

## Встановлення змін температурного поля графітованого порожнистого електрода за періодами обробки металу на установці «ківш-піч»

В. О. Рубан, О. М. Стоянов, К. Г. Нізяєв, Є. В. Синегін

Виконано аналіз процесу нагріву графітованого порожнистого електрода (ГПЕ) при обробці сталі на установці «ківш-піч». Наведені результати чисельного моделювання роботи електрода. Отримані дані температурного поля електрода при подачі електроенергії і в періодах без електронавантаження. Розраховані значення Джоулевої теплоти, що виділяється в процесі роботи електрода в періоди нагріву металу на установці «ківш-піч», які склали 1,11–1,15 МВт/м<sup>3</sup>. Виконаний розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі конвекцією для внутрішньої і зовнішньої поверхні ГПЕ значення якого, відповідно, склали 1,60 і 1,80 та 5–17 Вт/(м<sup>2</sup> °С). Отримані значення температурного градієнту електрода в високотемпературній зоні, які для першого періоду нагріву досягали 8286 °С/м, а третього до 6571 °С/м. Встановлено, що в періоди охолодження електрода градієнт температур суттєво знижується і становить до внутрішньої поверхні 379 °С/м; до зовнішньої поверхні 3613 °С/м; і вертикальній площині до торця електрода 1469 °С/м. Визначені напрямки покращення теплової роботи установки і зниження ресурсовитрат при позапічній обробці сталі.

Визначено, що в періоди експлуатації електрода з подачею струму відзначається істотні значення градієнту температур, які зосередженні в торцевій частині. В періоди експлуатації без подачі струму спостерігається утворення локально перегрітої зони, що має форму сплющеного уздовж осі тора, яка сформувалася в результаті акумуляції тепла попереднього періоду. Отримані дані, щодо впливу подачі газу через порожнистий електрод на параметри формування високотемпературних областей ГПЕ. Показано, що подача нейтрального газу через графітований порожнистий електрод з витратами 0,05 м<sup>3</sup>/хв зміщує високотемпературну зону до периферії на 3,5–4,2 мм, а також зменшує її висоту на 1,0–1,2 мм.

Проведені дослідження дозволять виконати розрахунки доцільних витрат газу і матеріалу для регулювання окисленості металу і шлаку, зменшити витрати графітованого електрода, знизити енерго- і ресурсовитрати на виробництво металу.

Ключові слова: чисельне моделювання, установка «ківш-піч», графітований порожнистий електрод, градієнт температур, граничні умови.

### 1. Вступ

Сталеплавильний комплекс характеризується застосуванням науково-технічних розробок, спрямованих на зниження енерго- і ресурсозатрат при одночасному підвищенні якості та обсягів продукції, що випускається. Одним з пріоритетних напрямків сталеплавильного виробництва в теперішній час є по-

запічна обробка сталі, яка вирішує досить значне коло питань з поліпшення якості металу і підвищення продуктивності сталеплавильних агрегатів.

Удосконалення технологій позапічної обробки сталі пов'язано з проведенням широкого кола теоретичних досліджень, що дозволить отримати математичне і фізичне описання процесів позапічної обробки металу і забезпечить їх практичне здійснення на виробництві. Ключовими операціями позапічної обробки сталі є її підігрів і її продування інертним газом через погрузні фурми або донні продувальні блоки в сталерозливному ковші.

Основним джерелом теплової енергії для нагріву сталі при позапічній обробці є електрична дуга, яка відтворена за допомогою трьох графітованих електродів (ГЕ). Вартість електродів при виплавці сталі складає одну з істотних витратних статей готової продукції, тому актуальним завданням при зниженні собівартості готової продукції є зменшення питомої витрати електродів.

В процесі високотемпературного нагріву ГЕ відбувається його фізичне і хімічне руйнування, внаслідок утворення локально перегрітих зон в об'ємі, а також окислення його поверхні газами які виділяються в процесі нагріву. На даний момент відсутні достовірні дані щодо експлуатації порожнистих електродів, при позапічній обробці сталі. Існують об'єктивні труднощі, пов'язані з визначенням раціональних умов подачі матеріалів і газів через отвір електроду і визначенням впливу їх на температурний стан тіла електроду.

Виходячи з цього, актуальним завданням є оцінка температурного поля по всьому об'єму графітованого електрода в різні періоди обробки сталі на установці «ківш-піч».

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В роботі [1] показано, що основними операціями позапічної обробки сталі є рафінування, розкислення, легування і модифікування. Для успішного проведення цих операцій застосовують продувку металу інертним газом через донні продувні блоки сталерозливного ковша. Але залишається не вирішеним питання компенсації втрат теплоти при використанні газів і не пояснюється досягнення заданих показників масообміну.

Варіантом компенсації втрат теплоти при позапічній обробці металу інертними газами є використанням теплової енергії отриманої від електричної дуги, яка формується за допомогою трьох графітованих електродів (ГЕ) [2]. Однак в роботі не в повній мірі приведені дані щодо використання резервів енергетичного потенціалу електричної дуги і як це вплине на собівартість металу.

Автори робіт [3, 4] приводять дані вартості електродів при виплавці сталі і показують, що цей показник становить 8–12,5 % в собівартості сталі і залежить, в першу чергу, від витрат електрода. При цьому приведені дані характерні лише для виплавки металу в електропечах і не можуть бути в повній мірі використані при обробці металу на установці «ківш-піч».

Результати досліджень [5] показують, що основними факторами, які визначають витрату електрода є фізичне і хімічне руйнування. До фізичного відносять – теплові і механічні навантаження, а до хімічного – окислення бічної поверхні, знос торця електрода внаслідок сублімації графіту в дузі. При цьому

автори роботи не приводять дані щодо переважного впливу фізичного або хімічного зносу електрода.

Одним з шляхів зменшення витрат електрода є нерівномірний нагрів і перегрів в процесі експлуатації. Так в дослідженнях проведених [6, 7] показано, що одним з ефективних способів зниження температури ГЕ є випарне охолодження бічної поверхні, застосування даного методу дозволило зменшити витрати електрода в 1,5 рази. Однак автори не привели дані щодо температурних полів електрода в різних режимах експлуатації.

В роботах [8, 9] проведений аналіз експлуатації графітованого порожнистого електрода (ГПЕ) при обробці металу на установці «ківш-піч». Показано позитивний вплив подачі газів через отвір в електроді на параметри обробки металу і витрати. Так, покращились умови десульфурзації металу, зменшився час обробки, також відмічена тенденція до зниження витрат електрода.

Авторами роботи [10] був підтверджений позитивний вплив інжекції молекулярних газів на потужність стабілізованої аргоном електричної дуги. Зокрема відмічене збільшення потужності електричної дуги при вдуванні 20 % діоксиду вуглецю. Однак використання цього газу неминуче призводить до окислення компонентів розплаву. Так, в ході експериментів асиміляція кисню розплавом складала 10–28 % залежно від наявності шлаку на дзеркалі металу. Непогані результати були також отримані при використанні 3 % пропану і 3 % метану. При цьому використання метану і пропану не викликає суттєвого науглецювання металу, оскільки гальмується кінетично.

Проведені дослідження впливу інжекції молекулярних газів на видалення нітрогену з металу [11]. Інкєкція 10 % водню та 5 % метану призводять до утворення на поверхні металу відповідно ціанідної (синильної) кислоти та аміаку внаслідок чого вміст нітрогену в металі зменшувався з 200 до 20 ppm впродовж 80 хв. Також спостерігалось збільшення вмісту водню в металі у 2–4 рази, однак шляхом вдування чистого аргону наприкінці обробки його вміст повертався до початкового, при цьому не показано вірогідності отримання заданих концентрацій.

Приведені авторами дані не в повній мірі описують процес впливу подачі газу через електрод на його температурні характеристики, а більш приділяють увагу саме технологічним показникам. Такий підхід не дозволяє сформулювати теоретичні передумови для визначення особливостей впливу факторів на процес руйнування електрода.

На основі проведеного аналітичного огляду визначена відсутність достовірних даних щодо формування теоретичних передумов температурних режимів експлуатації графітованого порожнистого електрода. Також не визначено вплив подачі газу через порожнистий електрод на температурні показники, як бічної поверхні так і внутрішнього каналу електрода.

Все це дає підстави стверджувати, що дослідження направлені на визначення впливу зовнішніх факторів на температурні показники експлуатації електрода в процесі позапічної обробки металу на установці «ківш-піч» є досить актуальними.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є чисельне моделювання нагріву графітованого порожнистого електрода для отримання даних температурного поля електрода під час обробки сталі на установці «ківш-піч» за різних умов його експлуатації. Це дасть можливість провести розрахунки витрат газу і (або) матеріалів, які подаються через порожнистий електрод з можливістю подальшої оптимізації процесу обробки металу на установці «ківш-піч».

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

- розрахувати значення Джоулевої теплоти, що виділяється на електроді і встановити коефіцієнти тепловіддачі на зовнішній і внутрішній поверхні порожнистого електрода в різні періоди експлуатації;
- визначити показники температурного поля порожнистого електрода при подачі нейтрального газу за періодами обробки металу на установці ківш-піч.

### 4. Матеріали та методи дослідження температурного поля графітованого порожнистого електрода

Розрахунок температурних полів графітованого порожнистого електрода (ГПЕ) з подачею через нього аргону при обробці на установці «ківш-піч», виконаний за допомогою програмного продукту для чисельного моделювання методом кінцевих елементів. Для опису теплових процесів, що відбуваються в ході позапічної обробки сталі, використовувався модуль, який дозволяє проводити розрахунки нестационарного теплообміну.

Розрахунок базується на вирішенні рівняння Фур'є-Кірхгофа з внутрішнім джерелом тепла, що є диференціальним рівнянням енергії в декартовій системі координат:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{C \cdot p} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{C \cdot p}. \quad (1)$$

Диференціальне рівняння базується на рівнянні теплового балансу для нескінченно малого елемента тіла [12].

У зв'язку з тим, що УКП працює в різних теплових режимах, моделювання нагріву електрода включало 4 періоди: I – нагрів, II – простій, III – нагрів, IV – рафінування і заміна ковша. У II та IV періодах нагрів ГПЕ не здійснюється.

На першому етапі були задані початкові умови для розрахунку [13]: щільність графіту – 1700 кг/м<sup>3</sup>, теплопровідність графіту задавалась функцією –  $\lambda(t) = 162,82 - 0,0407t$  Вт/(м °С), питома теплоємність графіту –  $c(t) = 681,81 + 2,6673t - 0,0019t^2 + 5 \cdot 10^{-7}t^3$  кДж/(кг °С).

Для розрахунку створена 3D-модель електрода за розмірами [14]: довжина – 1,8 м; діаметр електрода – 0,45 м; діаметр порожнистого каналу в електроді – 0,09 м.

Наступним етапом роботи було накладення розрахункової сітки на ГПЕ, яка складалася з 16434 елементів і 72683 вузлів, що дозволяє отримувати більш точну інформацію на будь-якій ділянці тіла електрода.

Задані граничні умови для розрахунку нестационарної теплопередачі в кожному періоді позапічної обробки сталі. Для зовнішньої і внутрішньої поверхні ГПЕ і нижнього торця у всіх періодах задавалися граничні умови III роду, а для верхнього торця – граничні умови II роду. Параметри теплообміну були розраховані за методикою [7]. На кожному наступному періоді враховувалося температурне поле ГПЕ, отримане в кінці попереднього періоду.

Згідно з уявленнями про нестационарну передачу теплоти конвекцією [12] пов'язана з процесом руху газів і відбувається тим інтенсивніше, чим швидше і частіше обсяги газу будуть досягати поверхні нагрівання або охолодження. Однак не тільки процес руху, а й фізична природа газів, форма і розміри твердого тіла роблять свій вплив на тепловіддачу конвекцією.

Передача теплоти конвекцією це дуже складний процес, який залежить від умов руху, умов обтікання газом твердих тіл різної геометричної форми і розмірів, а також явища теплопровідності.

У ламінарному одновимірному потоці відсутні поперечні переміщення макрооб'ємів газу. Тому конвекційний перенос теплоти з потоку до поверхні твердого тіла відсутній. У цьому випадку передача теплоти всередині потоку здійснюється теплопровідністю, що підтверджується досвідом.

Режим руху газу в каналі ГПЕ характеризується числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{0,00524 \cdot 0,09}{0,000013} = 36, \quad (2)$$

де  $w$  – середньовитратна швидкість газу, м/с;  $d$  – діаметр внутрішнього каналу ГПЕ, м;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості газу, м<sup>2</sup>/с.

Визначено, що для заданих умов газ рухається в ламінарному режимі, тому розрахунок коефіцієнта конвективної тепловіддачі усередині каналу проводимо для вимушеної конвекції в ламінарному режимі з числа Нуссельта.

Число Нуссельта розраховували за формулою:

$$\overline{Nu}_n = 0,15 Re_n^{0,33} Pr_n^{0,43} Gr_n^{0,1} \left( \frac{Pr_n}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \overline{\varepsilon}_l, \quad (3)$$

де  $\overline{\varepsilon}_l$  – коефіцієнт що враховує зміну тепловіддачі уздовж каналу ГПЕ [12];

$Pr_{ст}$  – число Прандтля для стінки (індекс «ст») та  $Pr_n$  – для потоку газу (індекс «п»), що визначається за формулою:

$$Pr = \frac{\nu}{a}. \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Число Грасгофа розраховували за формулою:

$$Gr = \frac{g\beta d^3 (T_{п.сп} - T_{ст})}{\nu^2}, \quad (5)$$

де  $g=9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $(T_{п.сп}-T_{ст})$  – різниця температур між газом і поверхнею, К;  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{d\rho}{dT} \right)_{P=\text{const}}$  – коефіцієнт об'ємного розширення газів,  $\text{К}^{-1}$ .

Конвекційний теплообмін здійснюється в умовах спільного протікання процесів конвективного і кондуктивного перенесення теплоти. Згідно з теорією Прандтля, в будь-якому потоці в безпосередній близькості від поверхні твердого тіла виникає тонкий граничний шар. Через ламінарний граничний підшар теплота передається теплопровідністю, а до нього теплота підводиться конвекцією.

Теплообмін між поверхнею бокових стінок електрода та атмосферою усередині УКП відбувається за рахунок вільної конвекції та випромінювання. Визначення коефіцієнта конвекційної тепловіддачі вільною конвекцією [12] в діапазоні зміни  $Gr_{п} \cdot Pr_{п} > 10$  (що відповідає турбулентному руху середовища) для зовнішньої поверхні вертикально встановлених ГПЕ розраховували з формули:

$$\overline{Nu} = 0,15 (Gr_{п} \cdot Pr_{п})^{\frac{1}{3}} \cdot \left( \frac{Pr_{п}}{Pr_{ст}} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі для нижнього торця графітованого порожнистого електрода в періоди без нагріву [12]:

$$\overline{\alpha} = A \sqrt[4]{t_{ст} - t_{п}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}), \quad (7)$$

де  $A=1,63$  коефіцієнт, для горизонтальних поверхонь, направлених донизу.

$t_{ст}$  і  $t_{п}$  – температури відповідно поверхні і навколишнього середовища віддалена від поверхні,  $\text{°C}$ .

Для розрахунку теплопередачі випромінюванням в граничних умовах приймалася ступінь чорноти графіту 0,71 [13].

На останньому етапі були задані параметри розрахунку (час кожного періоду відповідно до табл. 1, а крок розрахунку, мінімальна і максимальна тривалість кроку задавались автоматично виходячи з тривалості періоду). Для верхнього торця ГПЕ були обрані граничні умови II роду – густина теплового потоку  $0 \text{ Вт/м}^2$ , що відповідає випадку відсутності передачі теплоти через нього. А для решти поверхонь були задані граничні умови III роду. Температурні умови середовища під кришкою УКП прийняті відповідно до загально відомих практик її експлуатації [14].

При виконанні розрахунку температурного поля ГПЕ враховано Джоулеве тепловиділення при проходженні змінного електричного струму об'ємом ГПЕ, вилічну якого розраховували за виразом [13]:

$$q_v = \frac{16 \cdot I^2 \rho}{\pi^2 (D_3^2 - D_B^2)^2}, \text{ МВт/м}^3 \quad (8)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу електрода, Ом·м,  $I$  – струм дуги (для трифазного змінного струму діюче значення струму), А,  $D_3$  і  $D_B$  – діаметр зовнішньої і внутрішньої поверхні ГПЕ, м.

У I та III періодах основна частка теплоти горіння дуги передається нижньому торцю електрода шляхом випромінювання. Враховуючи високу температуру горіння дуги частка конвективного теплопереносу є досить малою і нею знехтували. Оскільки у II та IV періодах вдування газу каналом ГПЕ не здійснюється, то теплопередача відсутня оскільки температура поверхні каналу і газу в ньому є однаковими.

## 5. Результати дослідження змін температурного поля графітованого порожнистого електрода за періодами обробки металу

### 5.1. Розрахунки значень Джоулевого тепловиділення і коефіцієнтів тепловіддачі

Для отримання даних змін температурного поля графітованого порожнистого електрода виконані розрахунки основних теплофізичних показників процесу експлуатації електрода в процесі обробки металу на установці «ківш-піч».

Значення розрахунку Джоулевого тепловиділення для першого періоду обробки склали 1,11 МВт/м<sup>3</sup> для третього 1,15 МВт/м<sup>3</sup>.

В табл. 1 приведені значення коефіцієнтів тепловіддачі Вт/(м<sup>2</sup>·°C) відповідно до прийнятих періодів обробки металу.

Таблиця 1  
Коефіцієнти тепловіддачі конвекцією, Вт/(м<sup>2</sup>·°C)

Область	Період			
	I (6 хв)	II (4 хв)	III (10 хв)	IV (25 хв)
Зовнішня поверхня ГПЕ	5	3,7	3,4	17
Внутрішня поверхня ГПЕ	1,6	–	1,8	–
Нижній торець ГПЕ	–	11	–	13

Результати розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі узгоджуються з даними роботи [14] щодо їх величини за умов вільної та вимушеної конвекції у газовому середовищі.

### 5.2. Визначення значень температурного поля графітованого порожнистого електрода в різні періоди експлуатації

За результатами проведеного чисельного моделювання отримані дані щодо основних температурних характеристик ГПЕ. Загальна картина зміни температур в періоди нагріву (I і III) і витримки (II і IV) представлена на рис. 1.

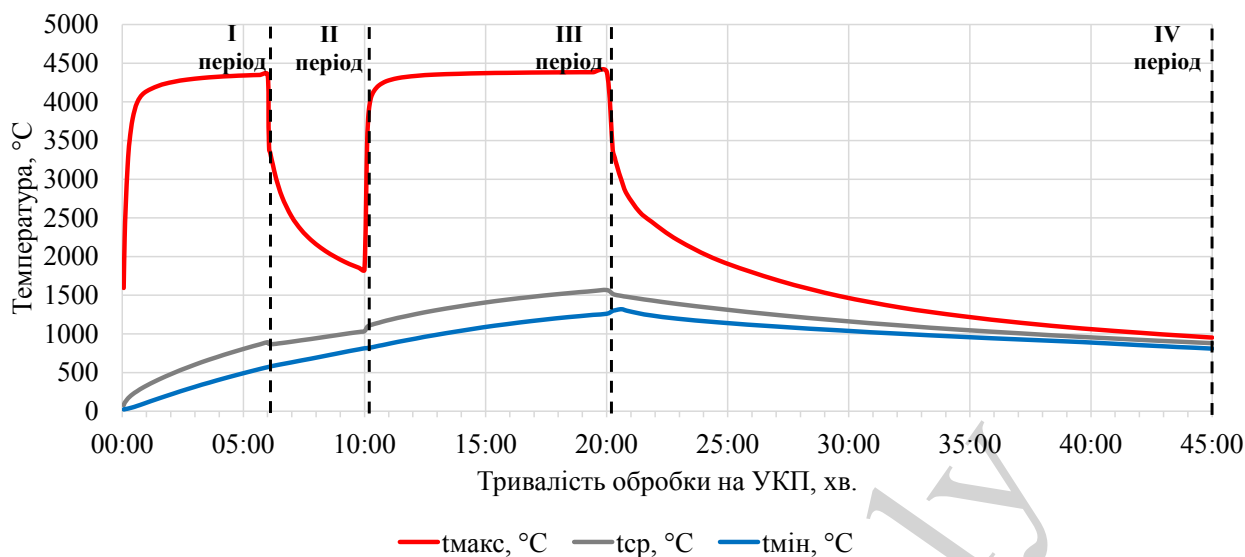
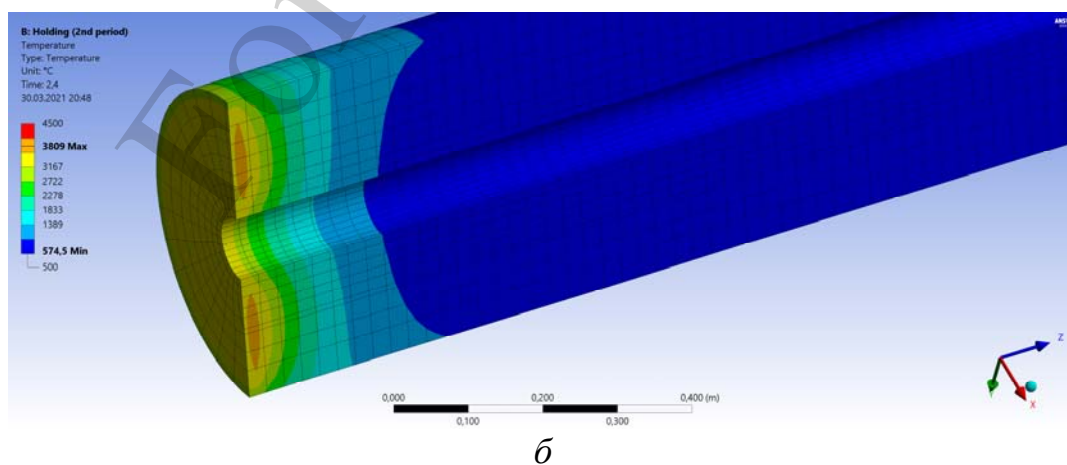
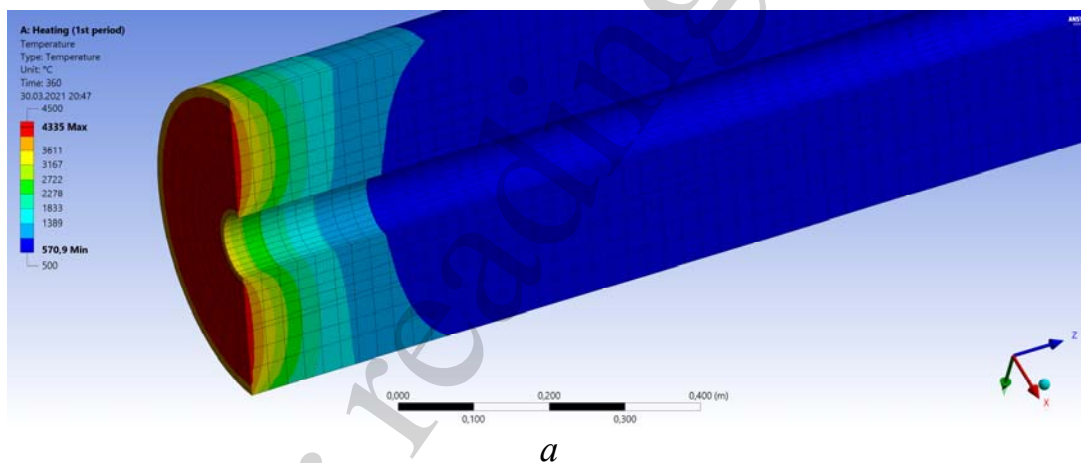
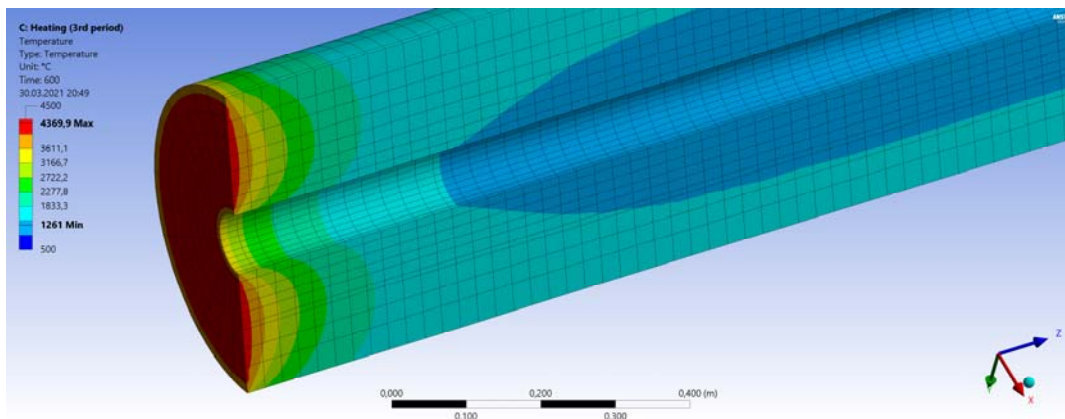


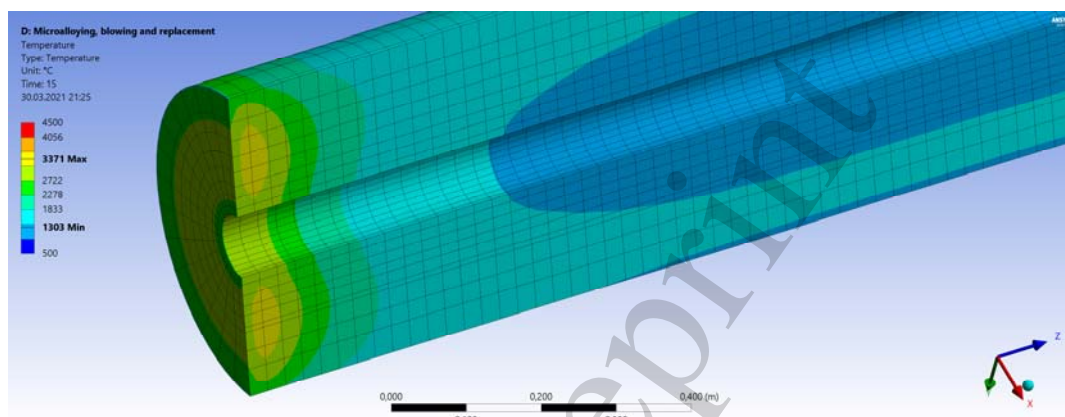
Рис. 1. Зміни температур в об'ємі ГПЕ в різні періоди обробки сталі на УКП

На рис. 2 представлено температурне поле 3D моделі ГПЕ у кожному періоді обробки сталі на установці «ківш-піч»





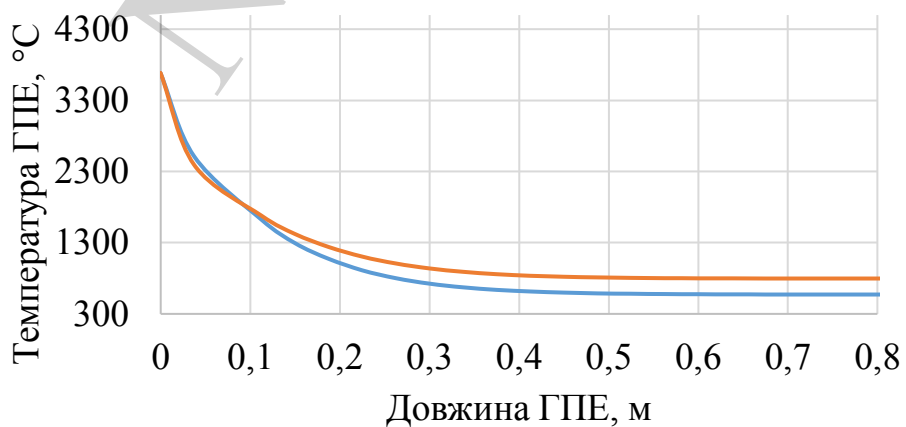
*б*



*г*

Рис. 2. Модель ГПЕ в поздовжньому розрізі за I, II, III і IV період позапічної обробки сталі: *а* – I період; *б* – II період; *в* – III період; *г* – IV період

Дані зміни температури по довжині електрода на зовнішній і внутрішній поверхні наприкінці періодів нагріву металу на установці «ківш-піч» наведені на рис. 3.



— Внутрішня поверхня — Зовнішня поверхня

*а*

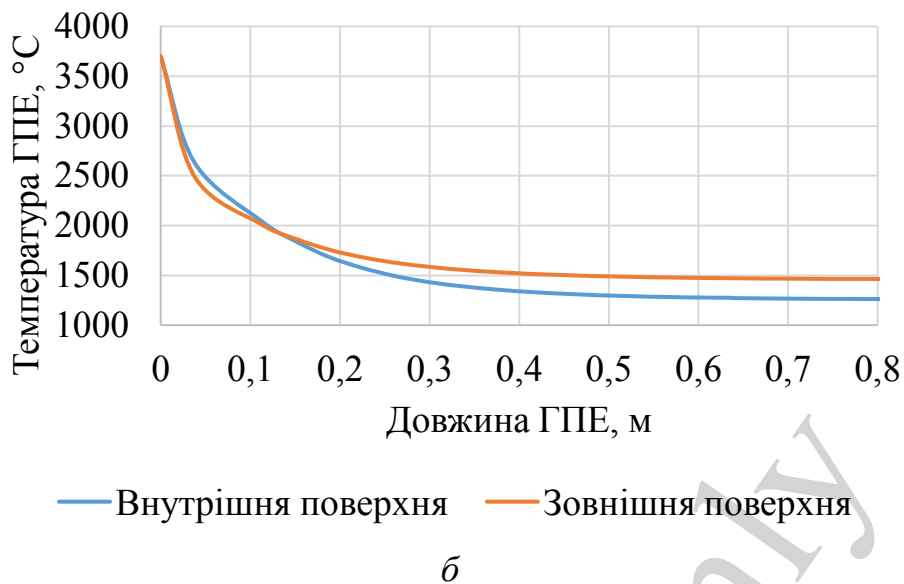
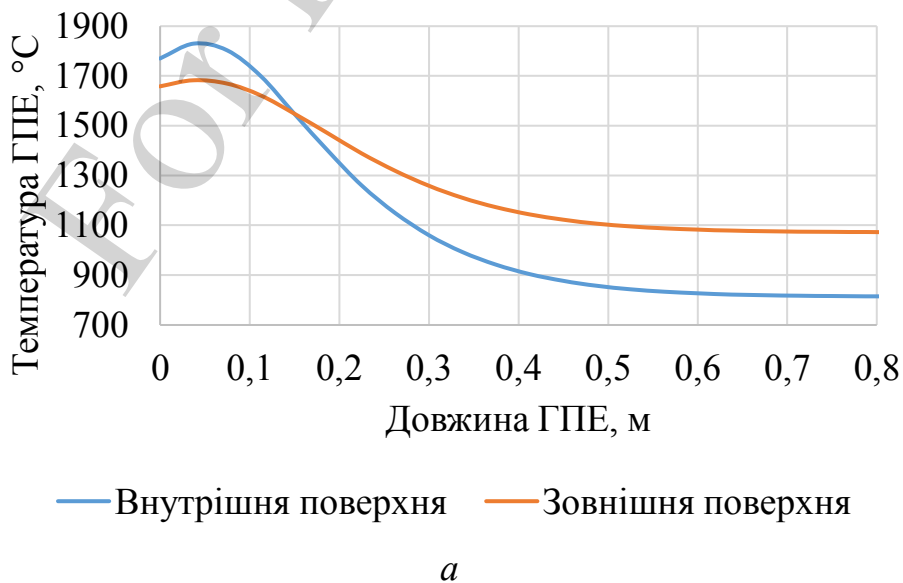


Рис. 3. Зміна температури на зовнішній і внутрішній поверхні ГПЕ по його довжині за періоди обробки сталі: *a* – I період; *б* – III період

На рис. 4 приведені значення зміни температури поверхні порожнистого електрода без подачі електроенергії і нейтрального газу.

Отримані дані температурних значень як бічної поверхні електрода так і внутрішньої свідчать про досить складний характер формування зон нагріву і охолодження, особливо при переході з одного режиму до іншого. Також, можна відмітити тенденцію незначних змін теплофізичних характеристик електрода на встановленій ділянці від нижньої частини електрода. Подача нейтрального газу через отвір в електроді дещо покращує охолодження лише внутрішньої частини електрода і в періодах без подачі електроживлення.



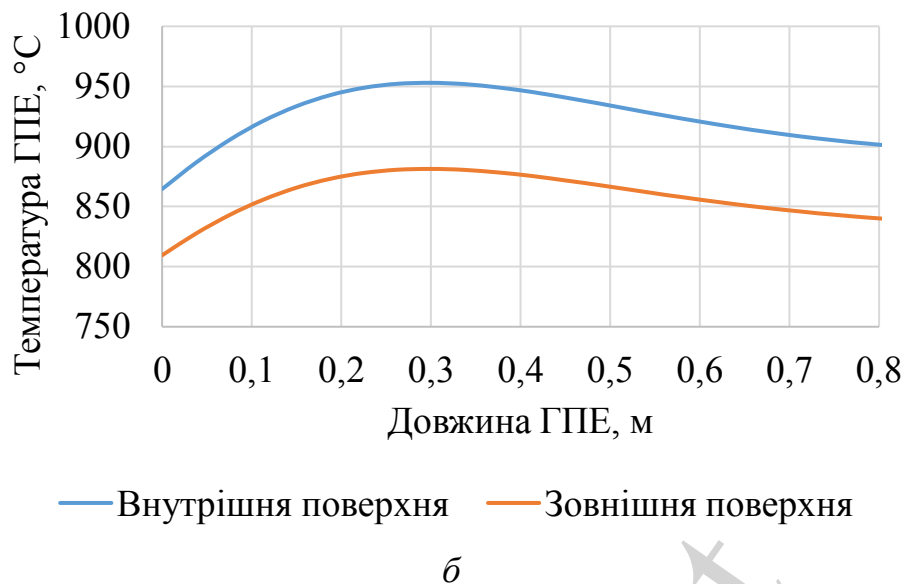


Рис. 4. Зміни температури на зовнішній і внутрішній поверхні ГПЕ по його довжині наприкінці: *a* – II періоду; *б* – IV періоду

#### 6. Обговорення результатів досліджень змін температурного поля графітованого порожнистого електрода

Результати досліджень переконливо свідчать про досить суттєві зміни температурного поля електрода в залежності від періодів експлуатації і подачі нейтрального газу.

Оскільки збільшення мінімальної температури носить практично лінійний характер, то можна зробити висновок, що віддалені від дуги ділянки електрода нагріваються переважно за рахунок Джоулевої теплоти. Теж саме можна сказати про середньо масову температуру. Максимальні значення температури ГПЕ спостерігаються в області нижнього торця електрода оскільки джерелом теплоти нагріву цієї частини є саме електрична дуга (рис. 2). Різкий приріст максимальних значень температури електрода, що спостерігається на початку I і III періоду нагріву, є наслідком великої різниці температур дуги і торця електрода в подальшому процесі нагріву електрода уповільнюється.

Протилежна картина спостерігається у II та IV періодах після припинення нагріву металу (рис. 1). Висока різниця температур зовнішнього середовища і нижнього торця електрода сприяє швидкому охолодженню останнього. Додатковий вплив на швидке охолодження електрода має високий градієнт температур по його довжині. Через стрімке охолодження торця електрода різниця температур між ним і навколишнім середовищем зменшується, уповільнюючи його охолодження.

Встановлено, що в періодах нагріву (рис. 3) відзначений істотний градієнт температур по довжині електрода, який спостерігається тільки на проміжку 0,35 м від нижнього торця. Значення градієнту температури для першого періоду досягало 8286 °C/м, а третього до 6571 °C/м, далі температурні значення розподіляються порівняно рівномірно по всій довжині електрода. Різниця абсолютних значень температур у цих періодах пояснюється процесом акумуляції теплоти, яка отримана електродом в першому періоді.

Визначено, що у II і IV періодах яким характерне охолодження електрода формуються локально перегріті зони на відстані 0,03–0,08 м від нижнього торця ГПЕ. Встановлено, що локально перегріта зона має форму сплющеного уздовж осі тора, що показано на рис. 2, б, з. Розрахований градієнт температури в горизонтальній площині від епіцентру тора складає: до внутрішньої поверхні 379 °С/м; до зовнішньої поверхні 3613 °С/м; і вертикальній площині до торця електрода 1469 °С/м. Досить високі значення градієнту температури пояснюється тим, що відбувається перерозподіл теплоти, накопиченої в періоди нагріву торцевою зоною електрода.

Різниця абсолютних значень температур у II і IV періодах пояснюється тривалістю цих періодів, та умовами в яких знаходиться ГПЕ. В IV періоді відбувається заміна ковша, під час цієї операції електроди знаходяться тривалий час поза зоною атмосфери установки «ківш-піч», що призводить до більш рівномірного розподілу теплоти по об'єму ГПЕ.

Отримані дані щодо значень температурного поля графітованого електрода в процесі його експлуатації дають можливість виконати розрахунки доцільних режимів подачі суміші газів через канал електрода в різні періоди позапічної обробки. Подача газів дозволить зменшити температурні навантаження на електрод, оскільки в роботах [6, 7] приводять дані результатів подачі газів без визначення їх впливу на процес нагріву самого електрода.

Згідно виконаного чисельного моделювання отримані нові дані по формуванню локально перегрітої зони в нижній частині електрода. Визначені параметри цієї зони і показано вплив розподілу температури в процесі експлуатації електрода без електричного навантаження, що має місце процесі обробки сталі на установці «ківш-піч». На відміну від робіт [8, 9] де приводять дані результатів роботи електрода в режимі постійного горіння електричної дуги, що не в повній мірі відповідає умовам обробки металу на установці «ківш-піч».

Температурне поле ГПЕ може дещо відрізнятись при зміні розмірів електрода, тривалості кожного періоду обробки, та їх кількості, а також потужності трансформатора. Зокрема зменшення або збільшення розмірів електрода хоча й не вплине на розподіл температури, однак призведе до змінення її величини особливо на поверхні каналу. Натомість, зміна тривалості обробки впливає на розподіл температури, та на її величину наприкінці кожного періоду. Потужність трансформатора впливає на температуру горіння дуги та на величину Джоулевої теплоти, що вплине на середньомасову температуру, швидкість нагріву та загальне температурне поле графітованого порожнистого електрода.

Зміна витрати газу та його типу не буде суттєво впливати на температурне поле ГПЕ, оскільки за умов обробки низька витрата будь-якого газу буде забезпечувати стійкий ламінарний режим його руху. Це забезпечить майже незмінну величину коефіцієнта конвекційної тепловіддачі.

Однією з опцій застосування ГПЕ є подача каналом сипких матеріалів для обробки сталі (розкислення, легування, десульфуріяція, мікролегування). В ході цього аналізу було визначено температурні умови в каналі електрода, які дозволяють розраховувати нагрів сипких матеріалів різного складу та властивостей, що рухаються цим каналом. Також можливо визначити оптимальну фрак-

цію сипких матеріалів для безперешкодного руху каналом ГПЕ, забезпечивши швидкий нагрів та засвоєння їх металом.

Отримані дані в подальшому дадуть можливість розрахувати та оптимізувати матеріаловитрати, та витрати газу для регулювання окисленості металу і шлаку; знизити хімічний вплив на електрод, особливо в зоні високих температур за рахунок використання суміші газів, яка подається порожнистим електродом.

Умови застосування результатів даного дослідження знаходяться в рамках обробки сталі на установці «ківш-піч» з використання ковшів ємністю 150–250 т. Перспективними напрямками подальшого розвитку цих досліджень може бути створення новітніх технологій інжекції в метал суміші газів та порошкових матеріалів, подовження терміну експлуатації електродів та покращення умов горіння дуги.

## 7. Висновки

1. За результатами проведеного дослідження отримане значення Джоулевого тепловиділення при проходженні електричного струму через графітований порожнистий електрод в періоди нагріву. Так, значення тепловиділення для першого і третього періоду відповідно становили:  $1,11 \text{ МВт/м}^3$ ;  $1,15 \text{ МВт/м}^3$ , також визначена доля Джоулевого тепловиділення загальному тепловому балансі нагріву електрода, яка склала у першому періоді 23,6 %, в третьому – 14,1 %.

Розраховані коефіцієнти тепловіддачі конвекцією для різних умов експлуатації електрода, показано що цей показник може суттєво змінюватись. Різниця значень коефіцієнтів тепловіддачі для внутрішньої поверхні каналу електрода в 1,9–3,1 раз менше, ніж для бічної поверхні і майже в 10 разів менше торцевої частини.

2. Встановлені значення зміни температурного поля по всій довжині електрода на зовнішній і внутрішній поверхні кожного періоду. Визначено, що в періоди експлуатації електрода з подачею струму відзначається істотні значення градієнту температур в торцевій частині, які досягали  $8286 \text{ }^\circ\text{C/м}$ . Визначено, що в періоди експлуатації без подачі струму спостерігаються утворення локально перегрітої зони в нижній частині електрода, що має форму сплющеного уздовж осі тора, яка сформувалася в результаті акумуляції тепла попереднього періоду.

## Література

1. Каменев, А. А., Кожухов, А. А., Семин, А. Е. (2018). Исследование процесса продувки жидкой стали в сталеразливочном ковше инертным газом. XV международный конгресс сталеплавильщиков. Москва: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 279–282.
2. Колокольцев, В. М., Ячиков, И. М., Сарычев, Л. В. (2006). Пути снижения расхода графитированных электродов в дуговых печах. Литейные процессы, 6, 51–56.
3. Грудницкий, О. М., Исхаков, Р. А., Коробов, В. К. (2011). Пути снижения удельного расхода графитированных электродов на электродуговых сталеплавильных печах. Литье и металлургия, 1 (59), 100–101.
4. Ячиков, И. М., Портнова, И. В., Быстров, М. В. (2018). Моделирование теплового состояния графитированных электродов при испарительном

охлаждении. Современные научные достижения металлургической теплотехники и их реализация в промышленности: сборник докладов II Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 203–208.

5. Грудницкий, О. М., Коробов, В. М., Исхаков, Р. А. (2006). Особенности эксплуатации графитированных электродов на электродуговых сталеплавильных печах. VII Междунар. конф. «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах». Мариуполь, 36–37.

6. Mokhov, V. A., Yachikov, I. M. (2013). Simulation of the thermal state of graphitized electrodes in an arc furnace with allowance for evaporation cooling. *Russian metallurgy (Metally)*, 2013 (6), 465–470. doi: <https://doi.org/10.1134/s0036029513060116>

7. Ячиков, И. М., Портнова, И. В., Быстров, М. В. (2017). Использование испарительного охлаждения графитированных электродов для снижения их расхода в дуговых печах малой емкости. Материалы XVII Международной конференции: Современные проблемы электрометаллургии стали. Старый Оскол, 191–198.

8. Zhan, D. P., Zhang, H. S., Jiang, Z. H., Gong, W., Li, H. B., Chen, Z. P. (2011). Influence of Hollow Electrode Ar-CO<sub>2</sub> Injection on Carbon Content in Ladle Furnace. *Advanced Materials Research*, 250-253, 3864–3867. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.250-253.3864>

9. Zhan, D. P., Zhang, H. S., Jiang, Z. H., Gong, W., Chen, Z. P. (2011). Influence of Electrode Argon-Hydrogen Co-injection on Carbon Content in A Alternating Current Ladle Furnace. *Advanced Materials Research*, 239-242, 2361–2364. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.239-242.2361>

10. Neuschütz, D., Hahn, I., Spirine, D., Storsberg, L. (1999) Power increase and metallurgical effects during arc heating of liquid steel due to the addition of molecular gases. *Steel Research*, 70 (8-9), 309–313. doi: <https://doi.org/10.1002/srin.199905645>

11. Neuschütz, D., Spirin, D. (2003). Nitrogen Removal and Arc Voltage Increase in EAF Steelmaking by Methane Injection into the Arc. *Steel Research International*, 74 (1), 19–25. doi: <https://doi.org/10.1002/srin.200300156>

12. Румянцев, В. Д. (2006). Теория тепло- и массообмена. Днепропетровск: Пороги, 532.

13. Ячиков, И. М., Портнова, И. В., Быстров, М. В. (2018). Моделирование теплового состояния графитированного электрода при подаче газа в осевой канал. XV Международный конгресс сталеплавателей. Москва: МИСиС, 180–186.

14. Величко, О. Г., Стоянов, О. М., Бойченко, Б. М., Нізяєв, К. Г. (2016). Технології підвищення якості сталі. Дніпропетровськ: Середняк Т.К., 196.