

Тарасенко Микола Олексійович, Кандидат тех. наук, професор. Тел. + 38 (066) 2 50 83 18. E-mail: tarasenkoni52@gmail.com

Тарасенко Олександр Миколайович, Кандидат тех. наук, доцент. Тел. + 38 (066) 2 50 83 18. E-mail: Oleksandr.Tarasenko@khpi.edu.ua

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій. Вул. Кирпичова, 2, Харків, Україна, 61002.

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПЕЧЕЙ ВТОРИННОЇ ПЕРЕРОБКИ АЛЮМІНІЮ

***Анотація.** В статті розглянуто сучасний стан та перспективи виробництва алюмінію в Україні та світі. Показано, що виробництво вторинного алюмінію в Україні є економічно доцільним і його частка постійно збільшується. Аналіз джерел інформації показав, що попит на алюміній постійно зростає але в зв'язку з підвищенням цін на енергоносії собівартість виробництва значно збільшилася, що призвело до зниження його виробництва. Тому необхідно впроваджувати заходи для вдосконалення процесу виробництва, що дозволить підвищити рівень енергозбереження при виробництві металу. Проведено аналіз теплового балансу плавильної печі для виробництва вторинного алюмінію. Аналіз теплового балансу показав, що в процесі виробництва мають місце значні енергетичні втрати за рахунок недостатнього використання теплоти в технологічному процесі, в тому числі, теплота продуктів згоряння або використовується не ефективно, або не використовується взагалі. Розглянуто основні методи підвищення енергоефективності плавильних печей та запропоновано перелік заходів щодо вдосконалення їхньої роботи, що дозволить знизити собівартість виробництва металу. Розраховані і спроектовані схеми для утилізації теплоти відхідних газів від плавильних печей. Складено тепловий баланс печі до і після модернізації. Виконано розрахунки поверхні нагріву рекуператора-повітронідігрівача.*

***Ключові слова:** енергоефективність, плавильна піч, енергоаудит, рекуператор, тепловий баланс, теплові втрати, вторинний алюміній*

Tarasenko Mykola, Ph.D., professor. Tel. +38 (066)2508318. E-mail: tarasenkoni52@gmail.com.

Tarasenko Oleksandr, Ph.D., associate professor. E-mail: Oleksandr.Tarasenko@khpi.edu.ua
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute, of the Department thermal engineering and energy efficiency technologies. Kyrpychova st., 2, Kharkiv, Ukraine, 61002.

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF FURNACES FOR PROCESSING SECONDARY ALUMINIUM

***Abstract.** The article examines the current state and prospects of aluminum production in Ukraine and the world. It is shown that the production of secondary aluminum in Ukraine is economically feasible and its share is constantly increasing. The analysis of information sources showed that the demand for aluminum is constantly growing, but due to the increase in energy prices, the cost of production has increased significantly, which has led to a decrease in the volume of its production. Therefore, it is necessary to implement measures to improve the production process, which will allow to increase the level of energy saving in the production of metal. An analysis of the heat balance of the melting furnace for the production of secondary aluminum was carried out. The analysis of the heat balance showed that in the production process there are significant energy losses due to the insufficient use of heat in the technological*

process, including the heat of the combustion products, which is either not used effectively or not used at all. The main methods of increasing the energy efficiency of melting furnaces are considered and a list of measures to improve their operation is proposed, which will reduce the cost of metal production. Schemes for heat utilization of waste gases from melting furnaces are calculated and designed. The heat balance of the furnace before and after modernization was compiled. Calculations of the heating surface of the recuperator-air heater have been performed.

Keywords: *energy efficiency, melting furnace, audit of energy, air heater, heat balance, heat losses, secondary aluminium*

Постановка проблеми. Алюмінієва промисловість є головною галуззю світової кольорової металургії, оскільки алюміній нині має найширше застосування. В даний час, у зв'язку з різким зростанням цін на енергоносії, виробництво алюмінію в Україні та країнах Європи зменшується, але попит на нього не знижується. Частка вторинного алюмінію, який отриманий з алюмінієвого брухту і відходів становить близько однієї третини від усього світового виробництва алюмінію. В Україні щорічно виробляється 210 тис. т алюмінію. Близько 100 тис. тон отримують методом вторинної переплавки алюмінієвого брухту [1-3]. Основними причинами для переробки алюмінієвого брухту є економічна доцільність і охорона навколишнього середовища. При виробництві вторинного алюмінію витрачається тільки близько 5 % енергії від необхідної енергії, на виробництво первинного алюмінію [4,5]. В європейських країнах рівень промислової переробки алюмінію вельми високий: від 60 % для алюмінієвих банок до 85 % в будівництві і до 95 % в транспорті. Якість алюмінію при переробці, в принципі, не знижується і його можна переробляти практично нескінченно. Особливо це відноситься до виробничого лому: майже 100 % цього брухту зазвичай відразу переробляється в той же самий алюмінієвий сплав. Основні джерела лому для переробки наведені на рис. 1.

В даний час у зв'язку з різким зростанням цін на енергоносії виробництво алюмінію в Україні та країнах Європи зменшується. Незважаючи на те, що виробництво алюмінію в Європі скорочується, попит на нього не знижується. Загальне споживання алюмінію в 2040 році може зрости з 86 млн до 148 млн тонн на рік (+72 %).

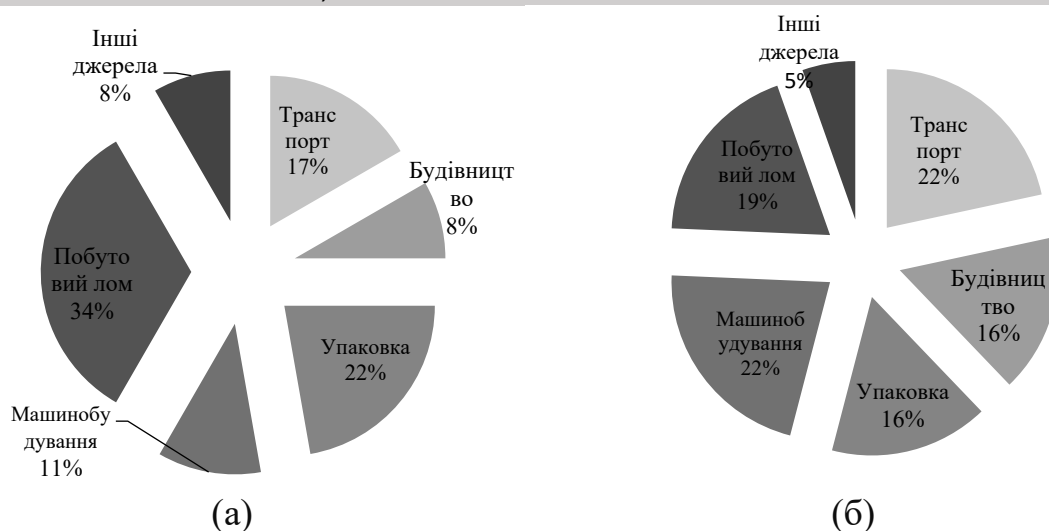


Рис. 1. Джерела лому алюмінію в Україні (а) та світі (б).

Зростання населення Землі і розширення сфери застосування алюмінію, масове виробництво електромобілів і розвиток сонячної генерації, щорічно збільшують попит на цей метал на всіх ключових ринках збуту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значна кількість алюмінієвих шлаків утворюється в ливарних цехах підприємства, що використовують технологію плавлення алюмінієвих сплавів без флюсу. Шлак може містити від 20 до 80% металу. По суті, вони являють собою відход, що складається з суміші металу та оксидів. Це також стосується відкладень із ливарних ковшів і піни, що утворюється під час лиття алюмінію. Легкий алюмінієвий брухт важко ефективно розплавити та він дуже легко окислюється. Незахищені пофарбовані алюмінієві поверхні швидко окислюються на повітрі навіть при температурі навколишнього середовища. Під впливом високих температур процес окислення значно прискорюється. Тому однією з найпоширеніших технологій переробки алюмінієвих відходів є процес захисту алюмінієвого брухту від окислення, наприклад шляхом занурення подрібненої суміші в розплавлений алюміній. Методи та пристрої для реалізації цієї технології наведені в патентах [6-7]. Однак описані в ньому технологічні прийоми ефективні у випадку алюмінієвих відходів, що містять не більше 7% оксидів, наприклад

алюмінієвої стружки. При необхідності переробки алюмінієвих шлаків, що містять оксид алюмінію та інші оксидні і сольові сполуки, застосування цих методів стає неефективним.

Зниження витрат на переробку забезпечує спосіб пресування гарячого шлаку безпосередньо після збору його з поверхні плавильної печі [8]. За розробленою технологією гарячий шлак завантажують у форму і пресують під пресом. Стиснутий розплавлений алюміній надходить у форму і твердне. Переробка залишків пресування в спресовану шкірку вимагає менших витрат. Однак використання цієї методики лише частково вирішує проблему переробки алюмінієвого шлаку та зменшення його частки. Метод також не дозволяє відокремлювати алюміній при переробці холодного шлаку.

Спосіб переробки алюмінієвого шлаку в електрошлаковій печі постійного струму, що має тигель з нижнім електродом як катодом і верхнім електродом як анодом - ще одна відома технологія. [9] Кріоліт (Na_3AlF_6) і глинозем (Al_2O_3) завантажують в тигель електрошлакової печі і розплавляють, потім алюмінієвий шлак (механічна суміш Al_2O_3 і металевого алюмінію) і кріоліт подрібнюють в отриманий рідкий розплав (електроліт), додають частини у міру їх плавлення і розчинення в електроліті. Виділення рідкого металу з алюмінію відбувається на дні тигля, в зоні катода, а виділення вторинного шлаку у вигляді суміші кріоліту та оксиду алюмінію відбувається в зоні анода. Тому застосування електрошлакової печі забезпечує плавлення і розчинення алюмінію шлак при температурах від 800 до 2000°C.

Найбільш вигідними є дугові електропечі, де переробка алюмінієвих відходів не передбачає використання сполук, що містять хлор і фтор [10]. У цьому процесі використовується електродугова піч, яка містить принаймні один електрод і має систему вдування газу в простір печі поблизу електрода.

Порошок або дрібно гранульована тверда речовина вдувається у простір печі разом з газом. Система наддуву газу оснащена спеціальними

турбуляторами. Їх наявність, на нашу думку, значно покращує роботу печі, але, як і в інших раніше відомих конструкціях дугових печей, довжина електричної дуги регулюється переміщенням електрода за допомогою приводу з механічною інерцією. Механічна інерція негативно впливає на стабільність дуги та викликає ненормальні стрибки струмового навантаження.

Відносно новим процесом переробки алюмінієвого лому є плавка в розплавах хлоридів лужних металів [11]. Розплавлені хлориди лужних металів є широко поширеними сольовими середовищами для проведення високотемпературних фізикохімічних і електрохімічних процесів. Розплави хлоридів знаходять усе більше застосування для отримання і рафінування металів, нанесення покриттів гальванічним способом, очищення промислових газів від шкідливих домішок, а також як електроліти у високотемпературних хімічних джерелах струму і середовища для проведення неорганічних і органічних реакцій.

Усі приведені технології мають певні переваги та недоліки. У той же час, загальною проблемою для вторинної переробки алюмінію остається проблема підвищення енергоефективності процесів.

Метою роботи є розробка заходів щодо удосконалення технологічного процесу з метою зменшення витрати палива в газових відбивних печах з прямим завантаженням шихти.

Викладення основного матеріалу. Виробництво алюмінієвих пресованих профілів зазвичай має свою ділянку або цех з переплавки власних технологічних відходів, а також відповідного покупного алюмінієвого брухту. Отриманий алюмінієвий розплав розливається потім в злитки-стовпи для пресування. Типовими плавильними печами для такого виробництва є газові відбивні печі з прямим завантаженням шихти, стаціонарні, або такі що нахиляються (рис. 1). Завантаження печі може проводитися лише твердою пресованою шихтою (чушковий алюміній, відходи свого виробництва, брухт).

Піч опалюється природним газом, що спалюється разом з холодним повітрям. В якості резервного палива застосовують відпрацьовані масла або дизельне паливо. Для опалення печі використовують три пальники, розміщені в торцях печі. Футерування печі багатошарове.

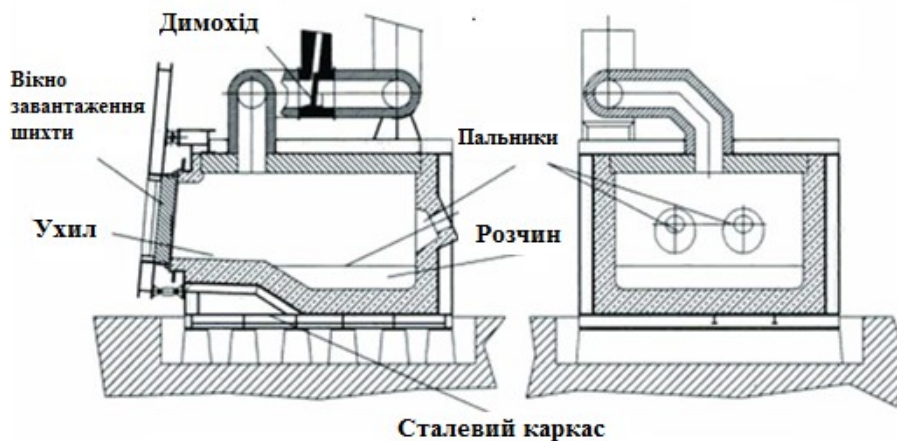


Рис. 2. Типова відбивна піч для плавління алюмінію.

Система димовидалення складається з двох вертикальних каналів, розташованих з правої та лівої сторін печі, що приєднуються під пічню до загального борову, через який димові гази видаляються в димову трубу.

Якість роботи печі, рівень її досконалості як теплового агрегату, характеризується коефіцієнтом використання тепла ($\eta_{к.в.т.}$). Для визначення $\eta_{к.в.т.}$ необхідно скласти тепловий баланс печі та визначити кількість теплових втрат. Тепловий баланс печі складається, як правило, на етапі проектування для визначення теплотехнічних характеристик печі і витрати палива (електричної потужності).

Тепловий баланс печі складається з статей надходжень і витрат тепла, які рівні між собою. При складанні теплового балансу повинні бути відомі: конструкція печі, вид теплоносія, теплотехнічні умови в печі, продуктивність (матеріальний баланс плавки). В конструкції печі повинні бути відомі: габарити, товщина кладки і вибрані матеріали, розміри і кількість робочих і

оглядових вікон, вікон завантаження - вивантаження, частка часу протягом якого ці вікна можуть бути відкриті і спосіб їх ізоляції.

Всі величини, що входять в рівняння теплового балансу беруться в межах робочого простору печі, за один і той же проміжок часу (с, годину), для безперервно працюють печей і за технологічний цикл (нагрів, плавка) – для печей періодичної дії.

Для аналізу теплової роботи печі вивчено реальний тепловий баланс. Структура балансу плавильної печі представлена в табл. 1.

Таблиця 1.
Тепловий баланс плавильної печі.

Прибуткова частина	%	Витратна частина	%
Хімічне тепло палива	95,6	Корисно використане тепло	32,4
Екзотермічний ефект реакції	3,3	Втрати з відхідними газами	39,3
Теплота з початковим матеріалом	1,1	Втрати в зовнішнє середовище	19,7
		Інші втрати	8,6
Разом	100	Разом	100

Аналіз енергопотоків показав, що кількість тепла яка корисно використовується складає лише 32,4 %, а втрати з відхідними газами становлять близько 40 %.

Теплота, що йде з робочого простору з димовими газами, кВт:

$$Q_{від} = B \cdot V_{від} \cdot C_{від} \cdot t_{від}, \quad (1)$$

де B – витрата палива, $\text{м}^3/\text{с}$ або $\text{кг}/\text{с}$; $V_{від}$ – дійсний об'єм продуктів згоряння, що отримують при спалюванні 1 м^3 або 1 кг палива з урахуванням присосів повітря по тракту; $C_{від}$ – питома теплоємність газів, що видаляються з печі, ($\text{кДж} / \text{м}^3 \cdot \text{°C}$); $t_{від}$ – температура відхідних з печі продуктів згоряння, °C .

Одним із факторів який впливає на величину втрат з відхідними газами є об'єм $V_{від}$ димових газів. Для зменшення об'єму димових газів є наступні можливості:

1) застосування палива з високою теплотворною здатністю Q_n^p та малим вмістом баластних компонентів, що містяться в паливі, перш за все N_2 і CO_2 .

2) збагачення повітряного дуття киснем, що дозволяє знизити вміст в ньому баластного газу N_2 . Цей спосіб знайшов застосування в плавильних і нагрівальних печах шляхом збільшення вмісту кисню в повітрі, що подається на пальники з 21 % до 30 %. Продування рідкого металу технічним киснем в подових сталеплавильних печах і в конвертерах дозволяє аналогічним чином підвищити коефіцієнт використання теплоти екзотермічних реакцій окислення домішок і значно зменшити час плавки. В печах даного призначення даний спосіб використовувати не доцільно [10-12 5,7].

Також до основних способів підвищення $\eta_{к.в.т.}$ відносяться: організація процесу горіння палива при оптимальних коефіцієнтах надлишку повітря; максимально можливий підігрів повітря дуття (підвищення температури повітря на 100 °С знижує витрату палива на 3 %); попередній підігрів шихти.

Пропонується наступне технічне переозброєння печі.

1. Установка рекуператора для нагрівання повітря до 400 °С, що дозволить зменшити втрати тепла з відхіднимим газами та витрату палива.
2. Заміна існуючого футерування з використанням волокнистих блоків та керамопаперу по всьому периметру печі, що дозволить дещо знизити теплові втрати в навколишній простір. Це пов'язано з тим, що середній коефіцієнт теплопровідності волокнистих блоків дорівнює $\lambda = 0,2$ Вт /м · К, що майже в 7 разів нижче, ніж у існуючого футерування $\lambda = 1,29$ Вт / м · К.

Рекуперация тепла димових газів. Утилізація теплоти відхідних димових газів дозволяє досягти економії палива, причому економія палива залежить від ступеня утилізації теплоти відхідних газів, вираженої як відношення ентальпії підігрітого повітря до ентальпії відхідних з робочого

простору газів. Ступінь утилізації теплоти також може бути виражена як ККД рекуператора.

При застосуванні повної рекуперації тепла, максимальний рівень економії енергії може досягати 30-40%. В результаті, при тій же витраті палива кількість корисно використаної теплоти, отриманої в процесі горіння, збільшується.

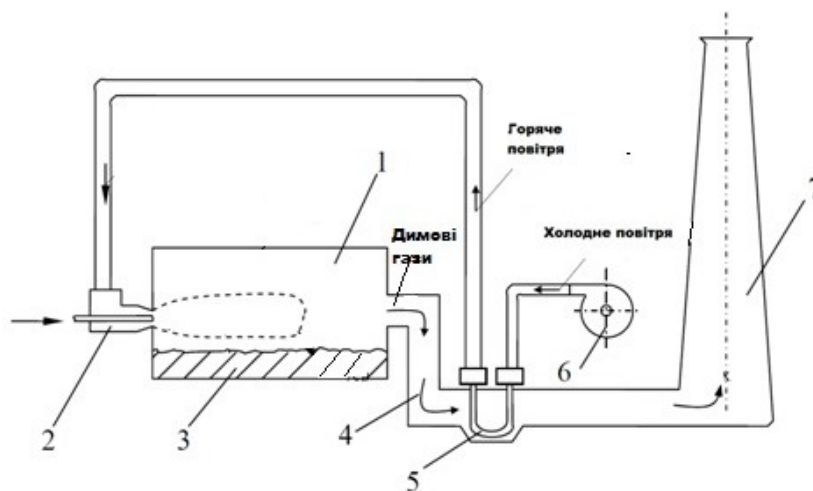


Рис. 2. Схема печі з рекуператором.

1 – робочий простір печі; 2 – пальник; 3 – метал; 4 – димовий канал; 5 – утилізатор теплоти відхідних газів (рекуператор); 6 – вентилятор; 7 – димова труба.

Таким чином, утилізація теплоти дозволяє значно економити паливо і є одним із шляхів зниження вартості нагріву металу в промислових печах. Доцільно прагнути до максимально можливої, економічно виправданою міри утилізації.[10-13] Однак утилізація не може бути повною, так як збільшення поверхні нагрівання раціонально тільки до певних меж, після яких воно вже призводить до дуже незначного виграшу в економії теплоти при збільшенні капітальних витрат [14-18].

Як було зазначено вище, утилізація теплоти відхідних газів відбувається в рекуператорах поверхневого типу для використання теплоти відхідних газів, в яких теплообмін між теплоносіями здійснюється безперервно через стінку, що їх розділяє.

Рекуператор встановлюється на шляху газів, що видаляються в димову трубу, а повітря в піч подається в середину труб за допомогою вентилятора.

Тепловий баланс печі після встановлення рекуператора представлено у табл.2.

Таблиця 2.

Тепловий баланс печі після встановлення рекуператора.

Прибуткова частина	%	Витратна частина	%
Хімічне тепло палива	81,7	Корисне використане тепло	51,9
Тепло з матеріалом	1,1	Втрати з відхідними газами	24,3
Екзотермічний ефект реакції	3,3	Втрати тепла у навколишнє середовище	15,2
Фізичне тепло повітря	13,9	Інші втрати	8,6
Разом	100	Разом	100

Висновки. На основі огляду джерел інформації встановлено, що попит на алюміній постійно підвищується. Зростання попиту обумовлено розширенням сфери його застосування. Виробництво вторинного алюмінію потребує значно менших витрат енергоносіїв ніж виробництво первинного алюмінію, при цьому якість металу практично не змінюється.

Для аналізу теплової роботи отримано реальний тепловий баланс плавильної печі. Аналіз енергопотоків діючої печі показав, що кількість тепла, яка корисно використовується, складає менше 40 %. Запропоновано перелік заходів щодо удосконалення роботи плавильної печі. Реалізація запропонованих заходів призведе до підвищення $\eta_{к.в.т.}$ до 52 %, що дозволить зменшити собівартість одержання металу.

Виконані тепловий та аеродинамічні розрахунки трубчатого рекуператора з протитечійною схемою руху теплоносіїв, який дозволяє отримати температуру повітря на виході до 400 °С. Підвищення температури повітря дуття призведе до зниження витрати палива на 13,9 %.

Дослідження енергопотоків печі, після модернізації показало, що втрати тепла з відхідними газами зменшились на 15 %.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Гринь О. М., Бредихін В. М., Червоний І. Ф., Маняк М. О. Розвиток технологій алюмінію з вторинної сировини. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХП». 2013. № 26 (999). С.180- 185.
2. Червоний І., Верховлюк А., Довбенко В. Технологические особенности переработки алюминиевого шлака. *Modern Scientific Researches*. 2019. 1(09-01). С. 9–18.
3. Верховлюк Ф. М., Довбенко В. В., Червоний І. Ф. Аналіз технологій переробки алюмінієвого скрапу. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2019. №12(65). С. 47 –54
4. Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 Aluminium alloy. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322027705>.
5. Бредихін В. М., Маняк М. О., Смирнов В. О., Пожуєв В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. *Металургія кольорових металів: підручник. Вторинна металургія кольорових металів*. Запоріжжя. ЗДІА, 2009. 452 с.
6. Патент WO2010/058172 World Intellectual Property Organization, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; F 27 В 3/00. Metal melting apparatus /Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry; заявник та патентовласник Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry. – РСТ/GB2009/002709; заявл. 19.11.2009; опубл.20.11.2009.
7. Патент JPН03120322 Японія, МПК: С 22 В 21/00. Device for melting aluminum swarf. - Опул. 22.05.1991. 9- 21. Патент СА2977480 Канада, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; С 22 В 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock; Опул. 12.11.2015.
8. Патент СА2977480 Канада, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/00; С 22 В 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock; Опул. 12.11.2015.
9. Патент 5882580 USA, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 7/00. Dross presses. 16.03.1999.
10. Патент EP2331718, МПК: С 22 В 21/00; С 22 В 7/04; С 22 В 9/18. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag; Опул.22.04.2015.
11. Патент DE19517151 Germaniya, МПК: С 21 С 5/46; С 21 С 5/52; F 27 В 3/08; F 27 В 3/22; F 27 D 13/00; F 27 D 99/00. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability; opubl. 07.03.1996.
12. Бредихін В. М., Маняк М. О., Смирнов В. О., Пожуєв В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. *Металургія кольорових металів: підручник. Вторинна металургія кольорових металів*. Запоріжжя. ЗДІА, 2009. 454 с.
13. Wallace G. Production of secondary aluminium. *Fundamentals of aluminium metallurgy*. Ed. Roger Lumley. 2011.
14. Пожуєв В. І., Іващенко В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. *Металургія кольорових металів: підручник. Ч. I. Сировинні ресурси і виробництво*. Запоріжжя. ЗДІА, 2007. 351 с.
15. Adeniji T. A. , Waheed M. A. Evaluation of the energy efficiency of an aluminum melting furnace for a Nigerian cast-coiled plant. *Fuel Communications*. 2021. 9. 100027.
16. Тарасенко М.О., Тарасенко О.М., Угольніков С.В. Дослідження динаміки многоходових трубчатих повотропідігрівників. *Вісник НТУ «ХП»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.-Харків: НТУ«ХП». 2018. 16(1292). С.65-69. doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09.
17. Губинський В. І. *Металургійні печі*. Дніпропетровск. 2006. 85 с.
18. Yurko V., Ganzha A., Tarasenko O., Tiutiunyk L. Improvement of methods for calculating thermal characteristics of loop air heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(8-109). P. 36–43. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225330.

REFERENCES:

1. Ghrynj O. M., Bredykhin V. M., Chervonyj I. F., Manjak M. O. Rozvytok tekhnologhij aljuminiju z vtorynnoji syrovyny. *Visnyk NTU «KhPI»*. Serija: Novi rishennja v suchasnykh tekhnologhijakh. – Kh: NTU «KhPI». 2013. 26 (999). P. 180- 185.

2. Chervonij Y., Verkhovljuk A., Dovbenko V. Tekhnologhicheskye osobennosti pererabotky aljuminumyevogho shlaka. *Modern Scientific Researches*. 2019. 1(09-01). P. 9–18.
3. Verkhovljuk F. M., Dovbenko V. V., Chervonyj I. F. Analiz tekhnologhij pererobky aljuminijevogho skrapu. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2019. 12(65). P. 47–54.
4. Effect of multiple remelting on behaviour of AlSi5Cu3 Aluminium alloy. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785322027705>.
5. Bredykhin V. M., Manjak M. O., Smyrnov V. O., Pozhujev V. I., Chervonyj I. F., Ghrycaj V. P. Metalurghija koljorovykh metaliv: pidruchnyk. Vtorynna metalurghija koljorovykh metaliv. Zaporizhzhja. ZDIA, 2009. 452 p.
6. Patent WO2010/058172 World Intellectual Property Organization, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; F 27 B 3/00. Metal melting apparatus / Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry; zaiavnyk ta patentovlasnyk Al Chalabi, Rifat; Perry, Ophneil, Henry. – PCT/GB2009/002709; zaiavl. 72009; opubl. 20.11.2009.
7. Patent JPH03120322 Yaponiia, MPK: C 22 B 21/00. Device for melting aluminum swarf. - Opubl. 22.05.1991. 9- 21. Patent CA2977480 Kanada, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; C 22 B 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock; Opubl. 12.11.2015.
8. Patent CA2977480 Kanada, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/00; C 22 B 9/16; F 27 D 27/00; F 27 D 3/14. System and method for melting light gauge metal stock; Opubl. 12.11.2015.
9. Patent 5882580 USA, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/04; C 22 B 7/00. Dross presses. - 16.03.1999.
10. Patent EP2331718, MPK: C 22 B 21/00; C 22 B 7/04; C 22 B 9/18. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag; Opubl. 22.04.2015.
11. Patent DE19517151 Germaniya, MPK: C 21 C 5/46; C 21 C 5/52; F 27 B 3/08; F 27 B 3/22; F 27 D 13/00; F 27 D 99/00. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability; opubl. 07.03.1996.
12. Bredykhin V. M., Manjak M. O., Smyrnov V. O., Pozhujev V. I., Chervonyj I. F., Ghrycaj V. P. Metalurghija koljorovykh metaliv: pidruchnyk. Vtorynna metalurghija koljorovykh metaliv. Zaporizhzhja. ZDIA, 2009. 454 p.
13. Wallace G. Production of secondary aluminium. Fundamentals of aluminium metallurgy. Ed. Roger Lumley. 2011.
14. Pozhujev V. I., Ivashhenko V. I., Chervonyj I. F., Ghrycaj V. P. *Metalurghija koljorovykh metaliv: pidruchnyk. Ch. 1. Syrovynni resursy i vyrobnyctvo*. Zaporizhzhja. ZDIA, 2007. 351 p.
15. Adeniji T. A., Waheed M. A. Evaluation of the energy efficiency of an aluminum melting furnace for a Nigerian cast-coiled plant. *Fuel Communications*. 2021. 9. 100027.
16. Tarasenko M. O., Tarasenko O. M., Ugholjnikov S. V. Doslidzhennja dynamiky mnogohokhodovykh trubchatykh povotropidighrivnykiv. *Visnyk NTU «KhPI», Serija: Novi rishennja v suchasnykh tekhnologhijakh*. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2018. 16 (1292). P. 65-69. doi:10.20998/2413-4295.2018.16.09.
17. Ghubyns'kyj V. I. Metalurghijni pechi. Dnipropetrovsk. 2006. 85 p.
18. Yurko V., Ganzha A., Tarasenko O., Tiutiunyk L. Improvement of methods for calculating thermal characteristics of loop air heaters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(8-109). P. 36–43. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225330.

Надійшла до редакції 21.09.2023р.