

УДК 669.715:621.745.012

ПАНОВ Є. М., БОЖЕНКО М. Ф.*, КОРЖИК М. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

НЕПРЯМЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗПЛАВУ В ПЕЧАХ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВКИ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ

Наведені результати розрахункових досліджень з визначення густини теплового потоку та температури зовнішніх поверхонь бокової та торцевої стінок печі для переплавлення алюмінієвого брухту в інтервалі температур розплаву 670 – 750 °С; на базі розрахункових даних отримана апроксимуюча залежність $q = f(t_{cm})$, максимальне відхилення яких не перевищує 4,6 %. Встановлена залежність температури стінки зовнішньої поверхні стінки від коефіцієнта теплопередачі, побудована залежність $k_p = f(t_{cm})$, максимальне відхилення розрахункових даних не перевищує 5,6 %. Надані практичні рекомендації стосовно оперативного визначення температури розплаву в печі в циклі плавки алюмінієвого брухту за виміряною температурою стінки зовнішньої поверхні.

Ключові слова: піч, алюмінієвий брухт, розплав, температура, огороження, густина теплового потоку, коефіцієнт теплопередачі.

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2023.283520

*Corresponding author: bojenko41@gmail.com

Received 27 March 2023; Accepted 08 June 2023

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. В останні роки в світі суттєво збільшилося використання алюмінію в різних галузях і, відповідно, збільшується його виробництво. Наприклад, за даними [1] у 2018 р. було вироблено 64, 3 млн. т цього металу, а у 2020 р. передбачалося збільшення виробництва до 80 млн. т [2].

В світі накопичено біля 15 млн. т відходів від первинного алюмінієвого виробництва і виробництва готових металевих виробів. Але середній рівень використання промислових відходів у залежності від розвитку технологій виробництва коливається в межах 20 – 80 %. В світі діють біля 3000 великих підприємств, які переробляють алюмінієвий брухт і відходи [3].

В Україні щорічно виробляється 210 тис. т алюмінію, а біля 100 тис. т цього виробництва – методом переплавлення алюмінієвого брухту [4].

Слід зазначити, що виробництво вторинних кольорових металів, і алюмінію зокрема, вельми ефективно, оскільки витрати сировини та матеріалів на їх виробництво значно нижчі, ніж на випуск первинних металів. На випуск 1 т вторинного алюмінію, наприклад, витрачається біля 2 тис. кВт·год електричної енергії, що у 7 – 9 разів менше, ніж на виробництво алюмінію електролітичним способом. При цьому практично виключаються викиди в атмосферу фториду водню та смолистих речовин, які мають місце при виробництві первинного алюмінію [5].

В роботі [6] також підтверджується, що виробництво алюмінію з рудної сировини (бокситів і нефелінів) потребує збільшення витрат, а також запровадження додаткових заходів на захист довкілля, тому перевага віддається виробництву вторинного алюмінію.

Для плавки алюмінієвого брухту, витримки та обробки отриманого алюмінію використовують печі, обігрів яких здійснюється при спалюванні газоподібного або рідкого палива, а також печі з електричним обігрівом [7].

Печі на газі і рідкому паливі широко використовуються в алюмінієвій промисловості. Вони зазвичай мають конструкції, що є варіантами традиційних подових або роторних печей. В цих печах використовується пряме випромінювання підведеної теплоти, тому ефективність системи спалювання палива доволі висока [7].

Електричні печі, які за своєю конструкцією поділяються на печі опору і індукційні печі, мають ряд переваг. Відсутність продуктів згоряння, наприклад, зменшує втрати від окислення металу, а також виключає забруднення розплавленого алюмінію воднем і іншими газами. Також з точки зору екології електричні печі є більш чистими [7].

Результати дослідження температурно-теплових умов роботи стаціонарної печі для переплавки алюмінієвого брухту з електричним та газовим нагрівом наведені в роботах [8 - 10].

Робочий простір печі виконаний у вигляді футерованої прямокутної камери з подиною, боковими і торцевими стінками та склепінням. Камера має дві зони: нижню, де знаходиться алюміній після розплавлення завантаженого брухту, та верхню (без розплаву). В одній з бокових стінок розташовані форкамери, через які завантажуються алюмінієвий брухт і знімається шлак, та летка для виливання алюмінію. Футеровка поверхонь наявних печей виконана послідовно з вогнетривких матеріалів (корунд, шамот), а теплоізоляція – з пінодіатоміту і азбесту для подини, торцевих і бокових стінок, та пінодіатоміту і вермикуліту для склепіння. Було показано, що часткова заміна теплоізоляції з пінодіатоміта на силікат кальцію в конструкціях подини, склепіння, бокових і торцевих стінок може призвести до зменшення тепловтрат через ці огороження приблизно на 25 %.

Згідно з технологією 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 домішки і здійснюють лиття виробів. Після повного закінчення лиття алюмінію цикл повторюється.

Вимірювання температури розплаву зазвичай здійснюють термометрами, розміщеними в чохлах із нержавіючої сталі або керамічних чохлах, які після розплавлення алюмінію вставляються в робочий простір печі через отвори в склепінні. Слід зазначити, що термін дії таких термометрів доволі обмежений унаслідок руйнування чохла із нержавіючої сталі при контакті з розплавом, а керамічні чохла є доволі крихкими.

Метою статті є розробка непрямого методу визначення температури розплаву, що дозволить здійснювати постійний контроль цієї температури та заощадити кошти на виготовлення термометрів в чохлах.

Розрахункові дослідження з непрямого визначення температури розплаву в печі. Потік теплоти, який підводиться в печі від електричної енергії або при спалюванні газоподібного чи рідкого палива, витрачається корисно на нагрів брухту до температури розплавлення, його розплавлення, перегрів розплавленого алюмінію та твердих домішок до робочої температури, а також на компенсацію втрат через зовнішні поверхні огорожень, через відкриті форкамери і отвори тощо [9].

При визначенні втрат теплоти окремими елементами зовнішніх огорожень, що знаходяться в зоні печі з розплавом алюмінієм, Вт, зазвичай використовують рівняння теплопередачі

$$Q_{\text{втри}} = k_i F_i (t_p - t_n), \quad (1)$$

де k_i – коефіцієнт теплопередачі від розплаву алюмінію до навколишнього середовища, Вт/(м²·К); F_i – площа теплопередавальної поверхні огороження, м²; t_p і t_n – температура розплаву алюмінію і навколишнього середовища, відповідно, °С.

За програмним забезпеченням [10] виконана серія розрахунків з визначення густини теплового потоку q та температури стінки $t_{\text{ст}}$ зовнішніх поверхонь, що знаходяться в зоні розплавленого алюмінію, печі для переплавлення алюмінієвого брухту ємністю 6 т з електричною потужністю 600 кВт.

Розрахункові дослідження виконані для огорожень бокової та торцевої стінки базової та зміненої конструкцій (табл. 1), а також і для довільних конструкцій цих стінок, в інтервалі температур розплаву алюмінію 670 – 750 °С з кроком в 10 °С.

Слід зазначити, що для довільних конструкцій цих огорожень незмінними залишалися сумарні їх товщини і, як правило, матеріал та товщина першого шару футеровки, порошка шамотного, а також сталевого кожуха, а змінювали матеріали і товщини наступних футеровочно-теплоізоляційних матеріалів. В деяких випадках замість корундової вогнетривкої цегли першого шару футеровки брали високоглиноземистий шамот ВГО-45 товщиною 230 мм.

Коефіцієнт теплопередачі від розплаву алюмінію до навколишнього середовища, Вт / (м²·К), визначали за відомою формулою

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{вн}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від розплаву алюмінію до внутрішньої поверхні стінки футеровки, Вт / (м²·К); δ_i – товщина відповідного шару огороження, м; λ_i – теплопровідність матеріалу шару, Вт / (м·К); $\alpha_{\text{н}}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки сталевого кожуха до навколишнього середовища, Вт / (м²·К).

Таблиця 1 – Вихідні дані до розрахунків для поверхонь печі, що знаходяться в зоні розплаву

Огородження	Поверхня, м ²	Конструкція	Матеріали/товщини шарів (мм)							Σδ _{ст} , мм
			1	2	3	4	5	6	7	
Бокова стінка	3,6	базова	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{50}$	$\frac{Ш}{230}$	$\frac{ПД}{460}$	$\frac{А}{10}$	$\frac{С}{10}$	-	1010
		змінена [9]	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{50}$	$\frac{Ш}{230}$	$\frac{ПД}{460}$	$\frac{СК}{270}$	$\frac{МВ}{20}$	$\frac{С}{10}$	
Торцьова стінка	1,4	базова	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{80}$	$\frac{Ш}{115}$	$\frac{ПД}{345}$	$\frac{А}{10}$	$\frac{С}{10}$	-	810
		змінена [9]	$\frac{K}{250}$	$\frac{ПШ}{70}$	$\frac{Ш}{115}$	$\frac{ПД}{115}$	$\frac{СК}{230}$	$\frac{МВ}{20}$	$\frac{С}{10}$	

Умовні позначення: К – корундова вогнетривка цегла; ПШ – порошок шамотний; Ш – шамот; ПД – пінодіатоміт; А – азбестовий картон; С – сталевий кожух; СК – силікат кальцію; МВ – мінеральна вата.

В розрахунках брали $\alpha_{вн} = 500 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$; теплопровідність матеріалів огорожень в залежності від температури визначали за даними [11], враховуючи при цьому їх повне або часткове просочування розплавом алюмінію, що визначається температурами на границях шарів (див., наприклад, рис. 1) і порівнянням їх з температурою розплавлення алюмінію $t_{роз}$, яка складає $656 \text{ }^\circ\text{C}$. При повному просочуванні матеріалу розплавом (температури на обох границях шару перевищують $t_{роз}$) теплопровідність збільшували у 1,5 рази, а при частковому (температура тільки на одній границі шару перевищує $t_{роз}$) – у 1,25 рази.

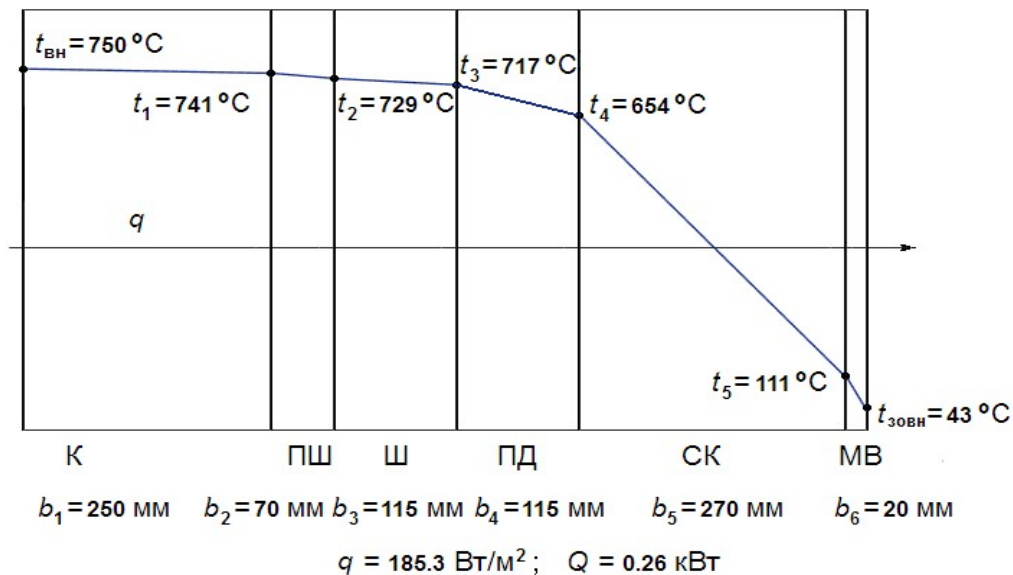


Рис. 1 – Розподіл температур по товщині торцевої стінки (сталевий кожух не показаний)

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні стінки сталевого кожуха до навколишнього середовища, Вт / (м²·К), визначали при отриманій в розрахунку температурі зовнішньої поверхні стінки за залежністю [12]

$$\alpha_{\text{н}} = 9,5 + 98,15 \cdot 10^{-3} (t_{\text{ст}} - 30) - 4,74 \cdot 10^{-4} (t_{\text{ст}} - 30)^2 + 1,74 \cdot 10^{-6} (t_{\text{ст}} - 30)^3.$$

Якщо відома густина теплового потоку q та виміряна температура зовнішньої поверхні огороження $t_{\text{зовн}} (t_{\text{ст}})$, то на практиці температуру розплаву алюмінію в печі можна визначити за рівнянням вигляду (1), тобто

$$t_{\text{р}} = t_{\text{ст}} + \frac{q}{k_{\text{р}}}, \quad (3)$$

де $k_{\text{р}}$ – коефіцієнт теплопередачі від розплаву алюмінію до зовнішньої поверхні огороження, Вт / (м²·К).

Величину $k_{\text{р}}$, для встановлення її зв'язку з температурою стінки зовнішньої поверхні $t_{\text{ст}}$, визначали за рівнянням вигляду (2), в якому в знаменнику буде відсутній термічний опір тепловіддачі на зовнішній поверхні огороження ($1 / \alpha_{\text{н}}$).

Результати розрахунків для всіх варіантів при відповідних заданих матеріалах і товщинах окремих шарів огорожень, площі теплопередачальної поверхні та температур розплаву $t_{\text{р}}$ включали:

- густину теплового потоку q , Вт / м²;
- температуру стінки зовнішньої поверхні огороження $t_{\text{ст}}$, °С;
- різницю температур $\Delta t_{\text{ст}} = t_{\text{р}} - t_{\text{ст}}$, °С;
- коефіцієнт теплопередачі від розплаву алюмінію до зовнішньої поверхні огороження $k_{\text{р}} = (q / \Delta t_{\text{ст}})$,

Вт / (м²·К).

На рис. 2, 3 наведені залежності q і $k_{\text{р}}$ відповідно від $t_{\text{ст}}$.

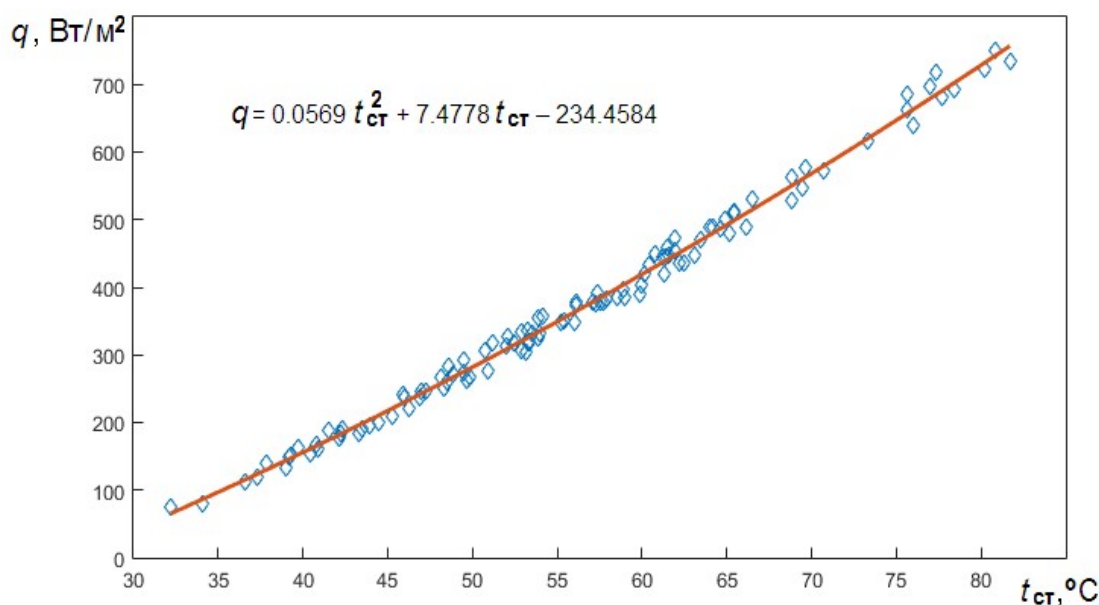


Рис. 2 – Залежність густини теплового потоку від температури стінки
(середнє відхилення розрахункових даних 1,51 %, максимальне – 4,6 %)

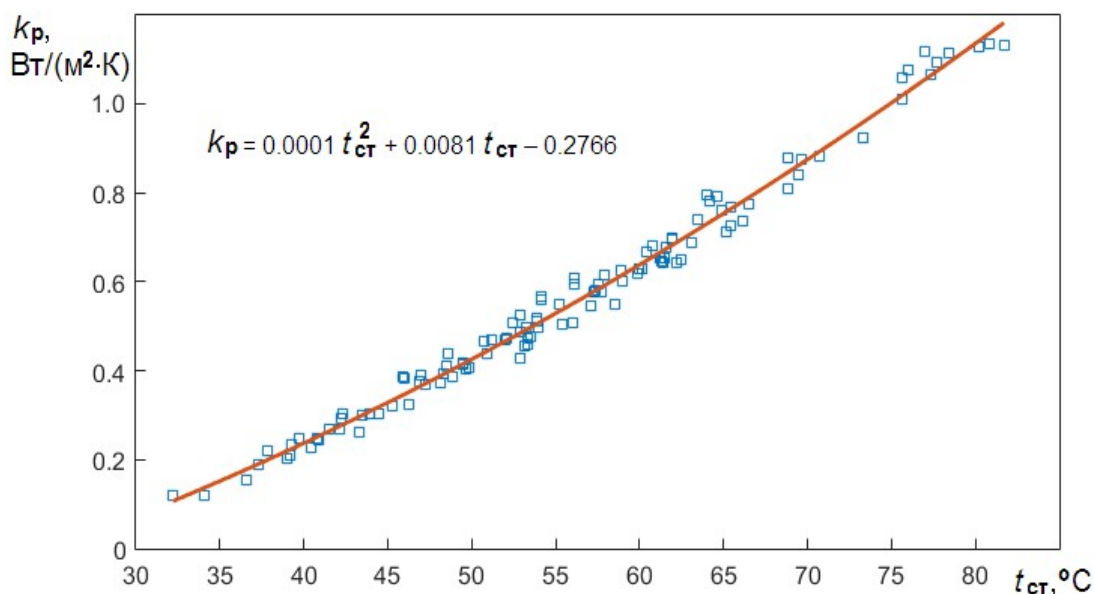


Рис. 3 – Залежність температури стінки від коефіцієнта теплопередачі
(середнє відхилення розрахункових даних 1,54 %, максимальне – 5,6 %)

Для практичного використання отриманих результатів в циклах плавки алюмінієвого брухту необхідно після його розплавлення виміряти температуру зовнішньої поверхні стінки $t_{\text{ст}}$, $^{\circ}\text{C}$, в двох – трьох точках, наприклад, використавши для цього хромель-алюмелеві термопари. У подальшому за рис. 2 або за наведеною на ньому апроксимуючою залежністю необхідно визначити густину теплового потоку q , $\text{Вт}/\text{м}^2$, а за рис 3 або апроксимуючою залежністю – коефіцієнт теплопередачі k_p , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$. Температура розплаву в печі t_p , $^{\circ}\text{C}$, визначається за виразом (3). Перед проведенням виливки розплаву алюмінія з печі можливе короткочасне вимірювання його температури штатною термопарою в чохлі.

Висновки

1. За розробленим авторами програмним забезпеченням виконані розрахунки з визначення густини теплового потоку та температури зовнішніх поверхонь бокової та торцьової стінок печі для переплавлення алюмінієвого брухту в інтервалі температур розплаву $670 - 750$ $^{\circ}\text{C}$; на базі розрахункових даних отримана апроксимуюча залежність $q = f(t_{\text{ст}})$, максимальне відхилення яких не перевищує 4,6 %.

2. Розрахунковими дослідженнями встановлена залежність температури зовнішньої поверхні стінки від коефіцієнта теплопередачі, побудована залежність $k_p = f(t_{\text{ст}})$, максимальне відхилення розрахункових даних не перевищує 5,6 %.

3. Надані практичні рекомендації стосовно оперативного визначення температури розплаву в печі в циклі плавки алюмінієвого брухту за вимірююю температурою стінки зовнішньої поверхні.

Список використаної літератури

1. Анализ мирового рынка алюминия: итоги 2017 года, прогнозы на 2018 год до 2021 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.talco.com.tj/sites/default/files/_world-aluminumindustry/Analiz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf. – Дата звернення 05.01.23.
2. Чернавина Д. А. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Д. А. Чернавина, Е. А. Чернавин, А. В. Фаллер и др. // Молодой ученый. - 2018. - №17. - С. 206-210.
3. Pinkham M. Big player aims higher still. IMCO Recycling. Aluminium today / M. Pinkham. - June/July 1999.- p. 43-44.
4. Савицкий К. В. Переработка шлаков вторичного алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rusnauka.com/SND/Tecnic/1savickiy%20k%20v.doc.htm>. – Дата звернення 05.01.23.
5. Галевский Г.В. Металлургия вторичного алюминия: Учебное пособие для вузов / Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис. Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 289 с.

6. Макаров Г.С. Мировые тенденции в области переработки и применения вторичного алюминия / Г. С. Макаров // *Технология легких сплавов*. – 2004. - № 1. – С. 25-30.
 7. Schmitz Ch. Handbook of Aluminium Recycling / Ch. Schmitz // Vulkan – Verlag GmbH, 2014.
 8. Панов Е.Н. Повышение энергетической эффективности печей (миксеров) для переплавки алюминиевого лома /Е.Н. Панов, М.Ф.Боженко. М.В.Коржик и др. // *Цветные металлы*. – 2005. - № 5 – 6. – С. 114-117.
 9. Панов Є. М. Оптимізація конструкції печей для переплавки алюмінієвого брухту / Є. М. Панов, М. Ф. Боженко, С. В. Даниленко та ін. // *Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського"*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. - 2017. - № 1. - С. 27-34.
 10. Панов Є. М. Автоматизовані розрахунки при розробці енергоефективних конструкцій печей для переплавлення алюмінієвого брухту / Є. М. Панов, М. Ф. Боженко, М. В. Коржик // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2022. - № 3. - С. 95-104..
 11. Панов Е.Н. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, С. В. Даниленко и др.; под общ. ред. Б.С. Громова. – М.: «Руда и металлы», 1998. – 256 с.
 12. Троянкин Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок: учебное пособие /Ю.В. Троянкин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 256 с.
-

Yevhen Panov, Mykhailo Bozhenko, Mykhailo Korzhyk

INDIRECT DETERMINATION OF THE MELTING TEMPERATURE IN ALUMINUM SCRAP FURNACES

Based on the analysis of literary sources, it is shown that the production of secondary non-ferrous metals, and aluminum in particular, is very efficient since the costs of raw materials and materials for their production are much lower than for the production of primary metals. For the production of 1 ton of secondary aluminum, of which about 100,000 tons are produced in Ukraine, about 2,000 kWh of electrical energy is consumed, which is 7-9 times less than for the production of aluminum by the electrolytic method. At the same time, emissions of hydrogen fluoride and resinous substances into the atmosphere, which occur during the production of primary aluminum, are virtually eliminated. Furnaces heated by the burning of gaseous or liquid fuel, as well as furnaces with electric heating, are used for melting aluminum scrap, curing and processing the obtained aluminum. Previous authors' research concerned the study of temperature and thermal conditions of operation of a stationary furnace for remelting aluminum scrap with electric and gas heating. The working space of the furnace is made in the form of a lined rectangular chamber with a floor, side and end walls, and a vault. The chamber has two zones: the lower one, where the aluminum is located after melting the loaded scrap, and the upper one (without melt). According to the technology, aluminum scrap is first loaded into the furnace through open prechambers, then external heating devices are turned on and the solid material is heated and melted, and then the molten metal is brought to the required temperature, after which steel and other impurities are removed from the working space through prechambers and perform casting of products. After the aluminum casting is complete, the cycle is repeated. Measurement of the melt temperature is usually carried out by thermocouples placed in stainless steel covers or ceramic covers, which, after melting the aluminum, are inserted into the working space of the furnace through holes in the vault. It is noted that the service life of such thermocouples is quite limited due to the destruction of the stainless steel covers upon contact with the melt, and the ceramic covers are quite fragile. That's why a method of an indirect determining the temperature of the melt, which will allow constant control of this temperature and save money on the manufacture of thermocouples in covers, was developed. The results of calculation studies on the determination of the heat flux density and the temperature of the outer surfaces of the side and end walls of the furnace for remelting aluminum scrap in the melt temperature range of 670-750 °C that were performed using the software developed by the authors, are given. The results of calculations for all options with the relevant specified materials and thicknesses of individual layers of fences, heat transfer surface area and melt temperature t_m included the heat flow density q , W / m^2 ; wall temperature of the outer surface of the enclosure t_w , °C; temperature difference $\Delta t_w = t_m - t_w$, °C; coefficient of heat transfer from the aluminum melt to the outer surface of the enclosure $k_m = (q / \Delta t_w)$, $W / (m^2 \cdot K)$. On the basis of calculated data,

an approximating dependence $q = f(t_w)$ was obtained, the maximum deviation of which does not exceed 4,6%. The dependence of the wall temperature of the outer surface of the enclosure on the heat transfer coefficient was established, the dependence $k_m = f(t_w)$ was built, and the maximum deviation of the calculated data does not exceed 5,6%. Practical recommendations are provided regarding the operational determination of the temperature of the melt in the furnace in the cycle of melting aluminum scrap, according to which, after melting the aluminum, it is necessary to measure the temperature of the outer surface of the wall t_w , °C, at two or three points, for example, using chromel-alumel thermocouples for this purpose. In the future, it is necessary to determine the heat flow density q , W/m^2 and the heat transfer coefficient k_m , $W / (m^2 \cdot K)$ according to the corresponding graphs or the approximate dependencies shown on them. The temperature of the melt in the furnace, °C, is determined by the equation $t_m = t_w + (q / k_m)$. Before pouring aluminum melt from the furnace, it is possible to measure its temperature for a short time with a standard thermocouple in the cover.

Keywords: furnace, aluminum scrap, melt, temperature, enclosure, lining, thermal insulation, heat flow density, heat transfer coefficient.

References

1. Analiz mirovogo rynka aliumyniia: itogy 2017 goda, prognozy na 2018 god do 2021 goda [Analysis of the global aluminum market: results of 2017, forecasts for 2018 to 2021] [Electronic resource]. – Available at: http://www.talco.com.tj/sites/default/files/_world-aluminum-industry/Analiz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf. – Access date: 05.01.2023.
2. Chernavina D. A., Chernavin E. A., Faller A. V. et al (2018), *Mirovoj rynek alyuminiia: tendencyi razvitiia, perspektivy i klyuchevye problemy* [The global aluminium market: development trends, prospects and key issues], *Molodoj uchenyj*, № 17. – p. 206–210.
3. Pinkham M. (1999) “Big player aims higher still. IMCO Recycling”, *Aluminium today*, № 11(4). – p. 43–44.
4. Savitskij K. V., *Pererabotka shlahkov vtorichnogo aliumyniia* [Processing of recycled aluminum slag] [Electronic resource]. – Available at: http://www.rusnauka.com/SND/Tecnic/1_savickiy%20k%20v.doc.htm. – Access date: 05.01.2023.
5. Galevskij G. V., Kulagin N. M., Mintsy M. Ja. (1998), *Metallurgija vtorichnogo aliumyniia: Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Recycled aluminum metallurgy: Textbook for universities], Nauka. Sibirskoe predpriiatie RAN, Novosibirsk.
6. Makarov G. S. (2004), *Mirovye tendentsyi v oblasti pererabotki i primenenija vtorichnogo aliumyniia* [World trends in the field of processing and use of recycled aluminum], *Tehnologija legkih splavov*, № 1. – p. 25–30.
7. Schmitz Ch. (2014), “Handbook of Aluminium Recycling”, Vulkan, Verlag GmbH.
8. Panov E.N., Bozhenko M. F., Korzhik M. V. et al (2005), “Improving the energy efficiency of furnaces (mixers), for remelting of aluminum scrap”, *Cvetnye metally*, № 5. – p. 114–117.
9. Panov Ye. N., Bozhenko M. F., Danylenko S. V. et al (2017), *Optyimizatsiia konstruksii pechei dlia pereplavky aliuminiievoho brukhtu* [Optimization of furnaces design for melting aluminium scrap], *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihoria Sikorskoho"*. Seriia: Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia, № 1. – p. 27–34.
10. Panov Ye. N., Bozhenko M. F., Korzhyk M. V. (2022), *Avtomatyzovani rozrakhunky pry rozrobtsti enerhoefektyvnykh konstruksii pechei dlia pereplavlennia aliuminiievoho brukhtu* [Automated calculations in the development of energy-efficient designs of furnaces for aluminum scrap remelting], *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia*, № 3. – p. 95–104.
11. Panov E. N., Vasil'chenko G. N., Danilenko S. V. et al. (1998), *Teplovy protsessy v elektrolizerah i mikserah aliuminiievogo proizvodstva* [Thermal processes in aluminum production electrolyzers and mixers], *Ruda i metally*.
12. Trojankin Ju. V. (1998), *Proektirovanije i ekspluatatsija ognietehnicheskikh ustanovok: uchebnoe posobie* [Design and operation of fire-engineering systems: textbook], *Energoatomizdat*.