possible to assess the impact of changing technological regimes on thermal processes. It was established that when the metal is heated, taking into account the additional time spent in the well from 1 to 25 hours, the mass of slag changes from 10,7 to 40,8 kg/t, and the thickness of the melting crust changes from 5,56 to 14,1 mm. The obtained dependence of the thickness of the burning crust on the duration of the presence of metal in the well can be used to preemptively control the process of heating the metal and prevent dissection and oxidation of sub-crustal gas bubbles. Which will help avoid the formation of torn edge defects and reduce the amount of metal that is melted, as well as reduce the consumption of metal with slag. The obtained results can be used in the production of metal products for further research to improve the technological regimes of metal heating in heating wells.

**Keywords:** metal heating modes, high-temperature units, product quality, heating temperature, heating speed, improvement, thermal modes, heating pads, technological delays, energy efficiency

Стаття надійшла до редакції 11.05.2023 р.