

Устаткування та прилади

УДК 669.715:621.745.012
DOI: 10.33070/etars.3.2022.07

Панов Є.М., докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0002-4885-2777,
Боженко М.Ф., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-2649-0901,
Коржик М.В., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-7636-4754
**Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського», Київ**
просп. Перемоги, 37, 03056 Київ, e-mail: bojenko41@gmail.com

Автоматизовані розрахунки при розробці енергоефективних конструкцій печей для переплавлення алюмінієвого брухту

Наведено аналіз теплових умов роботи печей для переплавлення алюмінієвого брухту. Встановлено, що при розробці конструкцій печей для футеровки необхідно обирати вогнетривкі матеріали із вмістом оксиду алюмінію більш 85 %, а товщина теплоізоляції має забезпечувати температуру зовнішніх поверхонь не більш 50 °С. На базі відповідних методик розроблено пакети прикладних програм: конструкторських розрахунків футеровки та теплоізоляції з урахуванням зміни теплопровідності окремих шарів унаслідок їх повного або часткового просочування розплавом алюмінію; розрахунків енергобалансів; вибору зовнішніх нагрівальних пристроїв при електричному або полуменовому нагріві. В енергетичному балансі враховано потужність зовнішнього джерела теплоти, а також кількість теплоти, що витрачається на нагрів брухту до температури розплавлення, розплавлення та перегрів розплаву до робочої температури та втрати теплоти. Рівняння теплового балансу використовується для визначення терміну плавки для печей з електричним обігрівом або для визначення потужності пальникових пристроїв при бажаному терміні плавки. В конструкторських розрахунках обирають необхідну товщину футеровочно-теплоізоляційних матеріалів для всіх елементів огорожень. При відповідних розрахунках у діалоговому режимі є можливість оперативно змінювати матеріали та їх товщину у разі перевищення допустимих температур експлуатації цих матеріалів. При розрахунках зовнішніх нагрівальних пристроїв розглянуто варіанти з використанням електричних стрічкових або дровових нагрівачів з ніхрому чи сталі ЕІ-626. Полуменовий нагрів може бути реалі-

зований за допомогою газових пальників чи форсунок на рідкому паливі. Подальші варіантні розрахунки за розробленими методиками та програмним забезпеченням дали можливість створити конструкцію печі потужністю 600 кВт зі зменшеними енергетичними та експлуатаційними витратами на процес плавки. *Бібл. 14, рис. 1, табл. 1.*

Ключові слова: алюміній, піч, плавка, футеровка, теплоізоляція, енергетичний баланс.

При конструюванні нових печей, а також при капітальному ремонті діючих необхідно провадити вибір матеріалів та геометричних розмірів футеровочно-теплоізоляційних шарів огорожень, а потім розраховувати втрати теплоти через відповідні елементи конструкцій. Оптимізація конструкторських елементів може бути виконана за допомогою ЕОМ.

Для розплавлення твердого алюмінію та підтримки необхідної температури розплаву в печах застосовують необхідні нагрівальні пристрої, вибір яких провадиться на основі складання та розрахунку енергетичного балансу.

Енергобаланс печей для переплавлення алюмінієвого брухту значною мірою відрізняється від відомих розробок міксерів для лиття алюмінієвих виробів [1], оскільки головним їх завданням є якнайшоріше розплавлення твердого алюмінієвого брухту. При цьому також змінюються підходи до визначення потужності зовнішніх нагрівальних пристроїв.

Не менш важливою проблемою є підвищення ККД печей для переплавлення алюмінієвого брухту за рахунок зменшення втрат теплоти у навколишнє середовище.

Мета роботи полягає в розробці методик та програмного забезпечення для оптимальних конструкторських розрахунків футеровки та теплоізоляції печей для переплавлення алюмінієвого брухту, автоматизованого розрахунку енергетичного балансу та вибору зовнішніх нагрівальних пристроїв.

Аналіз теплових умов роботи печей для переплавлення алюмінієвого брухту

Печі для переплавлення алюмінієвого брухту є високотемпературними теплотехнологічними агрегатами періодичної дії.

Спочатку через відкриті форкамери в піч завантажують алюмінієвий брухт, потім включають зовнішні нагрівальні пристрої і здійснюють нагрів та розплавлення твердого матеріалу, а далі доведення розплавленого металу до необхідної температури, після чого через форкамери видаляють з робочого об'єму сталеві та інші доміш-

ки і здійснюють лиття виробів.

Після повного закінчення лиття алюмінію цикл повторюється.

Ефективність роботи печей багато в чому залежить від температурних та теплових факторів протікання технологічного процесу, умов роботи футеровки та теплоізоляції.

Футеровка печі, особливо її перший шар, який знаходиться в контакт з розплавом, у процесі терміну експлуатації руйнується за рахунок хімічної, фізичної та механічної взаємодії. Хімічна взаємодія обумовлена тим, що при контакті високоагресивного розплаву алюмінію з першим шаром футеровки останній розчиняється. Цей процес супроводжується руйнуванням футеровки та забрудненням розплаву шлаковими включеннями. Фізична взаємодія пов'язана з просочуванням футеровки розплавом по тріщинах і порах та її руйнуванням за рахунок різниці в коефіцієнтах лінійного розширення металу та вогнетривкого матеріалу при коливаннях температури. Механічна взаємодія спостерігається при ударах алюмінієвого брухту в процесі його завантаження у робочий простір печі.

Стійкість футеровки визначається в основному хімічною взаємодією, інтенсивність якої залежить від властивостей вогнетривкого матеріалу (вмісту в ньому глинозему) та розплавленого металу [2].

Аналіз деяких досліджень [2–5] показує, що з метою підвищення стійкості футеровки та збільшення терміну експлуатації печі її необхідно виконувати з вогнетривких матеріалів із вмістом оксиду алюмінію більше 85 %. Такі вогнетривкі матеріали погано змочуються алюмінієм. Також для футеровки печей можливо застосовувати магнетитові або корундові вогнетривкі матеріали, а також виготовляти футеровку з оксидів, вільна енергія утворення яких більша, ніж у глинозему (наприклад, ZrO_2 , MgO , CaO).

При використанні високоглиноземистих, корундових, магнетитових та інших високостійких в агресивному середовищі вогнетривких матеріалів необхідно враховувати техніко-економічні показники, які пов'язані з вартістю цих матеріалів та передбачуваним збільшенням терміну экс-

плуатації печей при їх застосуванні порівняно з традиційними вогнетривкими матеріалами.

Заходи щодо підвищення стійкості футеровки не виключають, врешті решт, її просочування розплавом, тому що цей процес визначається температурою матеріалу та, як вказувалося вище, просочуванням розплаву через пори, тріщини у цеглі та шви між ними. Просочування розплавом футеровки призводить до зміни її теплофізичних властивостей, зокрема до підвищення теплопровідності матеріалів та, як наслідок, до збільшення втрат теплоти із зовнішніх поверхонь печі.

Збільшення терміну експлуатації печей може бути досягнуто при використанні для футеровки запропонованого авторами роботи [6] монолітного вогнетривкого матеріалу з неорганічним зв'язуючим та ефективним антизмочувальним агентом.

Також розробці вогнетривких футеровочних матеріалів з підвищеною корозійною та механічною стійкістю у печах при контакті з алюмінієм, які можуть бути використані й у печах для переплавки алюмінієвого брухту, присвячені роботи [7, 8].

Окрім футеровочних шарів, у печах застосовують теплоізоляцію, основна мета якої є зменшення теплових втрат через зовнішні огороження та підтримання температури зовнішніх поверхонь не вище 50 °С (що регламентується санітарними нормами).

Таким чином, при конструюванні нових печей та капітальному ремонті діючих необхідно визначити оптимальні конструктивні розміри футеровки та теплоізоляції в залежності від вибраних матеріалів (їх теплофізичних властивостей). Це можна здійснити за допомогою ЕОМ, для чого необхідно розробити спеціальні пакети програм та здійснювати вибір матеріалів, визначити їх товщину з урахуванням зміни теплопровідності деяких шарів та втрати теплоти зовнішніми огороженнями у навколишнє середовище.

Слід зазначити, що зменшення втрат теплоти зовнішніми поверхнями огорожень печей, особливо в зонах розташування нагрівальних пристроїв, може бути досягнуто при використанні футеровки з покращеними теплофізичними, експлуатаційними та вартісними характеристиками, які успішно використовуються, наприклад, у обертових печах різного призначення. Це досягається за рахунок зміни форми вогнетривкої футеровки та додавання до неї волокнистого теплоізоляційного матеріалу. Теплоізолятором мо-

же бути мулліто-кремнеземна вата з неорганічними добавками, базальтне волокно тощо [9].

У бокових, торцевих стінках та подині печей зменшення втрат теплоти може бути досягнуто за рахунок використання теплоізоляції із силіката кальцію замість діатоміту за аналогію з модернізованою конструкцією міксера для лиття алюмінію, яка запропонована за результатами експериментальних досліджень [10].

Для розплавлення твердого алюмінію та підтримання необхідної температури розплаву в печі застосовують необхідні нагрівальні пристрої: електричні нагрівники і газові або рідкопаливні пальники.

Вибір потужності нагрівальних пристроїв провадиться на основі складання енергетичного балансу, де необхідно врахувати якнайскоріше розплавлення алюмінієвого брухту та доведення розплавленого металу до необхідної температури. Для автоматизованого розрахунку енергобалансів, визначення потужності нагрівальних пристроїв та їх конструктивних розрахунків необхідна розробка відповідного програмного забезпечення.

Методика складання та розрахунків енергетичних балансів

Рівняння енергетичного балансу печі для переплавлення алюмінієвого брухту має такий вигляд [11]:

$$Q_{\text{зовн.}\tau} = Q_{\text{нагр.}} + Q_{\text{пл.}} + Q_{\text{перегр.}} + \Sigma(Q_{\text{пі}} \tau_i), \quad (1)$$

де $Q_{\text{зовн.}}$ — потужність зовнішнього джерела теплоти, кВт; τ — термін нагріву брухту до температури розплавлення, розплавлення та перегрів розплаву алюмінію до робочої температури в печі, с; $Q_{\text{нагр.}}$ — кількість теплоти, що витрачається на нагрів брухту до температури розплавлення, кДж; $Q_{\text{пл.}}$ — кількість теплоти, що витрачається на розплавлення алюмінієвого брухту, кДж; $Q_{\text{перегр.}}$ — кількість теплоти, що витрачається на перегрів розплавленого алюмінію до робочої температури, а також твердих домішок до цієї ж температури, кДж; $Q_{\text{пі}}$ — втрати теплоти, кВт; τ_i — характерний термін для розрахунку відповідних теплових втрат, с.

Рівняння (1) використовується для визначення величини τ після попереднього обчислення всіх складових балансу для печей з електричним обігрівом при обраній потужності електричних

нагрівачів або для визначення потужності газових чи рідкопаливних пальників при бажаному терміні плавки τ [11].

У роботі [11] також наведені формули для визначення втрат теплоти через відкриті форкамери та отвори у печі, а також потоку теплоти для нагрівання повітря, що всмоктується у робочий простір печі при відкриванні форкамер.

Окремо розглянемо методику розрахунків теплових втрат через зовнішні огороження (бокові та торцеві стінки, подину, склепіння). Вони розраховуються для кожної конкретної стінки з урахуванням її геометричних розмірів, температур у робочому просторі печі та навколишнього повітря, матеріалів та товщин футеровки та теплоізоляції. Також у розрахунках враховується просочування футеровки та теплоізоляції розплавом та відповідна зміна теплопровідності футеровочно-теплоізоляційних матеріалів. Спрощена блок-схема розрахунку наведена на рис. 1.

Опис блок-схеми

Символ 1. Початок.

Символ 2. Увід вихідних даних:

- вид теплопередавальної поверхні (бокова, подина, склепіння);
- кількість шарів;
- матеріали шарів (вибираються зі списку можливих: глиноземний корунд вогнетривкий; шамот доменний; шамот; порошок шамотний; муліт; шамот легковаговий густиною 1300, 1000, 800, 400 кг/м³ відповідно; діатоміт; пінодіатоміт; азбестовий картон; азбест розпушений; вермикуліт; перліт вспучений; трепельний порошок; шлакова вата; мінеральна вата; каолинова вата; високоглиноземистий шамот ВГО-45 або ВГО-62 відповідно; силікат кальцію; сталь; або інший матеріал, назва якого вводиться вручну;
- висота (тільки для бокової стінки) $h_{ст.}$, м;
- робоча температура в печі $t_{р.в.}$, °С;
- температура навколишнього повітря $t_{нав.}$, °С;
- поверхня огороження F , м²;
- температура зовнішньої поверхні $t_{зовн.}$ (у першому наближенні), °С;
- наявність контакту з розплавом (ϵ /немає);
- похибка розрахунків ϵ , %;
- бажана товщина огороження Σb , м.

Символ 3. Коефіцієнт тепловіддачі α_2 від зовнішньої поверхні до навколишнього повітря, Вт/(м²К), розраховується за рекомендованою у [12] формулою:

$$\alpha_2 = a_0 + a_1 (t_{зовн.} - 30) - a_2 (t_{зовн.} - 30)^2 + a_3 (t_{зовн.} - 30)^3, \quad (2)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3 – постійні коефіцієнти, що залежать від типу теплопередавальної поверхні (табл. 1).

Таблиця 1. Постійні коефіцієнти у формулі (2)
Table 1. Constant coefficients in formula (2)

Теплопередавальна поверхня	a_0	$a_1 \cdot 10^3$	$a_2 \cdot 10^4$	$a_3 \cdot 10^6$
Вертикальна стінка	9,5	98,15	4,74	1,74
Склепіння	9,7	100	4,43	1,35
Подина	9,3	91,5	3,88	1,37

Формула (2) справедлива при температурах поверхні $t_{н+1}$ від 30 до 210 °С.

Потім за рівнянням тепловіддачі розраховується поверхнева густина теплового потоку, Вт/м²:

$$q = \alpha_2 (t_{зовн.} - t_{нав.}).$$

Визначається температура внутрішньої поверхні, °С:

для бокової стінки та подини

$$t_{вн} = t_{р.в} - q (1/\alpha_1);$$

для склепіння

$$t_{вн} = t_{р.в} + q (1/\alpha_1),$$

де α_1 – коефіцієнт тепловіддачі до внутрішніх поверхонь (для тих, що знаходяться у розплаві, – 500 Вт/(м²К); вище рівня розплаву – 50 Вт/(м²К)).

Сумарний термічний опір теплопровідності стінки, (м²К)/Вт:

$$\Sigma R_i = (t_{вн.} - t_{зовн.})/q.$$

Символ 4. Беруть у першому наближенні температуру на межі i -го шару з $(i + 1)$ – °С: $t'_i = t_{i-1} - 40$ (між першим та другим шаром $t'_i = t_{вн.}$).

Символ 5. Визначається середня температура шару футеровки або теплоізоляції, °С:

$$t_{ср.i}' = 0,5 (t_{i-1} + t'_i).$$

Символ 6. Беруть $t'_i = t_i$.

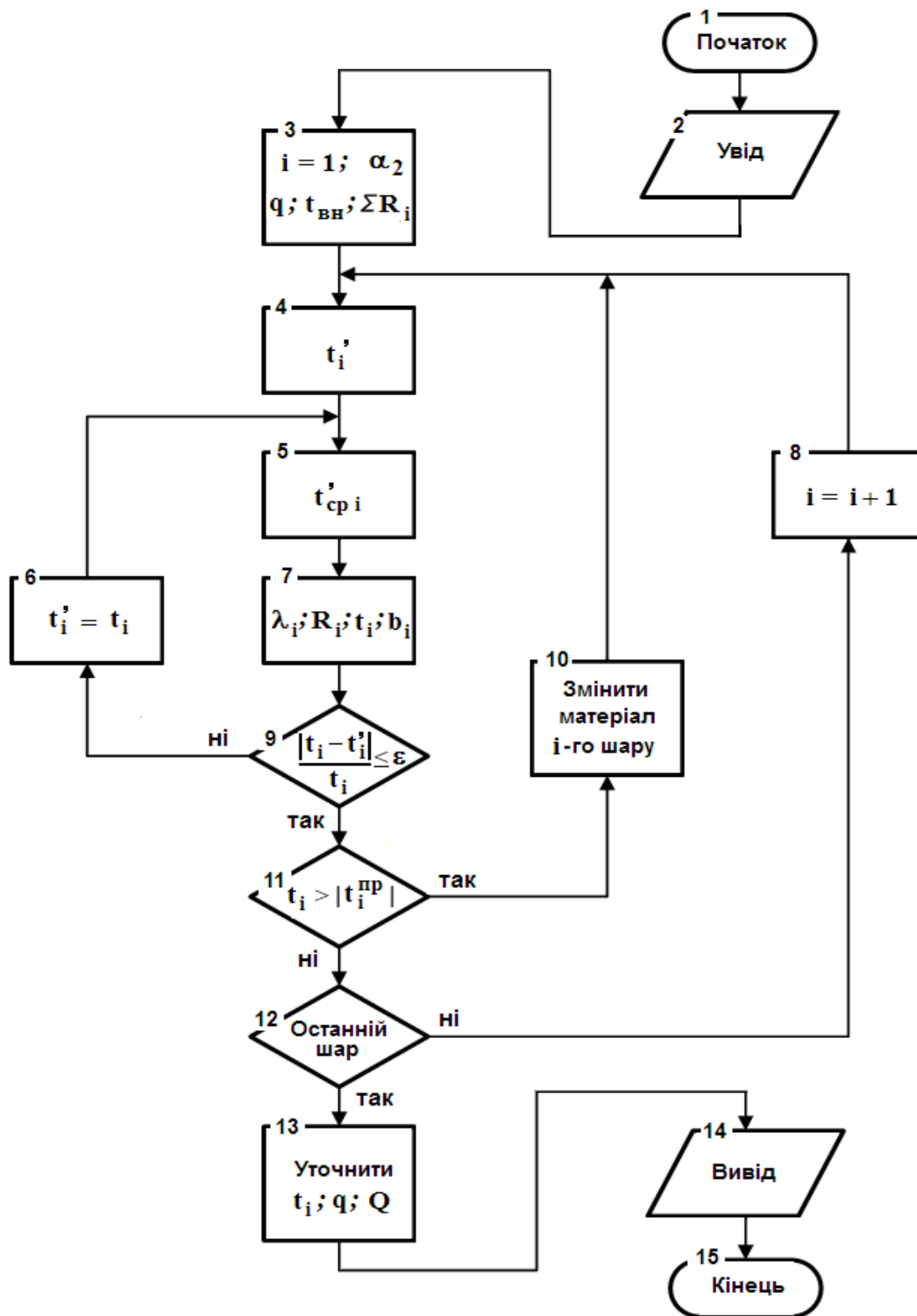


Рис. 1. Блок-схема конструкторського розрахунку огорожень печі.
 Figure 1. Block diagram of the design calculation of the furnace enclosure

Символ 7. Розраховується величина теплопровідності матеріалу шару в залежності від середньої температури і просочування алюмінієм, тобто

$$\lambda_i = A_i + B_i t_{cp,i}', \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}),$$

де A_i , B_i – постійні коефіцієнти, які залежать від виду матеріалу та ступеня його просочування [1], а також приблизно визначається термічний опір шару

$$R_i' = (t_{i-1} - t_i')/q, (\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт},$$

потім товщина шару

$$b_i = R_i' \lambda_i, \text{ м},$$

визначається його стандартне значення $b_i^{ст}$, м, потім розраховується термічний опір теплопровідності

$$R_i = b_i^{ст}/\lambda_i, (\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт},$$

і дійсна температура на межі шарів

$$t_i = t_{i-1} - q \Sigma R_i, \text{ }^\circ\text{C}.$$

Символ 8. Перехід до розрахунку наступного шару ($i = i + 1$).

Символ 9. Умова для виходу з циклу ітерацій: якщо розрахована на даній ітерації температура відрізняється від попередньої на більш 2 %, то розрахунок повторюється знову.

Символ 10. Користувачу пропонується змінити матеріал i -го шару та повторити розрахунок.

Символ 11. Перевірка на перевищення максимально допустимої температури для матеріала $(i + 1)$ -го шару.

Символ 12. Якщо шар не останній, то необхідно перейти до розрахунку наступного шару.

Символ 13. Уточнення густини теплового потоку та перерахунок температур на межах шарів.

Густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$:

$$q' = \frac{t_{p,b} - t_{навк.}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{b_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Температури на межах шарів розраховуються як у *символі 7*, але для раніш заданих величин $b_i^{ст}$.

Втрати теплоти через поверхню, Вт :

$$Q = q F.$$

Символ 14. Вивід результатів розрахунків на екран та при необхідності на принтер.

Символ 15. Кінець.

Визначення потужності зовнішнього джерела теплоти

При електричному нагріві для стрічкового нагрівника, що виконаний у вигляді зигзагів, за конструктивні характеристики печі беруть відповідну їх висоту, радіус закруглення та довжину одного зигзагу, відповідний крок зигзагів та визначають кількість зигзагів одного нагрівального елемента та його довжину на одну фазу. Надалі беруть відповідний крок у пазу для розміщення нагрівників, визначають загальну кількість нагрівальних елементів та їх кількість для однієї групи та однієї фази, а також довжину стрічки на одну фазу.

При виготовленні нагрівників з дроту у вигляді спіралей та розміщення їх у пазах склепіння за конструктивними характеристиками визначають загальну кількість нагрівальних елементів однієї групи та однієї фази. За відповідним діаметром спіралі визначають повну довжину одного витка та їх кількість для одного нагрівального елемента, а потім його довжину на одну фазу.

Для обох типів нагрівників за методикою [1] визначають встановлену потужність та питому поверхневу її величину, а також потужність однієї групи та однієї фази групи. Після вибору схеми з'єднання нагрівників у групі визначають розміри у перерізі та стандартні значення діаметра дроту чи ширини та висоти для стрічки тощо.

При полуменовому нагріві у печі при визначеній вище потужності джерела за відомими методиками обчислюють необхідну витрату газу або рідкого палива та кількість пальників.

При полуменовому нагріві після відповідних розрахунків перевагу для встановлення слід надавати пальникам ступеневого горіння, в яких невелика довжина полум'я не пошкоджує вогнетривку футеровку. Окрім цього, такі пальники мають найбільшу зону з низькою концентрацією водяної пари біля поверхні розплавленого алюмінію [13].

Обговорення результатів

Розроблене за наведеними вище методиками

програмне забезпечення використали при виконанні варіантних оптимізаційних розрахунках конструкції печі для переплавлення алюмінієвого брухту потужністю 600 кВт. Це стосувалося вибору найбільш ефективних матеріалів та геометричних розмірів футеровочно-теплоізоляційних шарів огорожень, а також оцінці енергетичної ефективності роботи печі, зокрема її ККД, терміну плавки, потужності зовнішніх джерел теплоти.

Як показали варіантні розрахунки, заміна теплоізоляції з пінодіатоміту на силікат кальція в конструкції подини печі, склепіння, торцевих та бокових стінок у цілому призводить до зменшення теплових втрат через зовнішні огороження на 26 %. На основі розрахунків зроблений висновок, що найбільш вагомий енергетичний ефект може бути досягнутий при зменшенні втрат теплоти через відкриті форкамери за рахунок зменшення їх площі та терміну відкриття при знятті шлаку [11].

Подальше використання розробленого програмного забезпечення для розрахунків при модернізації печі у роботі [14] показало, що повна або часткова заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальція, а також влаштування двох форкамер замість однієї (при однаковій площі) зі зменшенням терміну їх відкриття у 2 рази призводять до зменшення витрат теплоти у циклі плавки алюмінієвого брухту, наприклад, при електричному нагріві приблизно на 66 %. Для модернізованої печі зі зміненою теплоізоляцією при газовому нагріві витрати теплоти на компенсацію втрат огороженнями зменшуються на 9 % порівняно з електричним нагрівом. Переведення печі базової конструкції зі зміненою теплоізоляцією з електричного нагріву на газовий сприяє зменшенню експлуатаційних витрат у циклі плавки приблизно на 10 %.

Висновки

1. На основі аналізу теплових умов роботи печей для переплавлення алюмінієвого брухту встановлено, що перший шар футеровки у процесі експлуатації руйнується за рахунок хімічної, фізичної та механічної взаємодії. Стійкість футеровки визначається в основному хімічною взаємодією, інтенсивність якої залежить від властивостей вогнетривкого матеріалу (вмісту в ньому глинозему) та розплавленого металу. Тому футеровку необхідно виконувати з вогнетривких

матеріалів зі вмістом оксиду алюмінію більш 85 %. Обрана теплоізоляція має забезпечити температуру зовнішньої поверхні не більш 50 °С.

2. Розроблені методики складання та розрахунків енергобалансів, вибору зовнішніх нагрівальних пристроїв печей. На базі вказаних методик розроблені пакети прикладних програм автоматизованого розрахунку печей на ПЕОМ: а) конструкторського розрахунку футеровки та теплоізоляції; б) розрахунків енергобалансів; в) вибору зовнішніх нагрівальних пристроїв (електричних нагрівників та пальників при спалюванні газоподібного та рідкого палива).

Особливістю конструкторського розрахунку футеровки та теплоізоляції є автоматичне врахування повного або часткового просочування алюмінієм відповідних шарів за отриманим розподілом температур на їх межах та відповідне врахування при цьому збільшення теплопровідності матеріалів.

3. Виконані у подальшому за названими розробками варіантні розрахунки дали можливість створити конструкцію печі потужністю 600 кВт зі зменшеними енергетичними та експлуатаційними витратами на процес плавки алюмінієвого брухту.

Список літератури

1. Панов Е.Н., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В., Карвацкий А.Я., Шилович И.Л., Боженко М.Ф. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства. Москва : Руда и металлы, 1998. 256 с.
2. Альтман М.Б., Андреев А.Д., Балахонцев Г.А. Плавка и литье алюминиевых сплавов : Справочник. Москва : Металлургия, 1983. 351 с.
3. Андреев А.Д., Гогин В.Б., Макаров Г.С. Высокопроизводительная плавка алюминиевых сплавов. Москва : Металлургия, 1980. 136 с.
4. Диомидовский Д.А. Металлургические печи цветной металлургии. Москва : Металлургия, 1970. 704 с.
5. Башенко В.В., Донской А.В., Соломахин И.М. Электроплавильные печи цветной металлургии. Москва : Металлургия, 1971. 320 с.
6. Schemmel T., Pfaar R., Kremer U. Heavily loaded areas in aluminum melting furnaces and possible refractory solutions. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2020. P. 879–886. — https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_118
7. Simmat R., Dannert C. Influence of corrosive attack by ALMG5 on the hot abrasion resistance of refractory materials for the use in the secondary aluminum industry. *Proceedings of the Unified International*

Technical Conference on Refractories, UNITECR 2013. 2014. P. 1309–1314. — <https://doi.org/10.1002/9781118837009.ch221>

8. Majcenovic C., Pirkner D. High temperature infiltration resistance of alumina monolithics against Al-alloys. *United European Refractories Meet the World: UNITECR 2007 – Unified Int. Tech. Conf. on Refractories; 10th Biennial Worldwide Congress, Proc.; in Conj. with the 50th Int. Colloquium on Refractories*, 2007. P. 505–508.

9. Троценко Л.Н. Особенности конструкции и тепловой работы вращающихся печей и перспективные направления их усовершенствования (Обзор). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2016. № 4. С. 61–69.

10. Панов Е.Н., Боженко М.Ф., Васильченко Г.Н., Даниленко С.В., Билько В.В. Повышение энергетической эффективности газовых литейных миксеров емкостью 25 т. *Екотехнології та ресурсозбереження*. 2007. № 6. С. 19–23.

11. Panov E. N., Bozhenko M. F., Korzhik M. V., Fenchenko O. V. Rise of energetic efficiency of the furnaces (mixers) for aluminium scrap remelting. *Tsvetnye Metally*. 2005. № 5–6. P. 114–117.

12. Троянkin Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок : Учебное пособие. Москва : Энергоатомиздат, 1988. 256 с.

13. Nieckele A. O., Naccache M. F., Gomes M. S. P. Numerical modeling of an industrial aluminum melting furnace. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2004. Vol. 126, № 1. P. 72–81. — <https://doi.org/10.1115/1.1625396>

14. Панов Е. М., Боженко М. Ф., Даниленко С. В., Боянівський В. П. Оптимізація конструкції печей для переплавки алюмінієвого брухту. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2017. № 1. С. 27–34.

Надійшла до редакції 1.08.2022

Панов Е.Н., докт. техн. наук, проф., ORCID: 0000-0002-4885-2777,
Боженко М.Ф., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0003-2649-0901,
Коржик М.В., канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-7636-4754
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев
просп. Победы, 37, Киев, 03056, e-mail: bojenko41@gmail.com

Автоматизированные расчеты при разработке энергоэффективных конструкций печей для переплавки алюминиевого лома

Приведен анализ тепловых условий работы печей для переплавки алюминиевого лома. Установлено, что при разработке конструкций печей для футеровки необходимо выбирать огнеупорные материалы с содержанием оксида алюминия более 85 %, а толщина теплоизоляции должна обеспечивать температуру внешних поверхностей не более 50 °С. На базе соответствующих методик разработаны пакеты прикладных программ: конструкторских расчетов футеровки и теплоизоляции с учетом изменения теплопроводности отдельных слоев вследствие их полной или частичной пропитки расплавом алюминия; расчетов энергобалансов; выбора внешних нагревательных устройств при электрическом и пламенном нагреве. В энергетическом балансе учтены мощность внешнего источника тепла, а также количество тепла, которое затрачивается на нагрев лома до температуры расплавления, расплавление и перегрев расплава до рабочей температуры и потери тепла. Уравнение теплового баланса используется для определения времени плавки для печей с электрическим нагревом или определения мощности горелочных устройств при желаемом времени плавки. В конструкторских расчетах выбирают необходимую толщину футеровочно-теплоизоляционных материалов для всех элементов ограждений. При соответствующих расчетах в диалоговом режиме имеется возможность оперативно заменять материалы и изменять

их толщину в случае превышения допустимых температур эксплуатации этих материалов. При расчетах внешних нагревательных устройств рассмотрены варианты с использованием электрических ленточных или проволочных нагревателей из нихрома или стали ЕИ-626. Пламенный нагрев может быть реализован с помощью газовых горелок или форсунок на жидком топливе. Дальнейшие вариантные расчеты по разработанным методикам и программному обеспечению дали возможность создать конструкцию печи мощностью 600 кВт с уменьшенными энергетическими и эксплуатационными затратами на процесс плавки. *Библ. 14, рис. 1, табл. 1.*

Ключевые слова: алюминий, печь, плавка, футеровка, теплоизоляция, энергетический баланс.

Panov Ye.M., *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
*ORCID: 0000-0002-4885-2777, **Bozhenko M.F.**, Candidate*
of Technical Sciences, ORCID: 0000-0003-2649-0901,
Korzhyk M.V., *Candidate of Technical Sciences,*
ORCID: 0000-0002-7636-4754

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, *Kyiv*
37, Peremohy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine, e-mail: bojenko41@gmail.com

Automated Calculations in the Development of Energy-Efficient Designs of Furnaces for Aluminum Scrap Remelting

The analysis of operational thermal conditions of the furnaces for aluminum scrap remelting is given. It was established that it is necessary to choose refractory materials with aluminum oxide content more than 85 % and the thickness of the thermal insulation should ensure the temperature of the external surfaces not higher than 50 °C when designing the furnaces for lining. On the basis of relevant methods packages of application programs have been developed for design calculations of lining and thermal insulation considering thermal conductivity change of individual layers as a result of their complete or partial impregnation with molten aluminum; calculations of energy balances; the selection of external heating devices with electric or flame heating. The power of the external heat source, the amount of heat spent on heating the scrap to the melting temperature, melting and overheating the melt to the working temperature and heat loss have been taken into account in the energy balance. The heat balance equation is used for determination of the melting time for electrically heated furnaces or the power of burner devices at the desired melting time. In the design calculations, the necessary thicknesses of lining and heat-insulating materials are chosen for all elements of enclosure. With appropriate calculations in dialog mode, it is also possible to change materials and their thickness quickly in case of exceeding the allowable operating temperatures of these materials. Options of using electric tape or wire heaters made of nichrome or EI-626 steel were considered during external heating devices calculations. Flame heating can be implemented using gas burners or liquid fuel nozzles. Further variant calculations based on the developed methods and software made it possible to create a furnace design with a capacity

of 600 kW with reduced energy and operating costs for the melting process. *Bibl. 14, Fig. 1, Tab. 1.*

Keywords: aluminum, furnace, melting, lining, thermal insulation, energy balance.

References

1. Panov E.N., Vasilchenko G.N., Danilenko S.V., Karvatskii A.Ya., Shylovich I.L., Bozhenko M.F. [Thermal processes in electrolyzers and mixers of aluminum production]. Moscow : Ruda i metally, 1998. 256 p. (Rus.)
2. Altman M.B., Andreev A.D., Balakhontsev G.A. [Melting and molding of aluminum alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1983. 351 p. (Rus.)
3. Andreev A.D., Gogin V.B., Makarov G.S. [High-performance melting of aluminum alloys]. Moscow : Metallurgiya, 1980. 136 p. (Rus.)
4. Diomidovskii D.A. [Metallurgical furnaces for non-ferrous metallurgy]. Moscow : Metallurgiya, 1970. 704 p. (Rus.)
5. Bashenko V.V., Donskoi A.V., Solomakhin I.M. [Electric smelting furnaces for non-ferrous metallurgy]. Moscow : Metallurgiya, 1971. 320 p. (Rus.)
6. Schemmel T., Pfaar R., Kremer U. Heavily loaded areas in aluminum melting furnaces and possible refractory solutions. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2020. pp. 879–886. — https://doi.org/10.1007/978-3-030-36408-3_118
7. Simmat R., Dannert C. Influence of corrosive attack by ALMG5 on the hot abrasion resistance of refractory materials for the use in the secondary aluminum industry. *Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories, UNITECR 2013*. 2014. pp. 1309–1314. — <https://doi.org/10.1002/9781118837009.ch221>
8. Majcenovic C., Pirkner D. High temperature infiltration resistance of alumina monolithics against Al-alloys. *United European Refractories Meet the World: UNITECR 2007 – Unified Int. Tech. Conf. on Refractories; 10th Biennial Worldwide Congress, Proc.; in Conj. with the 50th Int. Colloquium on Refractories*. 2007. pp. 505–508.
9. Trotsenko L.N. [Features of the design and thermal operation of rotary kilns and promising directions of their improvement (Review)]. *Energotekhnologii i resursosberezhnie. [Energy Technologies and Resource Saving]*. 2016. No. 4. pp. 61–69. (Rus.)
10. Panov E.N., Bozhenko M.F., Vasilchenko G.N., Danilenko S.V., Bilko V.V. [Improving the energy efficiency of gas foundry mixers with a capacity of 25 tons]. *Ecotechnologii i Resursosberezhnie. [Ecotechnologies and Resource Saving]*. 2007. No. 6. pp. 19–23. (Rus.)
11. Panov E.N., Bozhenko M.F., Korzhik M.V., Fenchenko O.V. Rise of energetic efficiency of the furnaces (mixers) for aluminium scrap remelting. *Tsvetnye Metally*. 2005. No. 5–6. pp. 114–117.
12. Troiankin Yu.V. [Design and operation of fire-engineering units: a tutorial]. Moscow : Energoatomizdat, 1988. 256 p. (Rus.)
13. Nieckele A. O., Naccache M. F., Gomes M. S. P. Numerical modeling of an industrial aluminum melting furnace. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*. 2004. 126 (1). pp. 72–81. — <https://doi.org/10.1115/1.1625396>
14. Panov Ye.N., Bozhenko M.F., Danylenko S.V., Boianivsyi V.P. [Optimization of furnaces design for melting aluminium scrap]. *Visnyk NTUU «KPI imeni Ihoria Sikorskoho». Seriya: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursosberezhennia. [Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». Series: Chemical engineering, ecology and resource saving]*. 2017. No. 1. pp. 27–34. (Ukr.)

Received August 1, 2022