

**О. А. ПЕТРИК, І. А. НАЗАРЕНКО, Б. В. ПЕТРИК**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ АГРЕГАТАХ**

У даній статті розглянуто вдосконалення теплових режимів нагріву металу в нагрівальних колодцях та виконано оцінювання режимів нагрівання металу у високотемпературних агрегатах, що впливають на якість продукції. Розглянуто основні фактори, які впливають на собівартість продукції, а саме, витрати шлаку та умовні витрати палива при різній температурі нагрівання та часі утримання металу. Описані розрахунки можуть бути використані в промисловості для вдосконалення процесу виробництва та зниження собівартості продукції. Тема дослідження режимів нагріву металу 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 дослідження є вдосконалення теплових режимів нагріву металу в нагрівальних колодцях з метою підвищення ефективності виробництва та зниження витрат. Проведено дослідження впливу технологічних затримок на теплові процеси в нагрівальних колодцях. Для аналізу теплових процесів в нагрівальних колодцях було використано розрахунковий спосіб, що дозволило оцінити вплив зміни технологічних режимів на показники нагрівання металу. Розрахунок товщини кірки, що вигорає, можна використовувати для превентивного керування процесом нагрівання металу і попереджати розтин та окислення підкіркових газових пузирів. 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 для удосконалення технологічних режимів нагріву металу в нагрівальних колодцях, зокрема, врахувати вплив інших факторів на теплові процеси та вивчити можливості використання новітніх технологій для підвищення ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

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

**A. PETRIK, I. NAZARENKO, B. PETRIK**

## **INCREASING THE METAL HEATING EFFICIENCY IN HIGH-TEMPERATURE UNITS**

This research paper delves into the improvement of the thermal modes of metal heating in the heating wells and it evaluates the metal heating modes in high-temperature units that affect the quality of products. Consideration was given to the main factors that affect the production cost, namely, slag consumption and conventional fuel consumption at different heating temperatures and metal holding times. The described calculations can be used in industry to improve the production process and reduce the cost of production. The research topic relating to 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 this study was to improve the thermal modes of metal heating in heating wells in order to increase production efficiency and reduce costs. The effect of the technological process delays on thermal processes in heating wells has been studied. To analyze thermal processes in heating wells, a calculation method was used that enabled the assessment of the effect of the changed technological regimes on metal heating indices. The calculation of the thickness of the burning-out crust can be used to preemptively control the metal heating process and prevent the dissection and oxidation of sub-crustal gas bubbles. It will help avoid the formation of such defects as the torn edge and reduce the amount of melted metal, as well as reduce the consumption of slagged metal. The obtained results can be used in the production of metal articles for further research to improve the technological regimes of metal heating in heating wells, in particular, to take into account the influence of other factors on thermal processes and to study the possibilities of using the latest technologies to increase the efficiency and competitiveness of production.

**Key words:** metal heating modes, high-temperature units, product quality, heating temperature, heating rate, improvement, thermal modes, heating wells, technological process delays, and the energy efficiency.

### **Вступ**

Однією з головних проблем сучасного світу є пошук економії енергоресурсів та зниження собівартості виробництва, а саме палива. Високотемпературні агрегати є одними з найбільших споживачів палива. Теплотехнологічна установка, являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію. Витрати палива для нагрівання металу у високотемпературних нагрівальних колодцях 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 металу у нагрівальних агрегатах, як технологічних (черговість видачі за

сортаментом), так і зовнішніх (повітряні тривоги, знеструмлення станів та інше), що призводить до його наднормативного знаходження у колодязі (відхилення від мінімального потрібного часу (за технологією) знаходження металу у колодязі). При цьому метал знаходиться в них тривалий час при температурах вище 1300 °С, що призводить до значних втрат металу за рахунок спалювання кірки, оплавлення та окалиноутворення, а також до підвищеної витрати палива, що в свою чергу впливає на підвищення собівартості продукції.

Створення і дослідження раціональних та перспективних режимів нагрівання металу при тривалому знаходженню в нагрівальних колодцях, з вдосконаленням технологічного процесу, є актуальним завданням [1], [2].

© О. А. Петрик, І. А. Назаренко, Б. В. Петрик, 2023

## Мета роботи

Метою дослідження є вдосконалення теплових режимів нагріву металу в нагрівальних колодцях з метою підвищення ефективності виробництва та зниження витрат, а також дослідження впливу технологічних затримок на теплові процеси та витрати палива.

## Виклад основного матеріалу

На металургійних підприємствах [3] технологію нагріву зливок 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 знеуглецювання об'єднують в одну групу. Зливки кожної групи нагрівають за одним і тим же технологічним режимом. Розглянемо 1 групу марок сталі, наприклад марки сталі 0,8 кп.

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 періодом злитків [1] – [3]. Перший період називають

періодом нагріву, а другий період – періодом витримки. Тепловий потік на метал у початковому періоді має понижені значення, а температура поверхні зливка підвищується з швидкістю нагрівання поверхні [4]. У нагрівальний колодязь зазвичай надходить до 95 % злитків гарячого посада з температурою поверхні, що не перевищує 950 °С – 1000 °С. Недоліком процесу нагрівання металу є те, що перед виданням зливок у прокат метал треба рівномірно прогріти та він потрібен бути вигрітий до заданої температури видачі, незважаючи на те, що він знаходився у колодязі тривалий час. Тобто після посадки металу у колодязь подається паливо, метал нагрівається до температури (наприклад, 1380 °С) потім, у випадку технологічної затримки, закривається подача палива, йде витримка і, після отримання замовлення, він знову вигрівається до заданої температури, і так може буди декілька разів в залежності від переагровлень. При цьому велика частка металу, що нагрівається, пересиджує від готовності довше однієї години.

Пропонуються при передбаченні тривалої затримки знизити початкову температуру нагрівання металу з 1380 °С (базовий тепловий режим) до 1360 °С (тепловий режим № 1), 1340 °С (тепловий режим № 2) та 1320 °С (тепловий режим № 3) з поступовим вигріванням до температури 1380 °С перед виданням (рис. 1).

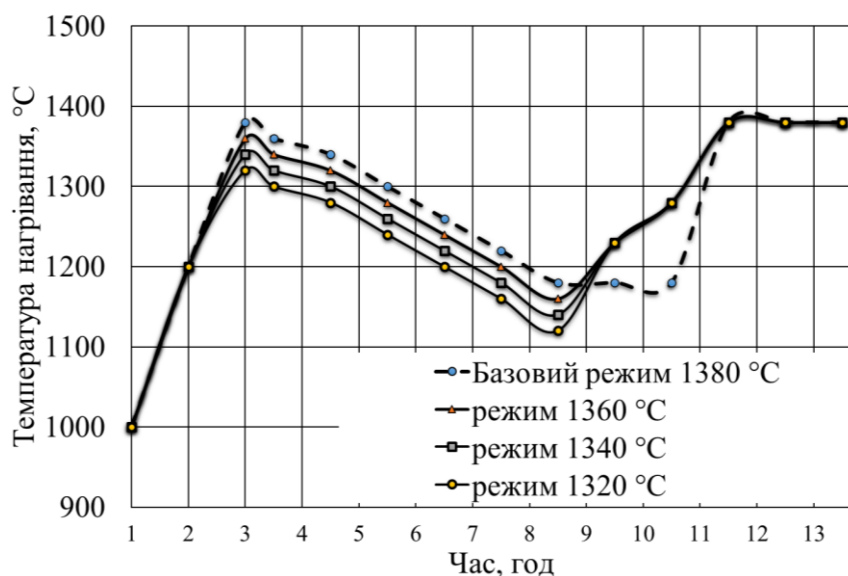


Рис. 1 – Графік нагрівання металу у часі при різних температурних режимах

Оцінку ефективності кожного з режимів зробити за наступними критеріями: товщина кірки зливка, що вигорає, витрати металу зі шлаком та витрати палива на одиницю маси металу.

Згідно методики [5] виконано розрахунок витрати шлаку, палива та товщину кірки, що вигорає при нагріванні злитків у нагрівальних колодязях.

Коефіцієнт окалиноутворення (залежить від температури томлення, мм/год<sup>0,5</sup>):

$$k_T = e^{\frac{10125}{T} + 7,25}, \quad (1)$$

де  $T$  – середня температура поверхні злитка.

Квадрат товщини окалини, що сплавляється в шлак, мм<sup>2</sup>:

$$S^2 = 1,2k_T^2 \left( \frac{T}{2C} t_n + t_T \right), \quad (2)$$

де 1,2 – коефіцієнт, що враховує утворення окалини при роздяганні, посадці та видачі зливків;

$C$  – постійна змінна, рівна 10125;

$t_n$  та  $t_T$  – тривалість нагріву та томлення відповідно, години.

Витрата металу на шлак, кг/м<sup>2</sup>:

$$Y = 31,6S, \quad (3)$$

де  $S$  – товщина окалини, що сплавляється в шлак.

Знаходимо масу шлаку за формулою, кг:

$$M = YS. \quad (4)$$

Витрата шлаку для дослідної технології нагрівання злитків, кг/т:

$$Y_{гор} = \frac{M}{m}, \quad (5)$$

де  $m$  – маса злитку, 16,0 т.

Зниження витрати шлаку при нагріванні металу, кг/т:

$$\Delta P = \frac{Y_{гор}}{m}. \quad (6)$$

Загальний час знаходження металу у колодязі:

$$t = t_n + \tau, \quad (7)$$

де  $\tau$  – відхилення від мінімального потрібного часу (за технологією) знаходження металу у колодязі, год.

Умовні витрати палива

$$B = \frac{Q_{пал} t Q_n k}{7000 m}. \quad (8)$$

де  $Q_{пал}$  – середньо годинні витрати палива, м<sup>3</sup>/год;

$Q_n$  – теплотворна спроможність палива, кДж/м<sup>3</sup>;

$k$  – кількість відділень у колодці, од.

Примітка: паливо перераховується в умовне шляхом множення обсягу конкретного виду палива в натуральному вираженні на його фактичний тепловий еквівалент, який визначається як відношення нижчої теплоти згоряння робочого стану палива до теплоти згоряння 1 кг умовного палива.

Розрахунок виконаємо для умов: час транспортування металу перед посадженням у нагрівальні колодязі 2 год 45 хвилини; вид посаду: гарячий посад; марка сталі: 0,8 кп; температура нагрівання 1380 °С (базовий тепловий режим), 1360 °С (тепловий режим № 1), 1340 °С (тепловий режим № 2) та 1320 °С (тепловий режим № 3); мінімальний час знаходження металу у колодязі 3 год.

Витрати палива, м<sup>3</sup>/год у часі при різних температурних режимах зображено на рис. 2.

Примітка: На рис. 2 витрати палива дорівнюють 0 м<sup>3</sup>/год у випадках ізотермічної витримки, цей період, при якому припиняється подавання газової суміші та повітря на нагрівання металу. В цей час димові шибери ставляться у нульове положення. Температура у робочому просторі знижується за рахунок теплових втрат через футерування, вікна для догляду та щілини між кришкою та робочим простором.

Товщина кірки, що вигорає, умовні витрати шлаку та палива, при різних режимах нагрівання металу зображено на рис. 3–5. Результати розрахунків зведено в табл. 1.

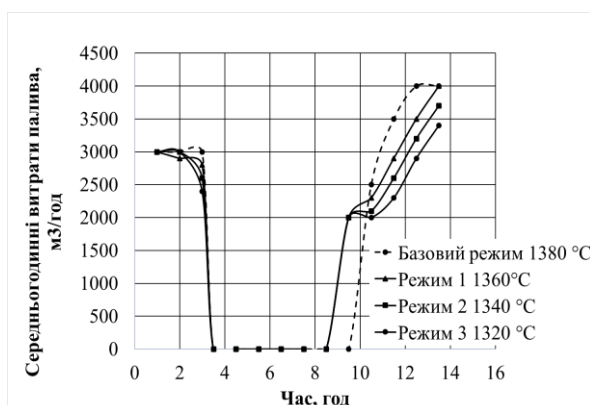


Рис. 2 – Витрати палива, м<sup>3</sup>/год у часі при різних температурних режимах

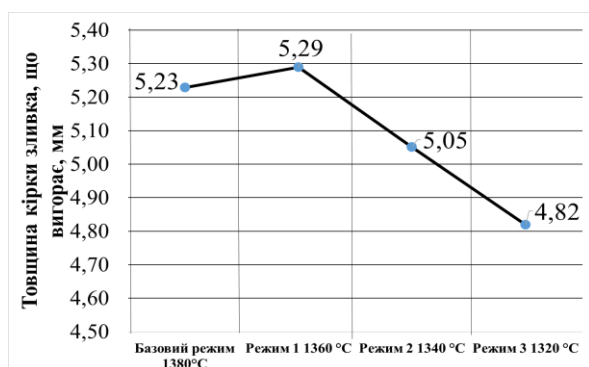


Рис. 3 – Товщини кірки, що вигорає, при різних режимах нагрівання металу

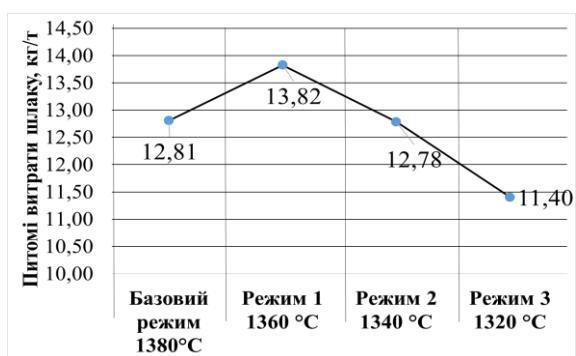


Рис. 4 – Питомі витрати шлаку, при різних режимах нагрівання металу

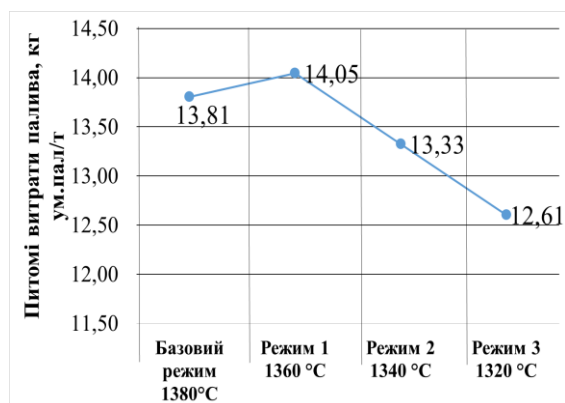


Рис. 5 – Питомі витрати палива, при різних режимах нагрівання металу

Таблиця 1 – Зведення результатів розрахунку

Режим	Температура, °C	Товщина кірки злитку, що вигорає, мм	Відхилення, мм	Питомі витрати шлаку, кг/т	Відхилення, кг/и	Питомі витрати палива, кг ум.п/т	Зниження витрати палива, кг ум.п/т
Базовий режим	1380	5,23	0,00	12,81	0,00	13,81	0,00
Режим № 1	1360	5,29	0,06	13,82	1,02	14,05	0,24
Режим № 2	1340	5,05	-0,18	12,78	-0,02	13,33	-0,48
Режим № 3	1320	4,82	-0,41	11,40	-1,41	12,61	-1,20

### Обговорення результатів

При базовому режимі нагрівання без відхилення за часом від номінального, товщина кірки, що вигорає становить 5,23 мм (з кожної грані зливу). При нагріванні за тепловим режимом № 1, товщина кірки, що оплавляється збільшується до 5,29 мм (+0,06 мм), за тепловим режимом № 2 – починається зменшення її згорання до 5,05 мм (-0,178 мм) і при тепловому режимом № 3 – зменшення її згорання до 4,82 мм (-0,41 мм).

Питомі витрати шлаку, які утворюються при нагріванні металу при базовому режимі нагрівання, становить 12,81 кг/т. При нагріванні за тепловим режимом № 1, питомі витрати шлаку збільшуються до 13,82 кг/т (+1,015 кг/т), за тепловим режимом № 2 – починається зменшення до 12,78 кг/т (-0,024 кг/т) і при тепловому режимом № 3 – вони зменшуються до 11,4 кг/т (-1,405 кг/т).

Питомі витрати палива на нагріванні металу при базовому режимі нагрівання, становить 13,81 кг ум.п/т. При нагріванні за тепловим режимом № 1, питомі витрати палива збільшуються до 14,05 кг ум.п/т (+0,24 кг ум.п/т), за тепловим режимом № 2 – починається зменшення до 13,33 кг ум.п/т (-0,48 кг ум.п/т) і при тепловому режимом № 3 – вони зменшуються до 12,61 кг ум.п/т (-1,2 кг ум.п/т).

Таким чином, найбільш раціональним є тепловий режим № 3 (при температурі 1320 °C), при

якому досягаються найбільш ефективні показники нагрівання металу.

Також, знаючи залежність товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металу 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, а також знизити витрати металу зі шлаком.

### Висновки

Виконано розрахунок витрат шлаку, палива та товщини кірки, що вигорає при нагріванні злитків у нагрівальних колодязях.

На основі проведених досліджень встановлено, що найбільш раціональним є тепловий режим № 3 (при температурі 1320 °C), при якому досягаються найбільш ефективні показники нагрівання металу.

При тепловому режимі № 3:

– питомі витрати шлаку, які утворюються при нагріванні металу зменшуються з 12,81 кг/т до 11,4 кг/т (-1,405 кг/т);

– питомі витрати палива на нагріванні металу зменшуються з 13,81 кг ум.п/т до 12,61 кг ум.п/т (-1,2 кг ум.п/т).

Знаючи залежність товщини кірки, що вигорає, від тривалості знаходження металу в колодязі

можна 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.

#### Список літератури

1. Губинский В. И. *Металлургические печи* : учеб. пособие / В. И. Губинский. – Днепр : НМетАУ, 2006. – 85 с.
2. Ревун М. П. *Расчёт управления форсированным нагревом термически массивных тел в камерных печах* / М. П. Ревун, В. Ю. Зинченко // *Металлургическая теплотехника* : сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск, 2006. – С. 285–293. – ISBN 966-96596-1-2.
3. Середя Б. П. *Прокатка листов та штаб : навч.-метод. посіб. для студ. ЗДІА спеціальності 6.05040104, 7.05040104, 8.05040104 «Обработка металлов тиском»* / Б. П. Середя, М. Г. Прищип, І. В. Кругляк, Т. О. Васильченко. – Запоріжжя : ЗДІА, 2012. – 184 с.
4. Гребельный В. И. *Повышение эффективности работы нагревательных колодцев прокатных цехов* / В. И. Гребельный, И. В. Куликов. – Киев : Техника, 2007. – 192 с.
5. Казанцев Е. И. *Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования*. – 2-е изд., доп. и переп. – 1975. – 368 с.
6. Eskin G. I. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, Gordon and Breach / G. I. Eskin. – Amsterdam : PNT, 1998. – 234 p.
7. Большаков В. И. *Влияние механических колебаний на распределение легирующих элементов в стали Гадфильда (110Г13Л)* / В. И. Большаков, Н. А. Ротт // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – 2013. – № 10(187). – С. 4–9. – ISSN 2312-2676.

ровської державної академії будівництва та архітектури. – 2013. – № 10(187). – С. 4–9. – ISSN 2312-2676.

#### References (transliterated)

1. Gubinskiy V. I. (2006), *Metallurgicheskiye pechi* [Metallurgical furnaces], NMetAU, Dnepr, 85 p.
2. Revun M. P., Zinchenko V. Yu. (2006), “Raschjot upravlenija forsirovannym nagrevom termicheski massivnyh tel v kamernyh pechah [Calculation of forced heating control of thermally massive bodies in chamber furnaces]”, *Metallurgical Heat Engineering*, pp. 285–293, ISBN 966-96596-1-2.
3. Sereda B. P., Pryshchyp M. H., Kruhlyak I. V., Vasylichenko T. O. (2012), *Prokatka lystiv ta shtab : navch.-metod. posib. dlja stud. ZDIA special'nosti 6.05040104, 7.05040104, 8.05040104 “Obrobka metaliv tyskom”* [Rolling of sheets and stacks], ZDIA, Zaporizhia, 184 p.
4. Grebel'nyj V. I., Kulikov I. V. (2007), *Povyshenie jeffektivnosti raboty nagrevatel'nyh kolodcev prokatnyh cehov* [Increasing the efficiency of the heating blocks of the rolling shops], Tekhnika, Kiev, 192 p.
5. Kazantsev Ye. I. (1975), *Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlja raschetov i proektirovaniya* [Industrial furnace. Reference guide for calculations and design], 368 p.
6. Eskin G. I. (1998), *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*, Gordon and Breach, PNT, Amsterdam, 234 p.
7. Bolshakov V. I., Rott N. A. (2013), “Vlijanie mehanicheskikh kolebanij na raspredelenie legirujushchih jelementov v stali Gadfil'da (110G13L) [Influence of vibration on the distribution of alloying elements in steel Hadfield (110G13L)]”, *Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 10, pp. 4–9, ISSN 2312-2676.

Надійшла (received) 05.05.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Петрик Богдан Вячеславович (Petryk Bogdan)** – студент кафедри Електричних машин Національного університету «Запорізька Політехніка»; м. Запоріжжя; тел.: (063) 691–73–39; e-mail: dartbogdan32@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9528-4610>.

**Назаренко Ірина Анатоліївна (Nazarenko Iryna)** – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Запорізька Політехніка», доцент кафедри Електричних машин; м. Запоріжжя; тел.: (099) 704–96–36; e-mail: irinan842@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424>.

**Петрик Алексій Анатолійович (Petryk Oleksiy)** – кандидат технічних наук, доцент Національного університету «Запорізька Політехніка»; м. Запоріжжя; тел.: (050) 418–45–31; e-mail: iternel17@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6287>.