

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДОВБЕНКО ВОЛОДИМИР ВІТАЛІЙОВИЧ

Гриф

Прим № ...

УДК 669.715:004.82

ДИСЕРТАЦІЯ
**ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ АЛЮМІНІЮ З ВТОРИННОЇ
СИРОВИНИ**

Спеціальність 136 – Металургія

13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. В. Довбенко

Науковий керівник:

Верховлюк Анатолій Михайлович, доктор технічних наук, професор

Київ 2023

АНОТАЦІЯ

Довбенко В.В. Оптимізація технології одержання алюмінію з вторинної сировини. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 136 – Металургія, 13 – Механічна інженерія. – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ, 2023.

Дисертаційна робота присвячена подальшому розвитку теорії та механізму переробки ливарного алюмінієвого шлаку, дозволила вирішити актуальну наукову та практичну проблему переробки ливарного алюмінієвого шлаку на одному і тому ж підприємстві.

Швидко зростаючий дефіцит первинних кольорових металів та забезпечення високої конкурентоспроможності за рахунок зниження собівартості литих виробів роблять актуальними дослідження, спрямовані на технології більш глибокої переробки та збільшення частки металевих відходів у металургійному та ливарному виробництвах. Однак широке застосування шлаку на металургійних підприємствах, а також литої продукції, які одержують з вторинних сплавів, стримується через відсутність комплексних технологій їхньої переробки та подальшого залучення у виробництво.

Оплавлення алюмінієвого шлаку проводять в електродуговій камері, в яку всмоктують алюмінієвий розплав з накопичувальної печі, а рівень розплаву в електродуговій камері піднімають на задану відстань від електрода. В процесі горіння електричної дуги регулюють її довжину шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері, а оплавлення алюмінієвого шлаку проводять в процесі підтримки циркуляції розплавленого металу між електродуговою камерою і накопичувальною піччю. При цьому циркуляцію розплаву підтримують під дією електродинамічної сили, що генерується лінійними асинхронними статорами, встановленими на трубопроводах, котрі з'єднують тигель з накопичувальною піччю. Електротермічна установка для переробки алюмінієвого шлаку складається з плавильної накопичувальної печі і розташованої над нею електродугової вакуумної

камери з встановленим дозатором шлакової суміші, а між плавильною накопичувальною піччю і електродуговою вакуумною камерою встановлені два трубопроводи з яких перший для нагнітання, а другий - відкачування, які разом з камерою і піччю утворюють замкнутий гідравлічний контур, в якому на першому трубопроводі встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор, а вздовж другого трубопроводу встановлено лінійний асинхронний статор для відкачки розплаву з камери в піч.

I. *Перший розділ* присвячений аналізу сучасного стану та перспективам розвитку техніки і технологій одержання вторинного алюмінію.

Незважаючи на те, алюміній найпоширеніший метал, в чистому вигляді в природі його не існує. Через високу хімічну активність атоми алюмінію утворюють стійкі сполуки з іншими елементами, наприклад з киснем. Процес одержання первинного алюмінію дуже складний і пов'язаний з використанням електричної енергії великої потужності.

Представлено теоретичні основи та механізм одержання металічного алюмінію з ливарного шлаку. Він опирається на особливостях температурних залежностей хімічних реакцій за участі алюмінію. Схема процесу складається з двох етапів: пірометалургійного та гідрометалургійного. Перший характеризується зміною валентності алюмінію з трьох до одного і навпаки в залежності від температури протікання реакцій. Наведено безвідходну технологічну схему та спосіб переробки алюмінієвого шлаку в електротермічній установці, який передбачає подачу шлаку на поверхню алюмінієвого розплаву і оплавлення шлаку електричною дугою.

II. У *другому розділі* викладені основні методологічні положення роботи, а саме представлено аналіз шлаків, що містять алюміній, їх властивості та класифікація, методику визначення металургійного виходу алюмінію в лабораторних умовах, метод диференційно-калориметричних досліджень одержаних зразків, розрахунки затрат матеріалів та енергетичних ресурсів на процес одержання Al зі шлаків і визначення економічної ефективності підготовки та переробки відходів.

Поява великої кількості вторинних глиноземовміщуючих відходів (ливарні шлаки, шлами, відпрацьовані каталізатори, мінеральні частки нафтової промисловості та ін.), які утворюються на промислових підприємствах, потребують їх класифікації та розробки наукових та теоретичних основ переробки.

Для визначення металургійного виходу алюмінію, для проведення однієї плавки використовували 300 г. ливарного шлаку. Плавки проводили в індукційній печі. В графітовий тигель поміщали алундовий, дно між графітом та алундом футеровали за допомогою порошку з оксиду алюмінію. Після цього графітовий тигель ізолювали з зовнішньої сторони каоліновою ватою та вставляли його всередину мідної індукційної котушки, яка охолоджувалась водою. Джерелом високочастотного електричного струму, що подавався на індукційну котушку, слугував високочастотний генератор ВЧГ-15. Температуру у тиглі до початку протікання хімічних реакцій вимірювали за допомогою вольфрам-ренієвої термопари ВР 5/20. В якості реагентів використовували каустичну соду, хлорид натрію та вапно у кількості 2,0-2,2 % від маси шлаку.

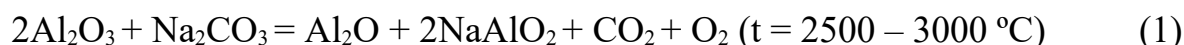
В роботі було використано синхронний термічний аналізатор STA 449F1 Jupiter фірми NETZSCH (Німеччина), який дозволяє проводити дослідження в двох режимах: «зразок» (без урахування теплофізичних характеристик тигельної системи) та «зразок з корекцією» (з урахуванням теплофізичних характеристик тигля). В режимі «зразок» дослідження проводяться в порівнянні з інертним еталоном, близьким за теплофізичними характеристиками до зразка, що досліджується.

III. *Третій розділ* присвячений дослідженням процесів теплообміну при виробництві вторинного алюмінію. Представлено технологічні особливості одержання алюмінію металургійним методом та його мікроструктура, схема і конструкція установки для виробництва вторинного алюмінію зі шлаку, вплив конструкції установки на теплообмін в процесі їх переробки та аналіз теплових режимів.

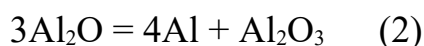
Для визначення необхідної та достатньої кількості карбонату натрію в процесі переробки шлаку алюмінієвого виробництва дослідили вплив його концентрації.

Встановлено, що зростання кількості добавки в суміш призводить в початковий момент до росту металургійного виходу алюмінію і вже при його вмісті біля 2,0 %мас. крива виходить на насичення. Таким чином, було визначено необхідну кількість реагенту.

Механізм даного процесу побудований на зміні валентності алюмінію з трьох до одного і навпаки в залежності від температури протікання реакцій. Його можна представити за допомогою наступних хімічних реакцій:



Після протікання вище представленої реакції температуру знижують до 1000 – 1100 °С. При цьому оксид одновалентного алюмінію розкладається на металевий алюміній та оксид трьох валентного алюмінію:



Алюмінієві зразки було проаналізовано двома методами: рентгеноспектральним та електронною скануючою спектроскопією. Для порівняння представлено хімічний аналіз електричного алюмінієвого дроту.

Аналіз електронних спектрів алюмінієвих зразків, які отримано з ливарного шлаку, також показав, що вони в основному містять Al в кількості від 98,16 % мас. до 99,02 % мас. Середнє значення складає 98,57 % мас. Щодо домішок, то це головним чином кремній та залізо. Їх кількість неоднозначна, в деяких зразках концентрація вища в 2-3 рази ніж у алюмінієвому дроті (% мас.: [Al] = 99,43; [Si] = 0,37; [Fe] = 0,19). Це пов'язано з вихідною шихтою, що використовується в процесі плавки (різного хімічного складу металобрухт, а саме дріт електромереж в якому кількість заліза може досягати до 0,80 % мас., терміном скачування шлаку, його зберіганням та ін.).

Визначено, що температури та ентальпії фазових переходів не дуже суттєво відрізняються від характеристик стандартного алюмінію (А85). Вони свідчать про те, що переробка алюмінієвого ливарного шлаку за допомогою вище викладеного способу приводить до одержання алюмінію порівняно високої чистоти.

Представлено також тепловий режим установки у випадку плавки ливарного шлаку. Процес теплообміну стає в деякому випадку дуже складним. Хоча розмір питомої поверхні матеріалу великий, поверхня, що нагрівається випромінюванням пічки – зовсім незначна. Більше того, рівень передачі тепла до розплаву алюмінію достатньо низький за рахунок великої кількості складових ливарного шлаку. Для того, щоб досягти необхідний рівень теплообміну, шлак спільно з каустичною содою необхідно перемішувати.

IV. *Четвертий розділ* присвячений дослідженням процесів переробки відходів на основі алюмінію та опробуванні нової технології на дослідно-промисловій установці, процеси підготовки сировини, екологічні аспекти технології переробки шлаків та економічні показники переробки відходів.

При розрахунках економічної ефективності в основному використовують метод оцінки якості продукції за одиничними показниками, наприклад, за відсотковим вмістом основного (корисного) компонента (алюмінію) у сировині. Однак, на умови і показники ціни впливають ряд інших властивостей. У зв'язку з цим, оцінка властивостей за одним показником є обмеженою та недостатньою для вибору об'єктивного рішення. Для якісної оцінки сировини необхідно привести окремі показники до єдиного критерію. В даному випадку єдиним виразом цінності сировини може бути його оцінка в грошовому еквіваленті.

Лабораторний контроль за станом навколишнього середовища в процесі переробки ливарного алюмінієвого шлаку та відходів кабельного виробництва здійснюється періодично державними органами санітарно-епідеміологічної служби, водного нагляду, екологічної безпеки з використанням стандартизованих методик визначення шкідливих речовин у повітрі, воді та ґрунті. Даний процес узгоджено з місцевими органами самоврядування, державною санітарно-епідеміологічною та іншими контролюючими службами. Всі промислові відходи, для яких розроблено методи вторинної переробки та раціонального використання їх у різних галузях, використовуються як вторинна сировина.

Ключові слова: алюміній, валентність, відходи, ливарний шлак, металургійний вихід, переробка шлаку, спектроскопія, суміш, термічний аналізатор.

ABSTRACT

Dovbenko V.V. Optimization of aluminum production technology from secondary raw materials. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in speciality 136 “Metallurgy” (13 “Mechanical Engineering”) – Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is dedicated to the further development of the theory and mechanism of processing foundry aluminum slag, allowing to address the current scientific and practical issue of processing foundry aluminum slag at the same facility.

The rapidly growing shortage of primary non-ferrous metals and ensuring high competitiveness due to the reduction of the cost of cast products make researches aimed at deeper processing technologies and increasing the share of metal waste in metallurgical and foundry industries relevant. However, the widespread use of slag at metallurgical enterprises, as well as cast products obtained from secondary alloys, is restrained due to the lack of complex technologies for their processing and further involvement in production.

Liquation of aluminum slag is carried out in an electric arc chamber, into which aluminum melt is sucked from the storage furnace, and the level of the melt in the electric arc chamber is raised to a given distance from the electrode. During the burning of the electric arc, its length is adjusted by changing the gas pressure in the electric arc chamber, and aluminum slag melting is carried out in the process of maintaining the circulation of the molten metal between the electric arc chamber and the storage furnace. At the same time, the circulation of the melt is supported under the action of the electrodynamic force generated by linear asynchronous stators installed on pipelines that connect the crucible with the storage furnace. The electrothermal installation for the processing of aluminum slag consists of a melting storage furnace and an electric arc vacuum chamber located above it with an installed slag mixture dispenser, and two pipelines are installed between the melting storage furnace and the electric arc vacuum chamber, the first of which is for

blasting, and the second is for pumping, which together with the chamber and the furnace form a closed hydraulic circuit, in which a pumping linear asynchronous stator is installed on the first pipeline, and a linear asynchronous stator is installed along the second pipeline for pumping the melt from the chamber into the furnace.

I. The *first chapter* is dedicated to the analysis of the current state and prospects of the development of techniques and technologies for obtaining secondary aluminum.

Despite aluminum being the most abundant metal, it does not exist in its pure form in nature. Due to its high chemical reactivity, aluminum atoms form stable compounds with other elements, such as oxygen. The process of obtaining primary aluminum is very complex and involves the use of high-power electrical energy.

The theoretical foundations and mechanism of obtaining metallic aluminum from foundry slag are presented. It is based on the features of the temperature dependence of chemical reactions with the participation of aluminum. The scheme of the process consists of two stages: pyrometallurgical and hydrometallurgical. The first is characterized by a change in the valence of aluminum from three to one and vice versa, depending on the reaction temperature. A zero-waste technological scheme and a method of processing aluminum slag in an electrothermal installation are presented, which involves feeding the slag to the surface of the aluminum melt and melting the slag with an electric arc.

II. The *second chapter* presents the fundamental methodological principles of the work, including the analysis of aluminum-containing slags, their properties and classification, the methodology for determining the metallurgical yield of aluminum in laboratory conditions, the method of differential calorimetric analysis of obtained samples, calculations of material and energy resource expenses for the aluminum extraction process from slags, and the determination of the economic efficiency of waste preparation and processing.

The emergence of a large quantity of secondary alumina-containing waste (foundry slag, sludges, spent catalysts, mineral particles from the oil industry, etc.) generated by industrial enterprises requires their classification and the development of scientific and theoretical foundations for processing.

To determine the metallurgical yield of aluminum, 300 grams of foundry slag were used for a single melt conducted in an induction furnace. A graphite crucible was lined with alumina, and the bottom between the graphite and alumina was lined with aluminum oxide powder. Afterward, the graphite crucible was insulated externally with kaolin wool and placed inside a copper induction coil, which was cooled with water. The high-frequency electric current, supplied to the induction coil, was provided by a high-frequency generator (HFG-15). The temperature in the crucible before the onset of chemical reactions was measured using a tungsten-rhenium thermocouple VR 5/20. Caustic soda, sodium chloride, and lime were used as reagents in amounts of 2.0-2.2% by weight of the slag.

In the work, a synchronous thermal analyzer STA 449F1 Jupiter from NETZSCH (Germany) was used. The thermal analyzer allows research to be conducted in two modes: "sample" (without considering the thermophysical characteristics of the crucible system) and "sample with correction" (considering the thermophysical characteristics of the crucible). In the "sample" mode, the studies are conducted in comparison with an inert standard, which has thermophysical characteristics close to the sample being studied.

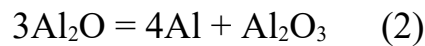
III. The *third chapter* is dedicated to the research of heat exchange processes in the production of secondary aluminum. It presents the technological peculiarities of obtaining aluminum through metallurgical methods, the microstructure of aluminum, the scheme and design of the installation for producing secondary aluminum from slag, the impact of the installation's design on heat exchange during the processing, and an analysis of the thermal regimes.

To determine the necessary and sufficient amount of sodium carbonate during slag processing, the influence of its concentration was studied. It was found that an increase in the additive's quantity in the mixture initially leads to an increase in the metallurgical yield of aluminum, but it saturates at around 2.0% by weight. Thus, the required quantity of the reagent was determined.

The mechanism of this process is based on the change in aluminum valency from three to one and vice versa, depending on the temperature of the reactions. This can be represented through the following chemical reactions:



After the above reaction has occurred, the temperature is reduced to 1000 – 1100 °C. In this case, monovalent aluminum oxide decomposes into metallic aluminum and trivalent aluminum oxide:



Aluminum samples obtained from foundry slag were analyzed using X-ray spectroscopy and scanning electron spectroscopy. For comparison, the chemical analysis of standard electrical aluminum wire is also presented.

The analysis of the electronic spectra of aluminum samples obtained from foundry slag showed that they primarily contain aluminum in quantities ranging from 98.16% by mass to 99.02% by mass, with an average composition of 98.57% by mass. As for impurities, silicon and iron are the main ones, but their concentration varies, with some samples having 2-3 times higher concentrations than in electrical aluminum wire (% by mass: [Al] = 99.43; [Si] = 0.37; [Fe] = 0.19). This is due to the diverse composition of the charge material used in the melting process (various chemical compositions of metal scrap, especially electrical wires with iron content possibly reaching up to 0.80% by mass, the slag skimming process, storage, and more).

The temperatures and enthalpies of phase transitions were found to be only slightly different from the characteristics of standard aluminum (A85). This suggests that the processing of foundry aluminum slag using the presented method results in the production of relatively high-purity aluminum.

The thermal regime of the installation during the melting of foundry slag is presented. The heat exchange process becomes quite complex in some cases. Although the specific surface area of the material is large, the surface heated by the furnace radiation is quite small. Furthermore, the heat transfer to the aluminum melt is relatively low due to

the high content of components in the foundry slag. To achieve the necessary level of heat exchange, it is essential to mix the slag with caustic soda.

IV. The *fourth chapter* focuses on the research of waste processing based on aluminum and the testing of a new technology on a pilot-industrial installation. It covers the processes of raw material preparation, ecological aspects of slag processing technology, and the economic indicators of waste processing.

In economic assessments, the primary method utilized is the evaluation of product quality based on single indicators, such as the percentage content of the primary (valuable) component (aluminum) in the raw material. However, price conditions and indicators are influenced by a range of other properties. Therefore, evaluating properties based on a single indicator is limited and insufficient for making objective decisions. To qualitatively assess raw materials, it is necessary to convert individual indicators into a common criterion. In this case, the sole expression of the value of raw materials can be its evaluation in monetary terms.

Laboratory control over the state of the environment during the processing of foundry aluminum slag and waste from cable production is periodically carried out by state authorities responsible for sanitation and epidemiology, water supervision, and ecological safety using standardized methods to determine harmful substances in the air, water, and soil. This process is coordinated with local self-government authorities and other controlling services. All industrial waste, for which methods of secondary processing have been developed, are utilized as secondary raw materials for use in the national economy.

Keywords: aluminum, valence, waste, foundry slag, metallurgical yield, slag processing, spectroscopy, mixture, thermal analyzer.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

1. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Технології переробки алюмінієвого скрапу // ScienceRise. – 2019. – № 12 (65). – С. 47–54.
<https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.189686>
2. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червонный И.Ф. Технологические особенности переработки алюминиевого шлака // Modern Scientific Researches. Yolnat PE, Minsk, Belarus. – 2019. – Р. 9–18.
<https://doi.org/10.30889/2523-4692.2019-09-01-003>
3. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Zhelesniak A.V., Chervonyi I.F. Investigation of the metallurgical yield of aluminum from foundry slag// International periodic scientific journal “Modern engineering and innovative technologies”. – 2020. – Issue 12. – Part 2. – Р. 5–16.
<https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-12-02-055>
4. Dovbenko, V., Verkhovliuk, A. Processing of aluminum slag with the use of soda // Science and Innovation. – 2023. – 19(4). – Р. 93–102.
<https://doi.org/10.15407/scine19.04.093>

Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України:

5. Довбенко В.В., Верховлюк А.М. Особливості одержання алюмінію з відходів ливарного виробництва // Процеси лиття. – 2020. – № 2 (140). – С. 3–7.
ISSN 0235-5884 (Print), ISSN 2707-1626 (Online)
6. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Chervonyi I.F. Processing of aluminum slag // Колективні монографії «Erbe der europäischen wissenschaft" Heritage of European science: engineering and technology, informatics, transport, architecture». Karlsruhe, Germany. – 2020. – Book 2. – Part 3. – Р. 9-36.
DOI: 10.30888/978-3-9821783-5-6.2020-02-03-080.
7. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Каніболоцький Д.С., Довбенко В.В. Вплив технологічних факторів на властивості високоміцного алюмінієвого сплаву системи

Al-Zn-Mg-Cu // Науково-технічний журнал “Металознавство та обробка металів”. – 2020. – № 1. – С. 27–36.

<https://doi.org/10.15407/mom2020.01.027>

8. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Русаков П.В. Електротермічна установка для переробки відходів алюмінієвого виробництва // Процеси лиття. – 2021. – №1(143). – С. 11–18.

<https://doi.org/10.15407/plit2021.01.011>

9. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Науково-методичний аналіз переробки алюмінієвих шлаків // Процеси лиття. – 2021. – №3(145). – С. 3–11.

<https://doi.org/10.15407/plit2021.03.003>

10. Довбенко В.В. Екологічні аспекти переробки алюмінієвого шлаку // Науково-технічний журнал “Металознавство та обробка металів”. – 2023. – № 3. – С. 50–55.

<https://doi.org/10.15407/mom2023.03.050>

Патент на винахід України:

11. Патент №124750 України. Спосіб і установка для переробки алюмінієвого шлаку / Верховлюк А.М., Русаков П.В., Сергієнко Р.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. // власник ФТІМС НАН України. – № а2020 00450 заявл. 27.01.2020. Опубл. 10.11.2021, бюл. №45.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Железняк О.В., Железняк В.В., Таранухіна Л.Д. Визначення металургійного виходу алюмінію із відходів ливарного виробництва. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020»*. Київ. 2020. С. 43.

13. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Особливості переробки алюмінієвого шлаку. *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладні науково-технічні дослідження. Виробництво та технології»*. Івано-Франківськ. 2020. С. 162–163.

14. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Железняк О.В., Железняк В.В. Металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку. *XVI Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020»*. Запоріжжя. 2020. С. 31–32. 15. Dovbenko V.V., Verkhovliuk A.M., Chervonyi I.F. Processing of aluminum of slag. *International Scientific Conference «International Scientific Inregration '2020»*. Seattle, Washington, USA.- 2020. P. 21-24.

DOI: 10.30888/2709-2267.2020-4, ISBN 979-8-5776002-6-6.

16. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Довбенко В.В., Железняк О.В. Хімічний та фазовий склад алюмінію, одержаного з ливарного шлаку. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2022»*. Харків. 2022. С. 39–42.

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ..... | 18 |
| ВСТУП..... | 19 |
| РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ ВТОРИННОГО АЛЮМІНІЮ | 25 |
| 1.1 Тенденції розвитку виробництва алюмінію в Україні та за кордоном..... | 25 |
| 1.2 Техніка та технології металургійного виробництва вторинного алюмінію..... | 32 |
| 1.3 Основні методи підготовки алюмінієвих відходів та шлаків для плавки та їх вплив на показники металургійного виробництва..... | 46 |
| 1.4 Мета та задачі досліджень..... | 49 |
| РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 50 |
| 2.1 Шлаки, що містять алюміній, їх властивості та класифікація..... | 50 |
| 2.2 Визначення металургійного виходу алюмінію в лабораторних умовах..... | 52 |
| 2.3 Метод диференційно-калориметричних досліджень..... | 53 |
| 2.4 Затрати матеріалів та енергетичних ресурсів на процес одержання алюмінію зі шлаків..... | 55 |
| 2.5 Визначення економічної ефективності підготовки та переробки відходів, що містять алюміній..... | 59 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ВТОРИННОГО АЛЮМІНІЮ..... | 61 |
| 3.1 Технологічні особливості одержання алюмінію металургійним методом та його мікроструктура..... | 61 |
| 3.2 Вторинний алюміній – сировина для високоміцного сплаву системи Al-Zn-Mg-Si..... | 82 |
| 3.3 Схема та конструкція установки для виробництва вторинного | |

| | |
|--|-----|
| алюмінію..... | 95 |
| 3.4 Вплив конструкції установки на теплообмін в процесі переробки шлаків..... | 100 |
| РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ В УДОСКОНАЛЕНІЙ УСТАНОВЦІ..... | 104 |
| 4.1 Удосконалення процесів підготовки шлаків..... | 104 |
| 4.2 Екологічні аспекти технології переробки ливарного алюмінієвого шлаку..... | 104 |
| 4.3 Економічні показники при переробці відходів алюмінієвого виробництва..... | 112 |
| 4.4 Розрахунок економічної ефективності переробки алюмінієвого шлаку..... | 115 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 122 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ..... | 125 |
| ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ..... | 138 |
| ДОДАТОК Б. ПАТЕНТ УКРАЇНИ..... | 141 |
| ДОДАТОК В. АКТИ ПРОМИСЛОВИХ ПЕРЕВІРОК І ВПРОВАДЖЕНЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 142 |
| ДОДАТОК Г. ДИПЛОМИ..... | 144 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$T_{\text{г}}$, °C – температура газу

$k_{\text{г,ф,ш}}$, Вт/(м²·К⁴) – коефіцієнт випромінювання газу та футерівки на поверхню шлаку

$\varepsilon_{\text{ш}}$ – ступінь забарвлення шлаку

$\varepsilon_{\text{г}}$ – ступінь забарвлення продуктів горіння

Q_1 , Вт/м² – теплове навантаження на 1 м² поверхні нагріву

α_{Σ} – сумарний коефіцієнт теплопередачі випромінюванням і конвекцією

$T_{\text{г}}^{\text{п}}$, $T_{\text{г}}^{\text{к}}$, °C – температури продуктів горіння газу на початку та в кінці процесу

$T_{\text{ш}}^{\text{п}}$, $T_{\text{ш}}^{\text{к}}$, °C – початкова та кінцева температура шлаку

ВЧГ-15 – високочастотний генератор

ВР 5/20 – вольфрам-ренієва термопара

РЕМ 106, ISM-6360 – растрові електронні мікроскопи

EPICVANT – оптичний мікроскоп

ДТА – диференціальний-термічний аналіз

СТА – синхронний термічний аналіз

ЗР – забруднюючі речовини

ГДК – гранично допустима концентрація

СЗЗ – санітарно-захисна зона

ВСТУП

Актуальність роботи. Суттєвий ріст використання алюмінієвих виробів приводить до накопичення відходів, які використовують для виробництва вторинних алюмінієвих сплавів. В порівнянні з первинним металом витрати на їх виробництво набагато нижчі. Переробку шлаків та стружки, що утворюються в процесі лиття і обробки з алюмінієвих сплавів виконують на спеціалізованих підприємствах. Ливарний алюмінієвий шлак утворюється в поверхневому шарі й представляє собою суміш піни, яка містить продукти взаємодії алюмінію з компонентами повітря. Перед впусканням плавки шлак видаляється. Вміст чистого металу (або сплаву) в ньому за різними даними знаходиться в межах 7-10 % мас. дол. металічного алюмінію, 70-75 % мас. дол. оксиду алюмінію і різних домішок. Переробку такого типу шлаку проводять на підприємствах кольорової металургії. Процес в основному складається з наступних стадій: а) подрібнення шлаку; б) фракційне його розділення; в) водяне вилуговування подрібненого шлаку; г) фільтрування розчину з метою розділення розчину солі та твердого залишку; д) випаровування твердого розчину; ж) сушіння; з) випалювання твердого залишку.

Як вказано вище, легкий алюмінієвий брухт важко ефективно плавити, тому що він дуже легко окислюється. Незахищені розвинені алюмінієві поверхні швидко окислюються на повітрі навіть при температурі навколишнього середовища. При впливі високих температур, процес окислення значно прискорюється. Тому, однією з найбільш поширених технологій переробки алюмінієвих відходів є процес, що пов'язаний із захистом алюмінієвого брухту від окислення, наприклад, зануренням роздробленої суміші в розплав алюмінію. Для зменшення витрат на переробку часто використовують пресування гарячих шлаків безпосередньо після забору їх з дзеркала плавильної печі. Згідно з такою технологією гарячий шлак завантажують у форму і здавлюють під пресом. Вичавлений розплав алюмінію стікає в металеву форму і твердне. Для переробки одержаного після здавлювання залишку у вигляді спресованої кірки потрібні менші витрати. Однак, застосування даного прийому лише частково вирішує

проблему переробки алюмінієвих шлаків і зменшення їх частки. Метод також не дозволяє відокремлювати алюміній при переробці холодних шлаків.

Технологія одержання алюмінію шляхом відновлення ливарних шлаків дозволяє суттєво зменшити кількість відходів, а також зменшити затрати електроенергії на виробництво виливок.

Тому дисертаційна робота спрямована на розвиток теоретичних і технологічних основ переробки алюмінієвих відходів та одержання з них високоякісного продукту.

Зв'язок роботи з науковими програмами та планами. Дисертація виконана відповідно до Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 р. "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки та Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок, тематичних планів, господарчого договору між ФТІМС НАН України та ТОВ «Виробниче підприємство «Укркабель» № 130 від 11 лютого 2020 р. на тему: «Дослідження металургійного виходу алюмінію з ливарного шлаку».

Мета та задачі дослідження. Розроблення теоретичних основ та технологічних режимів переробки ливарного алюмінієвого шлаку, що дозволить удосконалити метод та установку для їх виплавки.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз технологій переробки відходів виробництва, що містять алюміній;
- розробити експрес метод визначення алюмінію у ливарному шлаці;
- удосконалити технологію одержання вторинного алюмінію металургійним способом;
- встановити вплив фізичних та хімічних факторів на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку;
- удосконалити промислову установку для одержання алюмінію з ливарного шлаку;
- провести промислові випробування установки та розрахувати їх економічну ефективність.

Об'єкт дослідження — металургійний процес переробки ливарного алюмінієвого шлаку різного хімічного складу.

Предмет дослідження — закономірності впливу карбонату та хлориду натрію на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку, температурні умови протікання процесу, методи та установки для переробки відходів алюмінієвого виробництва.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використовували методи математичного планування експериментів, сучасні методи плавки, аналізу і контролю структури, ливарних, фізичних і службових властивостей алюмінію, а також спеціальні удосконалені методики із застосуванням обчислювальної техніки та сучасних програмних продуктів. Обладнання та засоби вимірювальної техніки пройшли відповідну метрологічну перевірку або калібрування.

Наукова новизна. Наукову новизну мають наведені нижче результати теоретичних та експериментальних досліджень.

1. Розвинуто уявлення про механізм процесу вилучення алюмінію при переробці металургійного шлаку на основі зміни валентності алюмінію з тридоодновалентного, що реалізується у дві стадії: через хімічну реакцію: $2\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3 = 2\text{NaAlO}_2 + \text{Al}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ($t = 2500 - 3000\text{ }^\circ\text{C}$), пониження температури до $1000-1100\text{ }^\circ\text{C}$, при якій оксид одновалентного алюмінію розкладається на металевий алюміній та оксид тривалентного алюмінію: $3\text{Al}_2\text{O} = 4\text{Al} + \text{Al}_2\text{O}_3$.

2. Одержали подальший розвиток дослідження закономірностей впливу теплообмінних процесів на металургійний вихід при переробці низькосортних алюмінійвмісних шлаків, визначено раціональні теплові режими, що забезпечують підвищення виходу придатного алюмінію на 35%.

Управління теплообмінними процесами на основі виявлених закономірностей дозволило досягти відновлення алюмінію зі шлаку приблизно від 75 до 85 %, що значно перевищує показники відомих аналогів.

3. Вперше проведено комплексні наукові дослідження та розроблено технічні рішення з підвищення ефективності роботи електротермічного

обладнання з переробки алюмінієвих шлаків за рахунок використання змінного струму для нагрівання потоку розплаву до температур від 1820 °С до 2250 °С; підтримання циркуляції розплавленого металу між вакуумною електродуговою камерою і накопичувальною піччю; додаткового впливу високих температур в зоні горіння дуги на шлак.

Новизну технічних рішень, розроблених у роботі, підтверджує патент на винахід України № 124750. Вони забезпечують спрощення технологічного процесу переробки, зниження енергозатрат та захист навколишнього середовища.

4. Набули подальшого розвитку експериментальні дослідження процесу окислення алюмінію. Встановлено, що окислення відбувається як за рахунок атмосферного кисню, так і розчинних в розплаві неметалевих включень (MgO , AlN , Mg_3N_2 , Al_2O_3 , AlB_2 та інші). Суттєвому зростанню окислення рідкого алюмінію сприяють лужні або лужноземельні елементи, а також цинк, які утворюють поверхневі рихлі оксидні плівки.

Одержані результати мають наукове значення і можуть бути використані при вирішенні прикладних задач, пов'язаних з переробкою вторинної сировини.

5. Вперше для сплаву системи Al-Mg-Cu, що виплавлений з алюмінію, вилученого з ливарного шлаку, розроблено спосіб введення цинку в пароподібному стані, що дозволило одержати вироби без гарячих тріщин.

Розробка відрізняється способом введення цинку до розплаву. Введення його в пароподібному стані покращує структуру високоміцного алюмінієвого сплаву, що деформується, дозволяє вирішити складну проблему боротьби з гарячими тріщинами, для цього в роботі розроблено відповідні технічні умови.

Практичне значення. В роботі представлено безвідходну технологію та спосіб переробки алюмінієвого шлаку в електротермічній установці, який передбачає подачу шлаку на поверхню алюмінієвого розплаву і оплавлення шлаку електричною дугою, при цьому оплавлення алюмінієвого шлаку проводять в електродуговій камері, в яку всмоктують алюмінієвий розплав з накопичувальної печі, причому рівень розплаву в електродуговій камері піднімають на задану відстань від електрода, а в процесі горіння електричної дуги регулюють її довжину шляхом

зміни газового тиску в електродуговій камері, оплавлення алюмінієвого шлаку проводять в процесі підтримки циркуляції розплавленого металу між електродуговою камерою і накопичувальною піччю, при цьому циркуляцію розплаву підтримують під дією електродинамічної сили, що генерується лінійними асинхронними статорами, встановленими на трубопроводах, котрі з'єднують тигель з накопичувальною піччю (патент України №124750, бюл. № 45 від 10.11.2021).

Одержані в роботі нові результати наукових досліджень та дослідно-промислових випробувань в умовах виробництва ТОВ "НВП "УКРКОЛЬОРМЕТ", щодо вдосконаленої установки для переробки алюмінієвого шлаку, яка складається з плавильної накопичувальної печі і розташованої над нею камери з встановленим дозатором шлакової суміші, показали, що використані технологічні режими переробки ливарного алюмінієвого шлаку дозволили суттєво підвищити якість та металургійний вихід алюмінію.

Впровадження у виробництво розробок, які запропоновані в роботі, дозволить підприємствам використовувати безвідходну технологію та одержувати продукцію підвищеної якості. Чистий середньозважений прибуток становить з розрахунку на 1 тону шлаку 24652,04 грн.

Особистий внесок здобувача. В дисертації містяться наукові результати, отримані особисто дисертантом або за його участю. В опублікованих наукових працях разом зі співавторами здобувач приймав участь у постановці задач, підготовці методик, виконанні розрахунків, проведенні експериментів, аналізів, обробці та інтерпретації експериментальних даних. Внесок дисертанта в отриманих експериментальних результатах, опублікованих статтях у співавторстві, становить 60-80%. а

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати роботи повідомлені й обговорені на: Міжнародній науковій конференції «Современная научная идея '2019 (Modern scientific idea '2019)» (г. Минск, Беларусь); Міжнародній науково-технічній конференції «Прикладні науково-технічні дослідження. Виробництво та технології» (м. Івано-Франківськ, Україна, 2020 р.); Міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в

машинобудуванні - 2020» (м. Київ, Україна, 2020 р.); XVI Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020» (м. Запоріжжя, Україна, 2020 р.); International Scientific Conference «International Scientific Inregration '2020» (Seattle, Washington, USA); XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2022» (м. Запоріжжя, Україна, 2022 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, у тому числі: 6 – статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 4 статті, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus, 5 тез доповідей у збірках наукових праць міжнародних конференцій, один патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (136 найменувань) та додатків. Повний обсяг дисертації — 145 сторінок. У розділах дисертації матеріали роботи викладено у вигляді 29 формул, 25 таблиць, 33 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ ОДЕРЖАННЯ ВТОРИННОГО АЛЮМІНІЮ

1.1 Тенденції розвитку виробництва алюмінію в Україні та за кордоном

Незважаючи на те, алюміній найпоширеніший метал, у чистому вигляді в природі він не існує. Через високу хімічну активність атоми алюмінію утворюють стійкі сполуки з іншими елементами, наприклад з киснем. Процес одержання первинного алюмінію дуже складний і пов'язаний з використанням електричної енергії великої потужності.

Однією з переваг алюмінію та його сплавів є здатність не втрачати властивостей в процесі використання, тому вироби з нього піддаються переплаву та вторинній переробці.

Виробництво алюмінію у світі з роками безперервно збільшується, оскільки зростає попит на цей метал. Також встановлено, що в середньому світова потреба росте приблизно на 5-7 % в рік [1-8].

В даний час промислове виробництво значно зросло і світовий обсяг виробництва в 2018 р. склав 64,3 млн. т. [4]. При цьому прогнозується збільшення обсягу виробництва до 80 млн. т., рис. 1.1 [5]. В Україні щорічно виробляється 210 тис. тон алюмінію. Близько 100 тис. тон проводиться методом вторинного переплавлення алюмінієвого брухту [6].

Постійне зростання обсягу виробництва алюмінію обумовлений розширенням його застосування в різних галузях й удосконаленням технології одержання чистого алюмінію. Технічний прогрес сприяв високому рівню споживання алюмінію. Галузі застосування алюмінію наведено в таблиці 1.1.

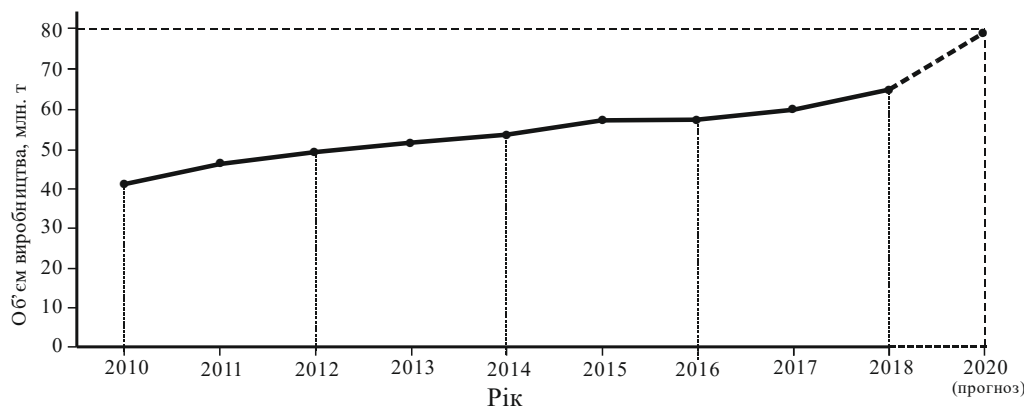


Рис. 1.1. Світовий об'єм виробництва алюмінію [5]

Таблиця 1.1

Застосування алюмінію по галузях промисловості [5]

| Галузь промисловості | Обсяг застосування, % |
|----------------------|-----------------------|
| Транспорт | 26,5 |
| Будівництво | 25,3 |
| Упаковування товарів | 7,7 |
| Фольга алюмінієва | 8,0 |
| Електротехніка | 14,2 |
| Споживчі товари | 4,5 |
| Машинобудування | 9,0 |
| Інші галузі | 4,9 |

Наведені дані про динаміку розвитку виробництва алюмінію характеризують і динаміку виробництва та споживання алюмінію на душу населення. Нижче наводиться динаміка споживання алюмінію на душу населення в економічно розвинених країнах.

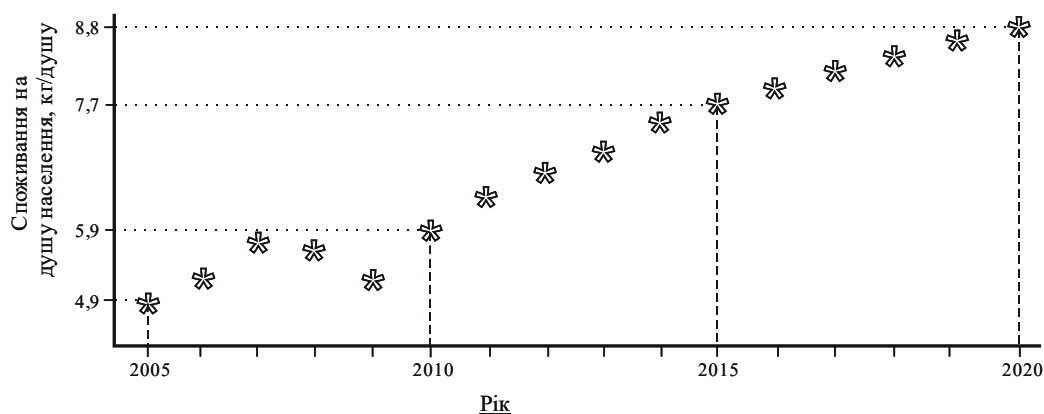


Рис. 1.2. Споживання алюмінію в економічно розвинених країнах на душу населення [6]

Таблиця 1.2

Світове виробництво та споживання алюмінію у 20-му і на початку 21-го століття

| № п/п | Рік | Виробництво, млн.т. | Споживання, млн.т. |
|-------|------|---------------------|--------------------|
| 1 | 2000 | ~ 24 | ~ 25,0 |
| 2 | 2005 | ~ 34 | ~ 33,7 |
| 3 | 2010 | ~ 43 | ~ 42,8 |
| 4 | 2015 | ~ 59 | ~ 58,4 |
| 5 | 2020 | ~ 67 | ~ 66,7 |
| 6 | 2030 | - | ~ 80,0 |

Переробка вторинного алюмінію в даний час виділилася в самостійну галузь промисловості, яка називається “вторинна металургія”, а в даному випадку — вторинна металургія алюмінію. Завданням вторинної металургії алюмінію є промислова переробка брухту, відходів, шлаків та інших видів вторинної сировини.

Відповідно до аналітичним оглядом світового виробництва і споживання алюмінію, в даний час обсяг виробництва вторинного алюмінію складає приблизно 30% від загального світового виробництва алюмінію. При цьому наголошується, що частка вторинного алюмінію продовжує збільшуватися [9, 10].

Переробка вторинного алюмінію включає два етапи:

- сортування вторинної сировини, сушку брухту і відходів, стружки, флюсів, шлаків та інших видів вторинної сировини;
- металургійна переробка вторинної сировини, яка включає плавку в плавильних печах.

Види вторинного алюмінієвого сировини наведені на рис. 1.3 [10], а на рис. 1.4. представлена фотографія спресованого алюмінієвого брухту.

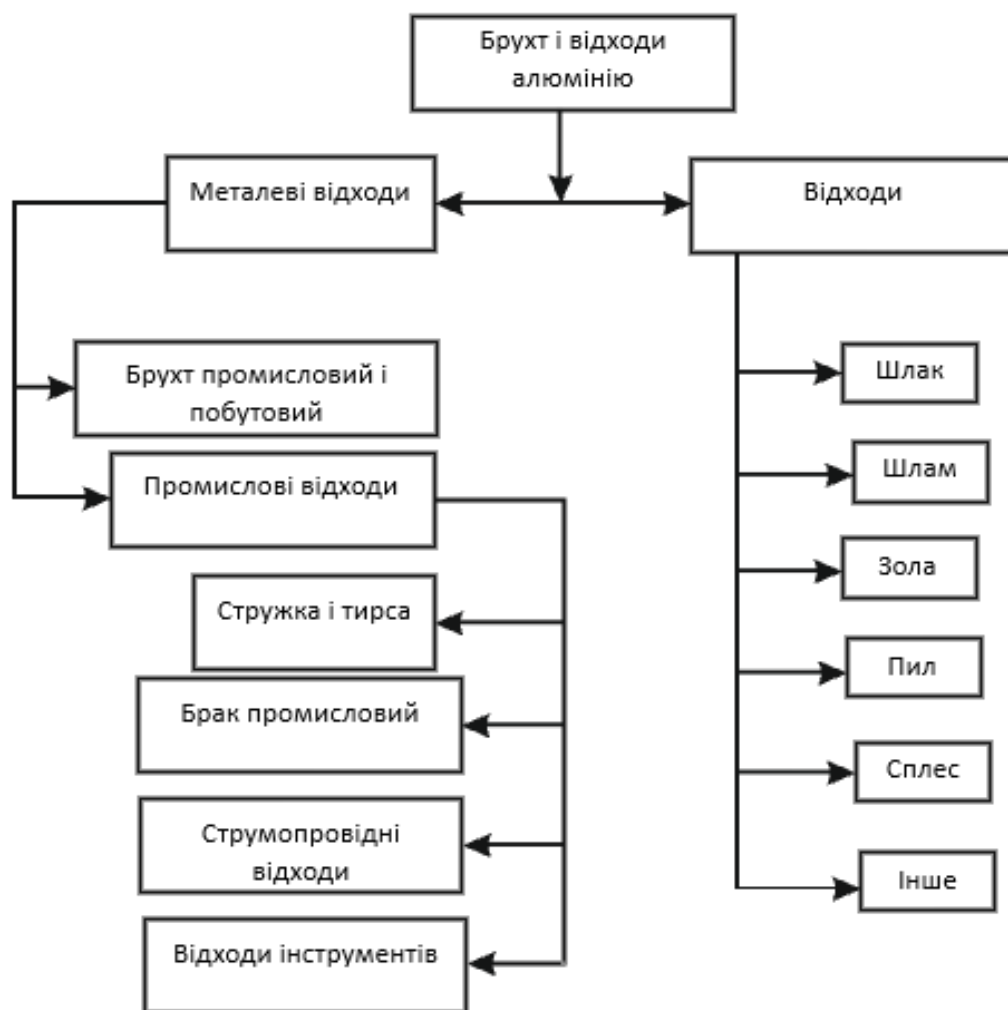


Рис. 1.3. Види вторинної алюмінієвої сировини [10]



Рис. 1.4 Фотографія спресованого алюмінієвої брухту

На першому етапі особлива увага приділяється очищенню брухту і відходів від механічних забруднень і оксидів. При цьому проводиться сортування брухту та відходів за видами вторинної алюмінієвої сировини. Застосування технології дроблення дозволяє проводити подрібнення брухту і відходів, а також проводити механічну або магнітну сепарацію. Для виконання операції дроблення і подрібнення застосовують різноманітні різні конструкції дробарок. Найбільшого поширення набули конусні, молоткові й ножові дробарки. Застосовуються також і млини для послідовного дроблення і подрібнення матеріалу. Це дозволяє зменшити час сушіння матеріалу, видалити вологу з поверхні матеріалу і забезпечити зниження втрат вторинної сировини та підвищити безпеку металургійної плавки.

Переробка вторинного алюмінію виконується під шаром рафінуючого флюсу, який захищає окислення розплаву, поглинає утворені в результаті хімічної

взаємодії оксиди і очищає розплав алюмінію. Матеріал флюсу вибирають таким, щоб він не вступав в хімічну взаємодію ні з футерівкою печі, ні з розплавом алюмінію, а ще мав температуру плавлення нижче температури плавлення алюмінію і повинен мати щільність нижче, ніж щільність розплаву алюмінію. Основним компонентом рафінуючого флюсу в даний час є суміш хлоридів натрію і калію ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) та кріоліту – Na_3AlF_6 . Модель механізму рафінуючої дії флюсу досить наочно представлена на рис. 1.5 [11].

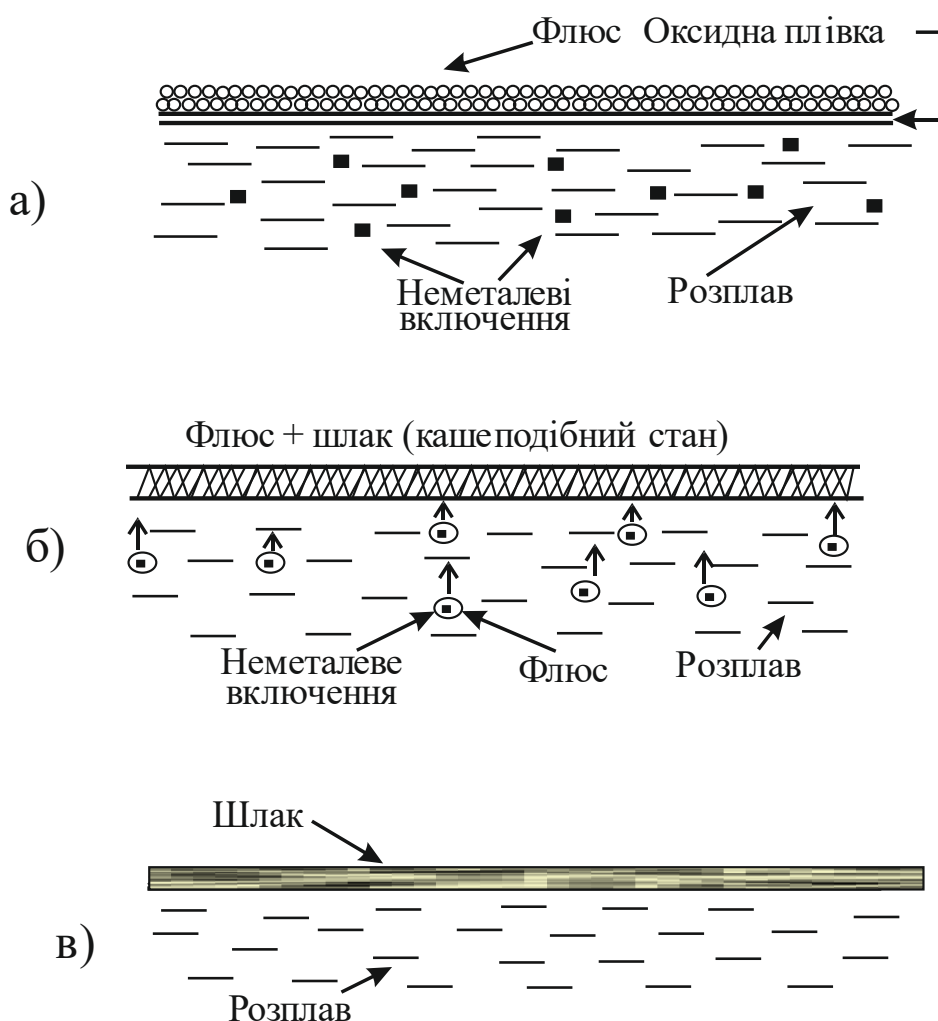


Рис. 1.5. Схема утворення шлаку при обробці шлаку флюсом [11]. а) – засипка флюсу на поверхню розплаву; б) – взаємодія флюсу і складових розплаву; в) – кінцева стадія утворення шлаку

Після розплавлення в печі вторинного алюмінію, на поверхню розплаву завантажується флюс. Новоутворена на поверхні розплаву оксидна плівка (рис. 1.5, а)) покривається флюсом і поглинається їм. Наявні в розплаві неметалеві включення обволікаються флюсом (рис. 1.5, б)) спливають і також поглинаються флюсом. Спливаючи, неметалеві включення захоплюють з собою і частинки (краплі) розплаву алюмінію, а флюс наповнюється краплями алюмінію і переходить вже в шлак (рис. 1.5 в)). Після витримки, розплав зливається з плавильної ванни, а шлак, який збагачений алюмінієм, направляється на додаткову переробку з метою вилучення алюмінію. Відповідно до даних роботи [12], вміст алюмінію в шлаках може досягати 60 % від кількості шлаку після процесу рафінування. Такий шлак є додатковим джерелом надходження алюмінію при переробці вторинного алюмінію.

Також вимагають глибокої переробки алюмінієві шлаки у вигляді так званих зборів, які накопичуються при первинному одержанні алюмінію. Збір, крім металевого алюмінію і його оксиду, містить різні продукти згоряння і відшаровані залишки вогнетривкої футерівки печі. Залежно від вмісту в них частки алюмінію збори класифікують як пінки – вміст алюмінію $> 45\%$ або як дроси – вміст алюмінію $< 45\%$.

Ще одна група алюмінієвих шлаків утворюється при вторинному виробництві алюмінію з алюмінієвого скрапу, а саме, в даному випадку ще в більшому обсязі. Оскільки в рамках процесів, що використовуються для одержання вторинного алюмінію, додаються соляні суміші, що складаються з NaCl і KCl, відбувається утворення так званих алюмінієвих соляних шлаків, в яких також містяться регенеровані частки алюмінію. Однак, навіть, самі алюмінієві соляні шлаки при зливанні схильні до утворення безпосередньої реакції з навколишньою атмосферою, в результаті чого, з одного боку, не відбувається регенерація частки алюмінію з алюмінієвих соляних шлаків, а з іншого боку, робоча атмосфера в зоні плавильних печей насичується шкідливими газами.

Значний обсяг алюмінієвих шлаків утворюється на ливарних підприємствах, що працюють за технологією безфлюсової плавки алюмінієвих сплавів. Шлаки

можуть містити від 20 до 80 % металу. Фактично вони представляють збори, що складаються з суміші металу і оксидів (рис. 1.6). Сюди також можна віднести настили з розливних ковшів і піна, що утворюється при переливанні алюмінію.

Таким чином, на основі вище сказаного можна зробити висновок, що виробництво алюмінію здійснюють в багатьох країнах світу і попит на нього весь час зростає. При цьому його виробники діляться на первинних (виробників первинного алюмінію та його сплавів) та вторинних (які виробляють продукцію з первинного алюмінію, а також тих, хто здійснює вторинну переробку з відходів алюмінієвого виробництва).



Рис. 1.6. Фотографія алюмінієвого шлаку

1.2 Техніка та технології металургійного виробництва вторинного алюмінію

Зростання попиту на алюміній і його сплавів обумовлює пошук нових поповнень його запасів, що забезпечується шляхом більш ефективного та економічного вилучення алюмінію, як з бідних шлаків, так і шляхом переробки алюмінієвої сировини з високим відношенням площі поверхні до маси [13-19].

Наприклад, при механічній обробці деталей утворюється стружка, вага якої коливається від 3 до 10 % загальної маси деталей, що оброблюються. Для стружки, яка має невелику щільність в порівнянні з розплавленим металом, переплавлення ускладнюється через швидке її окислення при контакті з гарячим повітрям.

Легкий алюмінієвий брухт важко плавити, оскільки він дуже легко окислюється. Незахищені розвинені алюмінієві поверхні швидко окислюються на повітрі навіть при температурі навколишнього середовища. При взаємодії високих температур, процес окислення значно прискорюється. Також інтенсивність окислення залежить від вологості середовища, температури та від вмісту домішок. Оксид алюмінію – дуже стійка хімічна сполука з низькою пружністю дисоціації пари, яка при температурі 750 °C складає 10^{-40} Па. Теплота утворення Al_2O_3 за реакцією $2\text{Al}_{\text{тв}} + 3/2\text{O}_2 = \text{Al}_2\text{O}_3$ дорівнює 1680 кДж/моль. Він не відновлюється і не розчиняється в рідкому алюмінії, але при плавці подрібнюється та рівномірно розподіляється в об'ємі рідкого металу. Тверді включення оксиду в алюмінії від'ємно впливають на фізичні, механічні та технологічні властивості. Тому, однією з найбільш поширених технологій переробки алюмінієвих відходів є процес, який пов'язаний із захистом алюмінієвого брухту від окислення, наприклад, зануренням роздробленої суміші в розплав алюмінію. Способи та установки, що реалізують цю технологію переробки алюмінієвих відходів представлено в роботах [20-41].

Для зменшення витрат на переробку алюмінієвих шлаків, запропоновано метод пресування їх в гарячому стані безпосередньо після забору з дзеркала плавильної печі [42]. Згідно з розробленою технологією гарячий шлак завантажують в форму і здавлюють під пресом. Вичавлений розплав алюмінію стікає в металеву форму і твердне. Для переробки одержаного після здавлювання залишку у вигляді спресованої кірки потрібні менші витрати. Однак, застосування даного прийому лише частково вирішує проблему переробки алюмінієвих шлаків і зменшення їх частки. Метод також не дозволяє відокремлювати алюміній при переробці холодних шлаків.

У зв'язку зі виснаженням природних мінеральних ресурсів проблема переробки та подальшого використання відходів власного виробництва стає дедалі актуальнішою. Одержання алюмінієвих злитків шляхом переплавлення стружки потребує значних енерговитрат. Цілком очевидним є і той факт, що якщо працювати із забрудненою стружкою, то металургійний вихід становить не більше 60–70% [43].

Зміна сировинної бази виробництва алюмінію та поява величезної кількості вторинних відходів глинозему (ливарні шлаки, шлами, відпрацьовані каталізатори, мінеральні частини вугілля та ін.), що утворюються на різних промислових підприємствах, вимагають створення наукових та теоретичних основ для їх обробки. Актуальність проблеми утилізації відходів усвідомлюється суспільством, але методи переробки багатьох видів алюмінієвих відходів ще не розроблені або розроблені неефективно. У роботі [44] як алюмінієву сировинну складову використовують алюмінієві сплави у вигляді стружки. Алюмінієві відходи є цілим рядом металевих алюмінієвих сплавів, що включають елементи: магній, мідь, кремній, цинк і залізо. Аналіз відходів алюмінію показує, що, залежно від вмісту металу, процес розчинення алюмінієвого сплаву слід трактувати як результат хімічної взаємодії металу з розчином лугу. На основі термодинамічних розрахунків наведено дані по взаємодії гідроксиду натрію з відходами алюмінієвого виробництва. На основі значення енергії Гіббса ΔG^0_{298} визначено ряд енергій сполук металевих алюмінію та гідроксиду алюмінію відносно 1 молярного розчину NaOH: Алюміній [Al] (-435,13 кДж/моль) \rightarrow гіббзит $[Al(OH)_3]$ (-5,9 кДж/моль) \rightarrow баєрит $[\alpha-Al(OH)_3]$ (-2,75 кДж/моль) \rightarrow беміт $[AlO(OH)]$ (0,54 кДж/моль) \rightarrow діаспора $[AlO(OH)]$ (2,28 кДж/моль) \rightarrow корунд $[\alpha, \gamma-Al_2O_3]$ (5,24 кДж/моль). Розраховані значення ΔG^0_{298} показують, що під час лужної хімічної обробки алюмінієвого сплаву розчиняються лише п'ять елементів сплаву (алюміній, кремнезем та інші). Стандартні потенціали металів використовуються для грубої оцінки електрохімічної корозії в лужних розчинах при нормальних температурах і виділення контактних пар різновидних металів.

Для визначення швидкості розчинення алюмінієвих відходів проводили досліди на зразках алюмінієвого сплаву розміром 40×40 мм, які поміщали в лужний розчин різної концентрації (10–160 г/л) і температури (60–90 °С). На основі експериментальних даних отримано рівняння травлення

$$\alpha = k C_{\text{NaOH}} 2^{T-40} \tau \quad (1.1)$$

де α – величина, за якою визначають кількість металевого алюмінію, що перейшов у лужний розчин, виражена в г/л Al_2O_3 ; k – постійна швидкості $1,5 \cdot 10^{-4}$ г/с; C_{NaOH} – концентрація NaOH , моль; τ – час травлення, с.

Розглянуто поведінку основних компонентів сплавів у лужному розчині стосовно системи $\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$.

У багатьох роботах [45-50] вивчалися як властивості шлаків, так і продукти, які одержано на їх основі. Наприклад, у дослідженні [45] вивчалися хімічні, механічні та міцнісні характеристики композитів, які одержані з алюмінієвого шлаку. Алюмінієвий шлак є шкідливим залишковим продуктом вторинної плавки алюмінію. Алюмінієвий шлак можна розділити на чорний або білий, причому чорний шлак має низьку концентрацію металу і гранульований зовнішній вигляд, порівнянний з піском. Білий шлак має високу концентрацію металів і містить невеликі кількості оксидів та солей, утворюючи величезні блоки. Також білий шлак є побічним продуктом ливарної промисловості, який осідає на звалищах, викликаючи забруднення ґрунту, повітря та ґрунтових вод, завдаючи шкоди здоров'ю людини. В останні роки переробка алюмінієвого шлаку стала популярнішою, і тепер його можна використовувати для виробництва бетону та цеглини замість цементу. Порівняно з властивостями, які отримані з композитів і цементу, алюмінієвий шлак покращує деякі властивості матеріалу, а саме міцність на стиск, оброблюваність та довговічність матеріалу. При 40% в'язучого і затвердженого при 80 °С зразок розчину, що виготовлений з алюмінієвого шлаку, мав найвищу міцність на стиск (24 МПа).

Відомо, що у процесі лиття розплавлений алюміній окислюється при контакті з навколишнім повітрям. Оксидні плівки, що утворюються на поверхні розплавленого металу, необхідно видаляти при очищенні печей, щоб уникнути забруднення сплаву, який використовується при виготовленні деталей. Аналізуючи процес часто під час очищення печей використовується металевий інструмент для видалення шлаку. Високий рівень втрат у процесі від вибракування шлаку завдає значних фінансових збитків установі, що відбивається безпосередньо на собівартості виготовлення продукції. У роботі [46] представлено технічне завдання на конструкцію, яке може розраховувати на контейнер для прийому та відділення шлаку за рахунок вібрації, що створюється моторними вібраторами, які встановлені на його кінцях, за яким слідує висувна скринька, що відповідає за зберігання металу після тверднення. Ідеальна орієнтація будь-якого металургійного процесу – "нульові відходи". Це стосується як основного продукту (металу), так і продуктів (шлаку). Якість процесу розроблена таким чином, що продукти, які викликають реакції (можна вважати відходами) переробляються в корисні продукти та утворюють екологічно чисті відходи. Що стосується шлаку, є два факти: – шлак повинен бути безпосередньо спрямований на виробництво алюмінію всередині заводу або до одержувача шлаку, що переробляє готовий продукт, наприклад, елементи будівництва наповнювача. Таким чином, первинним критерієм якості продукту по відношенню до шлаку повинне бути усунення процесу зберігання. Другий критерій – байдужість до навколишнього середовища, що стосується відповідного законодавства. Фаза екстрактивної металургії шлаків генерується в основному від вступу до сумішей оксидів і потоків, а також може складатися з продуктів реакцій таких як окислення та розчинення у підземних водах [46].

Міцна кірка з оксиду алюмінію, що утворюється при $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$, запобігає його окисленню. У переробці алюмінієвого ливарного шлаку використовуються дрібні фракції, зазвичай солі на основі хлориду натрію та хлориду калію. Ця система вибирається, тому що температура плавлення близька до температури плавлення алюмінію, але в той же час система має досить високу точку випаровування. Ця

суміш краще змочує оксиди. Фториди прискорюють розтріскування шару оксиду алюмінію і, отже, покращують їх лиття [55]. Одним із прикладів, тобто побічний продукт, для виробництва алюмінію є млин для подрібнення шлаку.

З аналітичного огляду видно, що побічним продуктом виробництва алюмінію є шлак. Припускається, що при переробці 1000 мг алюмінієвого брухту утворюється 760 мг вторинного алюмінію, 240 мг шлаку та 3 мг пилу. У цих процесах якість шлаків можна визначити на основі їх придатності для подальших процесів. В алюмінієвій металургійній промисловості існує три види шлаку [56]: 1) біла окалина, що утворюється в процесі виробництва первинного алюмінієвого лиття, саме литтям під тиском, прокатування та екструзії. Основний елемент якості пов'язаний з наявністю оксиду алюмінію. Білий – це відокремлення алюмінію від шлакового залишку за допомогою молоткового млину та плавлення в обертових печах під покриттям солі;

2) чорний шлак, що утворюється при вторинній виплавці алюмінію в печах для плавлення брухту, банок, стружки. У цих печах використовують в якості флюсів солі калію, щоб зменшити можливість окислення металу. Відновлення становить лише 12-18% флюсу. Для відновлення компонентів, що містяться в шлаці, використовується кілька методів переробки чорного та соляного кеку: методи фізичного розділення, гідрометалургійні та пірометалургійні методи;

3) «соляний пиріг» – це відновлення алюмінію з білим і чорним шлаком, що здійснюється в обертових печах під кришкою розплавленої солі. Основним критерієм якості є сіль. Цей залишок, що містить 3-5% оксиду металу, 15-30% і 50-75% хлориду, називається «соляний пиріг» і зберігається на звалищі. Утилізація соляних відходів має дуже важливе значення для зменшення навантаження на навколишнє середовище.

Незважаючи на технологічний прогрес, процес одержання металів все ще представляє певні проблеми, які пов'язані з втратами, що виникають внаслідок окислення сплаву, спричиняє утворенню оксидів (шлаків) на поверхні розплавленого металу. Такий процес притаманний виплавці алюмінію. Хімічний

склад шлаку залежить від марки алюмінію, що виробляється. В основному він складається з оксиду (від 25 до 30 %), металу (від 65 до 75 %), карбіду алюмінію (від 2 до 3 %), нітриду алюмінію (від 3 до 5 %), заліза (до 0,5 %) та кремнію (від 0,5 до 1,5 %) [47].

Автори роботи показали, що шлак, який одержано при плавлі алюмінію та його сплавів, містить високий рівень алюмінію, що пов'язано з його захватом при механічному стягуванні, а також захватом частинок металу сегрегованими оксидами та іншими домішками. Встановлено, що в середньому 6% металу переходить в шлак. Кожного раз, коли печі очищаються, в середньому видаляються 800 кг алюмінієвого шлаку, що формує щомісячний обсяг приблизно 35 тонн, які призначені для продажу. Це приводить до значних фінансових втрат для установи внаслідок середньої девальвації вартості продажу матеріалу.

В зв'язку з цим, переробка шлаку має велике значення для металургії, оскільки, крім встановлення альтернативного джерела металу протікає процес відновлення алюмінію, який споживає приблизно третину витрат енергії на даний процес (~ 15,2 кВт/год/кг).

Візуальні характеристики відновлених зразків алюмінію порівнювали з матеріалом, який вже використовується в процесі. Однак, мікрографічний аналіз зразків виявив наявність мікрочастинок оксиду алюмінію, який потрапляє в рідкий метал і залишається там під час затвердіння. Тест на опір відновлених зразків алюмінію показав схожість резистентності порівняно зі звичайними зразками лиття. Проведено аналіз металургійної якості шлаку методами диференційного термічного аналізу. Також використано метод визначення відновлювальної здатності шлакових розчинів. До складу шлаку вводять комплекси оксидів з метою встановлення двох показників якості у відновлювальних процесах: E_V – показник, що показує напрямок та інтенсивність реакції у складі шлаку та P – показник швидкості витрати вугілля. Запропоновано інші якісні критерії. Аналіз проведено на прикладі шлаків металургійних процесів алюмінію і, навіть, шлаків процесів виплавки міді та її сплавів. Розділено вплив на довкілля та використання шлаку в інших процесах.

Розглянуто якість шлаків в залежності від їх експлуатаційних якостей. Наголошено на необхідність якісної оцінки шлаку в широкому сенсі. Вказано необхідність аналізу якості шлаку за більшою кількістю критеріїв, у тому числі: технологічність, придатність до подальших процесів, експлуатаційні, екологічні та економічні переваги.

Було розглянуто основні напрямки ресурсозберігаючих та екологічно чистих технологій одержання вторинних алюмінієвих сплавів у сучасних промислових умовах, а також проаналізовано види вихідної сировини та плавильні агрегати, показані перспективні шляхи подальшого вдосконалення даного виробничого процесу. Виявлено, що традиційним, широко використовуваним на практиці способом переробки вторинної алюмінієвої сировини є термічна обробка серед розплавів хлористих солей. Були запропоновані безсольові технології переробки алюмінієвих шлаків, що ґрунтуються на поділі металу та оксидів шляхом механічного впливу на них в умовах високих температур у середовищі пічної атмосфери або металу-колектора. Розглянуто їх переваги перед широко поширеною сольовою технологією: матеріали, що застосовуються для обробки розплаву, суттєво дешевші за хлориди лужних металів; відвальні шлаки екологічно чисті; процес має високу продуктивність, оскільки здійснюється в одному металургійному агрегаті, що виключає необхідність очищення стінок і донної частини. Наведено приклади реалізації технологій безсольової переробки алюмінієвої сировини.

У роботі [49] розглянуто якість відходів алюмінієвого виробництва, які включають залишки від ливарних ковшів, піну, що утворюється під час повторного заливання металу, та оксидну плівку, видалену з поверхні в розвантажувальних печах під час виготовлення литих виробів. При обробці розплавленого металу флюсами суміш оксидів і нітридів разом з футерівкою та частинками флюсу видаляються з поверхні розплаву і утворюють алюмінієві шлаки, які переробляються на спеціалізованих підприємствах.

Автори роботи [57] зазначають, що кількість видаленого шлаку становить до 5% від маси готового сплаву. При цьому алюмінієві шлаки (виходи) бувають двох

видів: 1) грудчасті, які містять від 45 до 80 % Al (їх піддають дробленню на сучасних установках Tumbler (Франція)); 2) порошкоподібні (сухі), які містять 10–20 % Al і утворюються під час електроплавки або плавки в ревербераційних печах з невеликою (1–3 %) витратою флюсів.

Металевий алюміній, який міститься в шлаках, зустрічається у вигляді металевих частинок різного розміру та форми, які покриті шлаком та дисперсним алюмінієм, є результатом розпаду хлоридних, оксидних і фторидних субполук алюмінію.

Автор дисертаційної роботи, ґрунтуючись на аналізі технологічних схем виробництва алюмінієвої сировини та результатах досліджень, дійшов наступного висновку: 1) основним промисловим способом переробки вторинної алюмінієвої сировини є її термічна обробка в середовищі розплавлених сумішей хлоридів натрію та калію; 2) відомі безсольові технології переробки алюмінієвих шлаків передбачають розділення металу та оксидів шляхом механічного впливу на них при високих температурах у середовищі атмосфери печі; 3) показано, що безсольовий метод переробки вторинної алюмінієвої сировини має низку переваг порівняно з поширеною сольовою технологією:

а) матеріали, що застосовуються для обробки розплаву, є значно дешевшими, ніж хлориди лужних металів; б) відвальні шлаки є екологічно чистими; в) процес здійснюється в одному металургійному агрегаті, що забезпечує високу продуктивність; г) на футерівці печі не утворюються шлакові налипання, що виключає необхідність очищення стінок і донної частини агрегату.

В даній роботі також представлено метод обробки алюмінію, який пов'язаний з проблемами з навколишнього середовища. Він відноситься до процесу при низькій температурі в кілька стадій: кислотне вилуговування, очищення, осадження і прожарювання. В кінці у цьому процесі алюміній екстрагується спочатку у вигляді розчинних іонів Al^{3+} , а потім у вигляді продукту оксиду алюмінію. Метод, що представлений у цій роботі, дозволяє використовувати шкідливі алюмінієві тверді відходи як сировину для відновлення важливої фракції з вмісту розчинного

алюмінію як продукту з доданою вартістю, глинозему, з високою чистотою (99,28%).

Для плавки алюмінієвого брухту, шлаку та відходів різного виробництва використовують печі різних конструкцій. Кожна з них в тій чи іншій мірі придатна для плавки визначеного виду сировини. Це пов'язано в основному з вмістом домішок, а також зі зниженням вигорання та механізацією основних технологічних операцій.

Найбільше використовуються універсальні полум'яні відбивні печі. В них можна плавити практично любую сировину. Їх може бути декілька модифікацій: одно-, дво- і трьохкамерні. Частіше всього в промисловості використовуються двокамерні печі.

Для плавки дрібної шихти, а саме стружки, шлаку та інше, представляють інтерес обертові короткобарабанні печі. Це сталний футерований барабан, який встановлено на опорних роликах. Швидкість обертання барабана регулюється в межах від 1 до 8 об/хв. Футерівка набивна або викладена спеціальною фасонною цеглою. Піч нагрівається за допомогою природного газу або мазуту.

Часто алюмінієвий шлак переробляють в електрошлаковій печі постійного струму, що має тигель з нижнім електродом в якості катода і верхнім електродом в якості анода [50]. Кріоліт (Na_3AlF_6) і оксид алюмінію завантажують в тигель і розплавляють, потім в одержаний рідкий розплав (електроліт) добавляють подрібнений алюмінієвий шлак (механічна суміш Al_2O_3 і металевого алюмінію), а кріоліт додається порціями в міру плавлення і розчинення їх в електроліті. Відбір рідкого металу відбувається на дні тигля в області катода, а відбір вторинного шлаку у вигляді суміші кріоліту і глинозему відбувається в області анода. Отже, застосування електрошлакової печі забезпечує плавлення і розчинення алюмінієвого шлаку при температурі в діапазоні від 800 до 2000 °C. Однак, істотними недоліками такого типу печей є їх низька продуктивність переплавки, підвищені витрати і значні проблеми, які пов'язані із забрудненням повітря газами, що утворюються при плавленні кріоліту.

Відомо, що зменшення кількості шлаку в процесі плавки алюмінію являється однією з основних задач ливарників. Максимальне вилучення Al з нього, який попередньо було знято з розплаву та який знаходиться зовні печі друга важлива задача. Спеціальні дренажні пристрої для розділення алюмінію від шлаку є ефективними тільки в комбінації з технологією його охолодження. Старий метод охолодження шлаку – це його охолодження на підлозі цеху. Сучасні методи включають застосування інертних газів та спеціальних пресів.

Ефективність використання охолодження шлаку суттєво залежить від його активності. Наприклад, шлаки, що містять магній відрізняються підвищеною активністю. Іншим фактором є кількість та хімічний склад флюсів, які в ньому знаходяться. Без використання охолодження підвищується його активність і процес горіння шлаку приводить до швидких втрат основного металу. Дуже часто він переходить в оксиди.

Існують різні точки зору стосовно того чи необхідно флюсувати розплав у відбивних печах. Відомо, що взагалі флюс використовують для вилучення оксидів та різного роду домішок з розплаву. При цьому широко використовували екзотермічні флюси. З їхньою допомогою підігрівали шлак, що давало можливість алюмінію стікати з нього. В даний час існує інша точка зору, тобто при цьому протікає зворотній процес: такого типу шлак поглинає Al з розплаву. У зв'язку з цим в промисловості використовують в основному ендотермічні флюси.

Алюмінієвий шлак є одним з основних видів алюмінієвої сировини. З бідних та відвальних алюмінієвих шлаків можна одержати фєроалюміній і фєроалюмосиліцій. Шлаки з низьким вмістом солей спочатку збагачують, а після цього одержують концентрат, що містить біля 90% алюмінію, який потім послідовно переплавляють. Переплавляти без попередньої обробки можна шлаки, що містять алюмінію біля 25%.

У зв'язку зі виснаженням природних мінеральних ресурсів проблема переробки та подальшого використання відходів власного виробництва стає дедалі актуальнішою [43]. Одержання алюмінієвих злитків шляхом переплавлення стружки

потребує значних енерговитрат. Цілком очевидним є і той факт, що якщо працювати із забрудненою стружкою, то металургійний вихід становить не більше 60–70 %.

За останні роки представлено декілька безсолевих процесів очищення шлаків [51]. Відомо, що алюмінієвий шлак в процесі первинної та вторинної переробки утворюється за рахунок взаємодії розплавленого металу з пічною атмосферою [52]. Як було показано вище, його необхідно розглядати як цінну техногенну сировину, яка оцінюється металургійним виходом, в якому слідує відносити вміст дрібнодисперсного Al, який може також бути сировиною при одержанні коагулянтів для очищення води від заліза [53].

Використання сольових флюсів у сучасних умовах виробництва несе за собою комплекс подібних процесу проблем таких як ціна та екологічна небезпека [54, 58]. Сольові шлаки вже становлять суттєву екологічну проблему починаючи з 1995 року [59], а в 2021 році ця проблема стала ще гострішою. Інші недоліки полягають в тому, що під час плавки солі випаровуються, що дуже часто приводить до заростання футерівки печі. Крім того будь-яка сіль потребує енергії для її плавки, а також затрат на покупку та транспортування [60].

Переробка та повторна утилізація промислових відходів і побічних продуктів мають першочергове значення в технології одержання цементу та бетону [61]. Звичайні промислові побічні продукти, що використовуються у виробництві цементу та бетону, включають золу-винесення, гранульований доменний шлак і кремнезем. Реакційна здатність та ефективність цих відходів як активних добавок були широко вивчені. Менш реактивні відходи використовуються як додаткові цементні матеріали у його виробництві або інертних наповнювачів у виробництві бетону. Утилізація та переробка алюмінієвого шлаку, утвореного під час плавлення алюмінію, є глобальною проблемою. Більша частина шлаку викидається на звалищах, що призводить до вимивання іонів токсичних металів у ґрунтові води, що спричиняє низку проблем забруднення [62].

Зараз для відновлення алюмінію з шлаку витрачається більше енергії. Якщо шлаки можна використовувати як конструкційний матеріал за допомогою певного

процесу, то можна заощадити енергію. Крім того, якщо шлаки переробляти для певних цілей, то можна заощадити трохи більше енергії. Основні інгредієнти з шлаку є Al , Al_2O_3 , MgO і $MgAl_2O_4$. Однак у зв'язку зі зростанням відношення щодо екологічних проблем, потреби в максимальній економії та важливості переробки і видалення шлаку зараз привертає все більше уваги.

Наприклад, окалини класифікуються як токсичні та небезпечні відходи (легкозаймисті, подразливі, шкідливі та здатні вилугуватися), їх утилізація на звалищах заборонена в більшості європейських країн і вони повинні поступати на очищення та переробку. В даній роботі було розглянуто декілька процесів очищення шлаку: 1) порошки окалини були дисперговані в матриці алюмінієвого сплаву шляхом перемішування тертям. При цьому одержано продукт, який мав чудову зносостійкість з деякою втратою міцності; 2) шлак можна використовувати як добавку до іншого шлаку для зміни хімічного складу. Наприклад, додавання окалини до цементу покращує жорсткість, стійкість до стирання та можна контролювати мікротріщини матеріалу. Існує достатньо можливостей для проведення досліджень із визначення характеристик та оцінки механічних і довговічних властивостей алюмінієвих відходів для можливого використання їх як будівельного матеріалу.

У роботі [63] висвітлюються виробничі потужності, тип і кількість твердих відходів, що утворюються, їх хімічний склад і варіанти обробки алюмінієвої, мідно-свинцевої та цинкової промисловості. Це червоний шлам, відпрацьоване футерування електродів, летюча зола алюмінієвої промисловості. Поширеною практикою поводження з відходами у цій галузі є переробка та відновлення металу та поховання. Через наявність токсичних елементів у деяких твердих відходах відбувається погіршення стану навколишнього середовища. Запроваджуються та впроваджуються суворі правила контролю забруднення, у результаті всі металургійні підприємства в організованому секторі нині дбають про довкілля та проблеми, які пов'язані з управлінням відходами.

У роботі [64] представлено процес підвищення якості алюмінію, що витягується зі шкідливих відходів при переробці алюмінію, який може бути використаний у виробництві матеріалів з доданою вартістю, а також при утворенні нешкідливих відходів. Алюмінієві відходи обробляли при кип'ятінні та перемішуванні водними розчинами NaOH. Для одержання розчинів з Al^{3+} використовували дві концентрації гідроокису натрію (1 та 2 моль/дм³), різний час екстрагування (1, 2 та 4 год) та чотири послідовні стадії екстракції. Також аналізували активацію відходів подрібненням. Після екстракції розчин фільтрували, щоб відокремити водний розчин, що містить екстрагований Al^{3+} , та залишкові відходи. На першому етапі було вилучено максимум 7,54 г/дм³ алюмінію, а всього накопичено 9,59 г/дм³ Al. Алюміній може бути використаний для синтезу продуктів з високою доданою вартістю, що застосовуються як адсорбенти і каталізатори.

Алюмінієвий сольовий шлак (відомий як алюмінієвий соляний кек), який виробляється вторинною алюмінієвою промисловістю, утворюється при плавлі алюмінієвого брухту/шлаку і містить 15-30% оксиду алюмінію, 30-55% хлориду натрію, 5–7 % металевого алюмінію та домішки (карбіди, нітриди, сульфіди та фосфіди). Залежно від сировинної суміші кількість сольового шлаку на тонну вторинного алюмінію коливається від 200 до 500 кг. Оскільки сольовий шлак класифікується як токсичні та небезпечні відходи, з ним необхідно поводитися відповідно до чинного законодавства. Його поховання на звалищах заборонено у більшості європейських країн, і його слід переробляти належним чином з урахуванням впливу на довкілля. У роботі [65] представлено огляд хімічних і мінералогічних характеристик шлаку із солей алюмінію, а також різних процесів вилучення металу, повторного використання хлоридів натрію і калію, що містяться в ньому, в процесі плавки і одержання продуктів з доданою вартістю з кінцевого неметалевого залишку.

Автори роботи [66] показали, що процеси плавки непідготовленої вторинної сировини та процесів рафінування становлять екологічну небезпеку. Тому одним із

варіантів забезпечення екологічної безпеки процесів рафінування є розробка та застосування більш малотоксичних збагачувальних та рафінувальних сплавів.

У роботі [67] відмічається, що протягом року утворюється стільки шлаків, які складаються у відвалах, полігонах і таким чином забруднюють атмосферу та приводять до втрат цінної техногенної сировини.

Застосування електродугових печей для переробки алюмінієвих відходів не пов'язане з використанням хімічних сполук, що містять хлор і фтор. В цьому відношенні електродугові печі є найбільш підходящими [68, 69]. Процес передбачає електродугову піч, в якій міститься, щонайменше, один електрод, і є система для видування газу вниз в простір печі по краям електрода. Порошок або дрібно гранульована тверда речовина вдувається в простір печі разом з газом. Крім того система для видування газу вниз забезпечена спеціальними турбулізаторами. Наявність турбулізаторів, на думку авторів, значно покращує роботу печі. В даному випадку регулювання довжини електричної дуги проводиться шляхом переміщення електрода за допомогою складного приводу, що має механічну інерцію. Механічна інерція негативно впливає на стабільність горіння дуги і викликає аномальні поштовхи струмового навантаження. Даний спосіб плавки більш ефективний для залізовуглецевих сплавів, тому що при переплавленні алюмінієвих шлаків утворюється значний угар.

1.3 Основні методи підготовки алюмінієвих відходів та шлаків для плавки та їх вплив на показники металургійного виробництва

З літератури відомо, що алюмінієві шлаки можуть бути в основному двох видів: 1) кускові, що містять від 45 % до 80 % Al; їх перед плавкою подрібнюють; 2) порошкоподібні, вміст алюмінію в них складає від 10 до 20%. Вони утворюються в процесі електроплавки або плавки у відбивних печах при застосуванні флюсів [70].

Присутній у шлаках металічний алюміній зустрічається в ньому у вигляді корольків металу різного розміру або дисперсності, що є результатом розпаду

хімічних сполук алюмінію. В таблиці 1.3 наведено розподіл алюмінію в ливарних шлаках за фракціями.

Таблиця 1.3

Фракційний розподіл алюмінію в ливарних шлаках [38]

| № п/п | Фракція, мм | Відношення вмісту алюмінію до загальної маси металу в шлаці, % |
|-------|-------------|--|
| 1 | > 5 | 19,1 |
| 2 | 1 – 5 | 20,4 |
| 3 | 0,5 – 1,0 | 17,0 |
| 4 | < 0,5 | 31,7 |
| 5 | ≥ 0,01 | 11,8 |

Найбільше розповсюдженим способом промислової переробки низькосортної алюмінієвої сировини є термічний спосіб, який включає нагрівання до температури плавлення алюмінію та наступну хімічну або фізичну дію на розплав з метою відділення оксидів і хлоридів від рідкого металу.

В даний час дуже стрімко розвивається сольова металургія, яка розглядає в якості основного процесу розділення металу і оксидів у ємностях розплавлених хлоридів лужних металів [71-74]. Порівняно високі показники видалення Al з алюмінієвих шлаків пов'язують з тим, що розплави солей мають порівняно низьку в'язкість та низькі характеристики змочування, що в результаті забезпечує високу швидкість охолодження металевих корольків та їх коагуляцію. На відміну від металу, сольовий розплав добре змочує шлак, що також приводить до їх відокремлення.

В промисловості переробку вторинної алюмінієвої сировини проводять в умовах спеціалізованих підприємств [75], за виключенням матеріалів, що містять більше 2,0 % мас. заліза [76]. За даною технологією використовують спеціальні сольові або полум'яні відбивні печі.

В Німеччині було розроблено технологію обробки сольових шлаків, яка складається з наступних операцій [77-79]:

- а) подрібнення та виділення металевого алюмінію;
- б) розчинення та дегазація;
- в) відведення шкідливих газів;
- г) згущення суспензії, фільтрація та одержання глинозему;
- д) кристалізація, центрифугування та одержання вторинної солі.

В роботі [80] показано технологію переробки алюмінієвих відходів у гарячому стані без використання солей. Схема процесу включає розігрів матеріалу вище температури плавлення основи сплаву, «викручування» відходів до сухих шлаків та відділення останніх від металевого розплаву за допомогою зануреної центрифуги.

В рамках концепції безсольової переробки низькосортної алюмінієвої сировини авторами робіт [81-83] було розроблено принципово нову технологію, яку побудовано на тому, що рідкий Al виступає фазою, що концентрує алюміній зі шлаку. Її суть складається з наступних умов:

- а) дія на розплав присадками, що містять оксид кальцію;
- б) обробка розплаву вторинним алюмінієвим шлаком.

Дана технологія була використана на різних печах металургійних підприємств: індукційних типу ІСТ (середня частота), ІЧТ та ІАТ (промислова частота) і полум'яних відбивних (ємність 15 т). В таблиці 1.4 наведено результати, які показують вплив плавильного агрегату на металургійний вихід алюмінію при використанні безсольової технології переробки вторинної алюмінієвої сировини.

Видно, що найкращі результати отримано при плавлі алюмінієвого шлаку в печах з індукційним нагрівом. Це пов'язано з тим, що індукційний нагрів забезпечує найбільшу інтенсифікацію процесу обробки розплаву в тиглі печі.

Таблиця 1.4

Металургійний вихід алюмінію при використанні різних плавильних агрегатів

| № п/п | Плавильний агрегат | Металургійний вихід алюмінію, % |
|-------|------------------------|------------------------------------|
| 1 | ІСТ - 0,4 | 69 |
| 2 | ІАТ - 1М | 84 |
| 3 | ІАТ – 6 | 80 |
| 4 | ІСТ – 6 | 74 |
| 5 | Полум'яна відбивна піч | 58 |

1.4 Мета та задачі дослідження

В результаті проведеного аналізу було встановлено мету даної роботи, яка стосується теоретичних основ та технологічних режимів переробки ливарного алюмінієвого шлаку.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз технологій переробки відходів виробництва, що містять алюміній; розробити експрес метод визначення алюмінію у ливарному шлаці;
- удосконалити технологію одержання вторинного алюмінію металургійним способом; встановити вплив фізичних та хімічних факторів на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку;
- удосконалити промислову установку для одержання алюмінію з ливарного шлаку; провести промислові випробування установки та розрахувати їх економічну ефективність.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Шлаки, що містять алюміній, їх властивості та класифікація

Поява великої кількості вторинних глиноземовміщуючих відходів (ливарні шлаки, шлами, відпрацьовані каталізатори, мінеральні частки нафтової промисловості та ін.), які утворюються на промислових підприємствах, потребують їх класифікації та розробки наукових та теоретичних основ переробки. Аналіз відходів, що містять алюміній показав, що в залежності від процесу їх утворення вони мають різний хімічний склад [84, 85]. В табл. 2.1 наведено склад деяких відходів, в яких присутні алюміній та його сполуки.

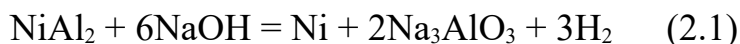
Шлаки від виробництва металевого хрому мають щільну структуру, яка складається з пластинчастих кристалів. Вони мають темно-сірий колір з зеленуватим або фіалковим відтінком.

Шлаки від виробництва безвуглецевого ферохрому представляють собою матеріал зі щільною порфіроподібною структурою червоно-бурого кольору з вкрапленнями шпінелі [86]. Порфіроподібна структура є різновидом зернисто-кристалічної. Фазовий склад такого шлаку наступний: $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ та алюмомагнезійний хромовмісний шпінель.

Шлаки виробництва феротитану також мають щільну структуру, їх границя щільності в процесі стискування складає 100 МПа.

Шлами алюмінію та його сплавів утворюються в результаті травлення концентрованими розчинами, які складаються з гідроксиду натрію з невеликою кількістю спеціальних речовин [87-89].

Шлами нікель-скелетного каталізатора утворюються в процесі обробки алюмінієвих сплавів на металообробних та металургійних заводах.



Таблиця 2.1

Хімічний склад відходів, що містять алюміній

| №, п/п | Відходи виробництв | Вміст, % мас. | | | | | | | | |
|-----------|---|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|---------|---------|--------------------------------|------------------|-----------|
| | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Cr ₂ O ₃ | R ₂ O | Д. +Al |
| 1 | Шлаки від виробництва металевого хрому | 4,0-5,0 | 70,0-75,0 | - | 1,0 | 5,0-7,0 | - | 5,0-7,0 | 2,0-4,0 | - |
| 2 | Шлаки від виробництва безвуглецевого ферохрому | 5,60 | 54,80 | - | 1,85 | 13,80 | 14,70 | 5,3 | 2,30 | - |
| 3 | Шлаки від виробництва феротитану | 2,40 | 72,06 | 10,3 | 0,34 | 11,40 | 3,50 | - | - | - |
| 4 | Шлам травлення алюмінію | 4,40 | 59,0-80,0 | - | 2,80 | 2,0-5,0 | 1,0-2,0 | - | 0,5-5,0 | 8,0-15,0 |
| 5 | Шлами нікель-склетного каталізатора (нікель Ренея) | 5,20 | 26,70 | - | 0,80 | 2,90 | 1,30 | - | 24,70 | 37,10 |
| 6 | Відпрацьований каталізатор ІМ-2201 | 8,40 | 74,50 | - | 0,75 | - | 0,50 | 14,50 | 0,47 | - |
| 7 | Алюмохромисті відходи травлення алюмінієвих сплавів | 7,30 | 68,40 | - | 1,50 | - | 0,70 | 10,20 | 11,80 | - |
| 8 | Відпалені сольові алюмінієві шлаки | 4,55 | 75,10 | - | 1,60 | 2,56 | 7,61 | - | 5,13 | 3,45 |
| 9 | Каолінова глина | 69,8 | 16,38 | - | 3,10 | 3,02 | - | - | 0,20 | 5,08 |

Нікель Ренея або «скелетний нікель» – твердий мікрокристалічний пористий нікелевий каталізатор, який використовується у багатьох хіміко-технологічних процесах. Він представляє собою вискодисперсний порошок блідо-зеленого кольору, розмірністю від 400 нм до 800 нм і містить крім нікелю до 15 % мас. алюмінію.

Високоглиноземисті відходи нафтохімії – відпрацьований каталізатор ІМ-2201. Це шламові алюмохромисті відходи, а саме тонкодисперсний порошок блідо-зеленого кольору, розміром частинок від 100 нм до 200 нм.

Алюмохромисті відходи травлення алюмінієвих сплавів утворюються в процесі обробки алюмінієвих сплавів на металургійних заводах. З відпрацьованих розчинів для травлення висаджують осад. Шлам цієї групи має високий вміст алюмінію та Al_2O_3 .

Сольові алюмінієві шлаки алюмінієвого виробництва за всіма показниками дуже токсичні. Вони бувають наступного хімічного складу, (% мас.): NaCl (10,25), $\text{CaO}+\text{CaCO}_3$ (14,25), $\text{MgO}+\text{MgCO}_3$ (15,30), FeCl_3 (0,001), SiO_2 (3,10), Al_2O_3 (41,28), KCl (5,35), CuCl_2 (0,011), алюміній металевий (9,89).

2.2 Визначення металургійного виходу алюмінію в лабораторних умовах

Для визначення металургійного виходу алюмінію, для проведення однієї плавки використовували 300 г ливарного шлаку [90, 91]. Плавки проводили в індукційній печі. В графітовий тигель поміщали алундовий, дно між графітом та алундом футерували за допомогою порошку з оксиду алюмінію. Після цього графітовий тигель ізолювали з зовнішньої сторони каоліновою ватою та вставляли його всередину мідної індукційної котушки, яка охолоджувалась водою. Джерелом високочастотного електричного струму, що подавався на індукційну котушку, слугував високочастотний генератор ВЧГ-15. Температуру у тиглі до початку протікання хімічних реакцій вимірювали за допомогою вольфрам-ренієвої термопари ВР 5/20. В якості реагентів використовували каустичну соду, хлорид натрію та вапно у кількості 2,0-2,2 % від маси шлаку. Шлак, Na_2CO_3 , NaCl , CaCO_3 прожарювали у муфельній печі СНОЛ-1.6.2.0.0.8/9-М1 при температурі 250 °С протягом однієї години для видалення вологи та органічних домішок. Просушений таким чином шлак поміщали в алундовий тигель та включали нагрів. При досягненні температури 700 °С до шлаку добавляли реагенти, які зв'язували оксиди алюмінію і

кремнію в алюмінати та силікати. Після цього рідкий алюміній заливали у виливницю і після його охолодження зважували на аналітичних терезах.

Проби для хімічного та спектрального аналізів алюмінію виготовляли згідно ГОСТ 7565-81. Для газового аналізу відбирали проби за допомогою кварцових трубок безпосередньо з плавильного тигля. Вміст хімічних елементів у зразках, визначали з використанням спектрального та хімічного методів.

Газовий аналіз проводився на установках Лесо в атмосфері інертних газів (аргон).

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили за допомогою електронних растрових мікроскопів JSM-6360 та PEM 106.

Відбір проб та виготовлення зразків алюмінію для металографічних досліджень здійснювали згідно ГОСТ 1778-70. Розміри і перерізи зразків відповідали умовам кристалізації виливків.

Металографічний аналіз зразків з алюмінію проводили з використанням оптичного мікроскопу EPICVANT.

2.3 Метод диференційно-калориметричних досліджень

При створенні нових металевих матеріалів і технологій їх виробництва важливо знати та контролювати всі структурні і фазові перетворення, які можуть відбуватися з матеріалом за тих чи інших умов. На сьогодні немає єдиного універсального методу, який давав би таку можливість. Тому найчастіше для дослідження структурних і фазових перетворень при нагріванні та охолодженні використовують диференціально-термічний аналіз (ДТА), диференціальну скануючу калориметрію (ДСК) та більш універсальний метод – синхронний термічний аналіз (СТА), який додатково включає ще і термогравіметрію (ТГ). В зв'язку з цим для проведення досліджень було вибрано метод синхронного термічного аналізу. Він дає можливість поєднати два методи – термогравіметрію та диференціальну скануючу калориметрію. Перевага СТА полягає в тому, що зміну маси і теплові ефекти

вимірюють на одному зразку одночасно. Це забезпечує можливість порівнювати отримані результати завдяки усуненню впливу неоднорідності матеріалу, умов проведення експерименту, підготовки зразків та інших факторів. Крім того, забезпечується більш точне визначення величин теплоємності та ентальпії, оскільки у будь-який момент експерименту відома фактична маса зразку. Цей метод дозволяє не лише кількісно визначати теплові ефекти та відповідні їм температурні показники, але і порівнювати результати термічного аналізу зі зміною маси зразку, що дозволяє контролювати процеси сушки, окислення, розкладання і випаровування зразків в процесі експерименту та враховувати їх вплив на теплові ефекти.

На жаль, класичний метод СТА має також ряд обмежень, і не всі структурні та фазові перетворення в металах і сплавах можливо досліджувати за його допомогою. Класичний метод СТА погано або взагалі не фіксує процеси тривалі у часі, або такі, що супроводжуються різкою зміною теплофізичних характеристик, наприклад, гомогенізації, рекристалізації, структурної релаксації, розпад твердих розчинів, перехід метастабільних фаз в стабільні.

В роботі було використано синхронний термічний аналізатор STA 449F1 Jupiter фірми NETZSCH (Німеччина) [92]. Термоаналізатор дозволяє проводити дослідження в двох режимах: «зразок» (без урахування теплофізичних характеристик тигельної системи) та «зразок з корекцією» (з урахуванням теплофізичних характеристик тигля). В режимі «зразок» дослідження проводяться в порівнянні з інертним еталоном, близьким за теплофізичними характеристиками до зразка, що досліджується.

Для проведення досліджень в режимі «зразок з корекцією» попередньо необхідно дослідити зміну теплоємності тигельної системи та еталону в тих же умовах (атмосфера, швидкість нагрівання, температурний інтервал), в яких планується досліджувати зразок, а потім прилад автоматично враховує ці показники під час вимірів. Таким чином вдається усунути вплив тигля та частково еталону на результати досліджень. Підібрати ідеальний еталон практично неможливо, навіть якщо в якості еталону використовувати термооброблений зразок (структурні зміни в

якому уже не відбувається) з того самого матеріалу, як і зразок що досліджується. За рахунок різної ваги, форми, розташування в тиглі вплив еталону буде відчутним, що призводить до нахилу базової лінії та деякому спотворенню кривих ДСК.

СТА-дослідження проводили в тиглях з чистого алюмінію в постійному потоці аргону, швидкість якого становила 40 мл/хв. Для вимірювань використовували тримач зразку, оснащений термopарою ХА, точність вимірювання температур складала $\pm 0,5$ °С. Швидкість нагрівання та охолодження становила 10 °С/хв. Перед проведенням досліджень прилад калібрували за еталонними речовинами згідно інструкції до приладу.

Для дослідження вказаних структурних перетворень та досягнення максимальної чутливості вимірювань і забезпечення повторюваності результатів було проведено два цикли нагрівання і охолодження зразків зі швидкістю 10 °С/хв., не виймаючи його із приладу.

2.4 Затрати матеріалів та енергетичних ресурсів на процес одержання алюмінію зі шлаків

В якості вхідної основної сировини для одержання вторинного алюмінію можуть використовуватися ливарний алюмінієвий шлак, відходи алюмінію власного виробництва та придбані на стороні відходи та брухт [93-96].

Технічні характеристики обладнання дозволяють виготовлення готової продукції в кількості, яка залежить від маси вихідної сировини. Структура виробництва включає ділянку підготовки ливарного шлаку.

Основним завданням переробки вхідної основної сировини є доведення її шляхом сортування, механічного подрібнення до стану, що дозволяє використання її в плавильному комплексі.

Завантаження шлаку та відходів кабельного виробництва з 2% соди проводиться за допомогою автoнавантажувача. Після включення нагріву шихти та одержані

рідкого металу проводиться забір проб для визначення його хімічного складу та рафінування від шкідливих домішок.

Для визначення матеріального балансу технологічного процесу переробки алюмінієвого ливарного шлаку та відходів і неліквідів кабельно-провідникової продукції використовуються діючі нормативні акти та акти досліджень проведених на виробництві в процесі переробки.

Сумарні технологічні безповоротні втрати розраховуються за наступною формулою:

$$\sum \alpha_{\delta, n.} = \sum_{n=1} \alpha_n \quad (2.2)$$

$$\sum \alpha_{\delta, n.} = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_8 \quad (2.3)$$

де α_n – маса втрат окремих стадій технологічного процесу, в тому числі:

α_1 – при зберіганні шлаку та відходів;

α_2 – при транспортуванні та вантажно-розвантажувальних роботах;

α_3 – при сортуванні; α_4 – при дробленні.

При зберіганні шлаку та відходів кабельно-провідникової продукції у закритих приміщеннях $\alpha_1 = 0$.

Відходи, які утворюються при виробництві алюмінію з вторинної сировини поділяються на такі, що поступають на переробку (алюмінат натрію) чи знищення та безповоротні втрати.

Алюмінат натрію поступає на переробку до спеціалізованих переробних підприємств. Угар відноситься до безповоротних втрат.

Якщо в процесі переробки використовується нагрівання за допомогою природного газу, то відомо, що теплота згорання його одного м³ складає 33,50 МДж/м³. Експериментальні дослідження показали, що коефіцієнт корисної дії газового пальника складає 32-47 % [94]. Тобто лише 39,5% в середньому тієї теплоти, що виділяє пальник, ефективно засвоюється, а інша розсіюється. В даній роботі одержано значення близько 38%. Під час визначення норм витрат необхідно

передбачити витрати газу для підтримання печей в нагрітому стані (50% від режиму плавлення).

На основі даних отриманих в результаті проведення дослідження витрат газу складаються «Норми витрат палива для плавильної печі і виду палива».

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика видів палива

| Найменування характеристики | Природний газ, м ³ | Скраплений газ, кг | Газовий конденсат, л |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Теплотворність (кКал) | 7 912 | 11 008 | 10 234 |
| ККД пальника | 0,39 | 0,38 | 0,38 |
| Номінальні витрати на добу | 11 909 | 8 559 | 9 965 |

Хімічні властивості видів палива представлено в таблиці 2.3.

Для нагріву шлаку можна використовувати інші джерела енергії, наприклад, зріджений газ, дизель. Паралельне використання альтернативних джерел можливе при наявності додаткових магістралей та комбінованих пальників (дизель-газ) [97].

Розрахунок витрат дизельного або пічного палива пов'язаний з хімічними властивостями палива, яке може мати відмінності в залежності від родовища та способу добування.

Таблиця 2.3

Хімічні властивості видів палива

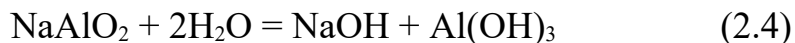
| Показник | Природний газ | Скrapлений газ | Газовий конденсат |
|----------------------------|---------------|----------------|-------------------|
| Густина, кг/м ³ | | | 807 |
| Теплота згорання, кКал | 7 912 | 11 008 | 10 234 |
| Вміст метану, % | 97,5 | 0,35 | |
| Вміст пропану, % | 0,25 | 19,21 | |
| Вміст бутану, % | 0.25 | 80,44 | |
| Вміст сірки, % | 0 | 0,0023 | 0,17 |

Лабораторний контроль за станом навколишнього середовища в процесі переробки ливарного алюмінієвого шлаку та відходів кабельного виробництва здійснюється періодично державними органами санітарно-епідеміологічної служби, водного нагляду, екологічної безпеки з використанням стандартизованих методик визначення шкідливих речовин у повітрі, воді та ґрунті. Всі промислові відходи, для яких розроблено методи вторинної переробки та раціонального використання їх у різних галузях, використовуються як вторинна сировина.

На підприємстві використовуються відходи як сировина, тому забезпечено високий рівень автоматизації і механізації технологічних процесів, а також технічні, технологічні та будівельні рішення для захисту довкілля.

Знешкодження відходів здійснюється відповідно до вимог екологічної безпеки та за погодженням з державною санітарно-епідеміологічною службою України.

В процесі переробки алюмінієвого шлаку содовим методом, крім алюмінію, одержуємо алюмінат натрію, який можна використовувати у виробництві первинного алюмінію. Для цього його необхідно піддати очищенню від домішок та провести гідроліз:



Одержаний таким чином осад гідроокису алюмінію фільтрують, прожарюють і одержаний таким чином оксид алюмінію можна використовувати в процесі електролізу.



2.5 Визначення економічної ефективності підготовки та переробки відходів, що містять алюміній

При розрахунках економічної ефективності в основному використовують метод оцінки якості продукції за одиничними показниками, наприклад, за відсотковим вмістом основного (корисного) компонента (алюмінію) у сировині. Однак, на умови і показники ціни впливають ряд інших властивостей. У зв'язку з цим, оцінка властивостей за одним показником є обмеженою та недостатньою для вибору об'єктивного рішення. Для якісної оцінки сировини необхідно привести окремі показники до єдиного критерію. В даному випадку єдиним виразом цінності сировини може бути його оцінка в грошовому еквіваленті.

Основний принцип даної методики базується на тому, що при оцінці сировини різної якості собівартість однієї тони алюмінію повинна при інших рівних умовах, залишатися постійною. При визначенні її цінності, при якій забезпечується рівна собівартість алюмінію, перед усім визначають затрати на плавку, без врахування ціни самої сировини. Потім з раніше встановленої ціни однієї тони алюмінію вираховуються затрати на переплав та залишок або множать на металургійний вихід алюмінію. Після віднімання з одержаної величини транспортних витрат знаходять ціну сировини.

В даний час методика визначення металургійної цінності сировини і продуктів її підготовки потребує деяких змін. По-перше, необхідно переглянути прийнятий в умовах централізовано-планової економіки критерій металургійної цінності $C_{\text{Al}} \rightarrow$

min (мінімізації затрат) як критерій, який відображає реалії ринкової економіки. По-друге, необхідно встановити вплив на металургійну цінність алюмінієвої сировини факторів виробництва, тому що вони в деякій мірі визначають рівень затрат на випуск продукції.

Таким чином, для визначення металургійної цінності алюмінієвої сировини пропонується використовувати критерій, який відображає максимум економічної ефективності у розрахунку на одну тону алюмінію, що одержано з сировини заданої якості. Даний підхід стосовно оцінки сукупного рівня якості являється найбільш привабливим, тому що прибуток найбільш повно відображає ефективність підприємств стосовно покращення її якості та властивостей.

В загальному вигляді критеріальний показник для визначення металургійної цінності (M_i) сировини, при якій забезпечується виконання вказаних умов, має наступний вигляд:

$$M_i = (A_{\text{Ali}} - C_{\text{Ali}}) / (1 + e^{t_m - t^0}) \rightarrow \max \quad (2.6)$$

де A_{Ali} – ціна однієї тони алюмінію; C_{Ali} – ціна однієї тони алюмінію, який одержано з алюмінієвої сировини; e – норма дисконту (альтернативні затрати в основний капітал, які виражають норму прибутку); t_m – момент закінчення; t^0 – момент приведення.

Після віднімання з одержаних величин транспортних затрат або продуктів підготовки сировини, визначається її цінність. Тоді формула приймає наступний вигляд:

$$M_i = [(A_{\text{Ali}} - C_{\text{Ali}}) / (1 + e^{t_m - t^0})] - t_{\text{pi}} \rightarrow \max \quad (2.7)$$

де t_{pi} – транспортні витрати або затрати щодо продуктів підготовки.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ВТОРИННОГО АЛЮМІНІЮ

3.1 Технологічні особливості одержання алюмінію металургійним методом та його мікроструктура

Вихідною сировиною для одержання алюмінію металургійним способом слугував ливарний алюмінієвий шлак [98]. Кількісний аналіз сировини представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Кількісний аналіз вихідної сировини

| № п/п | Al, % мас.дол. | Al ₂ O ₃ , % мас.дол. | SiO ₂ , % мас. дол. | Fe ₂ O ₃ , % мас. дол. | CuO, % мас. дол. | MgO, % мас. дол. | MnO, % мас. дол. | Σ дом., % мас. дол. |
|----------|-------------------|--|--------------------------------------|--|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 36,68 | 57,34 | 1,81 | 2,47 | 0,23 | 0,07 | 0,08 | 1,32 |
| 2 | 32,48 | 58,12 | 5,71 | 1,82 | 0,27 | 0,07 | 0,09 | 1,44 |
| 3 | 36,86 | 57,57 | 1,82 | 1,80 | 0,26 | 0,05 | 0,07 | 1,57 |
| 4 | 35,20 | 59,11 | 1,56 | 2,45 | 0,11 | 0,05 | 0,08 | 1,43 |
| 5 | 36,58 | 58,14 | 1,63 | 1,81 | 0,25 | 0,04 | 0,05 | 1,50 |
| 6 | 34,25 | 59,01 | 1,79 | 2,51 | 0,86 | 0,04 | 0,07 | 1,47 |
| 7 | 33,98 | 57,18 | 2,44 | 4,74 | 0,30 | 0,07 | 0,06 | 1,23 |

Для визначення необхідної та достатньої кількості карбонату натрію в процесі переробки шлаку алюмінієвого виробництва було досліджено вплив його концентрації. Одержаний результат представлено на рисунку 3.1. Видно, що зростання кількості добавки в суміш призводить в початковий момент до росту металургійного виходу алюмінію і уже при його вмісті біля 2,0 %мас. крива виходить на насичення. Таким чином було визначено необхідну кількість реагенту. Механізм даного процесу побудований на зміні валентності алюмінію з трьох до

одного і навпаки в залежності від температури протікання реакцій [99]. Його можна представити за допомогою наступних хімічних реакцій:



Після протікання вище представлених реакцій температуру знижують до 1000 – 1100 °С. При цьому оксид одновалентного алюмінію розкладається на металевий алюміній та оксид трьохвалентного алюмінію:



Щодо спільної дії хлориду та карбонату натрію, то спочатку NaCl взаємодіє з оксидом алюмінію з утворенням оксиду натрію та хлориду алюмінію, потім вже Na₂O переводить Al₂O₃ в алюмінат:



Крім того, в процесі хімічних реакцій з оксидами та карбонатами лужних металів оксид алюмінію утворює наступні алюмінати: NaAlO₂, Na₅AlO₄, NaAl₁₁O₁₇, Na₁₇Al₅O₁₆. В останніх атоми алюмінію знаходяться в центрі тетраедрів або октаедрів з атомів кисню. В сполуці Na₅AlO₄ присутні окремі алюмокисневі тетраедри, які з'єднані загальними вершинами в ланцюг.

На рис. 3.2 представлені дані, які отримано при спільній дії карбонату та хлориду натрію. В даному випадку змінювалась тільки концентрація NaCl, а Na₂CO₃ була постійною (1,0 %). Суттєвих змін не було. Хід кривої подібний до залежності, яку представлено на рис. 3.1.

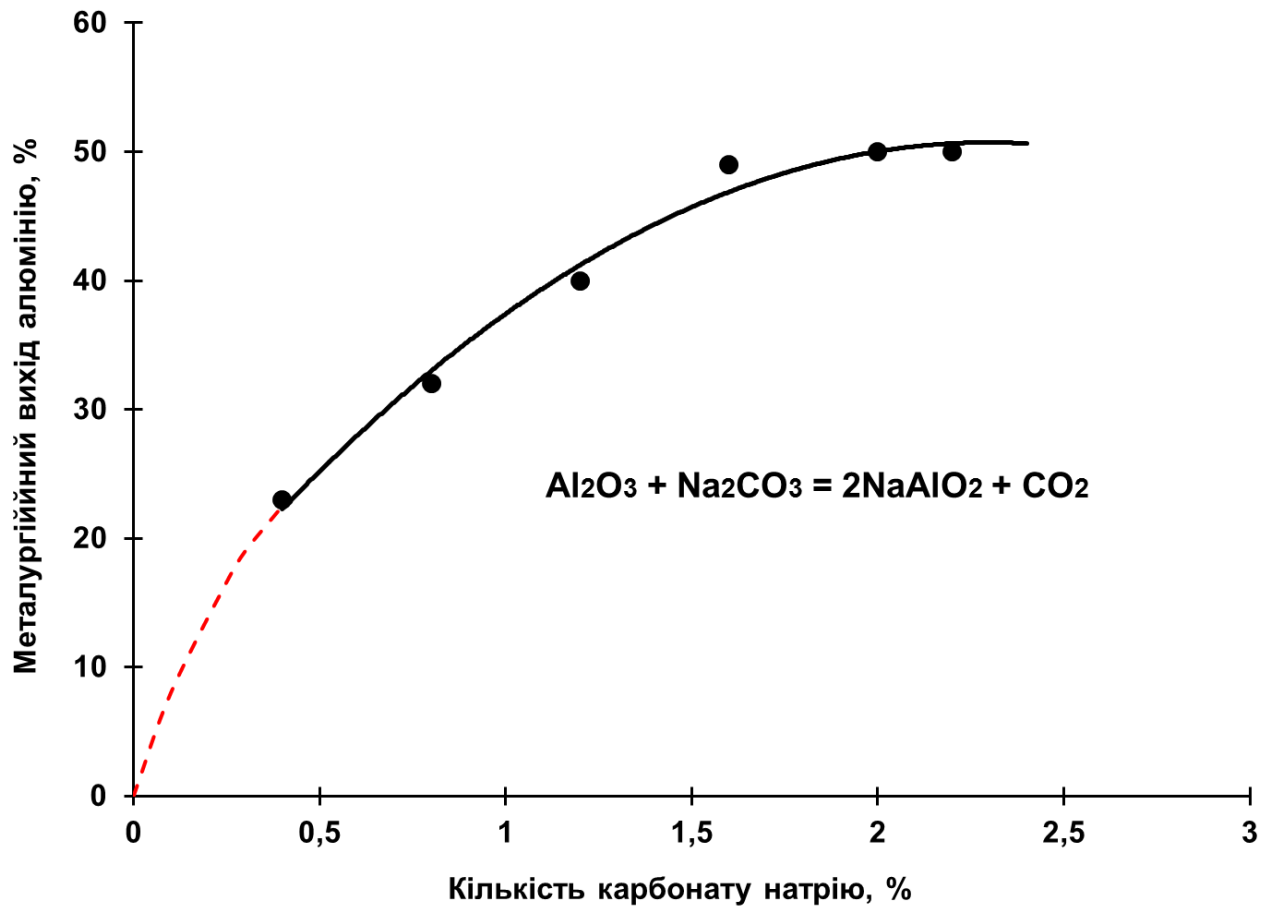
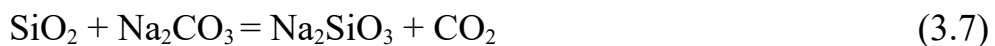
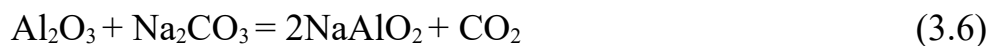


Рис. 3.1. Залежність між металургійним виходом алюмінію з ливарного шлаку та кількістю карбонату натрію.

Якщо в ливарних відходах присутній кремнезем, тоді сода одночасно взаємодіє з оксидом алюмінію та діоксидом кремнію з утворенням алюмінату та силікату натрію:



В зв'язку з цим, окрім соди, в шихту добавляють вапно або вапняк. Оксид кальцію також зв'язує Al₂O₃ і SiO₂ з утворенням нерозчинних у воді алюмінату (Ca(AlO₂)₂) і силікату (Ca₂SiO₄) кальцію. В залежності від різної спорідненості

оксидів, сода витрачається в основному на утворення алюмінату натрію, а вапно – силікату кальцію. В результаті проведеного аналізу було досліджено спільну дію карбонатів натрію та кальцію на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку.

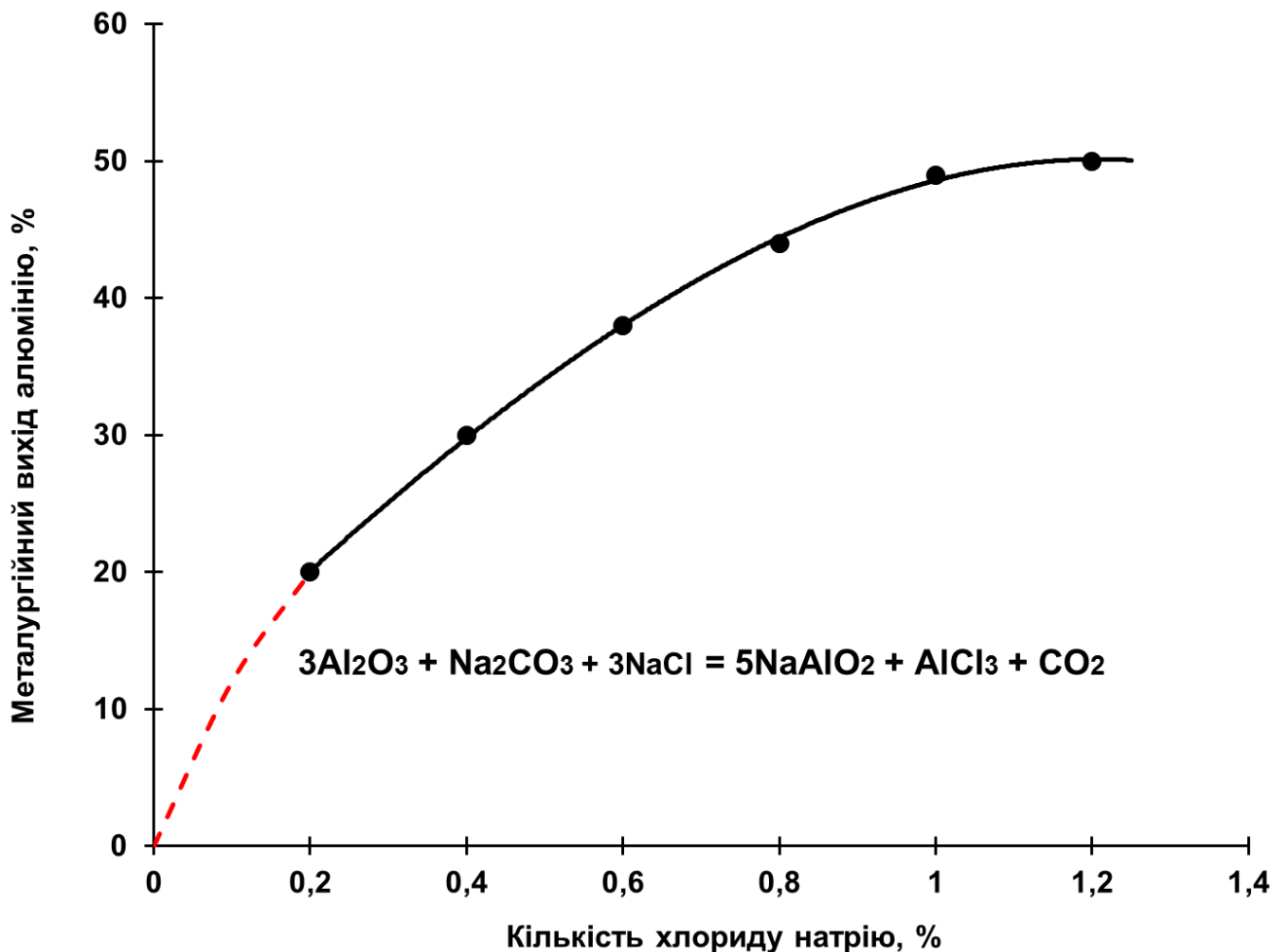


Рис. 3.2. Вплив добавки хлориду натрію (Na_2CO_3 складала 1,0%) на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку.

Встановлено, що загальний вихід алюмінію суттєво не змінився, але при цьому утворилось близько 1,0-2,0 % силікату кальцію.

Хімічний аналіз твердого шлаку показав, що він в основному складається з алюмінату натрію. Було також визначено металургійний вихід алюмінію при використанні 2,0 % Na_2CO_3 (табл. 3.2) [100].

Таблиця 3.2

Вихід алюмінію з ливарного шлаку

| № зразка | Маса проби, г | Маса одержаного алюмінію, г | Склад шихти | Коефіцієнт вилучення, % |
|----------|---------------|-----------------------------|------------------|-------------------------|
| 1 | 300 | 120 | шлак + 2,0% соди | 40 |
| 2 | 300 | 165 | шлак + 2,0% соди | 55 |
| 3 | 300 | 183 | шлак + 2,0% соди | 61 |
| 4 | 300 | 126 | шлак + 2,0% соди | 42 |
| 5 | 300 | 147 | шлак + 2,0% соди | 49 |
| 6 | 300 | 141 | шлак + 2,0% соди | 47 |
| 7 | 300 | 150 | шлак + 2,0% соди | 50 |

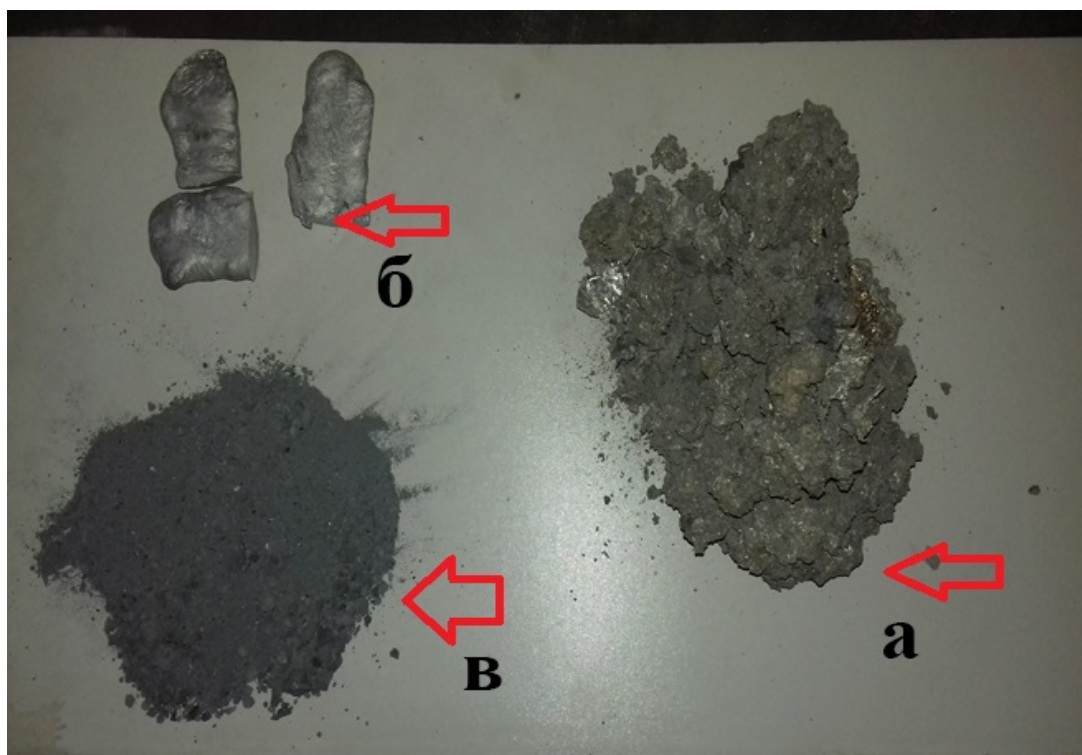


Рис. 3.3. Загальний вигляд вихідної сировини (а), зразки алюмінію (б) та одержаного після плавки шлаку (в)

Загальний вигляд вихідної сировини, зразки алюмінію та одержаний після плавки шлак представлено на рис. 3.3, а результати проведених дослідів наведено в табл. 3.3 та на рис. 3.4 [101].

Таблиця 3.3

Хімічний склад одержаних алюмінієвих зразків

| № зразка | Si, %мас. | Fe, %мас. | Cu, %мас. | Mg, %мас. | Mn, %мас. |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,28 | 0,34 | 0,053 | 0,022 | 0,017 |
| 1* | 0,22 | 0,26 | 0,060 | 0,016 | 0,014 |
| 2 | 0,89 | 0,25 | 0,063 | 0,014 | 0,020 |
| 3 | 0,28 | 0,35 | 0,048 | 0,016 | 0,015 |
| 4 | 0,18 | 0,31 | 0,028 | 0,016 | 0,011 |
| 5 | 0,23 | 0,25 | 0,060 | 0,012 | 0,031 |
| 6 | 0,27 | 0,32 | 0,230 | 0,013 | 0,018 |
| 7 | 0,38 | 0,65 | 0,079 | 0,019 | 0,025 |

Примітка: 1* - зразок, який одержано в результаті плавки в графітовому тиглі.

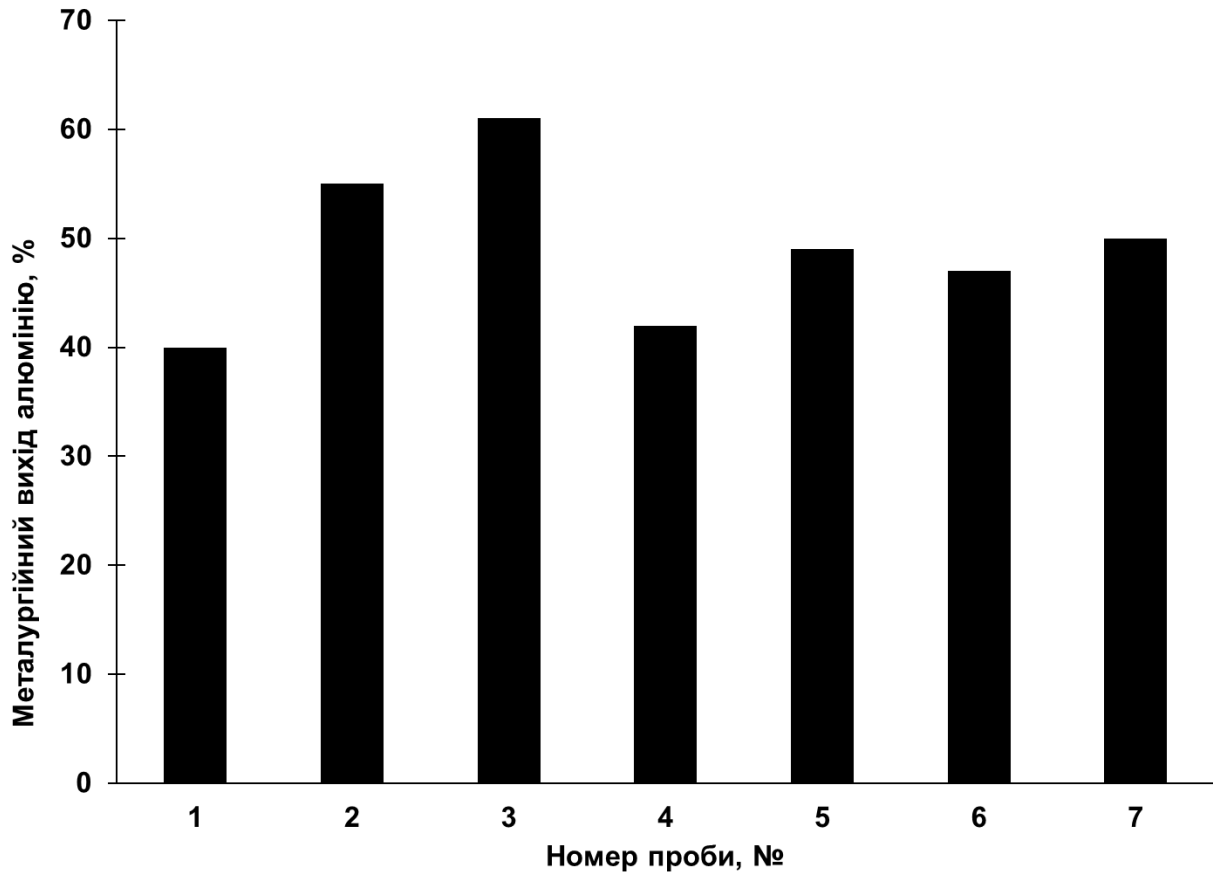


Рис. 3.4. Металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку.

Алюмінієві зразки було проаналізовано двома методами: рентгеноспектральним та електронною скануючою спектроскопією. Отримані дані наведено в таблиці 3.3 і на рисунках 3.5-3.6 [101]. Для порівняння на рис. 3.5 (а) представлено хімічний аналіз електричного алюмінієвого дроту. Як видно з таблиці та графіків, зразок під № 2 містить підвищену кількість кремнію, а зразок № 7 – заліза. Це, напевно, пов'язано з вихідною сировиною. Відомо, після зняття шлаку в багатьох випадках посипають кремнеземом. Даний факт може бути причиною збільшення концентрації Si в основному металі. Залізо могло потрапити також зовні.

Аналіз електронних спектрів алюмінієвих зразків, які одержано з ливарного шлаку, також показав, що вони в основному містять Al в кількості від 98,16 % мас. до 99,02 % мас. Середнє значення складає 98,57 % мас.

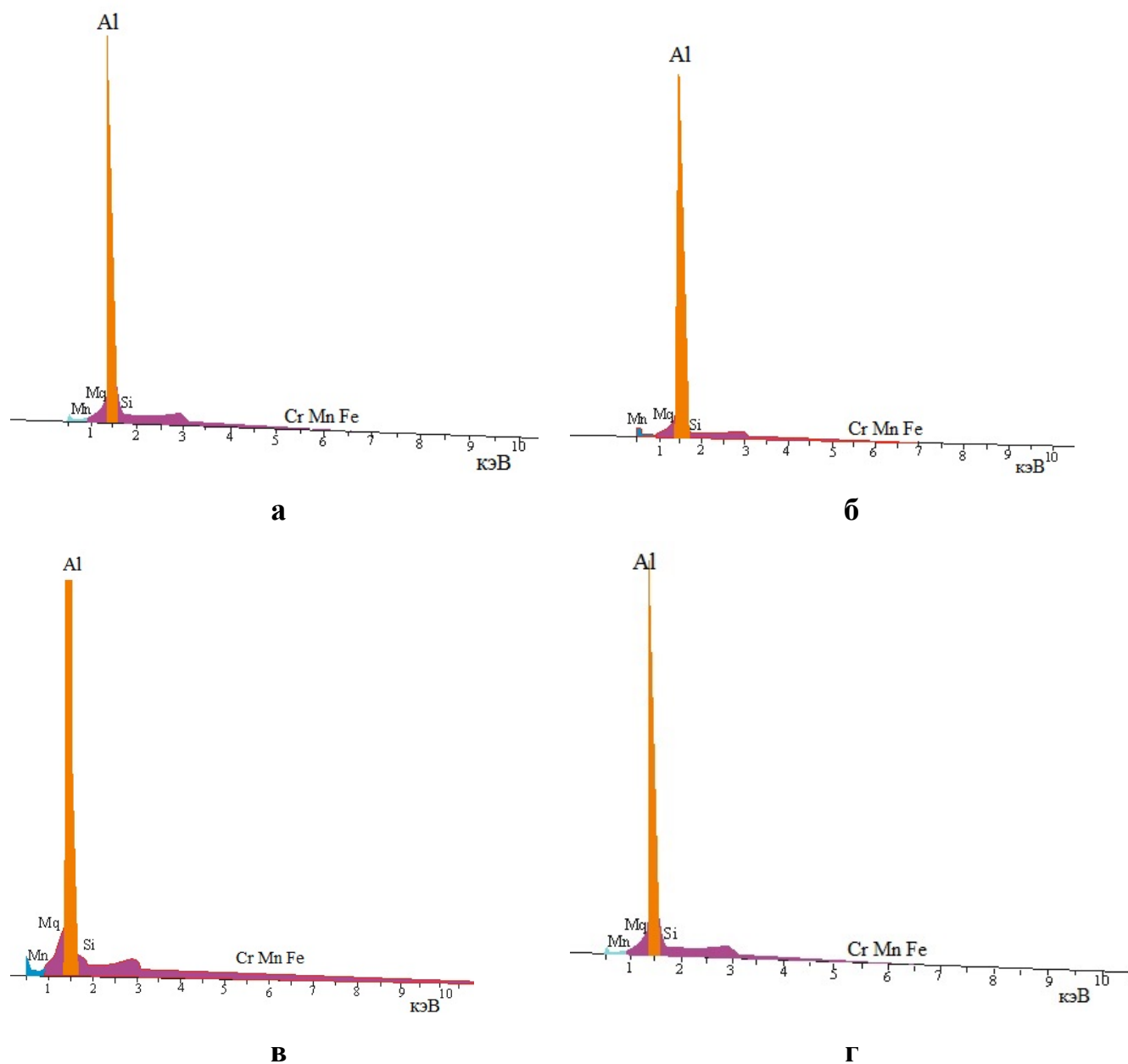


Рис. 3.5. Електронні спектри алюмінієвого дроту діаметром 3 мм (а)
і алюмінієвих зразків: № 1 (б), № 1* (в), № 2 (г).

Щодо домішок, то це головним чином кремній та залізо. Їх кількість неоднозначна, в деяких зразках концентрація вища в 2-3 рази ніж у алюмінієвому дроті (% мас.: $[Al] = 99,43$; $[Si] = 0,37$; $[Fe] = 0,19$).

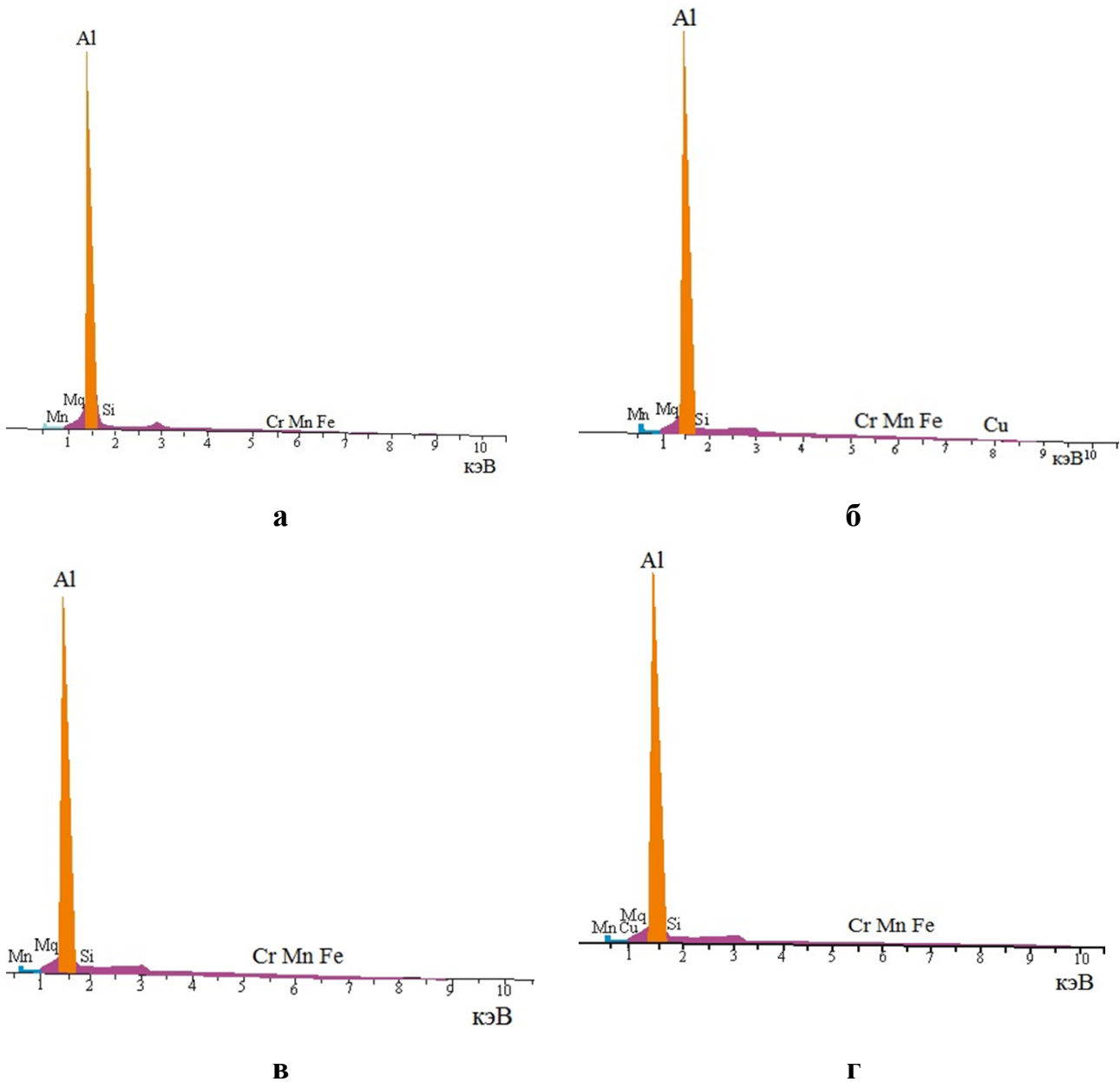


Рис. 3.6. Електронні спектри алюмінієвих зразків: № 4 (а), № 5 (б), № 6 (в), № 7 (г).

Це пов'язано з вихідною шихтою, що використовується в процесі плавки (різного хімічного складу металобрухт, а саме дріт електромереж в якому кількість заліза може досягати до 0,80 % мас.), терміном скачування шлаку, його зберіганням та інше.

Відомо, що домішки заліза та кремнію в алюмінії суттєво впливають на його структуру, що пов'язано з утворенням різних хімічних сполук, які знаходяться на границях зерен. Згідно діаграм стану, при вмісті в алюмінії $Fe > 0,05$ % мас. та $Si <$

0, 05 % мас. з'являються голкоподібні овальні хімічні сполуки FeAl_3 та склетоподібна евтектика $\text{Al} + \alpha (\text{FeAlSi})$ [102, 103].

На рисунках 3.7 і 3.8 представлено мікроструктуру вище вказаних алюмінієвих зразків. На рис. 3.7 представлені мікроструктури зразків 1, 2, 4 (рис. 3.7 а, б, в), спостерігається голчаста склетоподібна евтектика та голки алюмініду заліза. Щодо інших зразків, наприклад, у п'ятому розмір зерна більший, в ньому евтектика займає площу більшу за розміром в порівнянні з іншими [101]. Однак в усіх досліджених матеріалах існують одного складу евтектика та подібні хімічні сполуки. Отримані результати підтверджуються даними, які представлено в роботах [104-107].

Дослідження фазових переходів одержаних зразків проводили методом диференційно скануючої калориметрії на установці, яка описана в розділі 2. Отримані результати представлено на рисунках 3.9-3.16 та в таблиці 3.4 [101]. Згідно ДСК-кривих, що представлені на рис. 3.9-3.16, видно, що температури та ентальпії фазових переходів не дуже суттєво відрізняються від характеристик стандартного алюмінію (А85). Вони свідчать про те, що переробка алюмінієвого ливарного шлаку за допомогою вище викладеного способу приводить до одержання алюмінію порівняно високої чистоти. Виключення складають ентальпії зразка 5. Вони відрізняються приблизно на 60 Дж/г. Це, напевно, пов'язано з присутністю домішок в даному матеріалі.

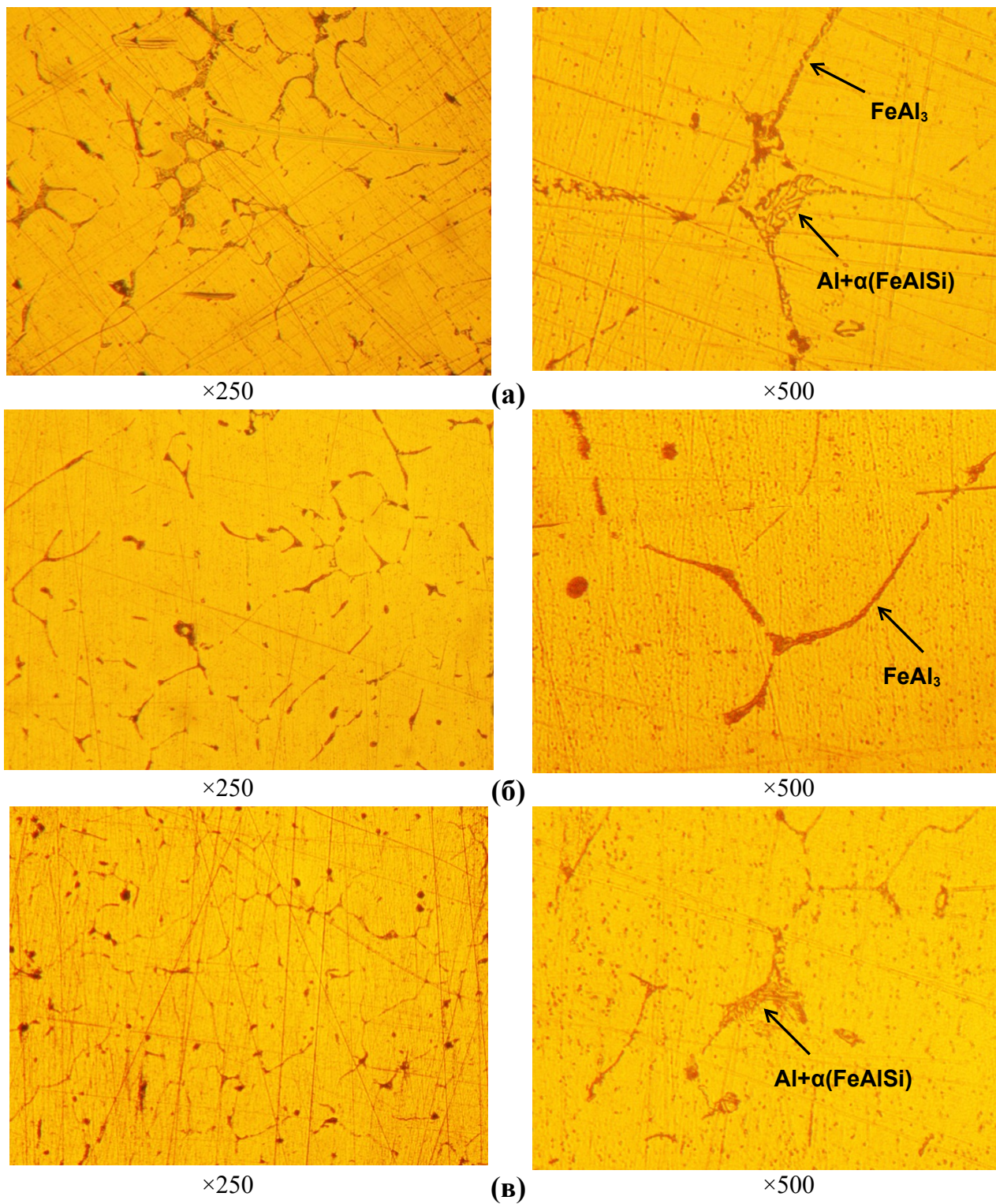


Рис. 3.7. Мікроструктура зразків шлаку, які одержано з ливарного алюмінієвого шлаку. (а) – зразок 1, (б) – зразок 2, (в) – зразок 4

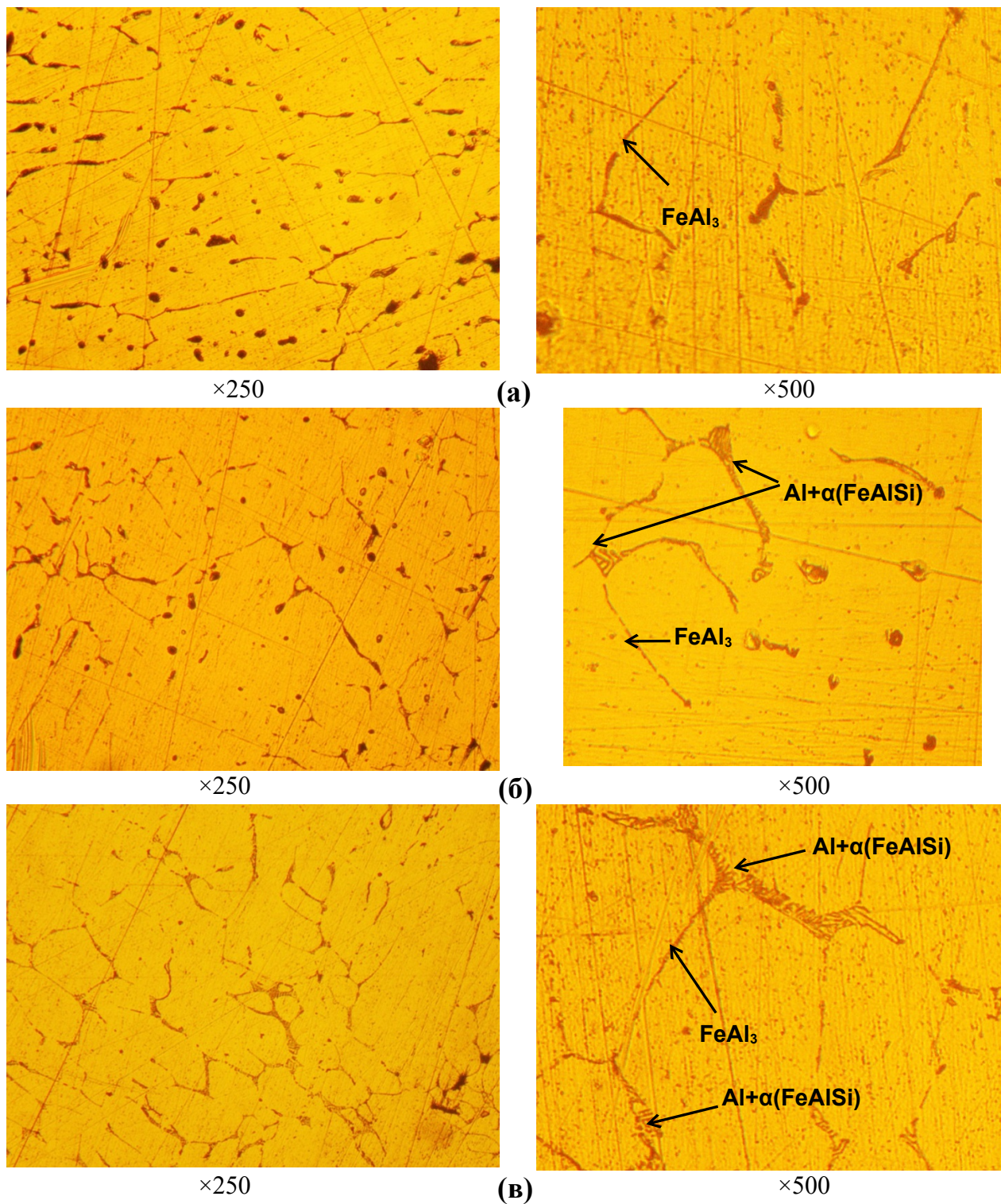


Рис. 3.8. Мікроструктура зразків шлаку, які одержано з ливарного алюмінієвого шлаку. (а) – зразок 5, (б) – зразок 6, (в) – зразок 7

Щодо алюмінієвого зразка під номером 2, то для нього на диференційних кривих плавлення та кристалізації спостерігається декілька піків. Поява піка при

температурі 574 ± 2 °C пов'язана з утворенням евтектики Al-Si, яка згідно розрахунків складає біля 7,8 %. З діаграми стану алюміній-кремній видно, що при вмісті 12,2 % Si, розплав переходить у рідкий стан при температурі 577 °C [95]. В даній системі крім алюмінію присутні інші хімічні елементи (див. табл. 3.2).

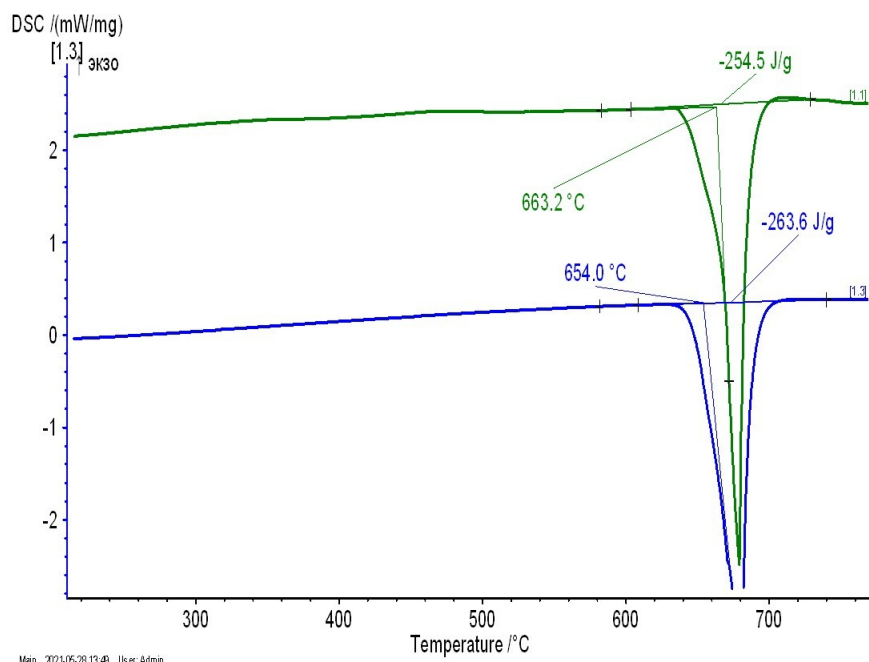
Таблиця 3.4

Характеристики фазових переходів алюмінієвих зразків

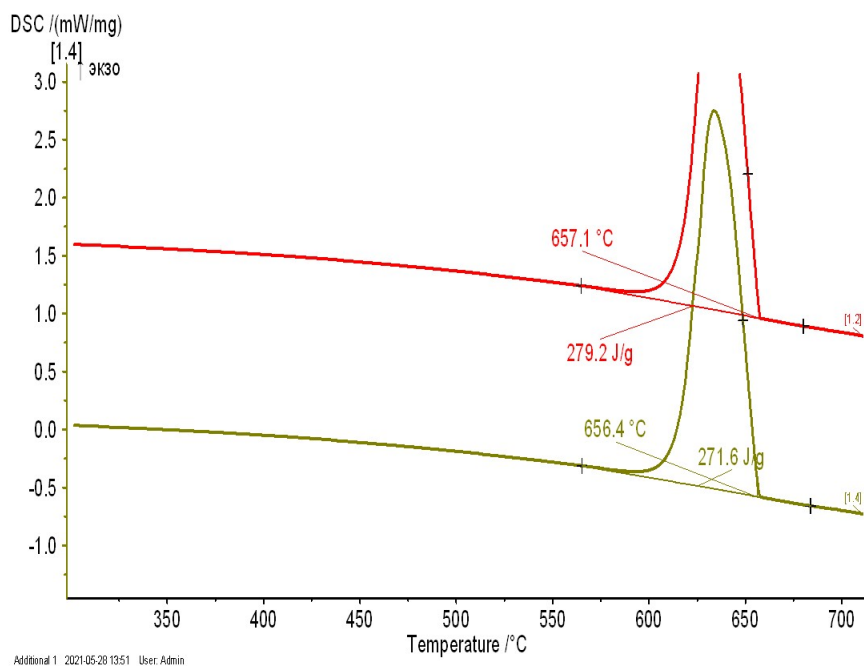
| № п/п зразка | $T_{пл}(1),$ °C | $T_{пл}(2),$ °C | $T_{кр}(1),$ °C | $T_{кр}(2),$ °C | $H_{пл}(1),$ Дж/г | $H_{пл}(2),$ Дж/г | $H_{кр}(1),$ Дж/г | $H_{кр}(2),$ Дж/г |
|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 663,2 | 654,0 | 651,1 | 656,4 | -254,5 | -263,6 | 279,2 | 271,6 |
| 2 | 644,8 | 636,4 | 649,6 | 649,1 | -234,3 | -248,5 | 252,9 | 261,3 |
| 3 | 659,8 | 652,9 | 656,5 | 656,0 | -237,6 | -247,6 | 258,0 | 256,2 |
| 4 | 669,5 | 654,6 | 657,4 | 657,1 | -249,9 | -245,1 | 240,3 | 239,4 |
| 5 | 651,4 | 649,7 | 653,7 | 653,3 | -184,4 | -179,1 | 185,8 | 186,6 |
| 6 | 655,8 | 648,4 | 654,5 | 654,5 | -223,1 | -220,7 | 229,4 | 223,9 |
| 7 | 658,0 | 643,6 | 653,8 | 653,2 | -234,1 | -241,6 | 248,2 | 248,6 |
| 8* | 660,6 | 660,1 | 656,8 | 656,7 | -244,3 | -237,6 | 242,4 | 245,8 |

Примітка.

1. Зразок 8* – стандартний алюміній марки А85. Хімічний склад якого наступний: Al $\geq 99,85$; Fe $\leq 0,08$; Si $\leq 0,06$; Ga $\leq 0,03$; Mg $\leq 0,02$; Mn $\leq 0,02$; Zn $\leq 0,02$; Cu $\leq 0,01$; Ti $\leq 0,008$ (ГОСТ 11069-2001).

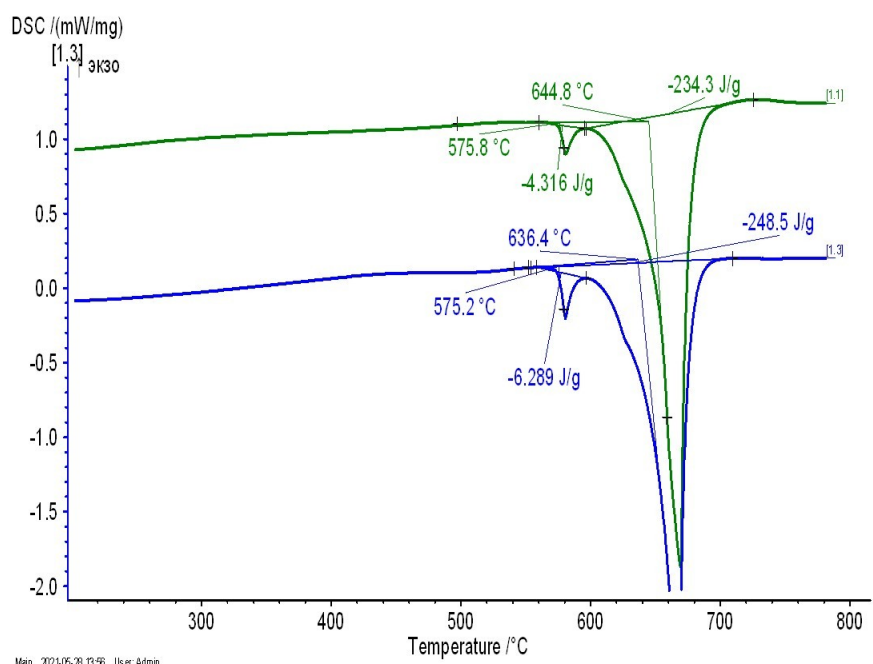


a

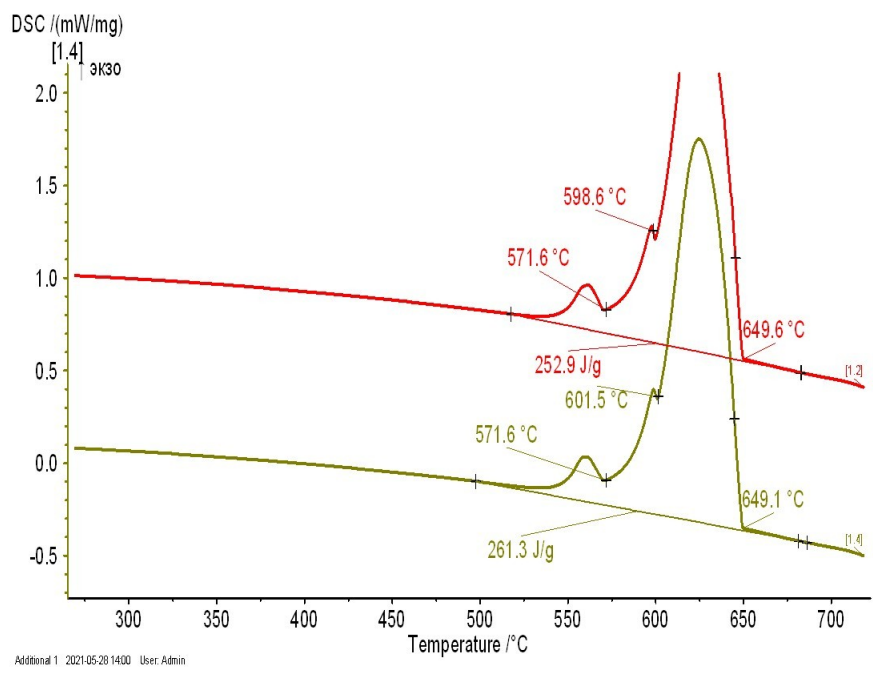


б

Рис. 3.9. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 1 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

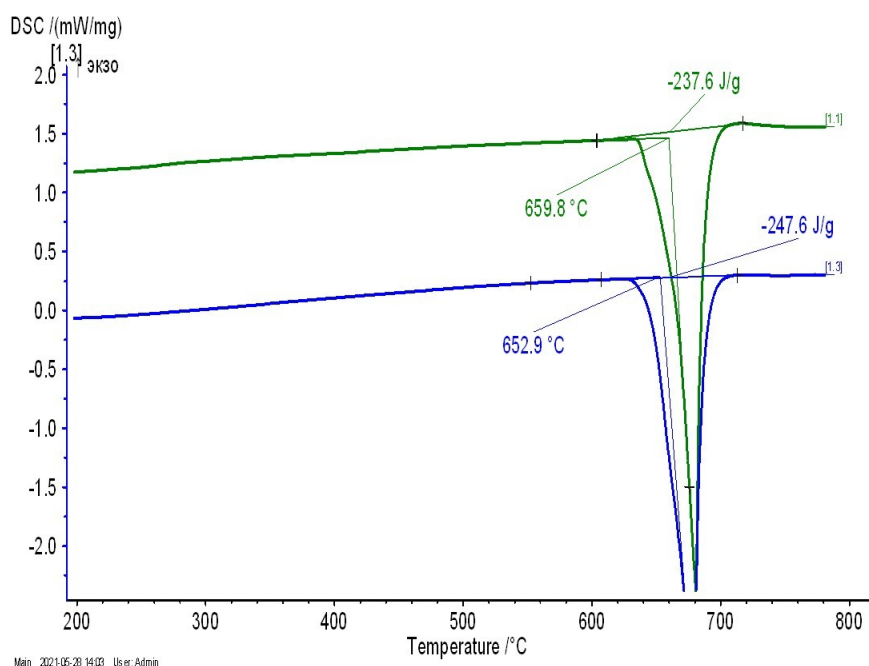


a

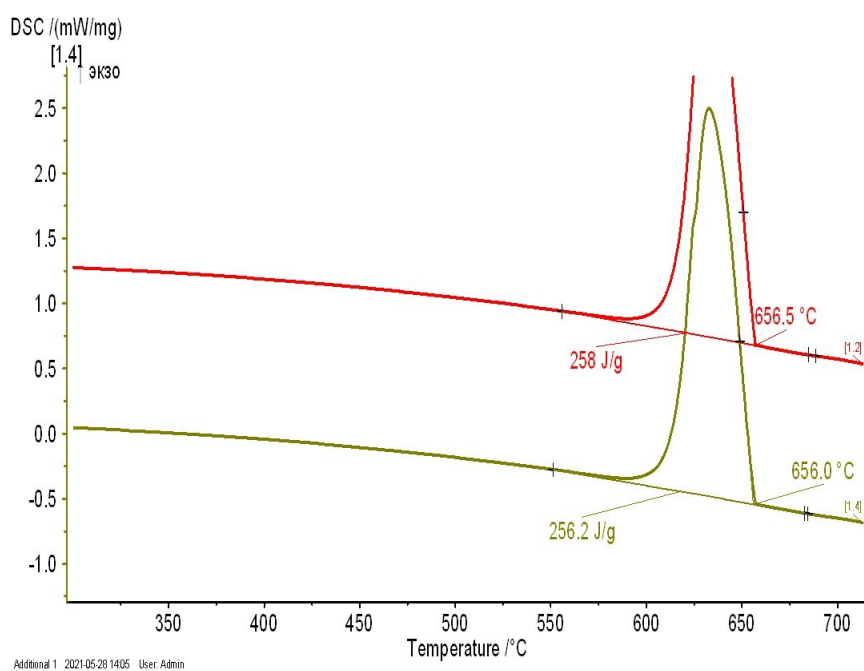


б

Рис. 3.10. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 2 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

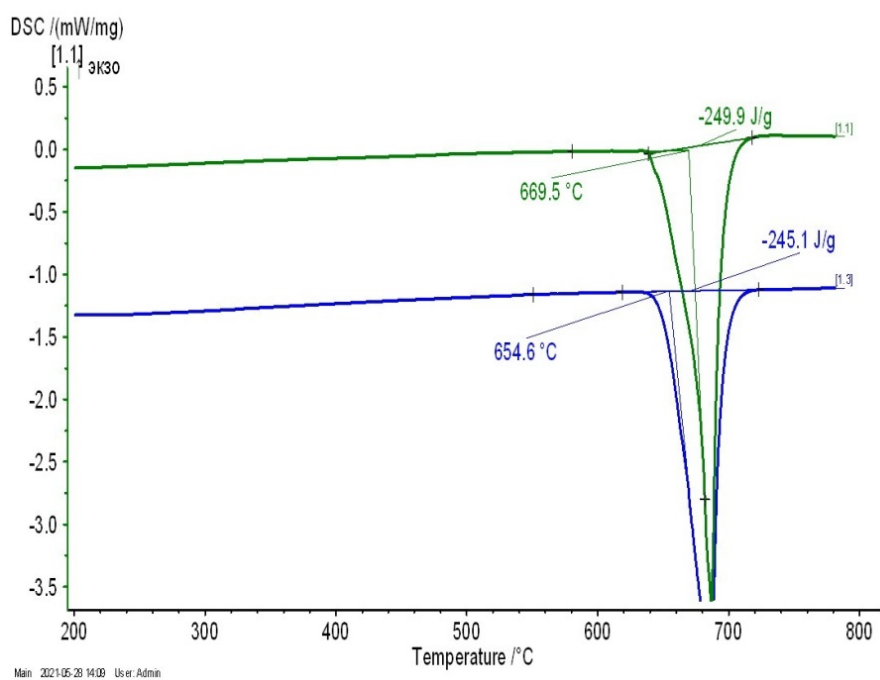


а

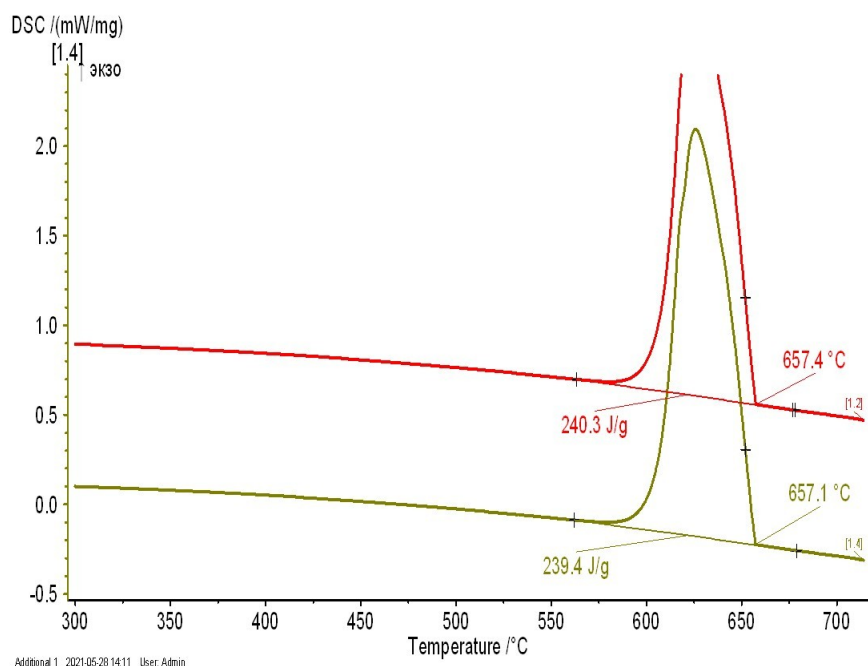


б

Рис. 3.11. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 3 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

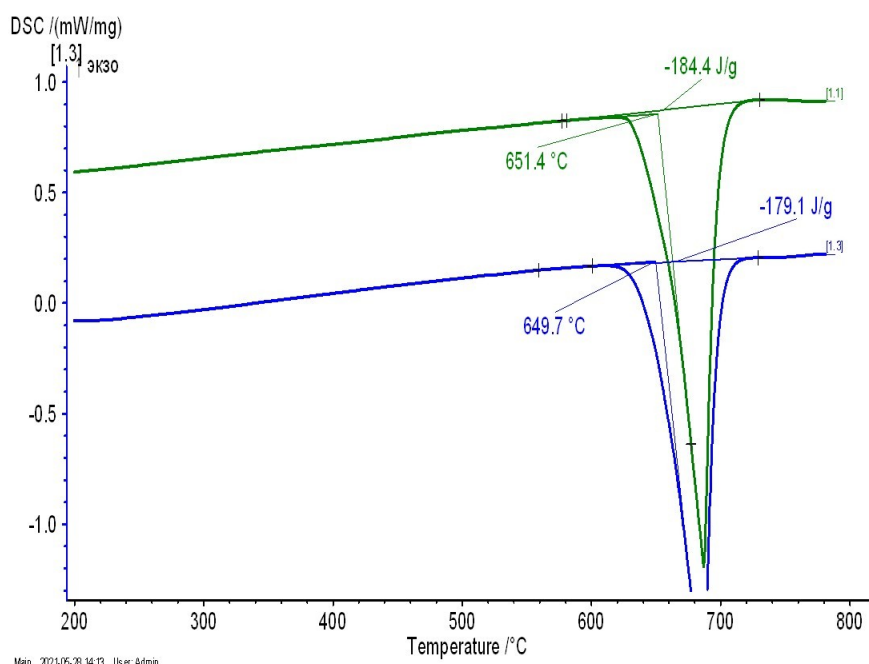


a

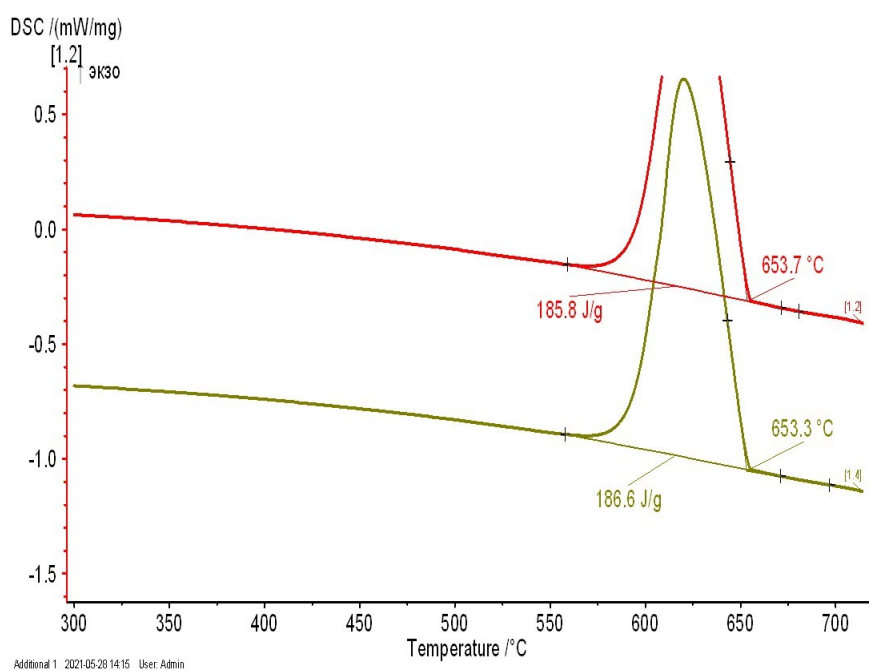


б

Рис. 3.12. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 4 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

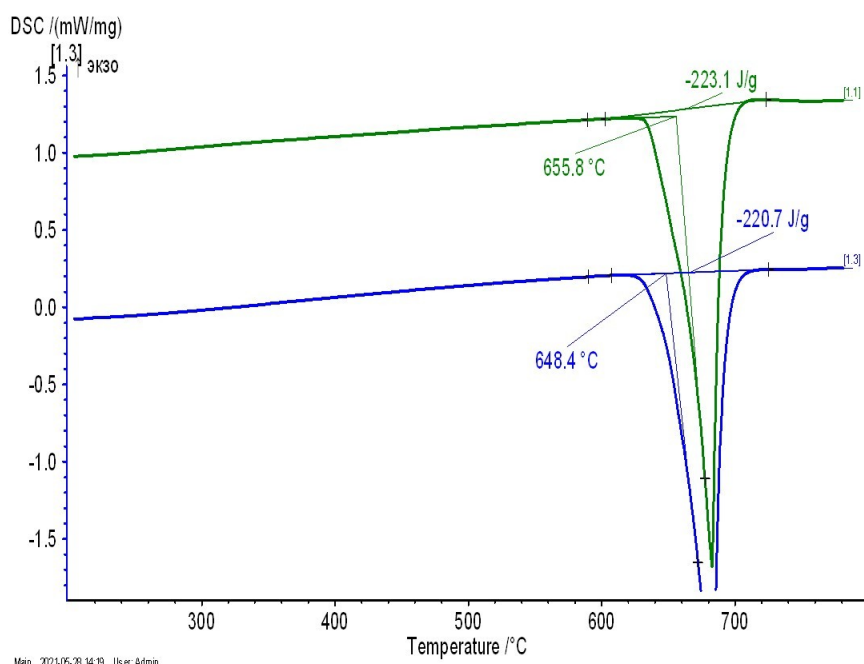


a

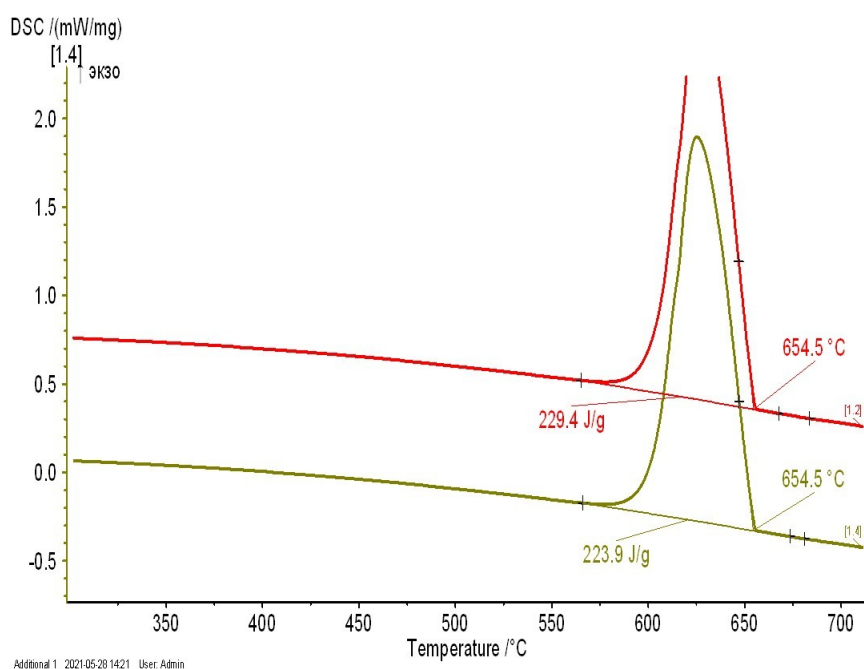


б

Рис. 3.13. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 5 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

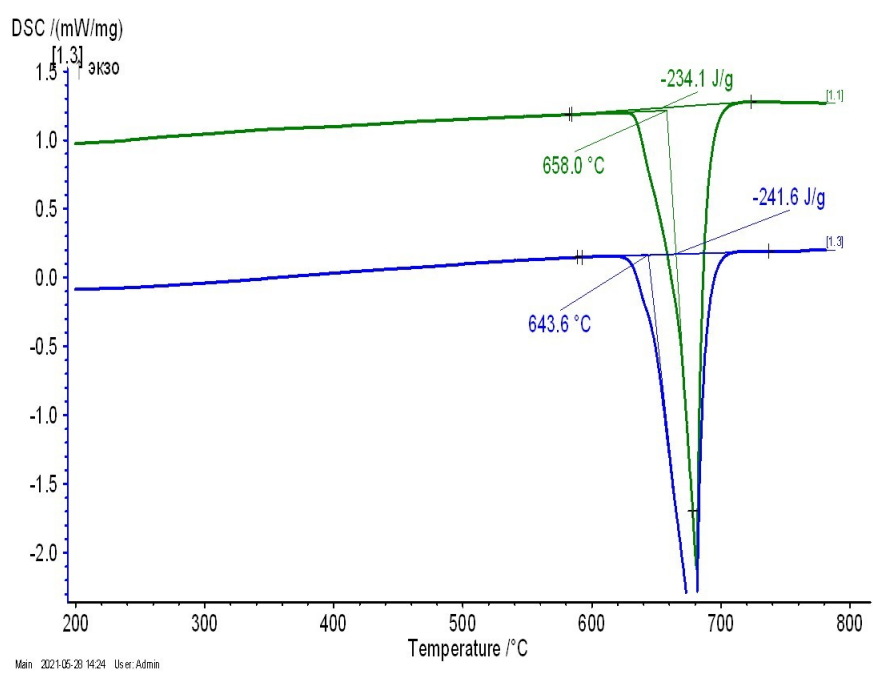


а

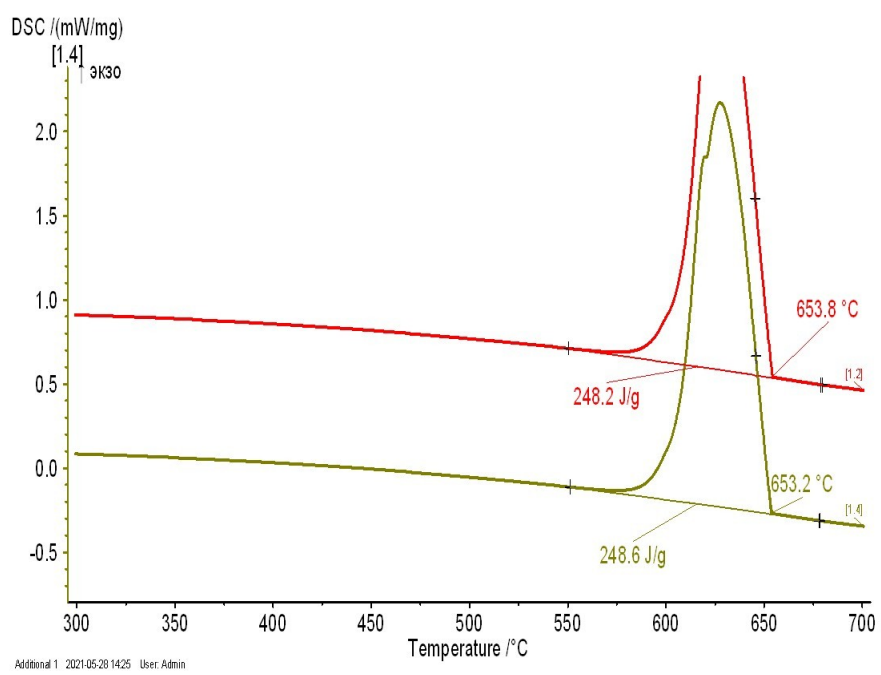


б

Рис. 3.14. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 6 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)



а



б

Рис. 3.15. ДСК-криві алюмінієвого зразка № 7 при нагріванні (а)
та охолодженні (б)

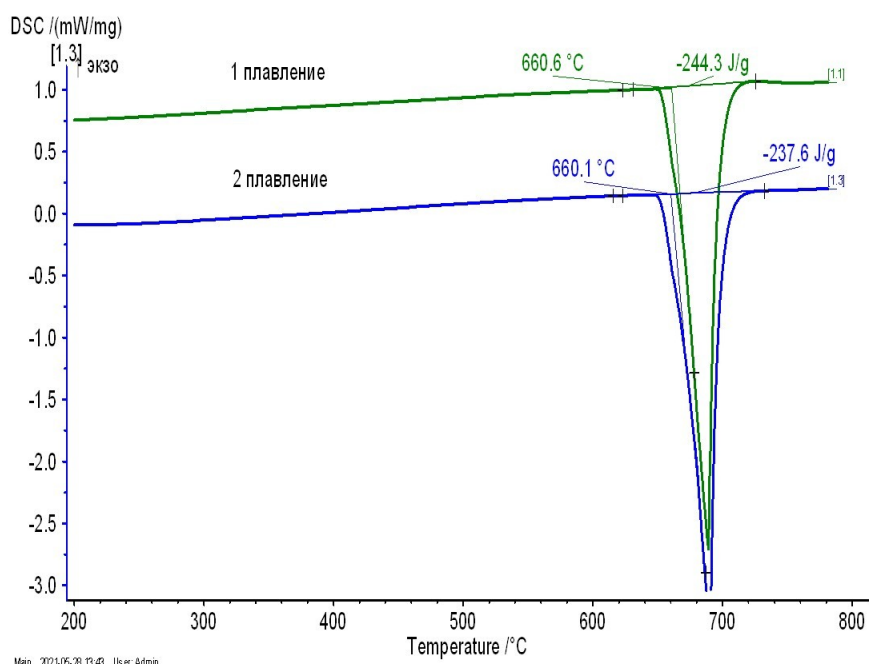
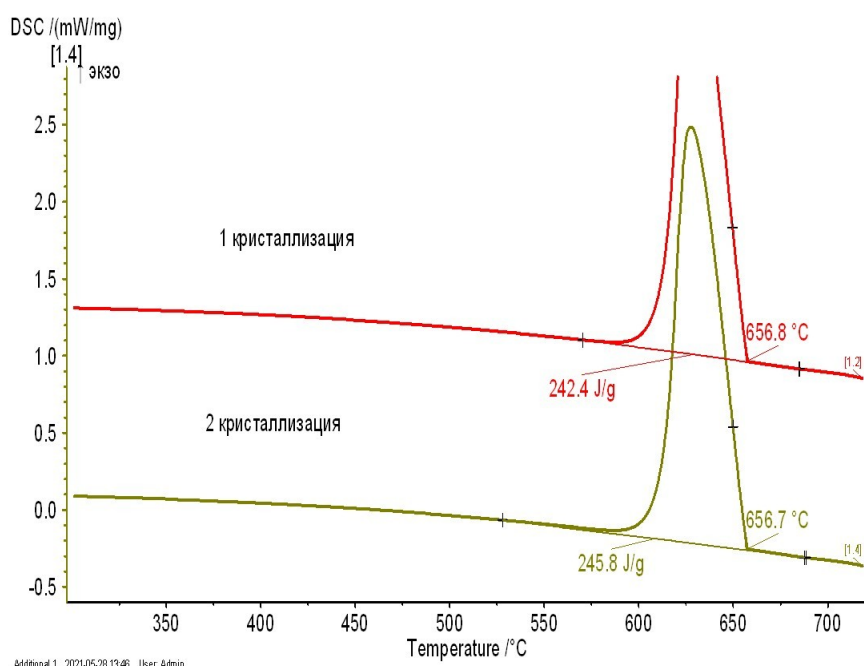
**а****б**

Рис. 3.16. ДСК-криві стандартного алюмінієвого зразка (A85)
при нагріванні (а) та охолодженні (б)

3.2 Вторинний алюміній – сировина для високоміцного сплаву системи Al-Zn-Mg-Si

Одержаний зі ливарного шлаку алюміній було використано як сировину в процесах отримання електричного дроту та високоміцного сплаву системи Al-Mg-Si. З літературних джерел відомо, що одним із факторів, який суттєво впливає на властивості високоміцних алюмінієвих сплавів, що містять цинк, є утворення гарячих тріщин. Розвиток теорії щодо їх виникнення при литті призвів до розуміння впливу деяких факторів на механізми їх зародження та росту [107-118]. Утворення тріщин при литті сплавів пов'язують із наступними головними причинами: великий інтервал кристалізації, напруження в інтервалі кристалізації та охолодження, фази або сполуки із низькою температурою плавлення на границях зерен, груба зеренна структура, низька в'язкість матриці при підвищених температурах, груба будова дендриту, низька рухливість зерен в інтервалі твердіння, низька рухливість рідкої фази в інтервалі кристалізації. Вони з'являються тоді, коли під час кристалізації та подальшого охолодження вилівка напруження у ньому більші, ніж його межа міцності. Особливу схильність до утворення гарячих тріщин мають сплави, до складу яких входять евтектики з низькою температурою плавлення. Це призводить до утворення тонких рідких проміжків між зернами, які значно знижують характеристики міцності вилівка.

В процесі гартування такого типу сплавів одержують стабільний твердий розчин. Основне зміцнення виникає за рахунок утворення Т-фази ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$). Температура нагрівання для гартування $\leq 450\text{ }^\circ\text{C}$, що пов'язано з високим ступенем легування, яке в даному випадку суттєво знижує температуру сплаву. Фрагментація та сфероїдизація інтерметалідних фаз при нагріві для гартування приводить до утворення глобулярних частинок. Вони відносно рівномірно розподіляються в твердому пересиченому розчині та прискорюють його розпад у всередині зерен і тим самим протидіють утворенню грубих зернограничних ланцюгів Т-фази. Цей

структурний ефект додатково відображається як на механічних властивостях, так і на опорі до корозії під напругою.

Для отримання загального балансу властивостей високоміцних сплавів необхідно проводити оптимізацію хімічного складу за всіма компонентами, технологічними режимами всього циклу виробництва напівфабрикатів (починаючи з лиття вилівка і закінчуючи термообробкою). Виходячи з того, що високоміцні сплави дуже чутливі до концентраторів напружень, тому необхідно суттєво зменшувати вміст домішок (Fe, Si та ін.) і відповідно контролювати в структурі об'ємну долю нерозчинних великого розміру інтерметалідів (з типовим розміром 1-5 мкм), які утворюються при кристалізації вилівка. Подібну від'ємну дію завдають розчинні надлишкові інтерметаліди (наприклад, S-фаза), яка містить легуючі елементи (Mg, Cu). Для вирішення цих проблем можна використовувати термічний аналіз та термодинамічну методику розрахунків.

Також було досліджено вплив цинку на структуру сплаву системи Al-Mg-Cu, який не містив цирконій. Цинк вводили в розплав трьома способами: 1) за допомогою лігатури; 2) за допомогою дзвіночка; 3) за допомогою реактора, який було виготовлено з кварцового скла (рис. 3.17). Установка складалася із кварцової труби 6, що вмонтована в графітовий блок 4. Циліндр та блок нагрівали за допомогою індуктора 3. Пари цинку з потоком аргону вдували в розплав 14 системи Al-Mg-Cu через занурену в нього кварцову трубу 9. Маса розплавленого металу в печі опору складала ~ 700 г, температуру алюмінієвого розплаву 14 підтримували 700 ± 10 °C, а температура парів цинку на виході з кварцової труби 9 не перевищувала 920 ± 10 °C. Витрата аргону була ~ 3 л/хв., тиск аргону в кварцовій трубі не перевищував 0,1 МПа і регулювався за допомогою ротаметра 18. Після введення всього цинку в розплав, його витримували протягом 3-4 хв. і при температурі 650 ± 10 °C заливали в чавунні кокілі циліндричної форми. В першому та другому випадках розплав перегрівали відповідно до температур: 1000 ± 10 °C, 1050 ± 10 °C та 1150 ± 10 °C. Температура заливання розплаву в кокіль була однакова при різних способах введення цинку [119].

Вплив температури перегріву розплаву на розмір зерна (р.з.) і дендритний параметр (д.п.), а також на макро- та мікроструктуру литих зразків із сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu показано на рисунках 3.18 і 3.19 [119].

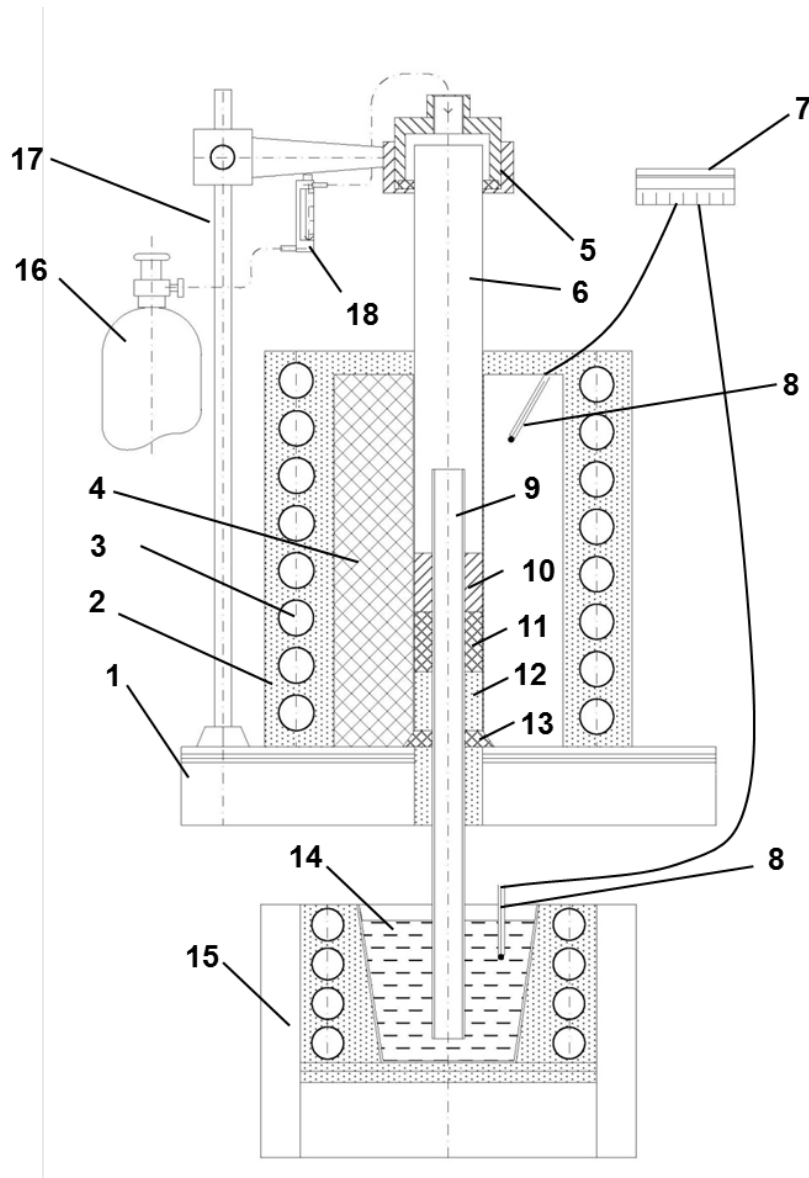


Рис. 3.17. Схема установки для введения цинку в атомарном виде у расплав системы Al-Mg-Cu [119]. 1 – стіл монтажний, 2 – індукційна піч, 3 – індуктор, 4 – графітовий блок, 5 – герметичний наконечник, 6 – кварцова труба, 7 – прилад контролю температури, 8 – термопара, 9 – кварцова трубка, 10 – втулка з цинку, 11 – графітова втулка, 12 – каолінова вата, 13 – графітова заглушка, 14 – розплав, 15 – піч опору, 16 – балон з аргоном, 17 – штатив, 18 – ротаметр

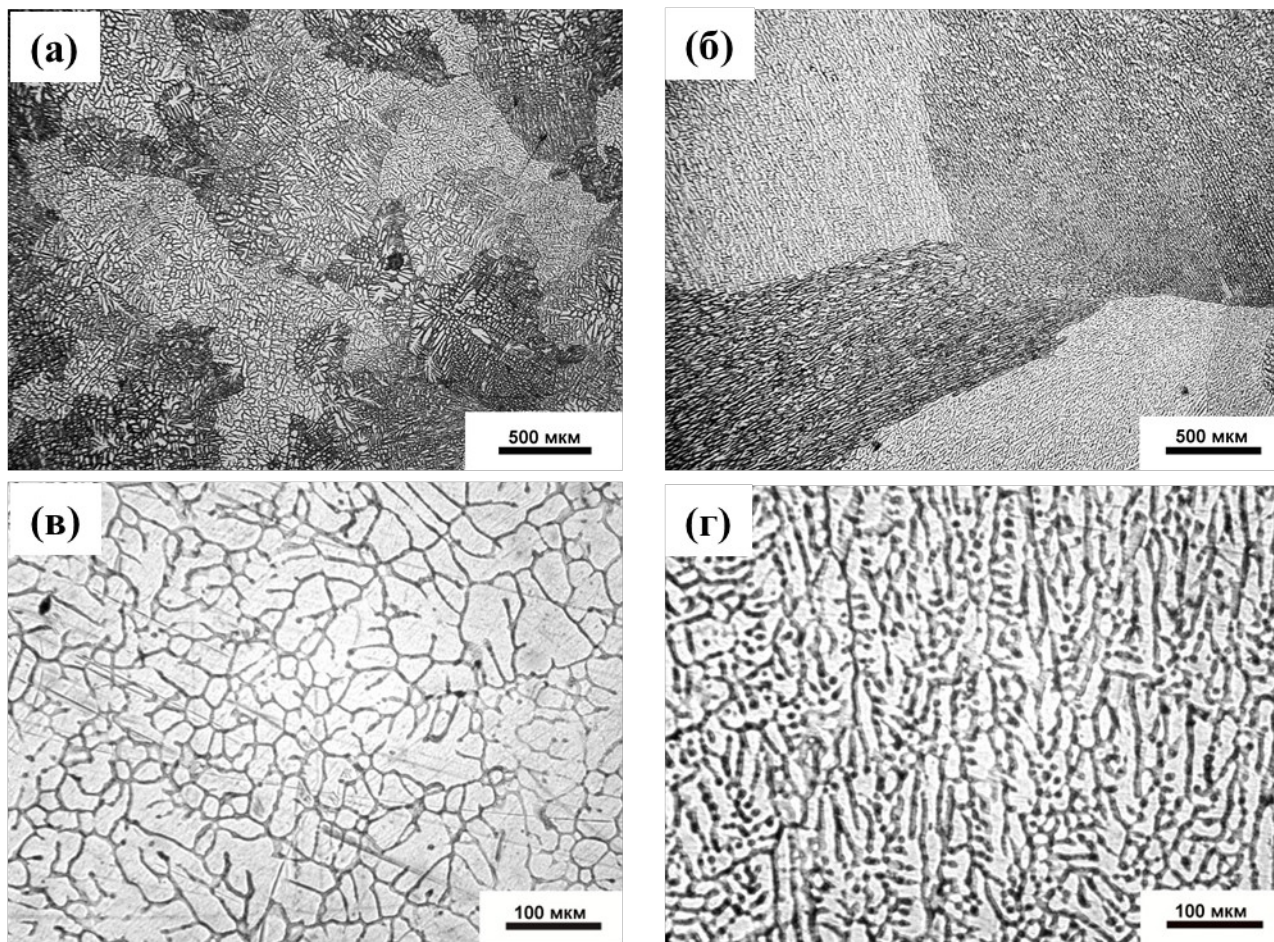


Рис. 3.18. Вплив температури перегріву розплаву системи Al-Zn-Mg-Cu на розмір зерна (р.з.) та дендритний параметр (д.п.) литих зразків [119]. (а) і (в) при 750 °C, д.п.=25 мкм, р.з.=1,1 мм; (б) і (г) при 1150 °C, д.п.=21,5 мкм, р.з.=3 мм. Цинк в рідкий сплав системи Al-Mg-Cu вводили за допомогою лігатури

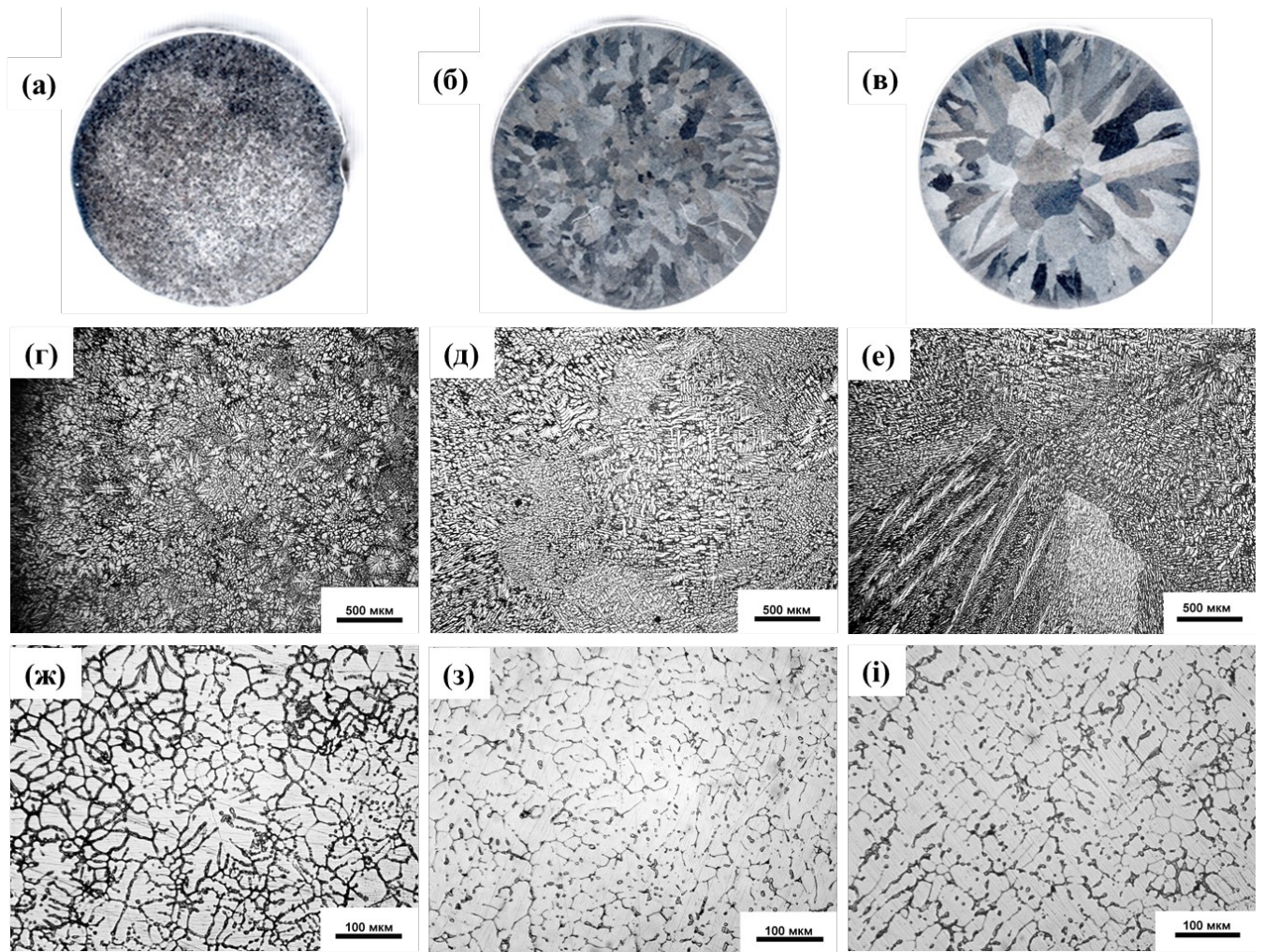


Рис. 3.19. Вплив температури перегріву розплаву на макро- та мікроструктуру литих зразків із сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu [119]. (а), (г), (ж) при 750 °С; (б), (д) і (з) при 930 °С; (в), (е), (і) при 1100 °С. Цинк в рідкий сплав системи Al-Mg-Cu вводили в пароподібному стані за допомогою реактора

Одержані результати представлено в таблиці 3.5 та на рисунках 3.20–3.26. Аналіз експериментальних даних показав, що температура перегріву і вміст цинку суттєво впливають на структуру та твердість сплаву системи Al-Mg-Cu. Чітко просліджуються залежності розміру зерна від температури перегріву (рис. 3.20–3.22, 3.23). Розмір зерна збільшується приблизно в три рази при перегріванні розплаву до температур 1100 °С або 1150 °С у порівнянні з перегрівом до температури 750 °С. Наведені експериментальні дані підтверджують той факт, що розмір зерна збільшується при перегріванні розплаву та високих температурах лиття і воно

подрібнюється при низькій температурі лиття [120]. В протилежність розміру зерна дендритний параметр (розмір дендритної комірки) зменшується при перегріванні, хоча ця залежність простежується слабо (рис. 3.21–3.22), тому потрібно буде провести додаткові дослідження для з'ясування впливу температури перегрівання на дендритний параметр. Відомо, якщо на розмір зерна значно впливає температура рідкого металу, то на його внутрішню будову (дендритний параметр) впливає тільки швидкість охолодження [120]. Чим вона вища, тим тонше внутрішня будова зерна і тим вище міцність і пластичність сплаву. При перегріванні розплаву до температури 1150 °C розмір дендритного параметру зменшується в 1,16 та 1,47 рази (рис. 3.19, 3.22) в литих зразках в які цинк вводили за допомогою лігатури та дзвіночком, відповідно [119]. При введенні цинку в пароподібному стані у не перегрітий розплав при температурі 650 °C за допомогою реактора розмір дендритної комірки литого зразку складає приблизно 25 мкм (табл. 3.5, рис. 3.20), а при перегріванні розплаву до 1100 °C розмір комірки незначно зменшується майже у 1,1 рази до 23 мкм.

Таблиця 3.5

Вплив методу введення цинку на розмір зерна, дендритний параметр та твердість

| Метод введення цинку | Номер зразка | Концентрація цинку, мас. % | Температура перегріву, °C | Твердість, НВ | Розмір зерна, мм | Дендритний параметр, мкм |
|----------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| Пара | 1 | 6.53 | 650 | 98.1 | 0.988 ± 0.231 | 25 |
| | 2 | 6.86 | 750 | 91.8 | 0.900 ± 0.124 | 31 |
| | 3 | 7.76 | 755 | 96.1 | 0.333 ± 0.036 | 22 |
| | 4 | 6.53 | 930 | 97.3 | 1.075 ± 0.435 | 23 |
| | 5 | 5.43 | 1000 | 103 | 0.754 ± 0.345 | 13.5 |
| | 6 | 5.19 | 1100 | 105 | 2.814 ± 0.801 | 23 |
| Дзвіночок | 1 | 8.71 | 1050 | 123.3 | 1.796 ± 0.445 | 19 |
| | 2 | 10.12 | 1000 | 112.0 | 1.812 ± 0.313 | 28 |
| | 3 | 9.44 | 1150 | 121.7 | 1.716 ± 0.497 | 17 |
| Лігатура | 1 | 8.22 | 750 | 105 | 1.101 ± 0.037 | 25 |
| | 2 | 11.75 | 1050 | 96.1 | 1.002 ± 0.106 | 19 |
| | 3 | 6.84 | 1100 | 88.4 | 2.145 ± 0.439 | 20 |
| | 4 | 10.23 | 1150 | 109.3 | 3.044 ± 0.313 | 21.5 |

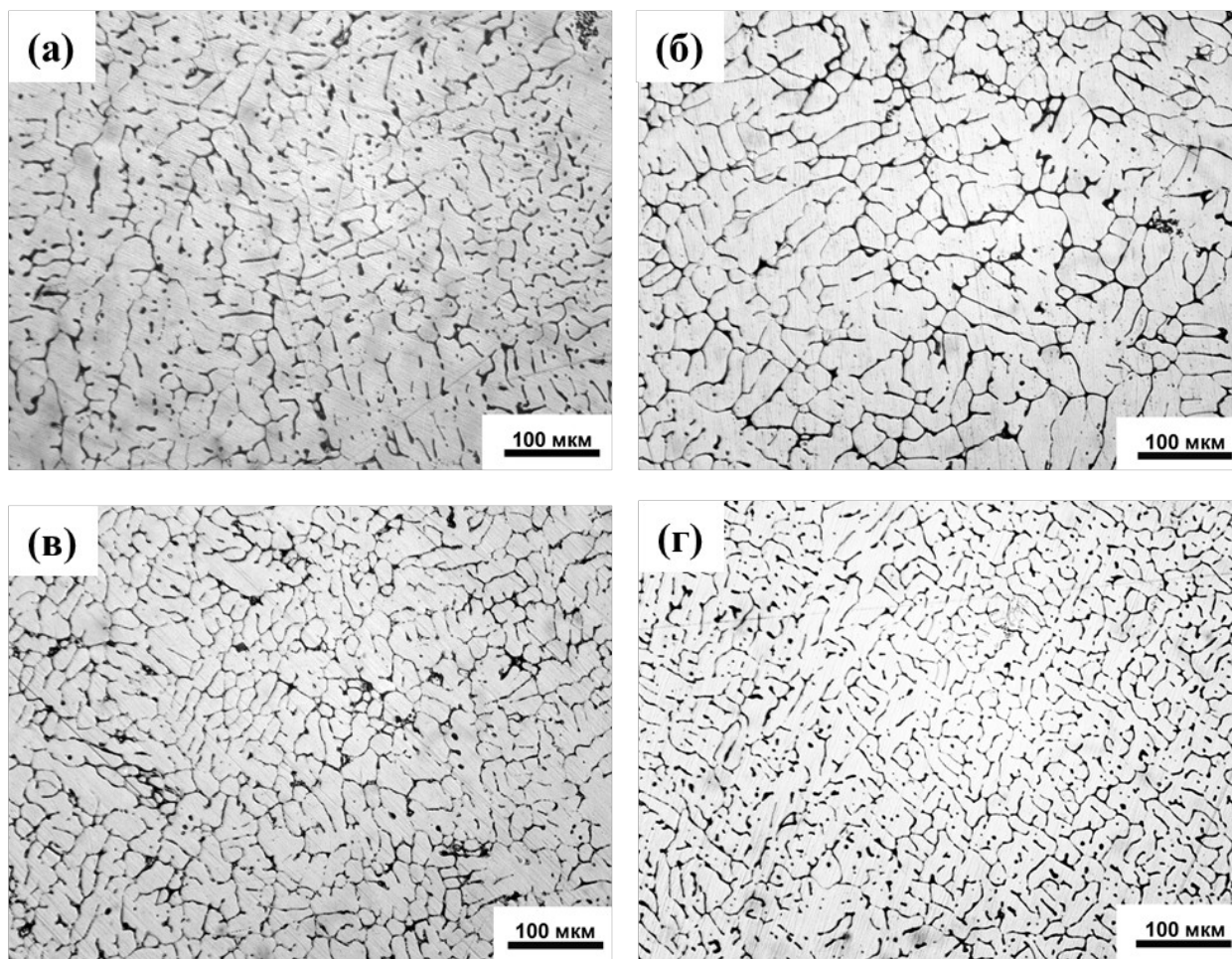


Рис. 3.20. Вплив температури перегріву розплаву системи Al-Zn-Mg-Cu на дендритний параметр (д.п.) литих зразків [119]. (а) при 750 °С, д.п.=25 мкм; (б) при 1000 °С, д.п.=28 мкм; (в) при 1050 °С, д.п.=19 мкм; (г) при 1150 °С, д.п.=17 мкм.

Цинк в рідкий сплав системи Al-Mg-Cu вводили за допомогою дзвіночка

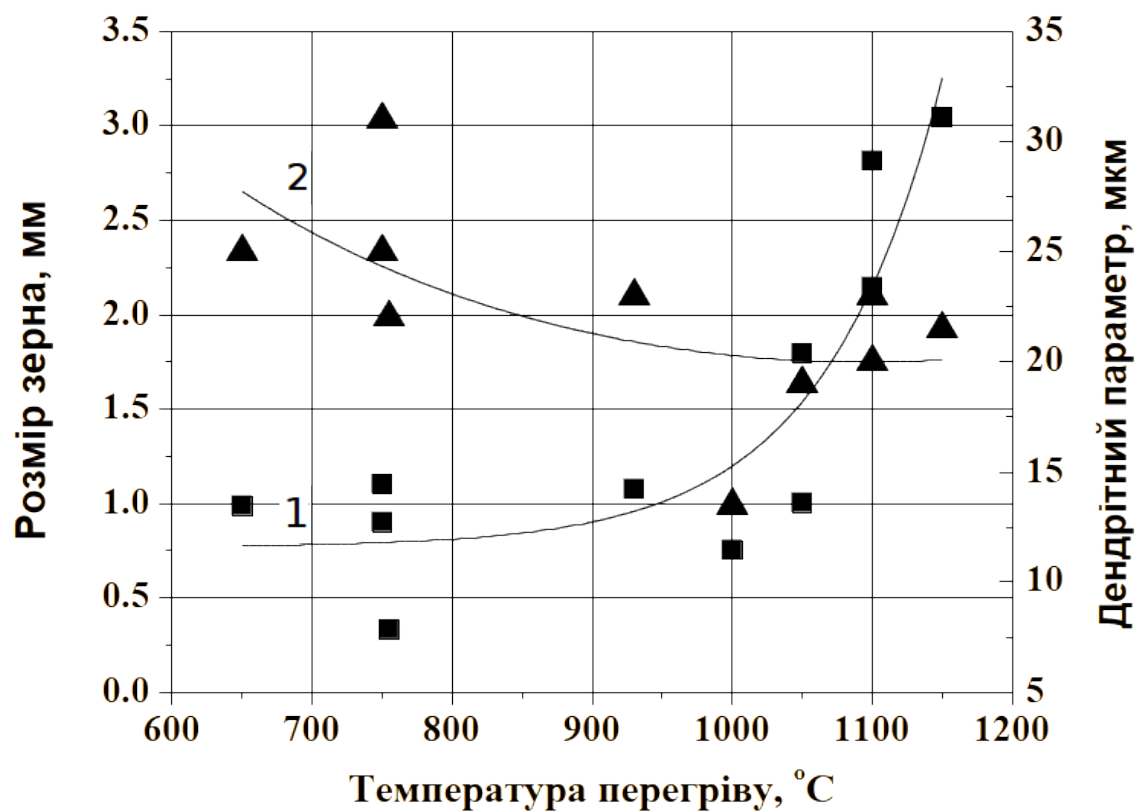


Рис. 3.21. Вплив температури перегріву рідкого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu на розмір зерна (1) та дендритний параметр (2) литих зразків [119]

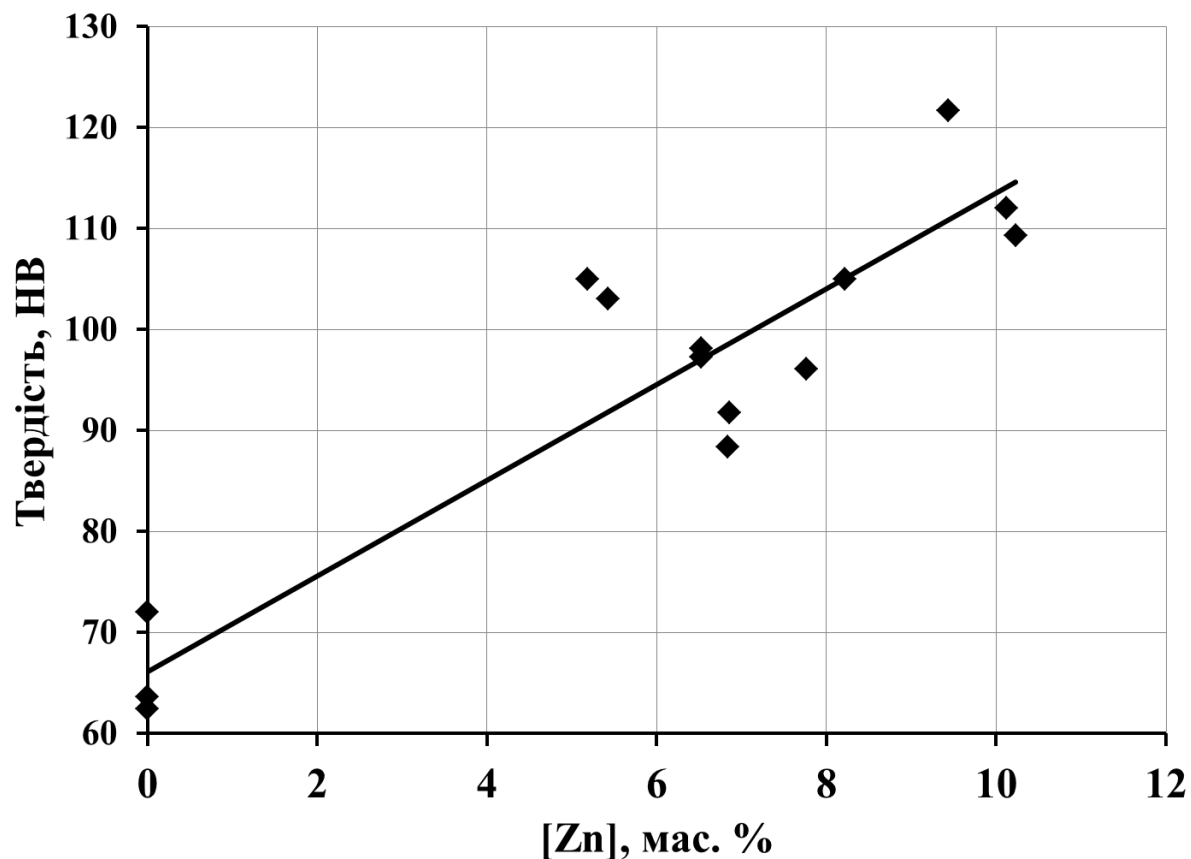


Рис. 3.22. Залежність твердості від концентрації цинку в литих зразках із сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu [119]

Твердість сплаву головним чином залежить від концентрації цинку в литих зразках і вона збільшується при збільшенні концентрації цинку (рис. 3.22). При цьому не помічено суттєвої різниці, як впливає на мікроструктуру та твердість метод введення цинку в розплав системи Al-Mg-Cu (див. табл. 3.5, рис. 3.23).

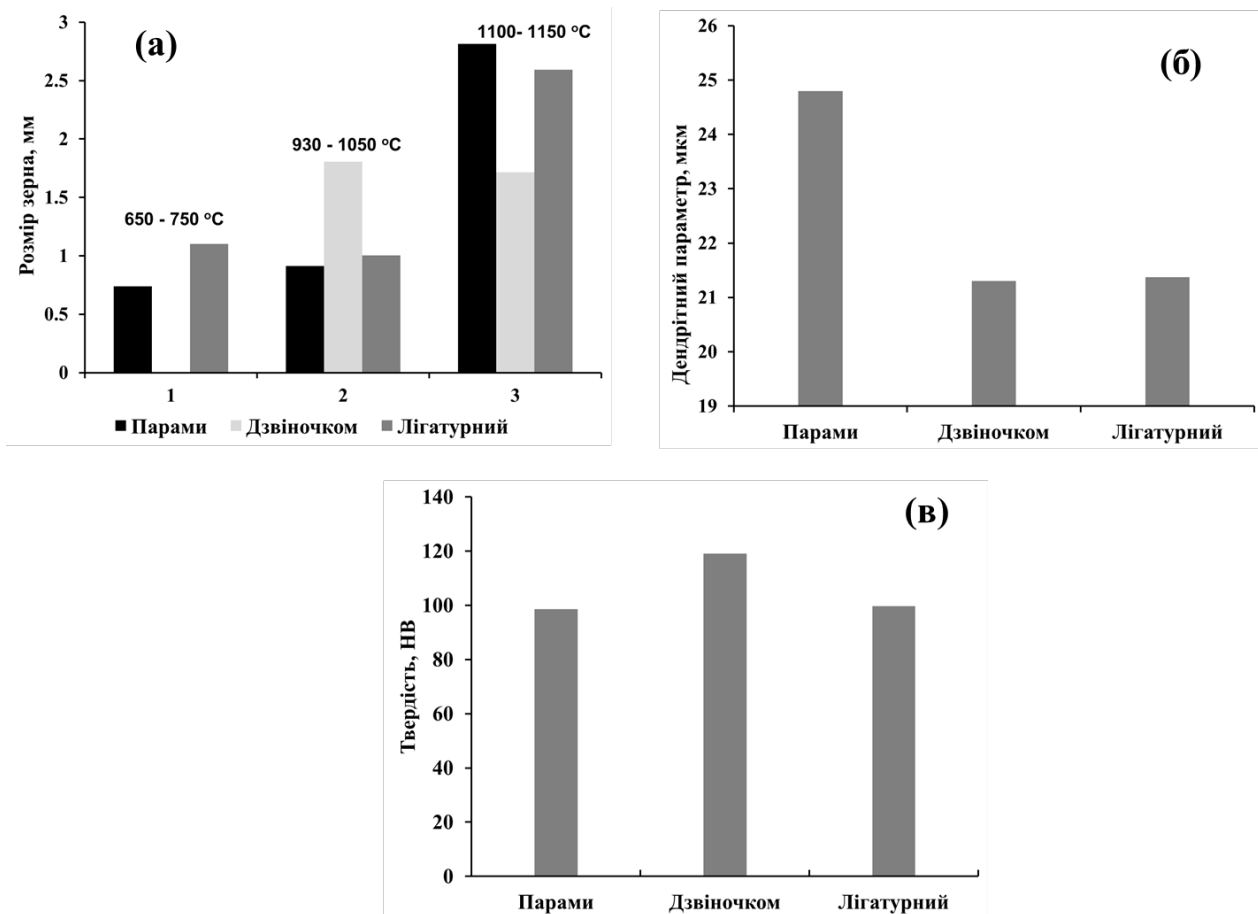


Рис. 3.23. Вплив метода введення цинку в розплав сплаву системи Al-Mg-Cu на розмір зерна (а) дендритний параметр (б), та твердість (в) литих зразків

Елементне мапування ділянки зразка за допомогою рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізу (рис. 3.25) показало, що цинк розподіляється рівномірно по ділянці шліфа і знаходиться в твердому розчині алюмінію. Елементи магній та мідь згідно проведеним дослідженням входять до складу інтерметалевих сполук Mg_2Si (рис. 3.24) та Al_2Cu (рис. 3.24 і 3.25). Хімічний склад в різних спектрах представлено в табл. 3.6.

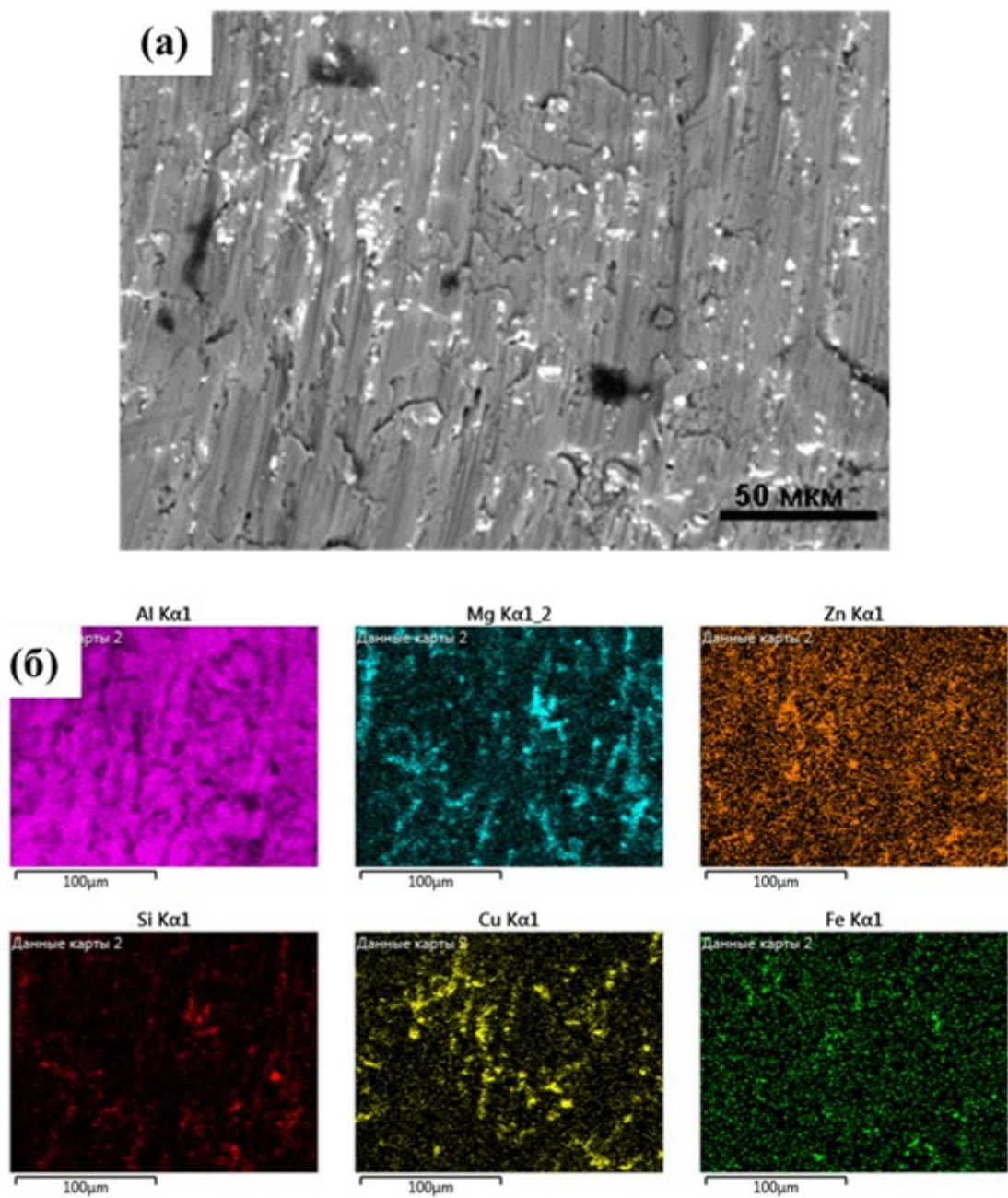


Рис. 3.24 (а) – електронне зображення зразка №2 (див. табл. 3.5) у відбитих електронах. Цинк в рідкий сплав системи Al-Mg-Cu вводили в пароподібному стані за допомогою реактора; (б) – мапа розподілу елементів на електронному зображенні

(а)

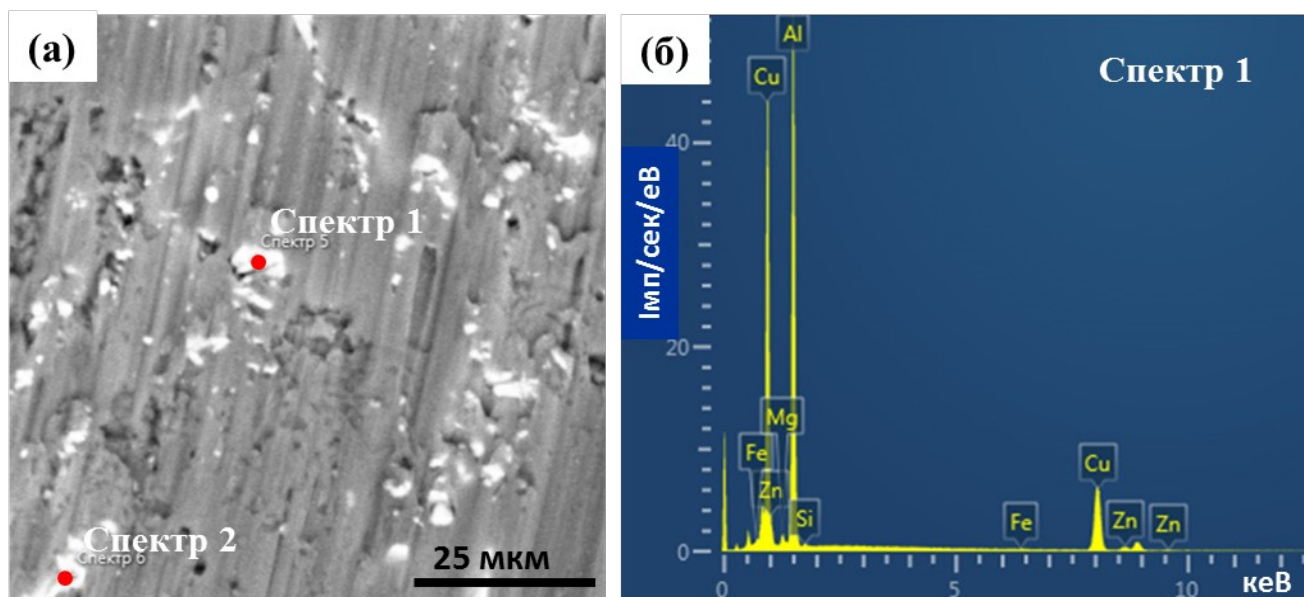


Рис. 3.25 (а) – електронне зображення зразка №2 (див. табл. 3.5) у відбитих електронах. Цинк в рідкий сплав системи Al-Mg-Cu вводили в пароподібному стані за допомогою реактора; (б) – енергорозсіювальний рентгенівський спектр 1 з інтерметалевої фази θ -Al₂Cu на зображенні (а)

Таблиця 3.6

Хімічний склад в різних спектрах

| Номер спектру | Елементи, % відносна атомна маса | | | | | |
|---------------|----------------------------------|-------|------|------|------|-------|
| | Al | Cu | Zn | Mg | Si | Fe |
| 1 | 71.55 | 24.57 | 1.62 | 1.81 | 0.39 | 0.065 |
| 2 | 74.13 | 20.74 | 3.57 | 1.18 | 0.25 | 0.13 |

3.3 Схема та конструкція установки для виробництва вторинного алюмінію

Переробку алюмінієвого шлаку здійснювали в установці на рис. 2.26, опис якої наведено нижче [98, 101, 121-123]. Вона складається з плавильної накопичувальної печі 1, в якій збирається і усереднюється розплавлений алюмінієвий сплав *Ал*. Піч закривається теплоізоляційною кришкою 101. Над плавильною накопичувальною піччю 1 розташовують збірний реакторний блок, який представляє електродугову вакуумну камеру 2. Блок електродугової вакуумної камери 2 складається з керамічного стакана 3 і сталевій планшайби 4. Стакан 3 герметично кріпиться до планшайби 4 і додатково ізолюється вогнетривкою ватою 102, котра вкладена всередину обичайки 103. Дно керамічного стакана 3 містить вбудовані вогнетривкі патрубки 5 і 6, які виконують функції трубопроводів. Трубопровід 5 є першим нагнітаючим трубопроводом і на ньому встановлено нагнітаючий лінійний асинхронний статор 8, а трубопровід 6 є другим, яким відкачують розплав алюмінію і на ньому розташовано відкачуючий лінійний асинхронний статор 9. У центральній частині електродугової вакуумної камери 2 встановлений електрод 10. Електроживлення на електрод здійснюється від однофазного силового трансформатора, вторинна обмотка якого приєднується одним кінцем до електрода, а другий контактує з розплавленим алюмінієм, який накопичується в печі 1. При роботі змінний струм від силового трансформатора може бути поданий на електрод 10 і пропущений по трубопроводах в розплав, що знаходиться в печі.

Зокрема, змінний струм може бути використаний для резистивного нагрівання потоку розплаву до температур, що становлять в межах інтервалу від $\sim 1820\text{ }^{\circ}\text{C}$, до $\sim 2250\text{ }^{\circ}\text{C}$, для сприяння одержанню металевого алюмінію.

Для подачі шлакової маси 11 у внутрішній простір камери 2 на планшайбі 4 змонтовано електромеханічний шнековий дозатор 12. Завантаження шлакової маси здійснюють в герметичний бункер 13 і потім по трубопроводу 14 шлак надходить в

шнековий дозатор. Зверху на планшайбі 4 встановлений датчик 15 газового тиску, який дозволяє контролювати газовий тиск всередині камери 2. Регулювання газового тиску всередині електродугової камери здійснюють за допомогою електромагнітного клапана 16 зв'язаного з цеховою системою відкачування вакууму.

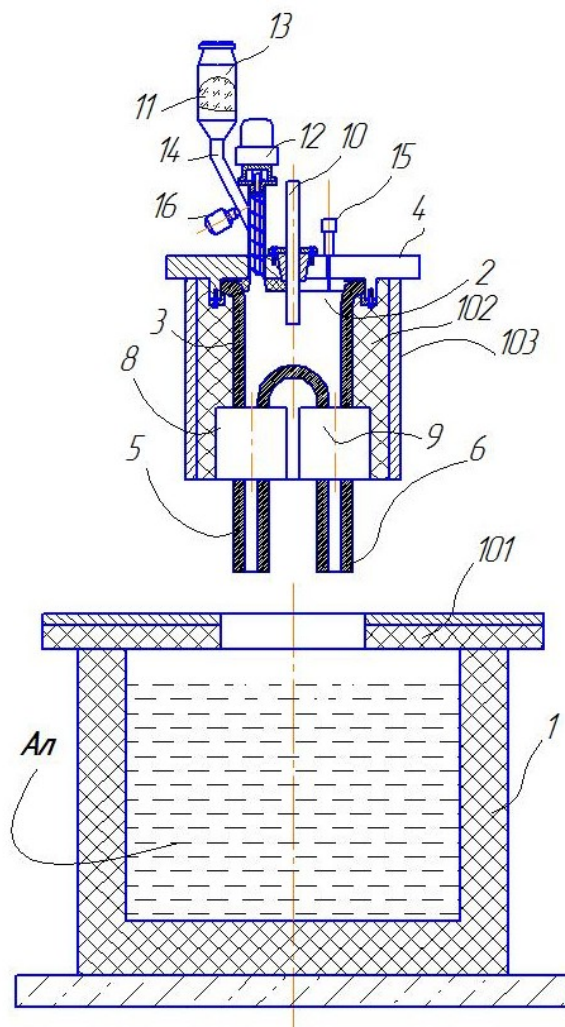


Рис. 3. 26. Основні модулі електротермічної установки для переробки алюмінієвого шлаку [98]. 1 – плавильна піч, 2 – вакуумна камера, 3 – керамічний стакан, 4 – сталевая планшайба, 5 і 6 – вогнетривкі патрубки, 7 – гідравлічний контур, 8 – нагнітаючий асинхронний статор, 9 – відкачуючий асинхронний статор, 10 – електрод, 11 – шлакова маса, 12 – електромеханічний шнековий дозатор, 13 – герметичний бункер, 14 – трубопровід, 15 – датчик газового тиску, 101 – кришка, 102 – вогнетривка вата, 103 – обичайка

Процес переробки алюмінієвого шлаку в електротермічній установці здійснюють наступним чином: перед початком роботи модуль електродугової камери 2 опускають на кришку 101, при цьому кінці трубопроводів занурюють в розплавлений алюміній, що знаходиться в печі 1 (рис. 3.27).

Після занурення трубопроводів в розплав включають систему відкачування газу і за допомогою датчика 15 контролюють тиск всередині робочого простору електродугової камери. В процесі зниження газового тиску всередині камери 2 розплавлений метал піднімається по трубопроводах у внутрішній простір камери, потоки розплаву всередині камери зливаються, і при цьому формується замкнутий гідравлічний контур 7, для безперервної циркуляції розплаву всередині камери. Для дотримання умов підтримки необхідної довжини електричної дуги H між електродом і поверхнею розплавленого металу, в процесі всмоктування розплаву з печі безперервно управляють і підтримують необхідний рівень газового тиску всередині камери.

Після того як розплав алюмінію піднявся в камері на необхідну висоту і зафіксовано необхідну відстань h між кінцем електрода і поверхнею розплаву включають нагнітаючий лінійний асинхронний статор 8 і одночасно з ним відкачуючий лінійний асинхронний статор 9. Під дією електродинамічних сил, що наводяться лінійними статорами в гідравлічному контурі 7 між піччю і електродуговою камерою збуджується контурна циркуляція розплаву. Включають електричну дугу і на поверхню алюмінієвого розплаву здійснюють подачу шлаку 11 для його переробки. Під дією потоку розплаву шлак 11 переміщується в зону горіння дуги. При переміщенні шлакової маси через зону горіння дуги, що має висоту h , досягається її прогрів електричною дугою; крім того, відбувається безперервне оновлення шлакової маси під електродом, де протікають основні фізико-хімічні процеси виділення алюмінію з шлаку. Одним з основних процесів, що сприяють виділенню алюмінію з шлаку, є катодне розпилення окисних плівок на

поверхні шлаку, що розвивається при впливі на нього електричної дуги змінного струму. Крім цього, в дуговому проміжку розвивається процес безпосереднього відновлення металевого алюмінію з його оксидів присутніх в шлаку. Відновлений алюміній абсорбується в потоці розплаву, що здійснює кругообіг в гідравлічному контурі. У процесі горіння електричної дуги для досягнення найбільшої ефективності регулюють довжину електричної дуги шляхом зміни газового тиску в електродуговій камері. При регулюванні тиску всередині камери змінюється висота поверхні розплаву і відповідно змінюється h – довжина горіння електричної дуги. Крім вигоди від розподілу струму при використанні процесу регулювання довжини дуги шляхом наближення або віддалення поверхні розплаву можуть бути також реалізовані й інші переваги. Наприклад, оскільки розплав здатний рухатися в напрямках вгору – вниз (наприклад, за допомогою зміни газового тиску всередині камери), то вертикальний рух інтенсифікує перемішування розплавленої ванни, що містить шлак в зоні горіння дуги.

Таким чином, висока ефективність відновлення алюмінію з шлаку, а також висока продуктивність процесу переробки досягається за рахунок підтримки циркуляції розплавленого металу між вакуумною електродуговою камерою і накопичувальною піччю і окрім цього діє додатковий вплив високих температур в зоні горіння дуги на шлак.

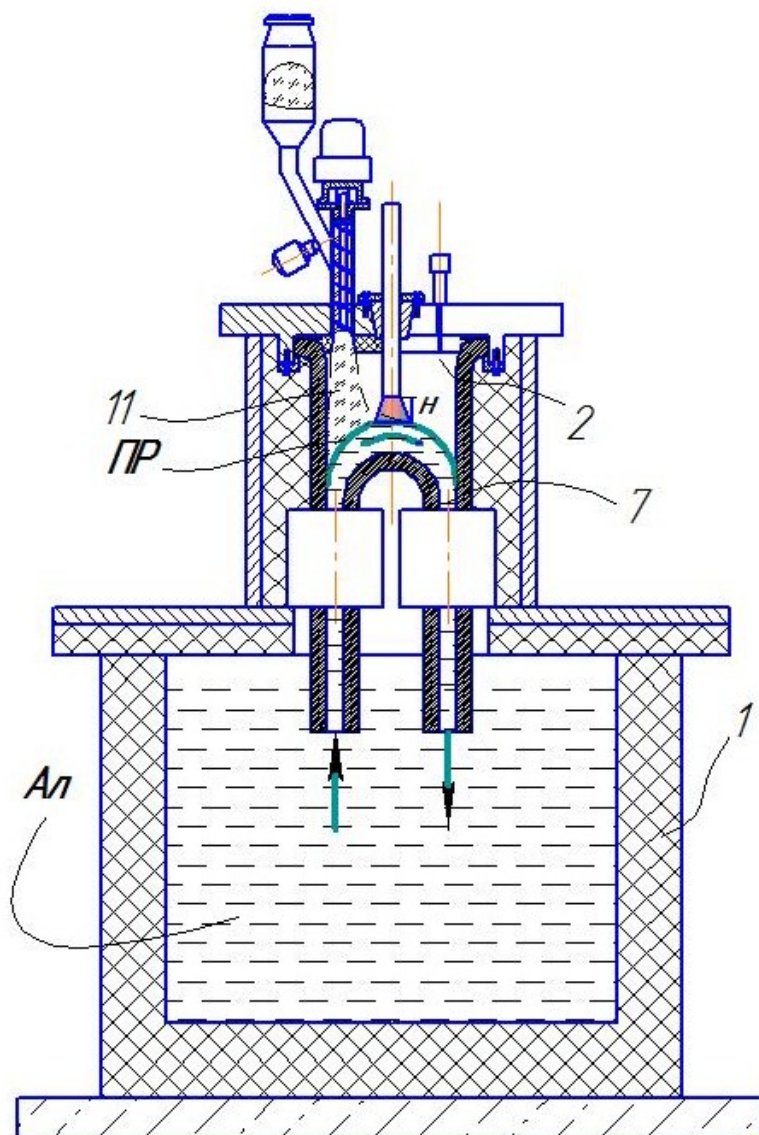


Рис. 3. 27. Схема електротермічної установки для переробки алюмінієвого шлаку

Конструктивні особливості установки для переробки алюмінієвого шлаку забезпечують також розширені можливості для отримання карбіду алюмінію з алюмінієвого шлаку. Також установка може експлуатуватися в межах інтервалу температур від приблизно 1910 °С до 1940 °С для вилучення вуглецю з отриманого металевого алюмінію.

Під час роботи установки забезпечується захист робочого простору в зоні роботи обслуговуючого персоналу; гази, що відкачуються з камери вакуумними водо-кільцевими насосами пропускають через систему очищення газів.

3.4 Аналіз теплових режимів установки

Відомо, що передача тепла з атмосфери печі до матеріалу – це функція, яка описує коефіцієнт теплообміну. У випадку плавки ливарного шлаку, процес теплообміну стає в деякому випадку дуже складним. Хоча розмір питомої поверхні матеріалу великий, поверхня, що нагрівається випромінюванням пічки – зовсім незначна. Більше того, рівень передачі тепла до розплаву алюмінію достатньо низький за рахунок великої кількості складових ливарного шлаку. Для того щоб досягти необхідний рівень теплообміну, шлак спільно з каустичною содою необхідно перемішувати.

Наприклад, горіння палива (мазут, природний газ) у об'ємі печі приводить до заповнення його продуктами горіння. При цьому тепло нагрітих газів випромінюванням та конвекцією передається шихті та футерівці. В зв'язку з цим поверхня футерівки також випромінює тепло, яке поглинається шихтою.

Таким чином, матеріал плавки, а саме шлак одержує тепло за рахунок випромінювання продуктів горіння палива, конвекції та відбивання від футерівки. В залежності від кольору шлаку частина цього тепла поглинається, частина відбивається і знову поглинається футерівкою та газами. Співвідношення вказаних потоків та результуюче значення потоку тепла до шлаку, що містить 2,0 % мас. Na_2CO_3 , залежить від ступеню забарвлення газів, шихти та площі футерівки. Остання представляє собою відношення сумарної внутрішньої поверхні печі $S_{\text{п}}$ до ефективної поверхні шлаку $S_{\text{ш}}$:

$$W = S_{\text{п}} / S_{\text{ш}} \quad (3.8)$$

Для розрахунків теплового балансу використовували залежності, які представлено в роботі [118]. Автори виходили з допущень, що продукти горіння палива повністю заповнюють вільний простір печі, а доля тепла, яку віддає футерівка в об'єм повністю компенсується теплом, яке одержує вона від продуктів горіння за рахунок конвекції, а ще температури і ступені забарвлення газу, футерівки та шихти не змінюються по довжині печі.

Таким чином, передачу тепла випромінюванням можна розрахувати згідно наступних рівнянь:

$$Q = k_{\text{г,ф,ш}} S_{\text{ш}} [(T_{\text{г}} / 100)^4 - (T_{\text{ш}} / 100)^4] \quad (3.9)$$

де $k_{\text{г,ф,ш}}$ (Вт / (м²·К⁴)) – коефіцієнт випромінювання газу і футерівки на поверхню шлаку, який визначають з наступного виразу:

$$k_{\text{г,ф,ш}} = 5,67 \varepsilon_{\text{ш}} [1 - \varepsilon_{\text{г}} + W] / \{ (1 - \varepsilon_{\text{г}}) / \varepsilon_{\text{г}} [\varepsilon_{\text{ш}} + \varepsilon_{\text{г}} (1 - \varepsilon_{\text{ш}})] + W \} \quad (3.10)$$

де $\varepsilon_{\text{ш}}$ – ступінь забарвлення шлаку; $\varepsilon_{\text{г}}$ – ступінь забарвлення продуктів горіння.

Температури газу $T_{\text{г}}$ і $T_{\text{ш}}$ в основному в печі залишаються постійними. При невеликій їх зміні можна визначити $T_{\text{г}}$, як середньоарифметичне значення початкової та кінчної температур. При достатньо великій зміні температури використовується геометричне усереднення:

$$(T_{\text{г}} / 100)^4 - (T_{\text{ш}} / 100)^4 = \{ [(T_{\text{г}}^{\text{п}} / 100)^4 - (T_{\text{ш}}^{\text{п}} / 100)^4] [(T_{\text{г}}^{\text{к}} / 100)^4 - (T_{\text{ш}}^{\text{к}} / 100)^4] \}^{1/2} \quad (3.11)$$

де $T_{\text{г}}^{\text{п}}, T_{\text{г}}^{\text{к}}$ – температури продуктів горіння газу спочатку та вкінці процесу; $T_{\text{ш}}^{\text{п}}, T_{\text{ш}}^{\text{к}}$ – початкова та кінцева температура шлаку.

Початкову температуру горіння палива розраховували шляхом множення теоретичної температури горіння на коефіцієнт 0,8. Кінцеву температуру брали на 50-100 °С вище температури нагрітого шлаку.

Підвищення ступеню яскравості полум'я природного газу досягається не повним його згоранням ($\alpha < 1$). В процесі нагрівання велику роль відіграє також футерівка, що має велике значення при малому $\varepsilon_{\text{г}}$ та ще менше при $\varepsilon_{\text{г}} > 0,6$. Значне зростання вільного об'єму печі може привести до неповного заповнення полум'ям та збільшення теплопередачі футерівки.

При розрахунках спільної теплопередачі в печі випромінюванням і конвекцією краще використовувати рівняння Ньютона:

$$Q_1 = \alpha_{\Sigma} (T_{\text{г}} - T_{\text{ш}}) \quad (3.12)$$

Q_1 – теплова навантаження на 1 м² поверхні нагріву, Вт/м²; α_{Σ} – сумарний коефіцієнт теплопередачі випромінюванням і конвекцією ($\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{кон}}$); $(T_{\text{г}} - T_{\text{ш}})$ – усереднена різниця температур продуктів горіння та шлаку.

Усереднену різницю температур брали як середньоарифметичне значення різниці температур газу і шлаку спочатку та в кінці нагріву:

$$(T_{\text{г}} - T_{\text{ш}}) = [(T_{\text{г}}^{\text{п}} - (T_{\text{ш}}^{\text{п}}) + (T_{\text{г}}^{\text{к}} - T_{\text{ш}}^{\text{к}})] / 2 \quad (3.13)$$

Якщо температури початку та закінчення процесу суттєво відрізняються, тоді усереднення проводять за геометричними правилами:

$$(T_{\text{г}} - T_{\text{ш}}) = [(T_{\text{г}}^{\text{п}} - (T_{\text{ш}}^{\text{п}}) \cdot (T_{\text{г}}^{\text{к}} - T_{\text{ш}}^{\text{к}})]^{1/2} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт теплопередачі випромінюванням визначається згідно наступного рівняння:

$$\alpha_{\text{в}} = k_{\text{г,ф,ш}} [(T_{\text{г}} / 100)^4 - (T_{\text{ш}} / 100)^4] / (T_{\text{г}} - T_{\text{ш}}) \quad (3.15)$$

Дуже часто замість $\alpha_{\text{в}}$ для розрахунків застосовують сумарний коефіцієнт теплопередачі, який має наступне значення:

$$\alpha_{\Sigma} = (1.05-1,10) \alpha_{\text{в}} \quad (3.16)$$

При цьому втрати палива складають приблизно 12 – 25 % від маси шлаку.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ В УДОСКОНАЛЕНІЙ УСТАНОВЦІ

4.1 Удосконалення процесів підготовки шлаків

Відомо, вихід шлаків при одержанні вторинного алюмінію з відходів алюмінієвого виробництва значно більший, ніж шлаків при переплавленні чорного металобрухту. У ньому містяться оксиди алюмінію, кремнію, заліза та інших дорогоцінних компонентів.

На підприємстві ТОВ «НВП Укркольормет» розроблено заходи, які спрямовані на переробку ливарного алюмінієвого шлаку безпосередньо в технологічному процесі виробництва. При цьому було споруджено ділянку, яка дозволяла переробляти алюмінієвий шлак та одержувати алюміній високої чистоти.

При переробці шлаку спочатку проводили його подрібнення. Для цього використовували ножову дробарку. Розмір шматків до подрібнення складав від 20 мм до 1000 мм, після подрібнення – 1 – 20 мм. Після подрібнення в суміш шлаку добавляли 2,0 % каустичної соди та перемішували протягом 30 хв. до одержання рівномірної суміші.

4.2 Екологічні аспекти технології переробки ливарного алюмінієвого шлаку

Конструкційні матеріали на основі кольорових металів та їх сплавів, знаходячись у різних умовах експлуатації, піддаються корозійним руйнаціям, що призводить до зниження їхньої міцності, скороченню терміну служби, зниженню якості і зовнішнього вигляду матеріалів [125]. Існують внутрішні та зовнішні чинники ушкодження. До першого відносяться чинники, які зв'язані з природою

матеріалу: хімічний склад, структура, внутрішні напруги і міжкристалічні дефекти. До інших відносяться склад середовища і зовнішні умови (температура, тиск, швидкість руху відносно корозійного середовища та ін.). Щодо алюмінію, то вважається, що він стійкий до корозії в забрудненому сірчистим оксидом середовищі. Це пов'язано з тим, що на його поверхні утворюється інертна оксидна плівка, яка захищає метал від хімічної взаємодії з SO_2 . При руйнуванні кірки з Al_2O_3 за рахунок великої концентрації твердих мікрочасток в оточуючому середовищі та при одночасній наявності в атмосфері SO_2 та може протікати наступна хімічна реакція:



Тому у багатьох країнах світу здійснюється суворий контроль за вмістом SO_2 та аерозолів у викидах, але в Україні дана проблема не вважається серйозною.

Переробка та повторне використання промислових відходів та побічних продуктів сьогодні мають велике значення у будь-якій галузі, особливо у технології виробництва цементу та бетону. При виробництві алюмінію утворюється величезна кількість відходів, відомих як окалина, які використовуються для переробки та повторного вилучення алюмінію, що залишився. Встановлено, що шлак є токсичним і шкідливим відходом для довкілля, і, отже, переробка чи замикання цих відходів дуже важливі. Дрос в основному складається з оксидів та алюмінію, і при переробці використовується сольовий процес для переробки алюмінію зі шлаку.

Аналіз та розрахунки питомих викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря у процесі переробки ливарного алюмінієвого шлаку проводили за допомогою методик, які наведено в роботах [126-130].

В даній роботі основним технологічним обладнанням для переробки алюмінієвого шлаку служить газова відбивна піч ППА-2000, проектною

продуктивністю розплаву по 0,5 т/год (10 т/добу). Робочий простір печі являє собою прямокутну камеру, місткістю 2 тонни з нахиленим днищем (подом), умовно поділеним на 2 частини. У першій частині здійснюється розплавлення суміші шлаку з содою під дією 2-х газових пальників. Друга частина - заглиблена ванна, куди стікає розплавлений метал, який випускають крізь льотковий отвір. Накопичення металу в ванні відбувається поступово - періодично завантажують нові порції шлаку й розплавляють його на нахиленому поді. Над ванною в боковій стінці печі знаходиться отвір, який з'єднує робочий простір печі з димовідвідним каналом, куди потрапляють продукти згоряння і димососом ДН-3,5 викидаються через димову трубу. Робота печі автоматизована.

Технологічне устаткування обладнане системою місцевої витяжної вентиляції з виходом на встановлену газоочисну установку у складі двох послідовно встановлених скрубєрів вологого очищення ЦВП-10 з ефективністю уловлення аерозолю оксиду алюмінію (Al_2O_3) 95% та частковим розчиненням у воді оксидів азоту.

При роботі печі в атмосферне повітря викидаються шкідливі речовини, які утворюються при спалюванні природного газу в газових агрегатах ливарної печі та від технологічного обладнання при переробці алюмінієвого шлаку, а саме: Al_2O_3 , CO_2 , NO_2 , пил, HCl , SO_2 , Hg та її сполуки (в перерахунку на ртуть, а також парникові гази – CH_4 , CO_2 , N_2O).

Система охолодження обладнана місцевою витяжною вентиляцією для відведення надлишку тепла. Відпрацьоване повітря проходить через спеціальний фільтр для очищення. Витяжні труби системи охолодження не є джерелами забруднення повітря.

Обладнання відповідає технічним нормам експлуатації. Фактична і проєктна потужність технологічного обладнання, яке є джерелом виділення шкідливих

речовин, час роботи обладнання, термін введення в експлуатацію та нормативний строк амортизації приведені в таблиці 4.1.

Для перевірки впливу процесу переробки алюмінієвого шлаку на стан атмосферного середовища був проведений розрахунок розсіювання ЗР (забруднюючі речовини) в приземному шарі повітря, який показав відсутність перевищення ГДК (гранично допустима концентрація) по оксиду вуглецю, діоксиду азоту, двооксиду сірки, хлориду водню та пилу.

Таблиця 4.1

Технічні характеристики обладнання

| № п/п | Назва установки | Термін введення в експлуатацію, рік | Номінальна потужність | Режим роботи, год/рік |
|----------|---------------------------------|--|--------------------------|---------------------------------|
| 1 | Газова відбивна піч ППА-2000 | 2000 | 10 т/добу | По мірі накопичення шлаку |
| 2 | Котел фірми Wissman | 2018 | 50 кВт | 4320 |

Крім того, для виявлення фактичних концентрацій ЗР на межі СЗЗ (санітарно-захисна зона) були виконані лабораторні дослідження за 300 м від джерела викиду. Результати лабораторних досліджень наведено в таблиці 4.2 [131].

Таблиця 4.2

Назва забруднених речовин та їх концентрація у повітрі

| № п/п | Забруднюючі речовини | Максимальна концентрація на межі СЗЗ, мг/м ³ |
|----------|----------------------------------|--|
| 1 | Оксид вуглецю (CO ₂) | 0,90 |
| 2 | Двоокис азоту (NO ₂) | 0,02 |
| 3 | Пил (зважені речовини) | 0,07 |
| 4 | Хлорид водню (HCl) | Не виявлено |

В таблиці 4.3 представлено сировину та допоміжні матеріали, які необхідні для випуску продукції.

Таблиця 4.3

Основні компоненти технологічного процесу переробки ливарного
алюмінієвого шлаку

| № п/п | Сировина, допоміжні матеріали | Призначення | Умови зберігання | Річне використання, тонн | Наявність документації, що регламентує вимоги санітарного законодавства |
|----------|---|---------------------------------------|---------------------|--|---|
| 1 | Алюмінієвий ливарний, шлак | Виробництво вторинного алюмінію | Ливарний цех | По мірі накопичення алюмінієвого ливарного шлаку | [132, 133] |
| 2 | Каустична сода (Na ₂ CO ₃) | Переробка шлаку | Склад | 2, 0 % від маси шлаку | [134] |

Характеристики устаткування та викидів забруднених речовин в атмосферне повітря від технології переробки ливарного алюмінієвого шлаку представлено в таблицях 4.4 і 4.5.

Таблиця 4.4

Характеристика устаткування для очищення газів

| Номер джерела викиду | Клас | Найменування ГОУ |
|----------------------|---------------------------|------------------|
| 1 (вхід) | Клас вологий Код 13110 | Скрубер ЦВП-10 |
| 2 (вихід) | Клас вологий Код 13110 | Скрубер ЦВП-10 |

Таблиця 4.5

Характеристики викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря

| Забруднюючі речовини, за якими проводиться газоочищення | | Витрага на вхіді в ГОУ, $\text{м}^3/\text{с}$ | Максимальна на вхіді в ГОУ, $\text{мг}/\text{м}^3$ | Ефективність η | Витрага на виході з ГОУ, $\text{м}^3/\text{с}$ | Максимальна на виході з ГОУ, $\text{мг}/\text{м}^3$ |
|---|---|---|--|---------------------|--|---|
| Код | Назва | | | | | |
| <u>03000</u> 2902 | Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом | 0,97 | 118,12 | 95 | 1,03 | 5,91 |
| <u>03000</u> 2902 | Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом | 2,36 | 26,2 | 95 | 2,47 | 1,31 |

В таблиці 4.6 наведено фонові концентрації забруднюючих речовин.

Оцінку впливу ЗР на стан атмосферного повітря проводився за результатами розрахунків розсіювання в установленому законодавством порядку: на межі санітарно-захисної зони, в контрольних точках найближчої житлової забудови шляхом порівняльного аналізу відповідності фактичних викидів ЗР зі встановленими нормативами граничнодопустимих викидів.

Гігієнічним критерієм для визначення граничнодопустимих викидів ЗР в атмосферу є відповідність їх розрахункових концентрацій на межі СЗЗ гігієнічним нормативам.

Оцінку впливу ЗР на стан атмосферного повітря проводився згідно методики, яку представлено в роботі [6].

Таблиця 4.6

Стан забруднення атмосферного повітря

| №, п/п | Забруднююча речовина | Гранично допустима концентрація, мг/м ³ | Фонова концентрація, мг/м ³ |
|-----------|---|--|--|
| 1 | Оксид вуглецю | 5,0 | 0,8 |
| 2 | Оксиди азоту в поррахунку на діоксин азоту | 0,2 | 0,015 |
| 3 | Сірчистий ангідрид | 0,5 | 0,2 |
| 4 | Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок недиференційованих за складом | 0,5 | 0,1 |
| 5 | Хлорид водню | 0,2 | 0,08 |
| 6 | Оксид алюмінію | 0,01 | 0,04 |
| 7 | Оксид міді | 0,002 | 0,008 |

Коефіцієнт рельєфу місцевості прийнято рівним 1, оскільки в районі розташування установки для переробки ливарного алюмінієвого шлаку відсутні перепади висот, які перевищують 50 м на 1 км.

Розрахунки розсіювання викидів забруднюючих визначали за допомогою формули [130]:

$$(М/ГДК) > \Phi; \Phi = 0,01 \text{ Н при } H > 10 \text{ м}; \Phi = 0,1 \text{ при } H \leq 10 \text{ м} \quad (4.2)$$

де М – сумарне значення викиду від усіх джерел підприємства, г/с;

ГДК – максимальна разова гранично допустима концентрація мг/м³;

Н – середньозважена по підприємству висота джерел викидів, м.

Розрахунки показали, що в атмосферному повітрі концентрація діоксиду азоту перевищує 0.2 ГДК, решти $ЗР \leq 0,05$ ГДК.

Таким чином встановлено, що викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від ділянки переробки алюмінієвого ливарного шлаку на території підприємства та на межі розрахункової санітарно-захисної зони (300м) менше ніж гранично-допустима концентрація для атмосферного повітря населених місць та не матиме значного шкідливого впливу на оточуюче середовище, при умові виконання санітарних та технологічних вимог до експлуатації.

Достатність розмірів розрахункової санітарно-захисної зони підтверджується розрахунком очікування забруднення атмосферного повітря, виконаними за діючими методиками розрахунку розсіювання в атмосфері шкідливих речовин, що містяться у промислових викидах.

Рівень вмісту шкідливих домішок в атмосферному повітрі не перевищує гігієнічних нормативів поза межами санітарно-захисної зони, які встановлено для атмосферного повітря населених місць.

4.3 Економічні показники при переробці відходів алюмінієвого виробництва

В розрахунках використовували дані з вартості матеріалів на 15.07. 2023 року. Згідно розрахунків, які наведені в розділ 3, визначили вартість технологічного обладнання для реалізації проекту (табл. 4.7) та послуг по монтажу та введенню в експлуатацію.

В подальшому для оцінки економічного ефекту від створення, виробництва вторинного алюмінію з ливарного алюмінієвого шлаку визначаються витрати основних та допоміжних матеріалів, які наведено у табл. 4.8.

Численність виробничого персоналу плавильної, формувально-заливальної ділянки та їх річний фонд заробітної плати (ФЗП) складуть **5 чол. та 725760 грн.** відповідно. При цих показниках ФЗП в тонні ливарного шлаку складе **2880 грн./тонну**, а середня заробітна плата – **576 грн/чол.**

За умови прогресивної форми оплати та доплат в розмірі 30% сумарний річний фонд заробітної плати, середня заробітна плата та ФЗП в тонні ливарного шлаку складуть **943488. грн, 748,8 грн./ особу та 3744 грн./тонну** відповідно.

Таблиця 4.7

Перелік технологічного обладнання для реалізації проекту щодо організації
виробництва алюмінію з ливарного шлаку

| № | Найменування обладнання та робіт | Термін виконання | Вартість обладнання чи робіт, грн. з ПДВ |
|--|--|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 Технологічні процеси плавлення для одержання алюмінію з ливарного шлаку | | | |
| 1.1 | Установка для переробки алюмінієвого шлаку | 3 місяці з часу фінансування Проекту | 33266400 |
| 1.2 | Монтаж та введення в експлуатацію установки для переробки алюмінієвого шлаку | 4 місяці з часу фінансування Проекту | 873600 |
| | | 4 місяці з часу фінансування Проекту | 34140000 |

Таблиця 4.8

Перелік основних та допоміжних матеріалів для виробництва алюмінію
з ливарного шлаку

| № | Назва матеріалів | Од. виміру | Витрати на 1 т шлаку | Ціна за одиницю грн. | Вартість, грн. |
|---|---|----------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Футеровочна маса печі | кг | 5 | 79 | 395 |
| 2 | Алюмінієвий ливарний шлак | кг | 1000 | 10 | 10000 |
| 3 | Каустична сода (Na_2CO_3) | кг | 20 | 34,16 | 683,2 |
| 4 | Природний газ | м ³ | 852 | 19,75 | 16827 |
| 5 | Водопровідна вода | м ³ | 58 | 4,5 | 261 |
| 6 | Електрична енергія | кВт | 57 | 4,49 | 255,93 |
| | Всього | | | | 28422,13 |

Використовуючи данні, які наведені у таблицях 4.7 і 4.8 проведено розрахунок собівартості алюмінію, одержаного при переробці ливарного алюмінієвого шлаку, результати розрахунку наведено в табл. 4.9, у вигляді кошторису.

Таблиця 4.9

Кошторис собівартості одержання алюмінію з ливарного шлаку
на експериментальній установці

| Статті витрат | Сума, грн./ тонну |
|---|----------------------|
| Фонд оплати праці (ФЗП)* урахуванням додаткових оплат (30%) | 3744 |
| Нарахування на ФОП і ПФ (22,0 %) | 824 |
| Основні матеріали | 10000 |
| Допоміжні матеріали | 1078,2 |
| Накладні витрати (100% от осн. ФЗП) в т.ч. | 3744 |
| Витрати на централізоване обслуговування транспортом і забезпечення матеріалами (30%) | 1123,2 |
| Витрати на централізоване бухгалтерське обслуговування (5%) | 187,2 |
| Витрати на централізовану охорону (5%) | 187,2 |
| Витрати на заходи щодо охорони праці, техніці безпеки й протипожежну безпеку (5%) | 187,2 |
| Інші заводські витрати (5%) | 187,2 |
| Внутрішньоцехові витрати (50%), в. т.ч. приміщень (сумісництво або за договором з спец. організацією) | 1872 |
| Енергоносії, у т. ч. електроенергія (кВт/тон.) | 17343,93 |
| | |
| Собівартість | 36734,13 |

4.4 Розрахунок економічної ефективності переробки алюмінієвого шлаку

Розрахунок економічної ефективності переробки алюмінієвого шлаку, проводилось з використанням методик, що викладені в Наказі Мінфіну і Мінекономіки України (218/446 від 25.09.2001 р.) «Методика розрахунку

економічної ефективності витрат на наукові дослідження, розробку і впровадження у виробництво» і Наказі Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатизації (№18 від 13.09. 2010 р.) «Методичні рекомендації з комерціалізації наукових розробок створених в результаті науково-технічну діяльність» [135, 136]. Ці методики визначають ефективність і інвестиційну привабливість науково-технічних розробок за такими критеріям:

- чистий дисконтний прибуток і дохід;
- внутрішня рентабельність виробництва і продажів продукції;
- індекс чистого дисконтного прибутку;
- точка беззбитковості освоєння розробки підприємством.

Для розрахунку цих критеріїв використані дані, які представлені в розділі 4, що дозволило визначити основні економічні характеристики застосування розробок при реалізації даного Проекту.

В цьому випадку чистий дисконтний прибуток (P_V) визначається відповідно до рівняння:

$$t = T \cdot P_V = (R_t - S_t) \cdot 1 / (1 + r)^t \text{ або } P_V = C_F \cdot 1 / (1 + r) \cdot t \quad (4.3)$$

де R_t – чистий прибуток, отриманий від реалізації алюмінію в t - році складає 12572,54 тис. грн./ рік;

S_t – витрати для реалізації проекту в t — році;

r – розрахункова дисконтна ставка;

t – крок розрахунку, рік; C_F – поточна вартість прибутку в t - році, тис. грн.;

T – термін життєвого циклу проекту, років;

$T = 20$ років (мінімальний термін заміни ливарного обладнання в Західній Європі).

Для розрахунку величини (P_V) попередньо були визначені про разові витрати для реалізації Проекту ($З_i$), які склали 28450 тис. грн. Для визначення дисконтної

ставки r скористаємося кумулятивним методом.

В основі цього розрахунку дисконтної ставки r знаходиться дисконтна ставка Національного банку України, величина якої склала на 1 січня 2023 року 23,5%, а так само додаткові коефіцієнти ризику, значення яких представлені в табл. 4.10. У такому випадку величина дисконтної ставки (r) складе 25%.

Таблиця 4.10

Розмір дисконтної ставки при реалізації Проекту

| Фактори | Межі дисконтної ставки, % | Розрахункова дисконтна ставка, % |
|---|---------------------------|----------------------------------|
| 1. Розмір компанії | 0 – 3 | 0,10 |
| 2. Фінансова структура | 0 – 5 | 0,20 |
| 3. Виробнича і територіальна диверсифікація | 0 – 3 | 0,20 |
| 4. Диверсифікація клієнтів | 0 – 4 | 0,20 |
| 5. Рентабельність підприємства | 0 – 4 | 0,10 |
| 6. Якість управління | 0 – 4 | 0,10 |
| 7. Інші ризики | 0 – 5 | 0,60 |
| 8. Національний банк України | 23,5 | 23,50 |
| Всього | | 25,00 |

Відповідно до розрахунку та даними таблиць 4.11 і 4.12 чистий дисконтний прибуток (P_v) за період життєвого циклу Проекту (7 років з моменту початку інвестування) склав 39780,8 тис. грн. Визначити чистий дисконтний дохід (NPV)

можна за рівнянням:

$$N_{Pv} = P_v - I_0 \quad (4.4)$$

де I_0 – разові капітальні витрати і дорівнюють Z_i 28450 тис. грн.

Відповідно до розрахунку і за умови, що $I_0 = Z_{\text{заг.}}$ величина (N_{Pv}), склала: $N_{Pv} = 39780,8 - 28450 = 11330,8$ тис. грн.

Таке значення величини N_{Pv} дозволяє встановити головну умову привабливості проекту, коли N_{Pv} перевищує 1, тобто $(39780,8) / I_0 (28450) = 1,4$

Розрахунковий дисконтний прибуток наведено в табл. 4.11.

Для визначення індексу чистого дисконтного прибутку (I_R) скористаємося рівнянням:

$$t = T \cdot I_R = 1 / K_{\text{заг}} \quad (4.5)$$

$$(R_t - S_t) \cdot 1 / (1 + r)^t \quad (8,4) \quad t = 0$$

де R_t – чистий прибуток, отриманий від реалізації ливарної продукції в t - році (див. табл. 4.11), тис. грн;

S_t – витрати для реалізації проекту в t - році, тис. грн;

$D_{\text{о заг.}}$ – разові капітальні витрати на реалізацію проекту, тис. Грн.

В цьому випадку $K_{\text{заг}} = Z_{i.} = 28450$ тис. грн.

Тоді величина індексу чистої дисконтної прибутку (I_R) складе:

$$I_R = 49306,67 / (28450) = 1,73$$

Згідно з цим значенням I_R (1,73) доходи від вкладених Підприємством грошових коштів за період життєвого циклу Проекту склали 173%.

Таблиця 4.11

Величина дисконтного прибутку

| Найменування показника | Рік реалізації проекту | | | | | | | |
|--|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | Всього за 7 років |
| 1. Інвестиції по проекту, тис. грн. | 28450 | - | - | - | - | - | - | 28450 |
| 2. Дисконтна ставка | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | |
| 3. Коефіцієнт дисконту | 1,25 | 1,56 | 1,95 | 2,44 | 3,05 | 3.81 | 4,76 | |
| 3. Використано сировини, тонн | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 7000 |
| 4. Обсяг виробництва лиття тон | 510 | 510 | 510 | 510 | 510 | 510 | 510 | 3570 |
| 5. Повна собівартість, тис.грн. | 36734,13 | - | - | - | - | - | - | 36734,13 |
| 6. Дохід від реалізації продукції, тис.грн | 49306,67 | - | - | - | - | - | - | 49306,67 |
| 5.Чистий прибуток, отриманий від реалізації ливарного шлаку Р, тис. грн. | 12572,54 | | | | | | | 12572,54 |
| 6. Чистий дисконтний прибуток, Р _v , тис. грн. | 10058,03 | 8059,32 | 6447,46 | 5152,68 | 4122,14 | 3299,88 | 2641,29 | 39780,8 |

Розрахунок точки беззбитковості (Т_Б) при реалізації даного проекту, в якому інвестиції носять разовий характер, можна визначити за формулою:

$$T_B = K_{\text{заг}} / (C - s) \cdot (1 - k) \text{ або } T_B = K_{\text{заг}} / P, \text{ тонн}$$

де с, s – середньозважена ціна 96679,74 і собівартість однієї тонни виливків

відповідно 72027,70 грн / тонну

p – чистий середньозважений прибуток і становить з розрахунку на 1 тонну шлаку ($p = 12572540 \text{ грн} / 510 \text{ тонн}$) або 24652,04 грн/тонну;

k – податок на прибуток від реалізації ливарної продукції, $k = 18\%$ (0,18)

Тоді точка беззбитковості $T_b = 28450000 / (24652,04 * (1 - 0,18)) = 1407$ тонн

Розрахункова точка беззбитковості при реалізації проекту (T_b) дорівнює обсягу реалізації ливарної продукції 1407 тонн, що не перевищує 39% від життєвого циклу Проекту.

Термін окупності за класичною формулою визначається $P_p = I_0 / P_{vcp}$

Термін окупності з моменту початку інвестування даного проекту, за умови, що виробництво починається з 2-го року інвестування з об'ємом 510 тонн / рік для цих умов складе: $P_p = 28450 \text{ тис.} / (39780,8 / 7) = 5$ років

Отримані основні характеристики Проекту представлені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Економічні показники проекту «Переробка ливарного алюмінієвого шлаку

| № | Показники | Значення |
|----|--|----------|
| 1 | Обсяг виробництва, Π , тонн/рік | 510 |
| 2 | Чистий річний прибуток, P , тис. грн./рік | 12572,54 |
| 3. | Середньозважений чистий прибуток від реалізації однієї тонни алюмінієвого шлаку, p , тис. грн./ тонну придатного | 24,65 |
| 4. | Чистий дисконтний прибуток P_v , тис. грн. | 39780,8 |
| 5 | Разові інвестиції, I_0 , тис. грн. | 28450 |
| 6. | Дисконтна ставка, r , % | 0,25 |
| 7. | Життєвий цикл проекту, T , років | 20 |
| 8 | Чистий дисконтний дохід N_{Pv} , тис. грн. | 11330,8 |
| 9 | Індекс чистого дисконтного прибутку I_R | 1,73 |
| 10 | Точка беззбитковості T_b , тонн | 1407 |
| 11 | Термін окупності з моменту початку інвестування P_p , років | 5 |

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виробництво алюмінію здійснюють багато країн світу і попит на нього весь час зростає. При цьому його виробники діляться на первинних (виробників первинного алюмінію та його сплавів) та вторинних (які виробляють продукцію з первинного алюмінію), а також тих, хто здійснює вторинну переробку з відходів алюмінієвого виробництва. Переробка вторинного алюмінію в даний час виділилася в самостійну галузь промисловості, яка називається вторинна металургія. Завданням вторинної металургії алюмінію є промислова переробка брухту, відходів, шлаків та інших видів вторинної сировини. В даний час обсяг виробництва вторинного алюмінію складає приблизно 30 % від загального світового виробництва алюмінію
2. В роботі було використано синхронний термічний аналізатор STA 449F1 Jupiter фірми NETZSCH (Німеччина). Він дозволяє проводити дослідження в двох режимах: «зразок» (без урахування теплофізичних характеристик тигельної системи) та «зразок з корекцією» (з урахуванням теплофізичних характеристик тигля). Для проведення досліджень в режимі «зразок з корекцією» попередньо необхідно дослідити зміну теплоємності тигельної системи та еталону в тих же умовах (атмосфера, швидкість нагрівання, температурний інтервал), в яких планується досліджувати зразок, а потім прилад автоматично враховує ці показники під час вимірів.
3. Досліджено вплив кількості карбонату натрію та спільно Na_2CO_3 та NaCl (кількість карбонату була сталою, а концентрація хлориду натрію змінювалась) на металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку. Встановлено, що зміна добавок хлориду натрію не привела до суттєвого покращення показників технологічного процесу.
4. Визначено необхідну та достатню кількість карбонату натрію в процесі переробки шлаку алюмінієвого виробництва. Встановлено, що його добавка біля 2,0 % мас.

част. в суміш достатня для протікання технологічного процесу. При цьому металургійний вихід алюмінію склав приблизно 49-51 %.

5. Методами електронної мікроскопії та хімічного аналізу досліджено аналіз алюмінієвих зразків, які одержано з ливарного шлаку і показано, що вони в основному містять Al в кількості від 98,16 % мас. до 99,02 % мас. Щодо домішок, то це головним чином кремній та залізо. Їх кількість неоднозначна, а в деяких зразках їх концентрація вища в 2-3 рази ніж у алюмінієвому дроті. Це ймовірно пов'язано з вихідною шихтою, що використовується в процесі плавки.

6. Досліджено мікроструктури алюмінієвих зразків, які одержано з ливарного шлаку. В багатьох з них спостерігається голчаста склетоподібна евтектика та голки алюмініду заліза. В усіх досліджених матеріалах існують одного складу евтектика та подібні хімічні сполуки.

7. Методом диференційно скануючої калориметрії досліджено фазові переходи, а методом оптичної мікроскопії- мікроструктуру алюмінієвих зразків, які одержано в результаті переробки ливарного алюмінієвого шлаку. Встановлено, що використання даних методів підтверджує той факт, що даний метод одержання алюмінію приводить до одержання його порівняно високої чистоти.

8. Розроблено схему та конструкцію установки для виробництва вторинного алюмінію. Показано, що висока ефективність відновлення алюмінію зі шлаку та висока продуктивність процесу досягається за рахунок підтримки циркуляції рідкого металу між вакуумною електродуговою камерою і накопичувальною піччю та окрім цього дією додаткового впливу високої температури в зоні горіння дуги на шлак.

9. Представлено сумарний тепловий баланс установки для переробки ливарного алюмінієвого шлаку, у якому виходили з допущень, що продукти горіння палива повністю заповнюють вільний простір печі, і що доля тепла, яку віддає футерівка в об'єм повністю компенсується теплом, яке одержує вона від продуктів горіння за

рахунок конвекції і що температури і ступені забарвлення газу, футерівки та шихти не змінюються по довжині печі.

10. Встановлено, що викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від промислової ділянки на території підприємства та на межі розрахункової санітарно-захисної зони менше ніж гранично-допустима концентрація для атмосферного повітря населених місць та не матиме значного шкідливого впливу на оточуюче середовище. Рівень вмісту шкідливих домішок в атмосферному повітрі не перевищує гігієнічних нормативів поза межами санітарно-захисної зони. Концентрація забруднюючих речовин становить: оксиди азоту (оксид та діоксид азоту) у перерахунку на діоксид азоту не перевищує значень 0.2 ГДК; решта ЗР - не перевищує - 0,05 ГДК.

11. Виконано оцінку економічного ефекту від створення виробництва вторинного алюмінію з ливарного алюмінієвого шлаку. Чистий дисконтний прибуток складає 39780,8 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Михайленко О.Ф. Регулювання пропорцій та ефективності внутрішнього ринку промислової продукції. Автореф. дис. к.е.н. Київ, 2004. 20 с.
2. Алюминий. Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%B9>. – дата выборки 28.07.2019.
3. Бредихин, В. Н. Алюминий вторичный. Монография / В. Н. Бредихин, Г. Г. Корицкий, В. Ю. Кушнеров, А. И. Шевелев. Донецк: ДонНТУ, 2019. 444 с.
4. 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-aluminum-industry/Analyz_mirovogo_rinka_2017_prognoz_2018_do_2021.pdf. – Дата выборки 25.07.2019.
5. Чернавина Д.А. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Д.А. Чернавина, Е.А. Чернавин, А.В. Фаллер, М.Ю. Зданович. Молодой ученый. 2018. № 17. С. 206-210.
6. Савицкий К. В. Переработка шлаков вторичного алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rusnauka.com/SND/Tecnic/1_savickiy%20k%20v.doc.htm. – Дата выборки 02.08.2019
7. Металлургия и вторичная металлургия алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/metallurgiya-alyuminiya/681-poluchenie-alyuminiya.html>. - Дата выборки 30.07.2019
8. Технологические схемы переработки лома и отходов алюминия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://uchebnikfree.com/ekologiya/tehnologicheskie-shemyi-pererabotkiloma-62897.html>. - Дата выборки 30.07.2019.

9. О мировой алюминиевой промышленности на сайте РУСАЛа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://iv-g.livejournal.com/930562.html>. - Дата выборки 01.08.2019.
10. Вторичное сырье цветных металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://metallurgy.zp.ua/vtorichnoe-syre-tsvetnyh-metallov/>. - Дата выборки 01.08.2019.
11. Галушко А.М., Королев С.П., Трибушевский В.Л., Михайловский В.М., Трибушевский В.М., Шешко А.Г., Королев М.С. Некоторые особенности технологии и организации рециклинга алюминия и его сплавов // Литье и металлургия. – 2018. – № 1-2. – С. 122-127.
12. О повышении эффективности производства вторичных алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ukrbascompany.at.ua/index/o_povyshenii_ehffektivnosti_proizvodstva_vtorichnykh_aljuminievykh_splavov/0-135). - Дата выборки 01.08.2019.
13. Москвитин В.И., Николаев И.В., Фомин Б.А. Металлургия легких металлов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2005. – 416 с.
14. Беляев А.И. Металлургия легких металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.
15. Фомин Б.А., Москвитин В.И., Махов С.В. Металлургия вторичного алюминия. – М.: «ЭКОМЕТ», 2004. – 240 с.
16. Галевский Г.В., Кулагин Н.В., Минцис М.Я. Металлургия вторичного алюминия. – Новосибирск.: Наука, 1998. – 289 с.
17. А.С. № 753919, СССР, кл. С 22 В 7/00/ Способ переработки металлургических шлаков / Е.П. Капур, Л.Н. Медведева // Опубл.1980
18. Худяков И.Ф., Дорошкевич А.П., Карелов С.В. Металлургия вторичных тяжелых цветных металлов. – М.: Металлургия, 1987. – 528 с.
19. Чернявский И.Я. Шлаки цветной металлургии. – Л.: Наука, 1984. – 374 с.

20. Койбаш В.А., Резников А.А. Оборудование предприятий вторичной цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1976. – 232 с.
21. Шкляр М.С. Печи вторичной цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1987. – 216 с.
22. Кроне К. Рециклинг алюминия: от исходного материала до готового сплава – М.: АСТШ, 2003. – С. 68-72.
23. Худяков И.Ф., Дорошкевич А.П., Кляйн С.Э., Гульдин И.Т., Фомин Б.А. Технология вторичных цветных металлов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
24. Вторичные материальные ресурсы цветной металлургии. Лом и отходы цветных металлов. Справочник. – М.: Экономика, 1984. – 151 с.
25. Metal melting apparatus. Патент WO2010058172 (A1). 2010.
26. Device for melting aluminum swarf. Патент JPH03120322 (A). 1991.
27. Гогин В.Б., Шадаев Д.Н. Современные направления развития технологии рециклинга алюминия // Технология легких сплавов. – 2006. – № 4. – С. 101-118.
28. Трибушевский Л.В., Немененок Б.М., Румянцева Г.А., Римосhevский В.С. Анализ процесса плавки алюминиевой стружки и шлака в короткопламенной роторной печи // Литье и металлургия. – 2015. – № 2. – С. 42 -48.
29. System and method for melting light gauge metal stock. Патент CA2977480 (A1). 2015.
30. Лысенко А.П., Пузанов Д.С. Задачи и перспективы переработки оксидо-солевых отходов вторичной металлургии алюминия // Вестник МГОУ, М.: серия «Техника и технологии». – 2011. – №3. – С. 10-14.
31. Патент №2194778, РФ / Способ обеднения алюминиевого шлака / Архипов Е.А., Елкин С.Б., Жолкин А.Г. и др.// Оpubл. 20.12.2002.
32. Способ переработки высокоглиноземистых шлаков алюмотермического производства феросплавов. Патент РФ №2511556, опубл. 10.04.2014.

33. Businger A. Neues verfahren fur die aufarbeituag von aluminium kratzen // Metal. – 1961. – №10. – P. 1014-1019.
34. Патент США 4119476, С. 04 В 21/02, 1978.
35. Куценко С.А., Курдюмова Л.Н., Кубаткина Н.В. Комплексная переработка солевых алюмосодержащих шлаков. – Орел: Орел ГТУ, 2007. – 171 с.
36. Процесс извлечения алюминия из шлака. Патент Франции М 1324712, опубл. 02.03.1963.
37. Способ получения чистого алюминия из алюминиевого шлака. Патент США 3155494, опубл. 03.11.1964.
38. Ловх И.Л., Базилевский В.М., Окунев В.М., и др. Извлечение алюминия и окислов из солевых шлаков с помощью электромагнитных сил // Известия вузов. Цветная металлургия. – 1971. – № 1. – С.65-68.
39. Ловх И.Л., Базилевский В.М., Окунев В.М., и др. Исследование возможности обеднения расплавленных солевых шлаков алюминиевой плавки путем электромагнитного утяжеления. Т-ды и-та «Донриичермет», Донецк. – 1970. – Вып. 20. – С. 21-25.
40. Сладкова И.А. и др. Исследование вакуумной дистилляции некоторых бинарных хлористых расплавов // В сб. «Вакуумные процессы в цветной металлургии». – Алма-Ата: Наука, 1971. – С. 229-231.
41. Способ извлечения металла из шлаков. Патент РФ №2159295, опубл. 20.11.2000.
42. Dross presses. Патент US5882580 (A). 1999.
43. Волочко А., Овчинников В., Садоха М., Технологии и оборудование переработки алюминиевых отходов // Наука и инновации. – 2012. – №9(115). – С. 12-14.
44. Kononchuk O., Alekseev A., Zubkova O. and Udovitsky V. Scientific Background for Processing of Aluminum Waste // The Second International Innovative Mining Symposium, E3S Web of Conferences 21, 02003 (2017). DOI: 10.1051/e3sconf/20172102003.

45. M. Tladi, T. Mashifana, Chemical, Mechanical, and Durability of Composites Developed from Aluminum Slag // Key Engineering Materials. – 2023. – Vol. 947. – P. 139-146.

<https://doi.org/10.4028/p-c2soly> (ISSN: 1662-9795).

46. V de Souza Oliveira, DA do Nascimento, Luís Smith de Oliveira Castro, Thales Ruano Barros de Souza, Luan da Silva Serrão, Aluminum Slag Separation Process Analysis Through a Vibratory Machine in the Foundry Process // International Journal for Innovation Education and Research. – 2021. – P. 104-120. ISSN 2411-2933.

47. A.W. Bydąlek, M. Holtzer, Selected Aspects of the Assessment of the Quality of Slag // Archives of foundry engineering. – 2015. – Vol. 15. – Issue 1. – P. 9-12. 4

48. I. F. Selyanin, V. B. Deev, A. V. Kukharensky, Resource-saving and environment-saving production technologies of secondary aluminum alloys // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2015. – Vol. 56. – P. 272–276.

49. E. David, J. Kopac, Aluminum recovery as a product with high added value using aluminum hazardous waste // Journal of Hazardous Materials. – 2013. – P. 316– 324

50. Electroslag melting method for reprocessing of aluminium slag. Патент EP2331718 (B1). – 2015.

51. Amer A. Aluminum extraction from aluminum industrial wastes // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2010. – 62 (5). – P. 60-63.

52. Xiao Y. Aluminium Recycling and Environmental Issues of Salt Slag Treatment / Y. Xiao, [et. al.] // Journal of Environmental Science and Health. – 2012. – Part A 40 (10). – P. 1861-1875.

53. Wuth W. Characterizing the physical and chemical properties of aluminum dross / W. Wuth, [et. Al] // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 1997. – vol. 49. – P. 48-51.

54. Urbach R. Where are we now in the field of treatment of dross and salt cake from aluminum recycling // International Aluminium Recycling Workshop, Trondheim, Norway. – 2010. – P. 2-4.
55. Ramachandra Rao S. Resource recovery and recycling from metallurgical wastes. Elsevier. – 2006.
56. Gierek, A., Karwan, T., Rojek, J. & Bzymek, J. Results of test with decopperisation of slag from flash process // Rudy i Metale. – 2005. – R.50. – br 12. –P. 669-675.
57. Nakajima K., Nagasaka T. Material flow analysis of aluminum dross and environmental assessment for its recycling process // Materials Transaction. – 2007. – 48(8). – P. 2219-2224.
58. Drauet M.G. Comparison of salt-free aluminium dross treatment processes / M.G. Drauet, [et. Al] // Resources, Conservation and Recycling. – 2002. – 36 (1). – P. 61-72.
59. Yan X. Chemical and Electrochemical Processing of aluminum Dross Using Molten Salts // Metallurgical and Materials Transactions. – 2008. – B 39 (2). – P. 348-363.
60. Prillhofer R. Treatment of residues during aluminum recycling / R. Prillhofer, [et. al] // EPD Congres. M. TMS (The Minerals, Materials Society). – 2009. – P. 857-862.
61. M. Satish Reddy, D. Neeraja, Aluminum residue waste for possible utilisation as a material: a review // Sādhanā. – 2018. – №124. – Vol. 43. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1007/s12046-018-0866-2>.
62. Unger T. W. and Beckmann M. Salt slag processing for recycling, light metals. In: TMS Annual Meeting. San Diego, California. – 1992. – P. 1159–1162.
63. A. Agrawal, K.K. Sahu, B. D. Pandey, Solid waste management in non-ferrous industries in India // Resources, Conservation and Recycling. – 2004. – vol. 42. – P. 99–120.
64. M. Yoldi, E.G. Fuentes-Ordoñez, S.A. Korili, A. Gil, Efficient recovery of aluminum from saline slag wastes // Minerals Engineering. – 2019. – Vol. 140. – 105884. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105884>

65. P.E. Tsakiridis, Aluminium salt slag characterization and utilization – A review // *Journal of Hazardous Materials*. – 2012. – Vol. 217–218. – P. 1-10.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.052>
66. Б. М. Немененок, Г. А. Румянцева, Л. В. Трибушевский, С. П. Задруцкий, Влияние технологии плавки в короткопламенной роторной печи на состав пылегазовых выбросов // *Литье и металлургия*. – 2010. – №1-2. – С. 149-153.
67. Ueda M. Recovery of aluminum from oxide particles in aluminum dross using molten salt / M. Ueda, [et. Al] // *Journal of Applied Electrochemistry*. – 2005. – 35 (9). – P. 925-930.
68. Melting metal scrap in electric arc furnace of good operational effectiveness and durability. Патент DE19517151 (C1). 1996.
69. Моисеев Г.К., Казанцев Г.Ф., Барбин Н.М., Бродова И.Г., Ватолин Н.А. Взаимодействие силумина с ионными расплавами галогенидов щелочных металлов // *Расплавы*. – 1999. – № 2. – С. 35-38.
70. Селянин И.Ф., Деев В.Б., Кухаренко А.В. Ресурсо- и экологосберегающие технологии производства алюминиевых сплавов // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 2015. – № 2. – С. 20-25.
71. Ларионов Г.В. Вторичный алюминий. – М.: Металлургия, 1967. – 271 с.
72. Худяков И.Ф., Дорошкевич А.П., Кляйн С.Э. Технология вторичных цветных металлов. Уч. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1981. – 280 с.
73. Патент №6379418 (США). Рециклинг алюминиевого лома (Recycle of scrap aluminum) / D.T. Ireland. Оpubл. 30.04.2002.
74. Патент №2244027 (РФ). Способ переработки лома алюминиевых сплавов, содержащих магний. Оpubл. 10.12. 2005.
75. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Хосен Ри., Цецорина С.А., Пономарева К.В. Эффективные технологии обработки расплавов при получении литейных алюминиевых сплавов // *Литейщик России*. – 2012. – № 10. – С. 14-17.

76. Каленик О.Н., Немененок Б.М., Довнар Г.В., Трибушевский В.Л. Снижение концентрации железа во вторичных алюминиевых сплавах // *Металлургия машиностроения*. – 2004. – № 3. – С. 83-85.
77. Huber J. Wiederverwertung von Aluminium Abfallen // *Elutrotechnik (Schwier)*. – 1988. – № 9. – P. 83-85.
78. Under T.W., Beckmann M. Salt slag processing for recycling / E.R. Cutshal (Ed) TMS Annual Meeting San Diego California, March 1-5. Light metals. 1992. – P. 1159-1162.
79. Adeosun S.O., Sekunowo O.I., Taiwo O.O., Ayoola W.A., Machado A. Physical and mechanical properties of aluminium dros // *Advanced Materials*. – 2014. – Vol. 3 (2). – P. 6-10.
80. Шустров А.Ю., Мфценко Ю.А., Нагибин В.А. Разработка и внедрение комплексной технологии переработки лома аккумуляторных батарей // *Цветные металлы*. – 2004. – № 1. – С. 70-73.
81. Патент №2004607, РФ, кл. C22B7/00 Способ переработки отходов алюминиевых сплавов /В.М. Федотов, Г.А. Червов, Н.М. Лучинин // Оpubл. 1993.
82. Патент №2002831, РФ, кл. C22C1/02. Способ переработки шлака производства алюминия и его сплавов / В.М. Федотов, Г.А. Червов // Оpubл. 1993.
83. Федотов М.В., Селянин И.Ф., Федотов В.М. Пути повышения чистоты производства вторичных алюминиевых сплавов // *Литейщик России*. – 2007. – № 8. – С. 28-31.
84. Алексеев А.И. Научные основы переработки алюминий содержащих отходов // *Записки Горного института*. – 2016. – Т. 219. – С. 428-434.
85. Абдрахимов В.З. Применение алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения // *Новые огнеупоры*. – 2013. – № 1. – С. 13-23.
86. Патент №2430064, РФ. Керамическая масса для получения кислотоупоров. Оpubл. 27.09.2011. Бюл. № 27.

87. Патент 2412130, РФ. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича. Оpubл. 20.02. 2011. Бюл. № 5.
88. Патент №2385304, РФ. Керамическая масса для получения кислотоупоров Оpubл. 27.03. 2010. Бюл. № 9.
89. Патент №2430064, РФ. Керамическая масса для изготовления клинкурных керамических изделий. Оpubл. 27.02. 2012. Бюл. № 6.
90. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Технології переробки алюмінієвого скрапу // Science Rise. – 2019. – № 12 (65). – С. 47-54.
DOI: 10.15587/2313-8416.2019.189686.
91. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червонный И.Ф. Технологические особенности переработки алюминиевого шлака // Modern Scientific Researches. Yolnat PE, Minsk, Belarus. – 2019. – Р. 9-18.
DOI: 10.30889/2523-4692.2019-09-01-003.
92. Щерецький О. А. Теоретичні та технологічні основи одержання литих заготовок із композиційних матеріалів на основі алюмінію та цирконію з дисперсними частинками. Дис. д. т. н. Київ, 2007. – 453 с.
93. ДСТУ 3211-2009 (2009) Брухт і відходи кольорових металів.
94. Ko Y.C., Lin T.H. Emissions and efficiency of a domestic gas stove burning natural gases with various compositions // Energy Conversion and Management. – 2003. – V. 44. – №19. – Р. 3001-3014.
95. Довбенко В.В., Верховлюк А.М. Особливості одержання алюмінію з відходів ливарного виробництва // Процеси лиття. – 2020. – № 2 (140). – С. 3-7.
96. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Zhelesniak A.V., Chervonyi I.F. Investigation of the metallurgical yield of aluminum from foundry slag // Modern engineering and innovative technologies. – 2020. – Issue 12. – Part 2. – Р. 5-16.

97. В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, В.О. Верховланцева, Н.О. Паляничка, Є.В. Михайлов, О.О. Червоткіна Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси: Підручник. – Київ: Проф.Книга, 2021. – 468 с.
98. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Науково-методичний аналіз переробки алюмінієвих шлаків // Процеси лиття. – 2021. – № 3 (145). – С. 5-13.
99. Белиев А.И., Фирсанова Л.А. Одновалентный алюминий в металлургических процессах. – М.: Металлургиздат, 1959. – 142 с.
100. Dovbenko V.V., Verkhovliuk A.M. Features the Processing of Aluminum Slag with the use of Soda // Scientific basis of innovation. – 2023. – V. 19 (4). – P. 93-102.
<https://doi.org/10.15407/scine.19.04.093>
101. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Chervonyi I.F. Processing of aluminum slag. Heritage of European science: engineering and technology, informatics, transport, architecture. Monographic series «European Sciens». Karlsruhe, Germany. 2020. –Book 2. – Part 3. – P. 9-36.
DOI: 10.30888/978-3-9821783-5-6.2020-02-03-080.
102. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Д44 Справочник: ВЗТ: Т. 1 / Под. общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – № 3. – 992 с.
103. Захаров А.М. Диаграммы состояния двойных и тройных систем. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.
104. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
105. Золотаревский В.С., Белов Н.А. Металловедение литейных алюминиевых сплавов. – М.: МИСиС, 2005. – 376 с.
106. Немчинова Н.В., Тютрин А.М. Металлографическое исследование образцов алюминиевых ронделей // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 124-128.

107. Gowri S., Samuel F.H. Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy // Metallurgical and Materials Transactions A, Feb., 1994. – V. 25.– Is. 2. – P. 437-448.
108. І.В. Прокопович. Металознавство: Навчальний посібник. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.
109. Pellini W.S. Strain Theory of Hot Tearing. Foundry 80. – 1952. – №11. – P. 124-133, 192, 194, 196, 199.
110. Apblett W.R., Pellini W.S. Factors Which Influence Weld Hot Cacking. Weid. Res. Suppl. – 1954. – №33. – P. 83-90.
111. Borland J.C. Fundamentals of Solidification Cracking in Welds. Part 1, Part 2. Weld. Met. Fabrication. – 1979. – Vol. 47. – №1 end 2, Janiro 1979, Macro. – P. 19-29, 99-107.
112. Прохоров И.Н. Технологическая прочность металлов в процессе кристаллизации при литье // Литейное производство. – 1962. – № 4. – С. 24-27.
113. Новиков И.И. Горячеломкость цветных металлов и сплавов. – М.: Наука, 1966. – 296 с.
114. Лупырев И.И., Гуляев Б.Б. Исследование процесса образования горячих трещин в стальных отливках. Новое в теории и практике литейного производства. – М.: Машгиз, 1952. – С. 117-126.
115. Корольков А.М. Усадочные явления в сплавах и образование трещин при затвердевании. – М.: Из-во Академии наук СССР, 1957. – 72 с.
116. Корольков А.М. Влияние предусадочного расширения на горячеломкость сплавов // Литейное производство. – 1969. – № 11. – С. 32-35.
117. Трубицын Н.А. Механизм образования горячих трещин // Литейное производство. – 1962. – № 4. – С. 33-34.

118. Трубицын Н.А., Справник В.И., Ларионов В.А. Исследование образования горячих трещин при затвердивании металла в отливках арматуры. Новое в процессах литья. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 158-166.
119. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Каніболоцький Д.С., Довбенко В.В. Вплив технологічних факторів на властивості високоміцного алюмінієвого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2020. – № 1. – Т. 26. – С. 27-36.
120. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Строение и свойства алюминиевых сплавов в литом состоянии. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Металлургия, 1981. – С. 10- 12.
121. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Русаков П.В. Електротермічна установка для переробки відходів алюмінієвого виробництва // Процеси лиття. – 2021. – № 1 (143). – С. 11-18.
122. Патент України №124750 на винахід. Спосіб і установка для переробки алюмінієвого шлаку. Бюл. № 45 від 10.11.2021.
123. Заявка на винахід № а2020 00450 від 27.01.2020. Верховлюк А.М., Русаков П.В., Сергієнко Р.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Спосіб і установка для переробки алюмінієвого шлаку.
124. Тимофеев В.Н., Головенко Е.А., Кузнецова Е.В. Электротермические процессы и установки. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007. – 360 с.
125. Курдюмов А.В., Пикунов М.В., Чурсин В.М. Производство оливок из сплавов цветных металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 416 с.
126. Директива 2010/75/ЕС про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання забрудненню та його контролю). Люксембург: Бюро публікацій Європейського Союзу, 2017. – 1233 с.
127. Апостолюк С.О., Джигирей В.С., Апостолюк В.С. Промислова екологія: навчальний посібник. – К.: Знання, 2005. – 474 с.

128. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264 – XII. Закон України «Про екологічну експертизу» від 09.02.1995 № 45/95 – ВР.
129. Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. – Донецьк. – 2004, – Т.2. – 220 с.
130. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Ленинград: ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1987. – 68 с.
131. Довбенко В.В. Екологічні аспекти переробки алюмінієвого шлаку. Металознавство та обробка металів // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – № 3. – Т. 30. – С. 50-55.
<https://doi.org/10.15407/mom2023.03.050>
132. СТ СЄВ 1562 - 88 Катанка алюминиевая. Технические условия.
133. ДСТУ ГОСТ 12.3.027 – 2005. Работи ливарні. Вимоги безпеки.
134. ДСТУ 8145: 2015. Реактиви та особливо чисті речовини. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
135. Наказ Мінфіну і Мінекономіки України від 25.09.2001 р. № 218/446 «Методика розрахунку економічної ефективності витрат на наукові дослідження, розробку і впровадження у виробництво».
136. Наказ Державного комітету України з питань науки, інновацій та інформатизації від 13.09.2010 р. №18 «Методичні рекомендації з комерціалізації наукових розробок створених в результаті науково - технічної діяльності».

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

1. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Технології переробки алюмінієвого скрапу // ScienceRise. – 2019. – № 12 (65). – С. 47–54.

<https://doi.org/10.15587/2313-8416.2019.189686>

2. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червонный И.Ф. Технологические особенности переработки алюминиевого шлака // Modern Scientific Researches. Yornat PE, Minsk, Belarus. – 2019. – Р. 9–18.

<https://doi.org/10.30889/2523-4692.2019-09-01-003>

3. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Zhelesniak A.V., Chervonyi I.F. Investigation of the metallurgical yield of aluminum from foundry slag// International periodic scientific journal “Modern engineering and innovative technologies”. – 2020. – Issue 12. – Part 2. – Р. 5–16.

<https://doi.org/10.30890/2567-5273.2020-12-02-055>

4. Dovbenko, V., Verkhovliuk, A. Processing of aluminum slag with the use of soda // Science and Innovation. – 2023. – 19(4). – Р. 93–102.

<https://doi.org/10.15407/scine19.04.093>

Статті у журналах, що включені до переліку фахових видань України:

5. Довбенко В.В., Верховлюк А.М. Особливості одержання алюмінію з відходів ливарного виробництва // Науково-технічний журнал “Процеси лиття”. – 2020. – № 2 (140). – С. 3–7.

ISSN 0235-5884 (Print), ISSN 2707-1626 (Online)

6. Verkhovliuk A.M., Dovbenko V.V., Chervonyi I.F. Processing of aluminum slag // Колективні монографії «Erbe der europäischen wissenschaft" Heritage of European

science: engineering and technology, informatics, transport, architecture». Karlsruhe, Germany. – 2020. – Book 2. – Part 3. – P. 9-36.

DOI: 10.30888/978-3-9821783-5-6.2020-02-03-080.

7. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Каніболоцький Д.С., Довбенко В.В. Вплив технологічних факторів на властивості високоміцного алюмінієвого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu // Науково-технічний журнал “Металознавство та обробка металів”. – 2020. – № 1. – С. 27–36.

<https://doi.org/10.15407/mom2020.01.027>

8. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Русаков П.В. Електротермічна установка для переробки відходів алюмінієвого виробництва // Науково-технічний журнал “Процеси лиття”. – 2021. – №1(143). – С. 11–18.

<https://doi.org/10.15407/plit2021.01.011>

9. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Науково-методичний аналіз переробки алюмінієвих шлаків // Науково-технічний журнал “Процеси лиття”. – 2021. – №3(145). – С. 3–11.

<https://doi.org/10.15407/plit2021.03.003>

10. Довбенко В.В. Екологічні аспекти переробки алюмінієвого шлаку // Науково-технічний журнал “Металознавство та обробка металів”. – 2023. – № 3. – С. 50–55.

<https://doi.org/10.15407/mom2023.03.050>

Патент на винахід України:

11. Патент №124750 України. Спосіб і установка для переробки алюмінієвого шлаку / Верховлюк А.М., Русаков П.В., Сергієнко Р.А., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. // власник ФТІМС НАН України. – № а2020 00450 заявл. 27.01.2020. Опубл. 10.11.2021, бюл. №45.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Железняк О.В., Железняк В.В., Таранухіна Л.Д. Визначення металургійного виходу алюмінію із відходів ливарного виробництва.

XII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2020». Київ. 2020. С. 43.

13. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Червоний І.Ф. Особливості переробки алюмінієвого шлаку. *IV Міжнародна науково-технічна конференція «Прикладні науково-технічні дослідження. Виробництво та технології»*. Івано-Франківськ. 2020. С. 162–163.

14. Верховлюк А.М., Довбенко В.В., Железняк О.В., Железняк В.В. Металургійний вихід алюмінію з ливарного шлаку. *XVI Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2020»*. Запоріжжя. 2020. С. 31–32. 15. Dovbenko V.V., Verkhovliuk A.M., Chervonyi I.F. Processing of aluminum of slag. *International Scientific Conference «International Scientific Inregration '2020»*. Seattle, Washington, USA.- 2020. P. 21-24.

DOI: 10.30888/2709-2267.2020-4, ISBN 979-8-5776002-6-6.

16. Верховлюк А.М., Щерецький О.А., Довбенко В.В., Железняк О.В. Хімічний та фазовий склад алюмінію, одержаного з ливарного шлаку. *XVIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво. Металургія. 2022»*. Харків. 2022. С. 39–42.

ДОДАТОК Б
ПАТЕНТ УКРАЇНИ



ДОДАТОК В

АКТИ ПРОМИСЛОВИХ ПЕРЕВІРОК І ВПРОВАДЖЕНЬ

Узгоджено

Затверджено

Директор ФТІМС НАН України

Директор ТОВ "НВП "Укркольормет"

член-кор. НАН України

А.В. Нарівський

Лупін А.М.

« _____ » 2021 р.

« _____ » 2021 р.



Акт

про промислові випробування електротермічної установки для переробки
відходів алюмінієвого виробництва

Даний акт складено про те, що в період з 14.04.2021 р. по 30.05.2021 р. в Ливарному цеху підприємства в присутності завідувача виробництва Ливарного цеху Меженського О.М., начальника лабораторії спектрального аналізу Черномордової О.М., інженера з експлуатації устаткування газових об'єктів Рожанського В.П. і аспіранта Довбенка В.В. було випробувано електротермічну установку для переробки відходів алюмінієвого виробництва.

Проведені випробування показали її дієздатність та дозволили суттєво підвищити якість та металургійний вихід алюмінію (до 47,8 %).

Представник ФТІМС НАН України

д.т.н., проф. А.М. Верховлюк

аспірант В.В. Довбенко

Представники ТОВ "НВП "Укркольормет"

Завідувач виробництва ливарного цеху Меженський О.М.

Начальник лабораторії спектрального аналізу Черномордова О.М.

Інженер з експлуатації устаткування газових об'єктів Рожанський В.П.



Укркольормет

Науково-виробниче підприємство

ЗАТВЕРДЖЕНО

Директор Лупін А.М.

« 10 » « листопада » 2023 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Довбенка Володимира
Віталійовича

Даним актом підтверджується, що на виробничому підприємстві ТОВ «НВП» Укркольормет» використані результати дисертаційної роботи Довбенка Володимира Віталійовича «Оптимізація технології одержання алюмінію з вторинної сировини».

В процесі впровадження були використані технологічні режими металургійної переробки ливарного алюмінієвого шлаку. Результати роботи показали їх дієздатність та дозволили суттєво підвищити якість та металургійний вихід алюмінію.

Завідувач виробництва ливарного цеху
ТОВ «НВП» Укркольормет»

Меженський О. М.

ДОДАТОК Г

ДИПЛОМИ



