

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ВЕРЕТІЛЬНИК ОЛЕКСАНДР ВІТАЛІЙОВИЧ**

УДК 669.187.56

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**«Рециклінг небрикетованої стружки жароміцних сплавів і нержавіючої  
сталі методом електрошлакової тигельної плавки»**

Спеціальність – 136 «Металургія»

Галузь знань 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

**Олександр ВЕРЕТІЛЬНИК**

Науковий керівник

Біктагіров Фаріт Камілович, докт. техн. наук

Київ - 2025

## АНОТАЦІЯ

*Веретільник О.В.* **Рециклінг небрикетованої стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки –**  
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 «Металургія» (13 – Механічна інженерія) – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, 2025.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню особливостей та закономірностей електрошлакової тигельної плавки небрикетованої сталеві стружки, розробці ефективної технології переробки стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі та дослідженню якості отриманих злитків із відходів металу.

На основі аналізу різних видів електрошлакової переробки металеві стружки визначено, що найкращі техніко-економічні показники має спільна плавка небрикетованої стружки та витратного електрода з кускового брухту в електрошлаковій тигельній печі. Визначено оптимальні геометричні параметри електрошлакової тигельної плавки стружки та виконано аналіз поведінки титану та алюмінію при електрошлаковій плавці жароміцних сплавів та нержавіючої сталі з використанням шлаку АН-295. Розроблено основи технології електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП) небрикетованої стружки. Показано високу якість металу, що отримується при електрошлаковій переробці стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі.

У першому розділі відзначено важливість рециклінгу сталеві стружки, особливо високолегованої, енерго- та ресурсозбереження, а також зменшення забруднення навколишнього середовища. Виконано аналіз існуючих технологій переробки металевих відходів і показані проблеми плавки сталеві стружки в традиційних електродугових та індукційних печах, у тому числі необхідність брикетування стружки, значний вигар металу та окислення легуючих елементів. Наведено приклади застосування електрошлакових технологій для переробки сталеві стружки у брикетованому та небрикетованому вигляді, показано

переваги та перспективність такого виду плавки для рециклінгу стружки високолегованих сталей та сплавів.

У другому розділі обґрунтовано вибір вихідних металів та шлаків для проведення досліджень з електрошлакової переробки стружки, наведено їх характеристики та хімічний склад, дано опис використаного обладнання, та наведено методики проведення експериментів.

У третьому розділі наведено результати експериментів з переробки брикетованої та небрикетованої стружки різними методами – електрошлаковою плавкою (ЕШП), індукційною тигельною плавкою (ІТП) та ЕШТП. Показано, що найменші питомі витрати електроенергії 0,55-0,65 кВт·год/кг та найбільша продуктивність процесу 130-160 кг/год були при спільній плавці небрикетованої стружки та витратного електрода з кускового брухту в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг. Виконано дослідження з визначення важливого для розробки технології ЕШТП параметра – впливу відношення діаметра електрода, що переплавляється, до діаметру плавильного простору на кількість переплавленої стружки і встановлено, що максимальна кількість стружки переробляється при ступені заповнення плавильного простору від 0,45 до 0,6. Показано, що при ЕШТП внаслідок плавки стружки у шарі шлаку без контакту з атмосферою втрати на вигар становлять 2,0-2,5 % головним чином за рахунок вигорання сторонніх домішок та залишків змазувально-охолоджувальної рідини.

У четвертому розділі виконано термодинамічний аналіз поведінки титану при електрошлаковій плавці сталевих стружок з використанням шлаку АН-295. Показано, що при температурі 1600 °С з розрахунку рівноважний стан по титану, при концентрації в сталі 12Х18Н10Т 0,8 % Ті, настає при вмісті в шлаці АН-295 близько 5 %  $\text{TiO}_2$ . Експериментально визначено, що в умовах ЕШТП сталі 12Х18Н10Т з використанням шлаку АН-295 для збереження вмісту в металі 0,7-0,8 % Ті необхідно вводити в шлак 8 %  $\text{TiO}_2$ . Визначено, що питома електропровідність шлаку АН-295 з добавками 8 %  $\text{TiO}_2$  при 1600 °С є

найближчою до питомої електропровідності шлаку АНФ-6, при порівнянні зі шлаками, які широко застосовується при ЕШП.

У п'ятому розділі наведено результати переробки за розробленою технологією в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг небрикетованої стружки жароміцних сплавів на нікелевій основі EI602 та EI437Б і нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. При плавці стружки сплаву EI602 застосовувався шлак АН-295, сплаву EI437Б, з метою виключення втрат із металу титану, в шлак додавалось 3 %  $\text{TiO}_2$ , а нержавіючої сталі – 8 %  $\text{TiO}_2$ . Показано, що хімічний склад виплавлених сплавів та сталі, в тому числі за вмістом титану та алюмінію, відповідають вимогам технічних умов на дані марки металу. Виконані на заводі «Зоря»-«Машпроект» металографічні дослідження та випробування механічних властивостей показали високу якість жароміцних нікелевих сплавів, отриманих електрошлаковою тигельною плавкою зі стружки. З отриманого при плавці стружки сталі 12Х18Н10Т металу отримано дослідно-промислову партію литих заготовок у вигляді товстостінних плит розміром 360x400x65...100 мм, з яких виготовлено ножі для зняття ґрата при контактнo-стиковому зварюванні рейок рейкозварювальними машинами K922, K930 та K950. Дослідження якості нержавіючої сталі показало, що метал при електрошлаковій тигельній плавці рафінується від сірки, газів і неметалічних домішок, за хімічним складом і механічними властивостями повністю відповідає вимогам, що до нього пред'являються.

Виконані дослідження дозволили розробити ефективну технологію переробки стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки, яка є економічно доцільною і дозволяє отримувати якісний метал придатний для використання за призначенням.

*Ключові слова:* стружка, рециклінг, електрошлакова плавка, жароміцні сплави, нержавіюча сталь, титан, термодинамічна рівновага рафінування, хімічний склад, механічні властивості.

## ABSTRACT

*Veretilnyk O.V.* **Recycling of non-briquetted chips of heat-resistant alloys and stainless steel by electroslag crucible melting method** – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 136 “Metallurgy” (13 – Mechanical Engineering) – E.O. Paton Institute of Electric Welding of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of the features and regularities of electroslag crucible melting of non-briquetted steel shavings, the development of an effective technology for processing shavings of heat-resistant alloys and stainless steel, and the study of the quality of the ingots obtained from metal waste.

Based on the analysis of various types of electroslag metal shavings processing, it was determined that the best technical and economic indicators are achieved by the joint melting of non-briquetted shavings and a consumable electrode from lump scrap in an electroslag crucible furnace. The optimal geometric parameters of electroslag crucible melting of shavings were determined and the behavior of titanium and aluminum during electroslag melting of heat-resistant alloys and stainless steel using AN-295 slag was analyzed. The basics of the technology of electroslag crucible melting (ESCM) of non-briquetted shavings were developed. The high quality of the metal obtained during electroslag processing of heat-resistant alloys and stainless steel shavings was shown.

The first section notes the importance of recycling steel shavings, especially high-alloyed ones, energy and resource saving, as well as reducing environmental pollution. An analysis of existing technologies for processing metal waste was performed and the problems of melting steel shavings in traditional electric arc and induction furnaces were shown, including the need for briquetting shavings, significant burnout of metal, and oxidation of alloying elements. Examples of electroslag technologies usage for processing steel shavings in briquetted and non-briquetted form were given, and the advantages and prospects of this type of melting for recycling shavings of high-alloy steels and alloys were shown.

The second section provides data on the methodology for conducting experiments and research on electroslag processing of shavings, on a description of the equipment used, the content and characteristics of the steels, alloys and slags used.

The third section provides the results of experiments on the processing of briquetted and non-briquetted shavings by various methods - ESM, ICM, and ESCM. It is shown that the lowest specific electricity consumption of 0.55-0.65 kWh/kg and the highest process productivity of 130-160 kg/h were obtained with the joint melting of non-briquetted shavings and a consumable electrode from lump scrap in an electroslag crucible furnace with a capacity of 120 kg. A study was carried out to determine the parameter important for the development of ESCM technology - the influence of the ratio of the electrode being remelted diameter to the diameter of the melting space on the amount of remelted shavings and it was established that the maximum amount of shavings is processed at a degree of filling of the melting space from 0.45 to 0.6. It is shown that in ESCM, due to the melting of shavings in a slag layer without contact with the atmosphere, the losses on burnout are 2.0-2.5 %, mainly due to the burnout of foreign impurities and residues of the lubricating and cooling fluid.

In the fourth section, a thermodynamic analysis of the titanium behavior during electroslag melting of steel shavings using AN-295 slag was performed. It was shown that at a temperature of 1600 °C, the equilibrium state for titanium, with a concentration of 0.8 % Ti in steel 18Cr10NiTi, occurs when the content of about 5% TiO<sub>2</sub> in the AN-295 slag. It was experimentally determined that in conditions of ESCM of steel 18Cr10NiTi using AN-295 slag, in order to maintain the content of 0.7-0.8 % Ti in the metal, it is necessary to introduce 8% TiO<sub>2</sub> into the slag. It was determined that the specific electrical conductivity of AN-295 slag with additives of 8 % TiO<sub>2</sub> at 1600 °C is close to the specific electrical conductivity of ANF-6 slag, which is widely used in ESM.

The fifth section presents the results of processing using the developed technology in an electroslag crucible furnace with a capacity of 120 kg of non-

briquetted shavings of heat-resistant alloys on a nickel base EI602 and EI437B and stainless steel 18Cr10NiTi. When melting shavings of alloy EI602, slag AN-295 was used, for alloy EI437B, in order to eliminate losses of titanium from metal, 3 %  $\text{TiO}_2$  was added to the slag, and for stainless steel — 8 %  $\text{TiO}_2$ . It was shown that the chemical composition of the melted alloys and steel, including the content of titanium and aluminum, meet the requirements of the technical conditions for these metal grades. Metallographic studies and tests of mechanical properties performed at the "Zorya-Mashproekt" plant showed the high quality of heat-resistant nickel alloys obtained by electroslag crucible melting from shavings. From the metal obtained by melting 18Cr10NiTi steel shavings, a pilot-industrial batch of cast billets in the form of thick-walled plates measuring 360x400x65...100 mm was obtained, from which knives were made for removing burrs during resistance butt welding of rails using rail welding machines K922, K930 and K950.

The study of the quality of stainless steel showed that the metal is refined from sulfur, gases, and non-metallic impurities during electroslag crucible melting, and its chemical composition and mechanical properties fully meet the requirements imposed on it.

The research conducted allowed us to develop an effective technology for processing shavings of heat-resistant alloys and stainless steel using the electroslag crucible melting method, which is economically feasible and allows us to obtain high-quality metal suitable for use for its intended purpose.

*Keywords:* chips, recycling, electroslag melting, heat-resistant alloys, stainless steel, titanium, thermodynamic equilibrium, refining, chemical composition, mechanical properties.

## Список публікацій здобувача

### Статті у наукових фахових виданнях

1. Biktagirov, F.K., **Veretilnyk, O.V.**, Shapovalov, V.O. et al. (2023) Electroslag Processing of High-Temperature Alloy Shavings. *AIST Transactions*, Vol. 20, No. 9, 200-203. DOI: <https://doi.org/10.33313/TR/0923> (Scopus).

2. **Веретільник О.В.**, Біктагіров Ф.К. (2024) Електрошлакова переробка стружки нержавіючої сталі Х18Н10Т. *Сучасна електromеталургія*, 3, 31-35. <https://doi.org/10.37434/sem2024.03.04>

3. **Веретільник О.В.**, Біктагіров Ф.К. (2024) Аналіз використання електрошлакових технологій для рециклінгу сталевих стружок. *Метал та лиття України*, 1, 8-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.001>

4. Біктагіров Ф.К., **Веретільник О.В.**, Шаповалов В.О. та інш. (2021). Порівняльні показники різних методів переробки стружки високолегованих сталей і сплавів. *Сучасна електromеталургія*, 4, 11-15. <https://doi.org/10.37434/sem2021.04.01>

5. **Веретільник О.В.**, Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Ігнатов А.П. (2020). Технології переробки металевих стружок. *Сучасна електromеталургія*, 2, 31-38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.06>

### *Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

6. Біктагіров Ф.К., **Веретільник О.В.**, Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Ігнатов А.П. (2021) Переробка стружки нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки. Перспективні технології, матеріали й обладнання у ливарному виробництві: матеріали VIII науково-технічної конференції, Краматорськ, 21-24 вересня 2021, 24-25. ISBN 978-617-7889-00-6.

7. **Веретільник О.В.**, Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О. і інш. (2023) Застосування електрошлакової тигельної плавки для переробки стружки високолегованих сталей і сплавів. XV Міжнародної науково-технічної конференції «НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ», Київ, 2023, 80-86. ISSN 2524-0544



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. РЕЦИКЛІНГ МЕТАЛЕВИХ ВІДХОДІВ – ВАЖЛИВА СКЛАДОВА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ .....	17
1.1. Види легкового сталевих відходів і способи їх підготовки .....	17
1.2. Існуючі способи переробки металевої стружки .....	21
1.2.1. Проблеми переробки металевої стружки в дугових і індукційних печах .....	21
1.2.2. Електрошлакові технології переробки сталевих стружки .....	26
ВИСНОВКИ .....	38
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ.....	39
2.1. Вихідні матеріали і шлакоутворюючі.....	39
2.2. Обладнання для плавки металевої стружки.....	45
2.3. Методика проведення експериментів і досліджень.....	52
ВИСНОВКИ .....	55
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РЕЦИКЛІНГУ СТРУЖКИ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ І НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ .....	56
3.1. Компактування стружки під струмом .....	56
3.2. Електрошлаковий переплав та індукційна плавка компактованої стружки. ....	59
3.3. Переробка стружки методом електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП) .....	62
3.3.1. Розробка основ технології ЕШТП стружки нержавіючої сталі і жароміцних сплавів .....	62
3.3.2. Порівняльні показники різних способів переробки металевої стружки.....	68
ВИСНОВКИ .....	76

РОЗДІЛ 4. МЕТАЛУРГІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ ТА ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ .....	77
4.1. Термодинамічний аналіз поведінки титану та алюмінію при електрошлаковій плавці жароміцних нікелевих сплавів і нержавіючої сталі .....	77
4.2. Дослідження розподілу титану між шлаком та металом при ЕШТП нержавіючої сталі .....	85
4.3. Дослідження впливу вмісту оксиду титану на електропровідність шлаку АН-295 .....	90
ВИСНОВКИ .....	96
5. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛУ, ОТРИМАНОГО ПРИ ПЕРЕРОБЦІ СТРУЖКИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЛАВКИ .....	97
5.1. Якість металу, виплавленого із стружки жароміцних нікелевих сплавів EI602 та EI437Б .....	97
5.2. Якість металу, виплавленого із стружки нержавіючої сталі 12X18H10T .....	101
ВИСНОВКИ .....	110
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	112
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	114
ДОДАТКИ .....	120

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сьогоднішній день одним з важливих шляхів енерго- та ресурсозбереження є максимальне та ефективне залучення у виробництво різноманітних відходів, у тому числі металевих, які утворюються на стадіях виготовлення та обробки металопродукції. Це також важливо і з екологічної точки зору, так як при переробці таких відходів минається стадія видобутку руди та її збагачення, коли утворюється велика кількість шкідливих викидів, які забруднюють навколишнє середовище.

Серед різних видів металевих відходів особливе місце посідає стружка, яка представляє особливу складність для переробки, що пов'язано з малою насипною її щільністю, наявністю на поверхні залишків змазувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) і оксидної плівки, а також підвищеною забрудненістю сторонніми домішками.

Різної стружки у світі утворюється мільйони тонн, у тому числі стружки найбільш поширеного конструкційного матеріалу - сталі. Можливі втрати сталевих стружки на стадіях збору, підготовки, транспортування та переробки оцінюють у світовій економіці десятками мільярдів доларів на рік. Тому завдання виявлення можливих областей використання сталевих стружки та розробки ефективних технологій її рециклінгу належать до однієї із загальних проблем світової економіки та екології.

Для рециклінгу і повернення у виробництво найбільш привабливими з економічної точки зору є леговані і високолеговані сталі і сплави, що мають у своєму складі такі цінні легуючі елементи як нікель, хром, молібден, вольфрам, ніобій, ванадій і ін. Серед високолегованих сталей одними із самих широко застосовуваних в різних галузях промисловості є нержавіючі сталі типу 12Х18Н10, що мають у своєму складі порядку 10 % нікелю та 18 % хрому, виробництво яких у світі з кожним роком збільшується і в даний час досягає 60 млн тонн на рік.

Крім нержавіючої сталі велика кількість нікелю, 50-70 %, міститься в жароміцних сплавах на основі нікелю. Жароміцні ж сплави на сьогоднішній

день є досить дефіцитними і дорогими. Пов'язано це або з невеликими запасами руд їх складових у земній корі, або з трудомістким процесом їх отримання. Тому питання переробки, раціонального та більш повного використання різного виду таких високолегованих сталей і сплавів є дуже актуальними протягом останніх десятиліть.

Переробка сталеві стружки в широко розповсюджених у металургії дугових та індукційних печах вимагає її обов'язкового брикетування. Але навіть за плавки брикетованої стружки втрати на вигар становлять до 10 %, зокрема за рахунок окислення, іноді повного, цінних легуючих компонентів. Отриманий при цьому метал має низьку якість внаслідок підвищеного вмісту неметалевих включень і газів.

Добре відомі досить високі рафінуючі можливості електрошлакового переплаву, у тому числі коли мова йде про видалення з металу неметалевих і забруднюючих домішок, що особливо важливо при плавці стружки. Перевагою електрошлакової плавки також є низький вигар основного металу і легуючих елементів. Важливим є також і те, що електрошлакові технології дозволяють здійснювати плавку металеві стружки як в брикетованому вигляді, так і без її попереднього брикетування.

Зазначені переваги свідчать про перспективність електрошлакової плавки для рециклінгу сталеві стружки. Серед різних електрошлакових технологій особливу увагу заслуговує метод електрошлакової тигельної плавки, який позбавлений багатьох недоліків плавки стружки у водоохолоджуваному кристалізаторі. Він може бути досить ефективним для рециклінгу сталеві стружки, однак потребує більш досконалого вивчення особливостей та можливостей його застосування на практиці.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота була виконана відповідно до планів науково-дослідних та господарчих робіт, які виконувались у відділі «Плазмово-шлакової металургії» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, в яких автор брав безпосередню участь. А саме: "Дослідження процесів плавлення та

кристалізації металу при плазово-дуговій та електрошлаковій виплавці зливків із відходів тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену" (2018-2020 рр., № д/р 0118U100514; № 1.6.2.1.20.1); „Виплавка із відходів сталі 12X18H10T дослідних нержавіючих відливок і дослідження впливу технологічних параметрів на якість металу" (Договір № 515 від 08.01.2020 р.).

**Мета роботи та задачі дослідження.** Метою роботи є дослідження технологічних та металургійних особливостей переробки стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі способом електрошлакової тигельної плавки. Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі було необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз існуючих методів переробки металеві стружки, у тому числі з високолегованих сталей та сплавів;
- оцінити техніко-економічні показники різних електрошлакових технологій переробки металеві стружки, вибрати найбільш доцільний;
- встановити вплив геометричних параметрів електрошлакової тигельної печі та струмопідвідного електрода на умови плавки небрикетованої стружки;
- виконати термодинамічний аналіз та дослідження перерозподілу титану та алюмінію при ЕШТП зі шлаком АН-295 стружки нержавіючої сталі і нікелевих жароміцних сплавів;
- дослідити вплив вмісту оксиду титану в шлаці АН-295 на електропровідність шлакового розплаву;
- з урахуванням виконаних досліджень удосконалити технологічні режими, у тому числі склад шлаку та електричні параметри процесу, при ЕШТП жароміцних і нержавіючих сталей та сплавів;
- дослідити якість металу, отриманого способом електрошлакової тигельної плавки жароміцних сплавів EI602 та EI437Б і нержавіючої сталі 12X18H10T.

**Об'єкт дослідження:** технологічний процес електрошлакової тигельної плавки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі.

**Предмет дослідження:** електрометалургійні явища, особливості та закономірності при електрошлаковій тигельній плавці стружки жароміцних сплавів EI602 та EI437Б та нержавіючої сталі 12X18H10T.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань використовували аналітичні, розрахункові та експериментальні методи досліджень. Хімічний склад металів, вміст газів, металографічні дослідження та механічні властивості здійснювали із застосуванням стандартних методів визначення цих показників. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Дослідження особливостей електрошлакової тигельної плавки небрикетованої стружки дозволило отримати нові дані, які мають практичне та наукове значення, у тому числі:

- вперше експериментально визначено вплив співвідношення між діаметром витратного електрода і розміром плавильного простору на умови плавлення небрикетованої стружки та встановлено, що максимальне залучення стружки на плавку, що становить близько 50 % від загальної маси плавки, досягається при указаному співвідношенні від 0,5 до 0,56;

- вперше термодинамічними розрахунками обґрунтовано та практично підтверджено, що при електрошлаковій плавці сталі 12X18H10T з використанням шлаку АН-295 для збереження в металі концентрації титану в межах, що вимагаються технічними умовами, необхідно вводити в шлак від 5 до 8 %  $\text{TiO}_2$ ;

- вперше визначено вплив добавок оксиду титану на електропровідність шлаку АН-295 та встановлено, що шлак АН-295 + 8 %  $\text{TiO}_2$  при температурі 1600 °С має питому електропровідність  $0,95 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ , яка є близькою до питомої електропровідності широко застосовуваного при ЕШП шлаку АНФ-6, у якого цей показник знаходиться на рівні  $1,1-1,2 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

**Практичне значення отриманих результатів.** На підставі проведених досліджень розроблено основи технологічного процесу переробки стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі способом електрошлакової тигельної плавки. У тому числі визначені вимоги до геометричних параметрів плавильної ємності (тигля) і витратного електрода для забезпечення максимального залучення стружки на плавку, а також вимоги щодо складу шлаку для виключення втрат титану з металу. Дослідно-виробниче випробування на підприємствах ДП НВКГ «Зоря-Машпроект» та ДП «Зварювання тиском НТК ІЕЗ ім. Є.О. Патона» металу, отриманого зі стружки жароміцних сплавів EI602 і EI437Б та нержавіючої сталі 12X18H10T, підтверджують високу його якість і придатність для використання в основному виробництві.

**Особистий внесок здобувача.** За безпосередньою участю автора проведено комплекс експериментальних і розрахункових досліджень з метою визначення особливостей процесу електрошлакової тигельної плавки некомпактованої стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі. Ним на основі аналітичного огляду сформульовано мету та задачі роботи, розроблено методику проведення експериментів, які було проведено при його безпосередній участі. Автор самостійно обробляв отримані дані та обговорював результати з науковим керівником з метою удосконалення досліджень та досягнення мети роботи. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, переважно йому належить обґрунтування актуальності тих чи інших досліджень, обробка та обговорення результатів експериментів, а також зроблені висновки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях «Перспективні технології, матеріали й обладнання у ливарному виробництві», Краматорськ, 21-24 вересня 2021р. та «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», Київ, 2023 р.

**Публікації.** По темі дисертації у співавторстві опубліковано 7 друкованих праць, в тому числі одна у виданні, яка індексується в міжнародних

наукометричних базах даних Scopus, 4 у вітчизняних фахових наукових періодичних виданнях та 2 тези у збірниках міжнародних науково-технічних конференцій.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів основної її частини, загальних висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Вона викладена на 123 сторінках, включаючи 23 таблиці та 41 рисунок.



# РОЗДІЛ 1

## РЕЦИКЛІНГ МЕТАЛЕВИХ ВІДХОДІВ – ВАЖЛИВА СКЛАДОВА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

### 1.1. Види легковагових сталевих відходів і способи їх підготовки.

На сьогоднішній день одним з важливих шляхів енерго- та ресурсозбереження є максимальне та ефективне залучення у виробництво різноманітних відходів, у тому числі металевих, які утворюються на стадіях виготовлення та обробки металопродукції. Це також важливо і з екологічної точки зору, так як при переробці таких відходів оминається стадія видобутку руди та її збагачення, коли утворюється велика кількість шкідливих викидів, які забруднюють навколишнє середовище.

Внаслідок широкого використання в різних галузях промисловості металевих виробів відбувається утворення значної кількості брухту і відходів. Металевий лом утворюється в результаті природного зносу деталей машин і устаткування, а відходи - при розливанні металу в ливарних цехах (прибутки, літники, знімання, великі затверділі бризки і т. п.), а також при механічній обробці і обробці тиском заготовок і напівфабрикатів. Як правило останні - це некомпактні матеріали у вигляді стружки, дрібних обрізків, уламків і т.п.

Що стосується некомпактних відходів, то серед них особливе місце займає стружка. Металева стружка утворюється у процесі виробництва виробів та деталей із заготовок. Стружка є частинками металу, які відокремлені від заготовки в процесі фрезерування, свердління, різання або інших видів металообробки. Її на різних стадіях металообробки утворюється досить велика кількість [1, 2, 6, 8]. Так коефіцієнт використання нержавіючих сталей на металообробних підприємствах нерідко складає 0,5...0,7, а залишок, здебільшого стружка, потрапляє у відходи [12].

Серед різних видів металевих відходів саме стружка представляє особливу складність для переробки, що пов'язано з її малою насипною щільністю, наявністю на поверхні залишків змазувально-охолоджувальної

рідини (ЗОР) і оксидної плівки, а також з підвищеною забрудненістю сторонніми домішками [3].

Залежно від способу обробки сталевих заготовок – фрезерної, токарної або свердлильної та їх технологічних особливостей (швидкість, кут різь, матеріал ріжучої кромки та ін), а також механічних властивостей металу, стружка може мати різний вигляд. Зазвичай стружку класифікують на чотири основні види, яку ще в 1870 запропонував І. А. Тиме: стружка зливна (а), сколювання або суглобова (б), елементна (в), і надлому (г), які умовно показані на рис. 1.1 [4].

Елементна стружка (рис. 1.1 в) являє собою не пов'язані між собою частинки металу, що зрізаються, і найчастіше вона утворюється при обробці сталей зниженої пластичності і при великих товщинах зрізуваного шару. Утворення такої стружки відбувається також при середніх значеннях передніх кутів і швидкостей різання, що використовуються у виробничих умовах.

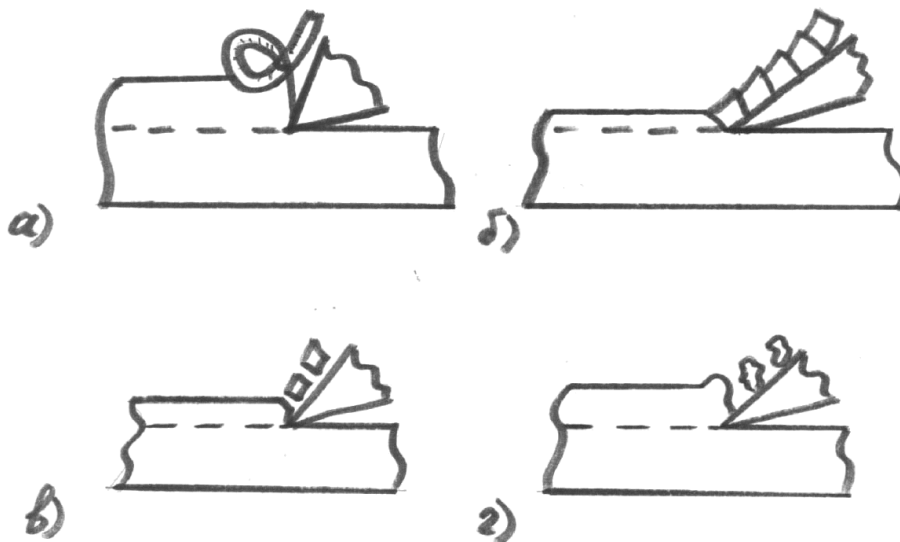


Рис. 1.1. Види металевої стружки.

Стружка, що складається з деформованих і взаємно зрушених елементів, досить міцно з'єднаних по площинах сколювання, утворюючи суцільну стрічку з яскраво вираженими зазубринами, називається суглобовою, ступінчастою або

сколювання (рис. 1.1 б). Вона нерідко утворює гвинтові витки більшого чи меншого діаметра.

При різанні пластичних металів з великими швидкостями різання і при зрізанні шару середніх і малих товщин пластична деформація металу, що зрізається, протікає більш рівномірно і пов'язані з нею внутрішні напруги теж розподіляються більш рівномірно по всьому деформованому об'єму. Тому відсутні умови, для періодично повторюваних через рівні інтервали робочого шляху різця, наростань напруги, що призводять до утворення стружки сколювання. Стружка, що утворюється в цьому випадку, найчастіше має вигляд безперервної стрічки без видимих зазубрин і виступів. Стружки такого типу називаються зливними (рис. 1.1 а).

При різанні крихких металів, наприклад, таких як чавуни, бронзи, особливо тверді сталі та сплави, утворення елементної стружки та зливних стружок практично не спостерігається. Крихкі метали під дією сили, що розвивається лезом різця, надламуються і руйнуються, утворюючи дрібні уламки, шматочки найрізноманітніших форм і розмірів, повністю відокремлені один від одного. Стружки такого типу називаються стружками надлому (рис. 1.1 г).

Зовнішній вигляд стружки певною мірою характеризує процес деформування та руйнування, що відбуваються при різанні різних матеріалів та за різних умов обробки.

На металообробних підприємствах при різанні конструкційних матеріалів можуть утворюватися різного виду стружки, у тому числі такі, які на вигляд значно відрізняються від прийнятої класифікації. Можна лише відзначити, що на вигляд стружки впливає пластичність металу, що обробляється. Зі збільшенням пластичності збільшується ймовірність утворення зливної стружки, рідше ступінчастої та рідко елементної – і навпаки.

У таблиці 1.1 наведено дані щодо насипної щільності різних видів стружки, з яких видно, що навіть найдрібніша елементна стружка буде при зберіганні

займати обсяг майже в 10 разів більше, ніж твердий метал, а зливна стружка ще приблизно в 5 разів більше [1].

**Таблиця 1.1.** Насипна щільність різних видів стружки

№ п/п	Вид сталюї стружки	Насипна щільність, т/м <sup>3</sup>
1	Елементна стружка (крихта, шматочки знятого металу, що не звиваються в спіральні кільця)	1,0 – 1,5
2	Елементна комкоподібна стружка	0,4 – 0,7
3	Спіральна (суглобова) стружка у формі гнучкого прута або пружини	0,3 – 0,6
4	Зливна стружка (великі спіральні та одношарові витки перетином 40-60 мм <sup>2</sup> , одношарові витки шаблеподібного вигляду діаметром 1,0 м і більше, пухкі клубки)	0,1 – 0,25

Вигляд і форма стружки визначає методи її збирання, зберігання та подальшої обробки. Основним методом попередньої підготовки стружки є її дроблення (подрібнення) як для підвищення насипної щільності, так і для зручності подальшого брикетування чи переплаву. При цьому стружка надлому або елементна у вигляді шматочків, сегментів, кілець, коротких завитків зазвичай не вимагає подрібнення перед переробкою тим чи іншим способом. А зливну та сегментну вже перед зберіганням у контейнерах для зменшення їх розмірів бажано дробити. Причому залежно від стану стружки застосовуються різного типу стружкодробилки: ножові, роторні, молоткові і т.п. Наприклад, суглобова стружка може розламуватися на фрагменти при терті витків між собою в барабані, що обертається. А для зливної стружки або стружки комкоподібної необхідно використовувати спеціальні одно і двовалкові ножові дробилки-шредери, які будуть її розривати і кришити (рис.1.2).



Рис. 1.2. Вид ножових дробилок для подрібнення сталеві стружки.

Різноманітної стружки у світі утворюється мільйони тонн, у тому числі стружки найбільш поширеного конструкційного матеріалу - сталі. Можливі втрати сталеві стружки на стадіях збору, підготовки, транспортування та переробки оцінюють у світовій економіці десятками мільярдів доларів на рік. Тому завдання виявлення можливих областей використання сталеві стружки та розробки ефективних технологій її рециклінгу належать до однієї із загальних проблем світової економіки та екології.

## **1.2. Існуючі способи переробки металеві стружки.**

### **1.2.1. Проблеми переробки металеві стружки в дугових та індукційних печах.**

При переробці стружки основним методом – переплавом, в якості плавильних агрегатів стосовно відходів найпоширеніших конструкційних матеріалів – сталей і сплавів на залізній і нікелевій основі, використовуються широко розповсюджені в металургії дугові сталеплавильні печі (ДСП) або індукційні тигельні печі (ІТП). Плавка стружки дуговим або індукційним методами мають свої особливості та можливості.

При плавці стружки в сучасних великовантажних дугових печах ємністю 50 і більше тонн її в не дробленому вигляді зазвичай завантажують в піч,

придавлюючи масивним шаром крупнокускового бруксту, що розташовується зверху. Таким чином зменшують об'єм, який займає стружка, і зменшують контакт з високотемпературними дугами, щоб зменшити втрати на вигар. Тим не менш, через застосування в таких ДСП кисневого дуття відбувається значний вигар стружки, за деякими даними до 30 % від поданої кількості на плавку [7]. Крім того, із стружки вигоряє більша частина легуючих елементів. Таким чином переробляється на великих металургійних і машинобудівних підприємствах власна стружка, що накопичується при виробничій діяльності. Незважаючи на значний вигар, економічно це виправдано, тому що виключаються витрати на дроблення стружки, її брикетування та транспортування на спеціалізоване підприємство з переробки такого виду відходів.

На невеликих підприємствах із дуговими печами малого тоннажу від 0,5 до 5 тонн, у тому числі постійного струму, стружку для переплаву необхідно дробити та брикетувати для механізованого завантаження в плавильний агрегат та зниження втрат на вигар. Проте і в цьому випадку безповоротні втрати за рахунок окислення та випаровування металу в зоні дії електричних дуг у середньому становлять не менше 10 % [7].

Аналогічні проблеми виникають і під час індукційної переробки стружки. Плавка насипом у небрикетованому вигляді можлива лише з залишенням частини рідкого металу у печі, так званого «болота». Крім того, для можливості завантаження в піч велика кручена стружка повинна піддаватися дробленню. Зважаючи на те, що стружка має розвинену поверхню, вона погано тоне в рідкому металі і її необхідно періодично занурювати, по суті, заштовхувати в піч. А це мало того, що трудомісткий процес, призводить до збільшення часу плавки і додаткових витрат електроенергії.

Втрати на вигар при індукційній плавці стружки нижче, ніж при дуговій плавці, але тим не менш досить високі - до 10 %. Найчастіше, як показує виробнича практика, пряме використання дешевої низькоякісної шихти - стружки розсипом в плавильних печах ливарних цехів призводить до зниження

всіх техніко-економічних показників плавки і перевищує вигоду від зниження вартості шихти. Аналогічні результати одержують і електрометалургійні підприємства [9].

Тому для переплаву в ДСП або ІТП стружку необхідно компактувати (брикетувати, пакетувати) для того, щоб уникнути підвищеного вигару в зоні дії дуги, підвищити ступінь заповнення плавильного простору печей і полегшити проведення процесу плавки.

Залежно від складу і виду стружки можуть застосовуватися різні види компактування [1]. В одних випадках достатньо холодного пресування, наприклад, при компактуванні стружки з малолегованої, низько і середньовуглецевої сталі. В інших випадках з метою отримання досить щільних брикетів необхідний підігрів матеріалу із застосування спеціальних видів нагріву для надання йому достатньої пластичності [10, 11].

Холодне брикетування, як правило, здійснюють у закритих матрицях без будь-яких зв'язуючих. Для отримання щільного брикету із сталевих стружок необхідно створити в прес-камері (матриці) преса тиск понад  $2500 \text{ кгс/см}^2$ , а для чавунної стружки – понад  $3500\text{--}4500 \text{ кгс/см}^2$ . Тим не менш, густина, що досягається, не перевищує  $5,0\text{--}5,5 \text{ кг/см}^3$ , що майже в 1,5 рази нижче густини твердого металу. Холодні брикети можуть мати низьку механічну міцність і легко руйнуватися в процесі транспортування та завантаження. Недостатня щільність брикетів є причиною того, що окисні гази проникають усередину брикету і, тим самим, збільшують ступінь окиснення металу.

Гаряче брикетування здійснюється для підвищення щільності брикетів і випалювання залишків ЗОР. Для цього дроблену стружку нагрівають до  $750\text{--}800^\circ\text{C}$  у камерних або шахтних печах і потім подають на прес брикетування.

Останнім часом для нагрівання стружки набувають поширення більш ефективні ротаційні печі з віссю обертання, що нахилиється, в яких забезпечується петлеподібний рух нагріваючих і відходящих газів та скорочується час досягнення матеріалом необхідної температури [13].

В результаті пресування стружки в гарячому стані за збереження величини тиску в межах 300-350 МПа густина зростає до 7250 кг/м<sup>3</sup> (для сталевих стружки). Відповідно зменшується пористість брикету, зростають теплопровідність та міцність (62,3–78,2 МПа), що важливо при переплавленні та транспортуванні. Дещо менша густина брикетів з чавунної стружки (до 6500 кг/м<sup>3</sup>), проте міцність, стійкість проти ударів та інші параметри також підвищуються.

Ціни на брикети холодного пресування зі сталевих та чавунних стружок у 2–2,5 рази вищі, ніж стружки розсипом, а гарячого пресування у 2–3 рази дорожче за холодне пресування [1]. Основну частку в собівартості гарячих та холодних брикетів становлять енерговитрати. Лінії брикетування займають великі виробничі площі, мають низький ККД. При цьому пред'являються високі вимоги до підготовки стружки перед пресуванням по гранулометричному складу і ступеню забрудненості сторонніми домішками.

Брикети гарячого пресування задовольняють в основному вимогам для подальшої плавки, але їх вартість стосовно недорогих малолегованих сталей знаходиться на рівні з вартістю первинних металів, а якість їм поступається, що робить використання гарячих брикетів нерентабельним.

Газове нагрівання для гарячого брикетування, особливо при високих температурах, в тій чи іншій мірі супроводжується не тільки вигаром металу, але і погіршенням його якості. Тому для дорогих високолегованих і високоміцних сталей, рециклінг яких спрямований на отримання не просто шихтової заготовки, а марочного металу, застосовуються інші методи нагрівання. У літературі найчастіше згадується електроімпульсний, електрофізичний та електротермічний методи пресування стружки [10,11]. У них нагрівання стружки короткочасними імпульсами або більш тривалими циклами поєднується з процесом пресування. При цьому отримуються або окремі брикети, або довгомірні заготовки для подальшого переплаву, наприклад, електропроменевого або електрошлакового [14].



Незважаючи на дороговизну виготовлення зі стружки брикетів, переплав їх у печах ДСП та ІТП дозволяє поліпшити всі техніко-економічні показники плавки та суттєво знизити втрати металу на вигар. Проте, і при використанні брикетованої стружки залишаються проблеми з якістю металу внаслідок підвищеного вмісту в ньому неметалевих включень і газів. Це вимагає проведення додаткових операцій рафінування, а при істотних втратах легуючих елементів, що особливо відбувається при плавці в електродугових печах, і долегування. Це, у свою чергу, вимагає наявності додаткового обладнання та призводить до збільшення трудомісткості переділу відходів, підвищення витрат матеріалів та енергоресурсів.

Втрати дорогих легуючих елементів, тим більше із витратами на брикетування, ставить під питання економічну доцільну переробки стружки високолегованих сталей та сплавів у печах ДСП та ІТП. Більш того, у ДСП та відкритих ІТП практично неможливо плавити метали, що містять високореакційні елементи, такі як хром, ванадій, ніобій, титан, алюміній та низку інших, зважаючи на їх інтенсивне окислення та значні втрати.

Тому ведуться роботи та дослідження з пошуку нових, ефективніших методів переробки сталевих стружки, особливо високолегованої. Так у роботі [15] виконана оцінка вигару хрому при переробці стружки сталі 10X18H9Л у відкритій індукційній печі, в дуговій печі постійного струму, в дуговій печі з подачею аргону через осьовий отвір у графітовому електроді і в дуговій печі із застосуванням аргону в якості плазмоутворюючого газу та плазматронів з вольфрамовим катодом.

Наведені у табл. 1.2 результати показують, що найбільші втрати хрому відбуваються при індукційній плавці – у металі залишається близько 10 % Cr при 18,5 % у вихідній стружці. Швидше за все такий високий вигар хрому пояснюється проведенням плавок без використання покривного шлаку, та ще й у печі з кислим футеруванням. Вдвічі менші втрати хрому при дуговій плавці і невеликі при дуговій, а по суті плазмовій, плавці, яка проводиться із застосуванням захисного газу. Тому автори, для зберігання складу сталі

10X18H9Л в межах марочного, в якості раціональних рекомендують два останні варіанти плавки стружки.

**Таблиця 1.2.** Втрати хрому при різних методах плавки сталі 10X18H9Л

№№ п/п	Варіанти плавки стружки	Втрати хрому, % абс.
1	Індукційна відкрита піч	8,7 – 10,9
2	Дугова піч постійного струму з графітовим електродом	4,8
3	Дугова піч постійного струму з подачею аргону через осьовий отвір у графітовому електроді	1,4
4	Дугова піч постійного струму з плазматроном з вольфрамовим катодом та подачею аргону	1,2

З точки зору запобігання окиснення металів при їх плавці найбільш ефективним є використання вакуумної металургії. Це вакуумно-індукційна (ВІП), вакуумно-дугова (ВДП) та електронно-променева (ЕПП) методи плавки. Однак дані процеси дорогі та їх використання для переробки некомпактних дрібнодисперсних відходів, тієї ж стружки, часто неможливе. Крім того, при вакуумній плавці відбувається інтенсивне випаровування елементів з високою пружністю пару, зокрема хрому.

Тому доцільним є використання більш прогресивних технологій здатних поліпшити як економічні показники плавки відходів, так і якість одержуваної металопродукції. Серед цих технологій можна виділити технології які засновані на застосуванні електрошлакового джерел нагріву.

### **1.2.2. Електрошлакові технології переробки сталевих стружки.**

Добре відомі досить високі рафінуючі можливості електрошлакової плавки, у тому числі коли мова йде про видалення з металу неметалевих і

забруднюючих домішок, що особливо важливо при плавці стружки. Витрати на електрошлаковий переплав завдяки простоті і надійності обладнання в кілька разів нижчі в порівнянні з електронно-променевою і плазмово-дуговою плавками. З огляду на це електрошлаковий переплав у різних варіантах був використаний для переробки сталевих стружки.

Так у роботах [14,16] приведені дані електрошлакового переплаву стружки сталей 12X18H10T та сплаву ЕП609. З огляду на те, що стружка з подібних високолегованих нержавіючих, жароміцних сталей і сплавів важко піддається брикетуванню, витратні електроди діаметром 100 мм отримували копактуванням стружки під струмом способом, описаним в роботах [11,17]. Переплав відбувався в кристалізатор діаметром 170 мм з використанням суміші шлаків АНФ-6 та АН-295. Отриманий таким методом метал злитків ЕШП по хімічному складу та механічним властивостям повністю відповідав вимогам технічних умов на ці сплави. Однак застосування спеціальних методів копактування вимагає відповідного обладнання, додаткових матеріальних та енергетичних витрат і не завжди може бути економічно доцільним.

В той же час електрошлакові технології дозволяють здійснювати плавку металевих стружки без її попереднього брикетування. Ґрунтуються вони на тому, що кожна частка стружки має розвинену площу поверхні при порівняно невеликій її товщині. Це забезпечує швидке розплавлення стружки при попаданні в рідкий шлак, що має температуру вище температури плавлення металу. Математичне моделювання та натурні експерименти показали, що при характерних для електрошлакового процесу температурах шлаку 1650-1750 °С час плавлення стружки у шлаковій ванні становить кілька секунд, а середня масова швидкість плавки не нижче, ніж швидкість плавки суцільного металевих електрода в печах ЕШП приблизно такого самого розміру [18,19].

При електрошлаковій плавці некомпактної шихти у вигляді стружки для підтримки електрошлакового процесу необхідно від джерела живлення (трансформатора) до шлаку підводити електричний струм. Як струмопідвідний

елемент найчастіше використовують графітований електрод і процес переплаву здійснюється так, як показано на рис. 1.3.

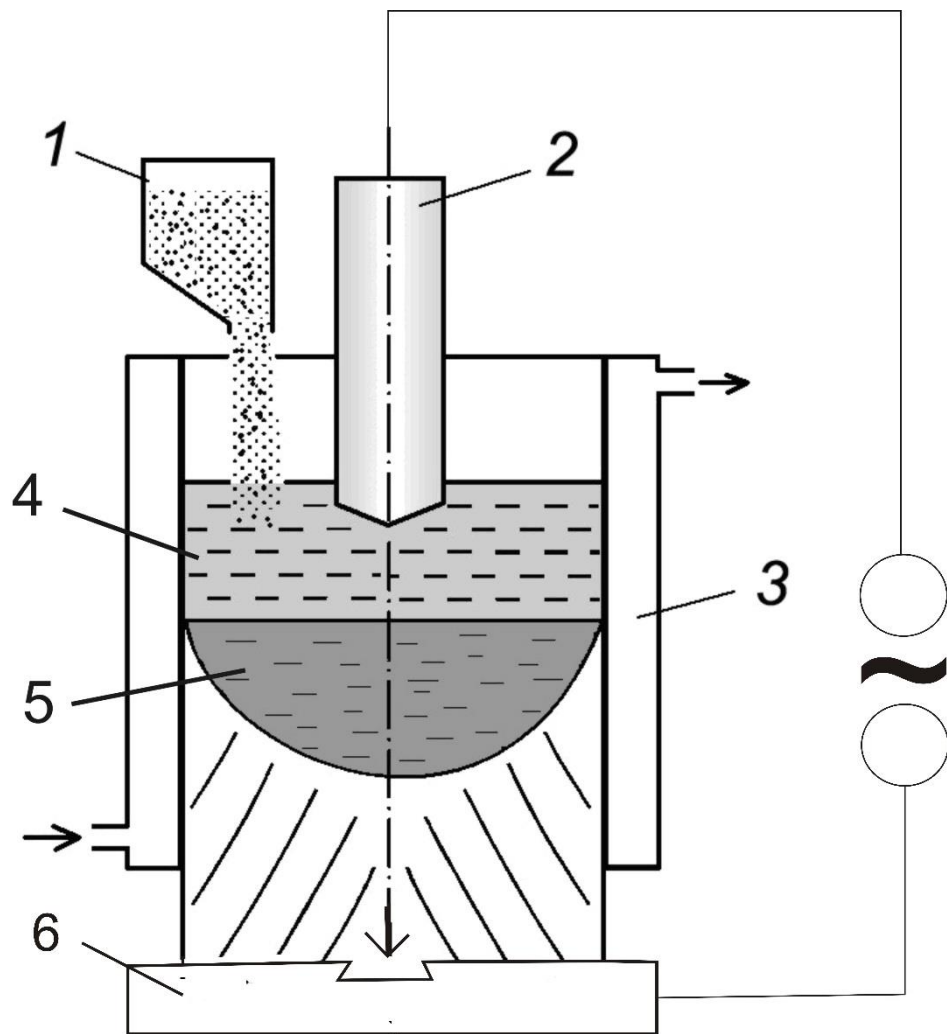


Рис. 1.3. Схема електрошлакової плавки стружки з використанням невитратного електрода в водоохолоджуваному кристалізаторі:

- 1 – бункер; 2 – невитратний електрод;
- 3 – водоохолоджуваний кристалізатор; 4 – шлакова ванна;
- 5 – металева ванна, 6 – піддон.

У літературі є відомості про переробку за вищенаведеною схемою стружки різних сталей. Так в роботі [20] наводиться приклад переробки стружки сталі Р6М5 в кристалізаторах діаметром 125 і 150 мм з використанням в якості струмопідводу графітових електродів діаметром 40 і 50 мм. Відзначається, що за хімічним складом виплавлений метал відповідає вимогам на сталь даної марки. Механічні властивості і стійкість фрез, виготовлених з

отриманих заготовок, вищі в порівнянні з аналогічними показниками інструменту, виготовленого зі сталі промислового виробництва. Пояснюється це, на думку авторів, більш тонкою карбідною структурою металу злитків ЕШП і його рафінуванням при ЕШ-плавці.

На Новокраматорському машинобудівному заводі було випробувано технологію ЕШП стружки хромо-нікель-вольфрамової сталі ЕІ961 [21]. При цьому в якості невитратного електрода використовували порожнисту сталю трубу з графітовим накінецьником Ø 250 мм. В електроді передбачено отвір, в якому розміщується лоток. Із бункера за допомогою шнекової подачі через лоток в середину електрода неперервно подається розмільчена стружка з насипною масою 0,8...0,9 г/см<sup>3</sup>. Сама плавка відбувається в водоохолоджуваному мідному кристалізаторі Ø 305 мм. В якості шлакової складової використовували суміш АНФ-6 (65%) і АН-291 (35%). Такий флюс мав більший електричний опір та забезпечував підвищення температури шлакової ванни на 50...70 °С і більш високу швидкість плавки (3,5...4,0 кг/хв) в порівнянні з плавкою з використанням тільки шлаку АНФ-6. Макроструктура подовжнього перерізу отриманих злитків характеризується відсутністю зональної ліквіації S, P, шлакових включень та нерозплавленої стружки. Питомі витрати електроенергії склали 1500 кВт·год/т при питомих витратах флюсу 100 кг/т.

Також були проведені дослідження технології переробки металеві стружки головна відмінність якої полягає у використанні порожнистого графітованого електрода, що дозволяє подавати стружку безпосередньо в центральну, найбільш розігріту зону шлакової ванни (рис. 1.4).

Підкреслюється, що запропонована технологічна схема має наступні переваги перед класичною багатостадійною схемою переплаву стружки з використанням дугової сталеплавильної печі:

- зменшений вигар металу і легуючих елементів;
- скорочена кількість стадій отримання кінцевого металу;
- зменшення витрат електричної енергії;

- можливість переробки стружки безпосередньо на підприємствах, де вона утворюється.

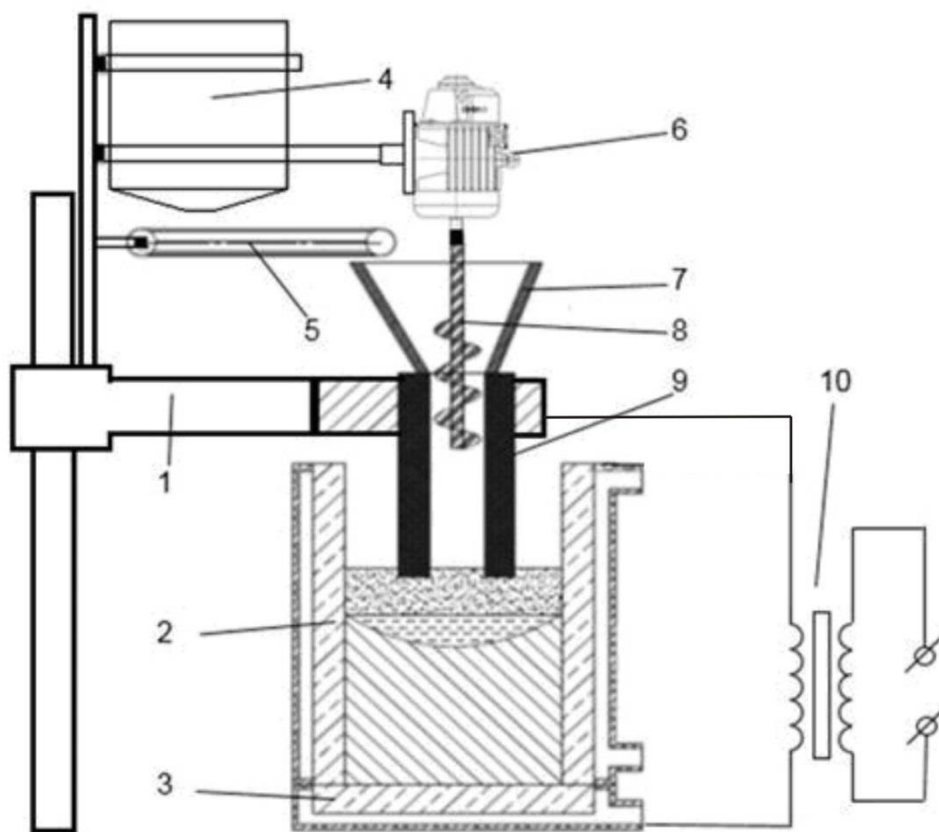


Рис. 1.4 — Схема ЕШП некомпактних відходів з використанням полого невитратного електрода:  
1 - механізм переміщення електрода; 2 – кристалізатор; 3 – піддон;  
4 – бункер для шихтових матеріалів; 5 – дозатор; 6 – електропривід;  
7 – воронка; 8 – шнековий живильник;  
9 – полий невитратний електрод; 10 – джерело живлення.

Отримані злитки мали однорідну щільну структуру, включення у вигляді нерозплавлених частинок стружки або шлаку були відсутні, візуально вони не відрізнялися від злитків отриманих переплавом звичайного сталевих електрода.

Вищенаведені приклади свідчать, що електрошлакова плавка з використанням невитратного струмопідвідного графітованого електрода є

одним з ефективних способів переробки металевої стружки. Однак в цьому випадку існує небезпека науглецювання металу, яка багато в чому визначається складом стружки і шлаку, що переплавляють, і температурою останнього [23].

Це відзначається і в дослідженнях, описаних вище, де підкреслюється, що одним з недоліків застосування невитратного графітованого електрода є збільшення вмісту вуглецю в металі зливка. Показано, що при переплаві стружки сталі 35ХГСА під шлаками АНФ-6, АН-29 і АНФ-32, вміст вуглецю виявився прийнятним тільки при використанні шлаку АНФ-32. В цьому випадку хімічний аналіз металу зливка показав його повну відповідність хімічному складу сталі 35ХГСА з вмістом вуглецю в межах вимог стандарту для даної марки сталі.

Тому при переробці стружки з середньо, а тим більше низьковуглецевих сталей і сплавів застосування графітованого струмопідвода для здійснення електрошлакового процесу небажане, а найчастіше просто виключене. Що стосується використання замість них металевих водоохолоджуваних електродів, то мідні, молібденові або комбіновані (мідь-вольфрам) їх накінецьники, зокрема такі як застосовувалися при переробці стружки з суперсплавів в роботі [24], в тій чи іншій мірі розчиняються в шлаці, забруднюючи метал, що переплавляється. Особливо при досить високих температурах процесу, необхідних для ефективної плавки стружки. Тобто вони мають обмежений ресурс роботи і крім того, на охолодження таких електродів втрачається до 40 % тепла, що виділяється в шлаці.

До різновиду електрошлакової плавки з невитратним водоохолоджуванним електродом можна віднести і процес ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі (СПК), де функцію невитратного електрода виконує струмопідвідна секція кристалізатора. У роботах [25-27] наводяться дані про використання такого кристалізатора для плавки в шарі шлаку різної некомпактної дискретної шихти - сталевий і мідної стружки, відходів швидкорізальних сталей, шлаків абразивної зачистки (рис. 1.5).

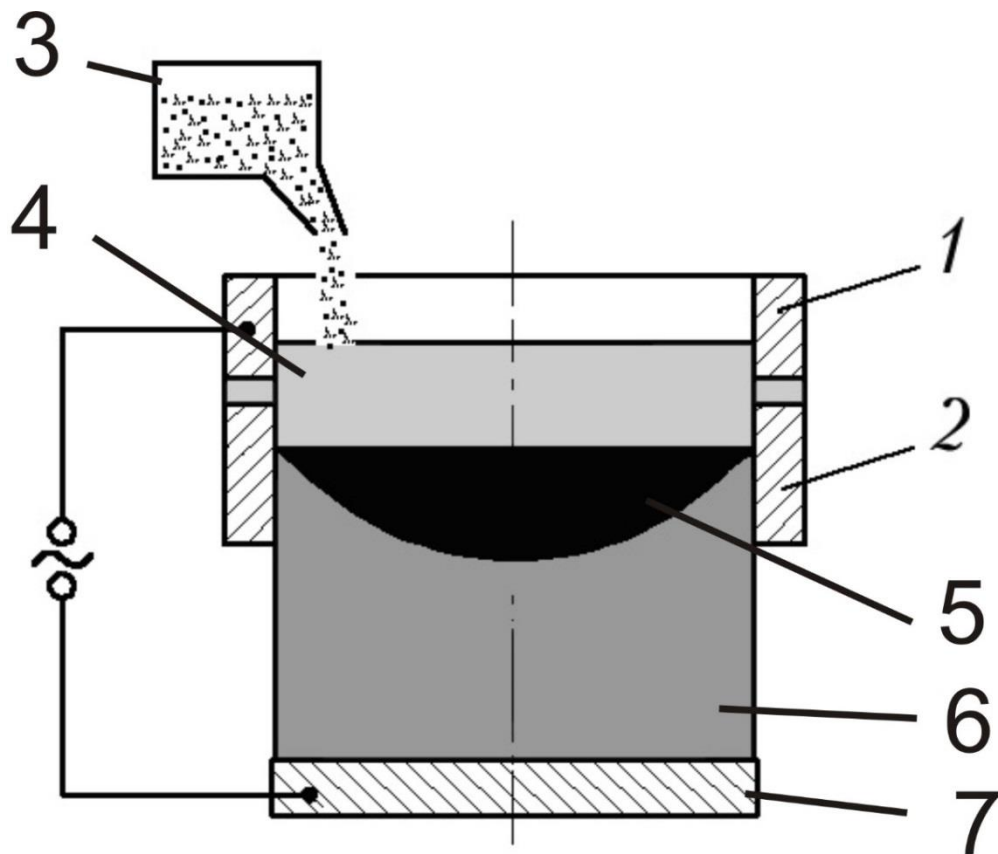


Рис. 1.5 — Схема ЕШП некомпактних відходів у струмопідвідному кристалізаторі:

1 - струмопідвідна секція кристалізатора;  
 2 – формуюча секція кристалізатора; 3 – бункер; 4 – шлакова ванна;  
 5 – металева ванна; 6 – злиток; 7 - піддон.

Перевагою переробки за такою схемою металевої стружки є наявність вільного дзеркала шлакової ванни, що полегшує подачу шихти на плавку, і відсутність колони для кріплення і переміщення струмопідвідного електрода. Однак такий кристалізатор набагато складніше і дорожче звичайного і плавка з його використанням характеризується підвищеною витратою електроенергії. Крім того, в конструкції подібного кристалізатора з метою запобігання ерозії поверхні струмопровідної секції, що контактує зі шлаком, передбачається установка захисного графітового кільця. А це може бути джерелом небажаного науглецювання металу, що переплавляється. Особливістю ЕШ-процесу в струмопідвідному кристалізаторі є переважний нагрів периферії шлакової



ванни. Внаслідок цього при збільшенні діаметра кристалізатора, наприклад для того, щоб збільшити продуктивність плавки, центральна область шлакової ванни матиме відносно низьку температуру, що ускладнює плавлення шихти в цій зоні.

Для виключення забруднення металу, що переплавляється, матеріалом струмопідвідного невитратного електрода автори патенту [28] запропонували спосіб електрошлакової плавки некомпактних металевих відходів з використанням витратного електрода (рис. 1.6).

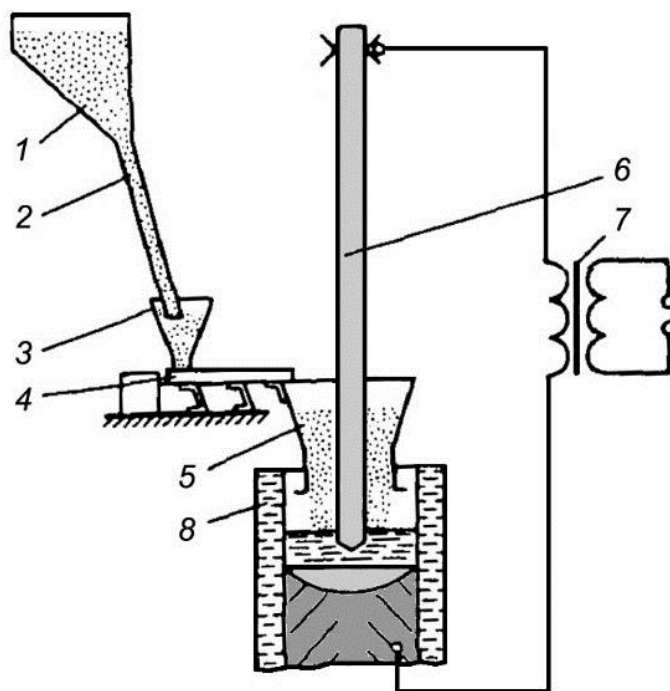


Рис. 1.6 — Схема ЕШП некомпактних відходів з використанням витратного електрода:

1 - бункер с шихтою; 2 – жолоб; 3 – проміжна воронка; 4 – дозатор;  
5 – воронка; 6 – витратний електрод; 7 – джерело живлення;  
8 – кристалізатор.

Витратний електрод може бути виготовлений різними способами в залежності від можливостей підприємства, де буде реалізовуватися подібна схема переробки металевої стружки. Наприклад, зварюванням відповідного за розмірами лому з металу тієї ж марки. Автори зазначеного патенту відзначають, що при переробці стружки швидкорізальної сталі Р6М5 кількість

її становила до 60-70 % від загальної маси металу, що переплавлявся. При цьому отримані злитки характеризуються відсутністю дефектів ліквідаційного походження, щільною бездефектною макроструктурою. Тобто, запропонований метод ЕШП некомпактних відходів дозволяє отримувати інструментальну сталь, яка повністю відповідає всім вимогам, що пред'являються до серійної продукції.

Останній з розглянутих варіантів електрошлакової плавки некомпактних матеріалів є найбільш придатним для переробки металеві стружки з високолегованої нержавіючої сталі і різних жароміцних сплавів. Однак і ця технологія, як і всі попередні, що передбачають плавку в водоохолоджуваному кристалізаторі з отриманням злитка, мають ряд особливостей і обмежень. По-перше, не виключається можливість попадання в порівняно невелику за обсягом металеву ванну стружки, що не повністю розплавилась, а ще гірше - заносить з собою частинки шлаку. Наприклад, внаслідок попадання в шихту окремих більших по товщині елементів, або стружки, щільно скрученої у відносно великий клубок, або ж наявності сплєтених між собою фрагментів. По-друге, ускладнюється плавка металу, що має в своєму складі елементи, які мають високу спорідненість до кисню. Добре відомо, що в процесі ЕШП відбувається вигар титану і частково хрому, якими легують багато нержавіючих і жароміцних сталей. А при переробці стружки такої сталі втрати зазначених елементів зростають через високі температури шлаку, необхідних для швидкого плавлення некомпактної шихти. Долегування титаном (феротитаном) і хромом (ферохромом) в необхідній кількості по ходу плавки не гарантує рівномірного розподілу цих елементів по висоті і перетину виплавлених злитків. Більш того, існує небезпека локального скупчення таких добавок.

Крім металургійних є і технологічні складнощі плавки стружки за варіантом, показаному на рис. 1.6. Справа в тому, що при попаданні в плавильний простір стружка в тому чи іншому місці може одночасно торкатися електрода, що переплавляється, і стінки кристалізатора. Це призводить до виникнення мікродуг, що супроводжуються дестабілізацією електрошлакового

процесу і небезпекою підвищеного зносу стінки кристалізатора аж до її пропалу. Необхідно також відзначити значні витрати води на охолодження кристалізатора, а також істотні втрати тепла з цією водою, що ведуть до збільшення питомих витрат електроенергії на плавку.

Всіх перерахованих вище недоліків і обмежень позбавлений процес електрошлакової плавки в футерованій ємності - електрошлакова тигельна плавка (ЕШТП). Зазначена електрошлакова технологія знайшла широке поширення як раз для переробки різних металевих відходів. Так із застосуванням графітованих електродів в якості струмопідводу і графітового тигля в якості плавильної ємності успішно переплавляються відходи мідних і алюмінієвих сплавів у вигляді стружки, січки і дрібних шматків [29, 30] (рис. 1.7 а). Більш того, розроблені технології виплавки з мідних відходів мідних сплавів шляхом введення легуючих добавок в металеву ванну [31]. ЕШТП дозволяє здійснювати подібне легування практично без обмежень. Відзначається висока якість одержуваного при цьому металу, що досягається за рахунок його рафінування шлаком.

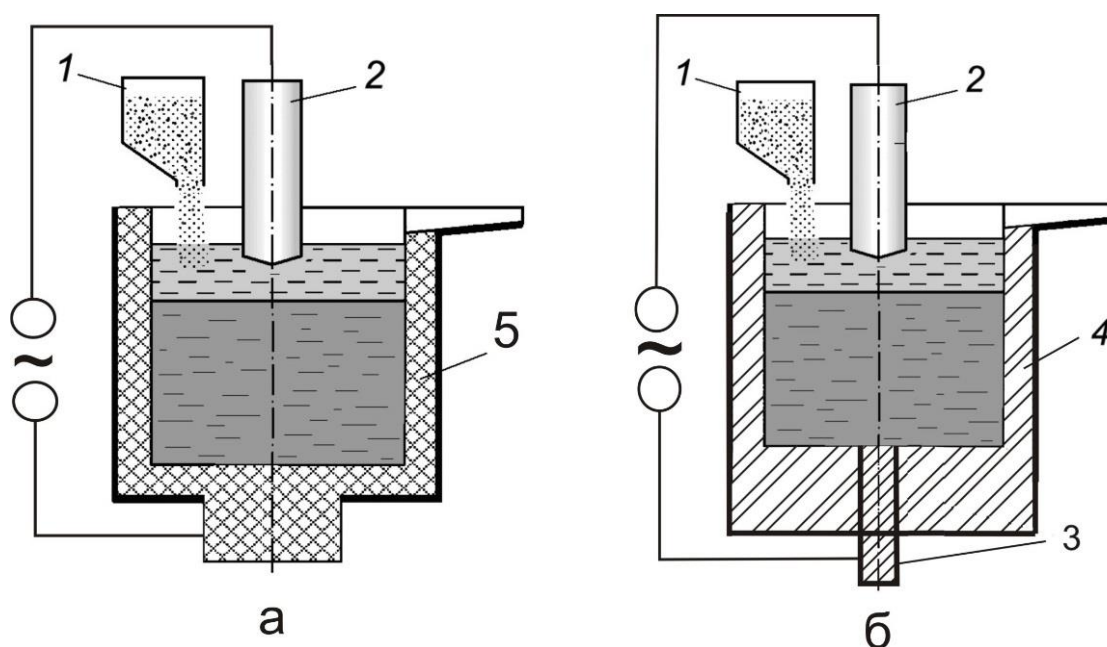


Рис. 1.7 — Технологічна схема електрошлакової тигельної плавки в графітовій (а) та футерованій (б) ємності:

1 – бункер; 2 – невитратний електрод; 3 – подовий струмовідвід;  
4 – вогнетривкий тигель; 5 – графітовий тигель.

Однак застосування графітового тигля виключено при плавці низьковуглецевих сталей через неминуче розчинення вуглецю в металі. Та й при плавці високовуглецевих валкових, інструментальних, шарикопідшипникових або швидкорізальних сталей також може відбуватися їх науглецювання. Тому при електрошлаковій тигельній плавці сталей використовується тигель, футерований вогнетривкою цеглою (рис. 1.7 б).

Електрошлакова тигельна плавка використовувалася авторами робіт [33] при переробці стружки з жароміцного сплаву ХН70ВМТЮФ (ЕІ617). Тигель футерувався хромомagneзитовою цеглою марки ПМ-1, використовувалася суміш шлаків АНФ-6 і АН-291, а в якості невитратного електрода служили вольфрамові, молибденові або графітові стрижні. У процесі плавки метал не розкислювали і не легували. Після закінчення плавки рідкий метал зливався в металевий кокіль. Наводяться результати хімічного складу отриманого металу і його механічні властивості. При цьому не акцентується увага на зміні вмісту тих чи інших елементів, тому що виплавлені таким чином виливки використовувалися в якості шихтових заготовок при подальшій плавці в індукційних печах. Проте з наведених даних випливає, що вміст титану в металі зменшується майже в два рази, алюмінію на 25-30 %, а хрому, вольфраму, молибдену і ванадію приблизно на 10 %. Тому в разі отримання при ЕШТП відразу марочного металу необхідно вживати заходів щодо зниження таких втрат при плавці, а при необхідності проводити долегування. Автори цих робіт стверджують, що така схема залучення у виробництво стружки дозволяє за рахунок зменшення втрат на окислювання (вигар) знизити на 15-20 % виробничі витрати.

Однак використання невитратних струмопідводів може привести, наприклад, до суттєвого науглецювання металу, яке не може бути усунуто при індукційній плавці, хіба що за рахунок розведення чистими по вуглецю шихтовими матеріалами. Тому, як зазначалося вище, для переплаву низько і середньовуглецевих, а часом навіть і високовуглецевих сталей електрошлаковий процес необхідно здійснювати витратним електродом.

Є відомості, що так чинять і на одному з підприємств України де зі стружки штампової сталі 4Х5МФС шляхом холодного пресування отримують витратні електроди, які потім переплавляються в електрошлаковій тигельній печі. При цьому додатково стружку в процесі плавки не додають. У разі необхідності хімічний склад накопиченого в тиглі металу коригується присадками відповідних феросплавів і потім метал зливається в кокіль [35]. З отриманих заготовок виготовляються нові литі штампи, стійкість яких вище стійкості кованих штампів, які поставляються спеціалізованими підприємствами.

Така схема переробки стружки можлива в разі отримання досить щільних і міцних електродів, що потрібно не тільки для запобігання їх поломки в процесі плавки, але і для забезпечення хорошої провідності електричного струму.

Виконаний аналіз способів і технологій переробки металевої стружки показує, що найкращі умови для плавки подібних легковагових відходів створюються при використанні електрошлакового джерела нагріву. У цьому випадку порівняно з традиційними методами плавки в дугових та індукційних печах такий метод плавки має наступні переваги:

- низький вигар основного металу і легуючих елементів, що в деяких випадках виключає необхідність додаткового легування сплавів при переплаві;
- можливість переплаву металів з високою хімічною активністю;
- рафінування металу шлаком від неметалевих домішок і газів;
- можливість, при необхідності, проводити операції додаткового легування та модифікування металу під час плавки;
- простота в обслуговуванні, мобільність і відносно невисока вартість електрошлакових установок у порівнянні з іншими плавильними агрегатами.

Зазначені переваги свідчать про перспективність електрошлакових технологій для рециклінгу сталевих стружок та необхідність більш досконалого вивчення особливостей та можливостей її застосування на практиці.

## ВИСНОВКИ

1. Одним з важливих шляхів енерго- та ресурсозбереження є максимальне та ефективне залучення у виробництво різноманітних відходів, у тому числі найбільш поширеного конструкційного матеріалу – сталі, які утворюються на стадіях виготовлення та обробки металопродукції.

2. Серед сталевих відходів особливе місце займає стружка, якої у світі утворюється на стадіях виготовлення та обробки металопродукції мільйони тонн на рік. Стружка представляє особливу складність для переробки, що пов'язано з малою насипною її щільністю, наявністю на поверхні залишків змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР) і оксидної плівки, а також з підвищеною забрудненістю сторонніми домішками.

3. Для рециклінгу та повернення у виробництво особливу цінність становлять леговані та високолеговані сталі та сплави, що мають у своєму складі такі цінні легуючі елементи як нікель, хром, молібден, вольфрам, ніобій, ванадій та ін.

4. Втрати на вигар при плавлі брикетованої сталеві стружки в дугових і індукційних печах досягає 10 %, у тому числі за рахунок окислення високореакційних легуючих компонентів, хрому, ванадію, ніобію, титану, алюмінію та ін. Одержуваний при цьому метал має низьку якість внаслідок підвищеного вмісту неметалевих включень і газів.

5. Для переробки брикетованої та небрикетованої стружки можуть застосовуватись електрошлакові технології, за яких метал плавиться без контакту з навколишньою атмосферою та рафінується від небажаних домішок. Серед них найбільш перспективною є електрошлакова тигельна плавка небрикетованої стружки, яка позбавлена багатьох недоліків електрошлакової плавки небрикетованої стружки у водоохолоджуваному кристалізаторі.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ І ДОСЛІДЖЕНЬ, ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ.

#### 2.1. Вихідні матеріали і шлакоутворюючі.

Для рециклінгу і повернення у виробництво найпривабливішими з економічної точки зору є леговані і високолеговані сталі і сплави, що мають у своєму складі такі цінні легуючі елементи як нікель, хром, молібден, вольфрам, ніобій, ванадій та ін. Серед високолегованих сталей одними з найбільш широко застосовуваних в різних галузях промисловості є нержавіючі сталі, виробництво яких у світі з кожним роком збільшується і в даний час досягає 60 млн тонн на рік. Найбільш поширеною нержавіючою сталлю є хромонікелева сталь типу X18H10, у тому числі стабілізована титаном – 12X18H10T. Ця сталь близька за хімічним складом до сталі ASI 321 за стандартом США ASTM A240.

За рахунок оптимального вмісту вуглецю і титану, який зв'язує вільний вуглець та запобігає утворенню карбідів хрому на межах зерен, стабілізуючи мікроструктуру матеріалу, сталь 12X18H10T стійка до міжкристалітної корозії та застосовується як для виробів у криогенній техніці, так і при виготовленні жаростійких деталей та вузлів. Рекомендована температура використання сталі від мінус 196 до плюс 800 °С. Крім стійкості до окислення перевагою сталі 12X18H10T є стабільність властивостей, досить висока міцність, зварюваність, легка оброблюваність як тиском, так і механічно.

Завдяки своїм унікальним якісним характеристикам сталь даної марки може використовуватись у різних сферах виробництва – харчовій, морській, хімічній, фармацевтичній, машинобудівній, нафтовій та паливно-енергетичній галузях промисловості.

Широке застосування сталі 12X18H10T зумовлює утворення великої кількості її відходів, у тому числі стружки, що потребує переробки із збереженням усіх її властивостей. Тому нержавіюча сталь марки 12X18H10T була вибрана в якості вихідного матеріалу для проведення досліджень з її

рециклінгу.

Одним з головних легуючих елементів сталі 12X18H10T крім хрому є нікель, вміст якого становить від 9 до 11 %. Нікель відносять до стратегічних металів за обсягами споживання та виробництва якого судять про рівень розвитку країни. Цей метал використовується у виробництві легованої сталі та сплавів на його основі, високотехнологічній медицині, електротехніці, суднобудуванні, хімічній промисловості та військовій техніці.

Крім нержавіючої сталі значна кількість нікелю, 50-70 %, міститься в жароміцних сплавах на основі нікелю. Жароміцні ж сплави на сьогоднішній день є досить дефіцитними та дорогими. Пов'язано це або з невеликими запасами руд їх складових у земній корі, або з трудомістким процесом їх отримання. У той же час відходи з таких сплавів, що утворюються на підприємствах металургійної та металообробної промисловості, становлять величезну матеріальну цінність, оскільки є важливим додатковим сировинним джерелом. Тому питання переробки, раціонального та більш повного використання різного виду таких матеріалів є дуже актуальними протягом останніх десятиліть.

Велика кількість сплавів, що містять нікель, застосовується на підприємстві ДП НВКГ «Зоря-Машпроект», м. Миколаїв при виготовленні лопаток та інших деталей газових турбін морського та загальнопромислового застосування. В Україні виробництво таких сплавів відсутнє, тому складно переоцінити важливість повторного залучення у виробництво сплавів на його основі для української економіки. Нами при проведенні дослідних експериментальних плавок використовувалась стружка жароміцних сплавів ХН75МБТЮ (ЕІ602) і ХН77ТЮР (ЕІ437Б), яка утворювалася на підприємстві ДП НВКГ «Зоря-Машпроект».

На рис. 2.1 приведено зовнішній вид стружки жароміцних сплавів, яка використовувалась у даній роботі. Первинна стружка у залежності від способу механічної обробки була різних видів, у тому числі зливна, тому на підприємстві піддавалася подрібненню на ротаційній дробильній установці.





Рис. 2.1. Зовнішній вигляд стружки жароміцних сплавів.

Хімічний склад жароміцних сплавів EI602 і EI437Б наведено в табл. 2.1. Це високолеговані нікелеві сплави, з високою стійкістю до агресивних середовищ, у тому числі при високих температурах. Робоча температура для деталей, виготовлених з EI437Б, досягає 750 °С, для деталей виготовлених з EI602 - 950 °С. Застосування цих сплавів обумовлене можливістю працювати в складних умовах, де потрібна стійкість до механічних навантажень, термічного впливу та хімічно активних речовин. Дані сплави застосовуються в багатьох промислових галузях, включаючи енергетику, морське будівництво, хімічну та фармацевтичну, машинобудівну та нафтогазову, авіаційну та ракетно-космічну промисловості.

**Таблиця 2.1.** Хімічний склад вихідних жароміцних сплавів

Марка сплаву	Вміст елементів, % мас.									
	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	Mo	Nb
ЕІ437Б ГОСТ 5632-72	До 1,0	До 0,07	До 0,6	До 0,4	70- 77,4	19- 22	2,4- 2,8	0,6- 1,0		
ЕІ602 ГОСТ 5632-72	До 3,0	До 0,1	До 0,8	До 0,4	68,5- 77,6	19- 22	0,35- 0,75	0,35- 0,75	1,8- 2,3	0,9- 1,3

Окрім жароміцних сплавів ЕІ437Б і ЕІ602 в даній роботі проводились досліджування з аустенітної нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, хімічний склад якої наведено в (табл.2.2), а зовнішній вигляд стружки, яка використовувалась у роботі приведено на рис. 2.2.

**Таблиця 2.2.** Хімічний склад нержавіючої сталі

Марка сталі	Вміст елементів, % мас.									
	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	S	P	Cu
12Х18Н10Т ДСТУ 12344:2005	Осно- ва	До 0.12	До 0.8	До 2.0	9-11	17-19	5С-0.8	До 0,02	До 0,035	До 0.3



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд стружки нержавіючої сталі.

Одним із ключових матеріалів, які використовуються при електрошлаковому переплаві, є флюс, який служить джерелом тепла, забезпечує передачу тепла і рафінування металів, які переплавляються. Флюс відіграє важливу роль у формуванні властивостей одержуваного металу, забезпечуючи стабільність технологічного процесу та чистоту розплаву. Він захищає розплав від контакту з атмосферою печі, захищаючи розплав від забруднення та мінімізуючи утворення оксидів, адже шлакова ванна запобігає контакту розплавленого металу з киснем повітря. Флюс виводить небажані неметалеві включення (оксиди, сульфіді) з металу, зв'язуючи їх у вигляді шлаку, що значно підвищує чистоту та якість металу. Також правильно підібраний флюс сприяє видаленню газів з металу, що мінімізує ризик утворення пор.

Дуже важливо перед використанням ретельно просувувати флюс для видалення вологи, оскільки наявність вологи може спричинити газоутворення у металі.

При виборі флюсу для ЕШП існують жорсткі обмеження по температурі плавлення. Температура плавлення флюсу має бути нижчою за температуру плавлення металів, що переплавляються.

Ще однією важливою характеристикою шлакового розплаву є його густина. Від різниці густини шлакового і металевого розплавів залежить швидкість їх розділення в рідкому стані. Чим більша ця різниця, тим краще, через зменшення вірогідності заплутування шлаку в металі і забруднення останнього. Густина флюсу відіграє важливу роль, тому що вона впливає на взаємодію з металом і здатність флюсу видаляти неметалеві включення.

Для дослідних плавок, які проводились в даній роботі, використовувалися флюс АН-295, або суміш флюсів АНФ-6 та АН-295 у співвідношенні 1:1 (табл. 2.3). Вибір цих флюсів пояснюється необхідністю забезпечення певних фізико-хімічних властивостей для здійснення того чи іншого виду електрошлакової плавки.

**Таблиця 2.3.** Хімічний склад вихідних флюсів

Марка флюсу	Вміст компонентів, % мас.									
	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	C	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	P	TiO <sub>2</sub>
АНФ-6	Осно- ва	23-31	До 8	До 2.5	-	До 0.1	До 0.5	До 0.05	До 0.02	До 0.05
АН-295	11-17	49-56	26-31	До 2.5	До 6	До 0.1	До 0.5	До 0.05	До 0.02	До 0.05

Фторид кальцію (CaF<sub>2</sub>) у цих шлаках забезпечує низьку температуру плавлення і хорошу текучість шлакової системи, CaO приймає участь у рафінуванні металу, зв'язуванні оксидних включень і регулюванні основності шлаків, SiO<sub>2</sub> підвищує механічну міцність шлакової плівки і покращує

змочуваність металу, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  є амфотерним оксидом і служить головним чином для регулювання електричного опору шлакового розплаву.

Варто зазначити, що флюси АН-295 і АНФ-6 широко використовуються для переплаву нікелевих сплавів, конструкційних та інструментальних сталей.

## **2.2. Обладнання для плавки металеві стружки**

Технологія рециклінгу некомпактних металевих відходів має забезпечувати вирішення стандартних для ЕШП задач, таких як висока продуктивність плавки, відносно незначні витрати електроенергії, уникнення вигару хімічних елементів сплавів, висока ступінь рафінування сплавів від неметалевих включень і газів. Для цього важливо правильно підібрати технологічне обладнання і технологічні параметри процесу.

В першому розділі дисертаційної роботи було доведено, що найбільш придатним і ефективним способом переплаву некомпактних металевих відходів з високолегованої нержавіючої сталі і різних жароміцних сплавів може бути електрошлакова плавка в футерованій тигельній печі.

Для експериментальних досліджень рециклінгу стружки нержавіючої сталі 12Х18Н10Т і жароміцних сплавів EI602 і EI437Б методом електрошлакової тигельної плавки була створена дослідно-промислова установка на базі апарату А-550, схема якої наведена на рис. 2.3, а зовнішній вигляд на рис. 2.4.

Апарат А-550 складається з колони 6 із механізмом вертикального переміщення електроду, привідної каретки, електродотримача і станини, в середині якої знаходиться пускорегулювальна апаратура. Переміщення електрода здійснюється електродвигуном постійного струму за допомогою гвинтового приводу.

Витратний металевий електрод служить струмопідводом, і окрім накопичення рідкого металевого розплаву потрібен для розплавлення і нагріву шлакової ванни. До електроду під'єднується один із водоохолоджуваних силових кабелів.

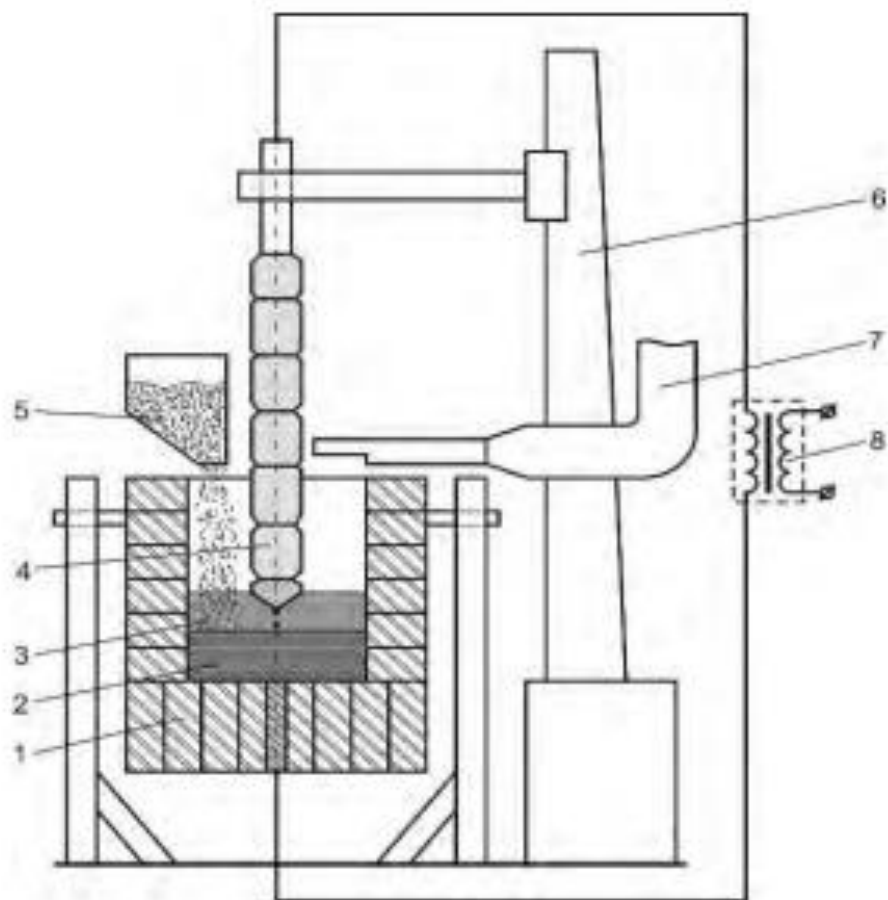


Рис. 2.3. Схема установки электрошлаковой тигельной плавки:

1 – тигель; 2 – рідкий метал; 3 – шлакова ванна; 4 – витратний металевий електрод; 5 – металева стружка; 6 – колона з механізмом переміщення електроду; 7 – газовідвід; 8 – джерело живлення.

Обидва водоохолоджувані силові кабелі підключаються до зварювального трансформатора ТШС-3000/1. Для забезпечення необхідної напруги можуть використовуватись два джерела електроенергії ТШС-3000/1, з'єднаних послідовно, кожен з яких має п'ять ступенів регулювання напруги в діапазоні від 27 до 46 В.

Також розроблена установка включає в себе поворотну плавильну ємність (тигель) і систему водоохолодження піддону тигля та кабелів.



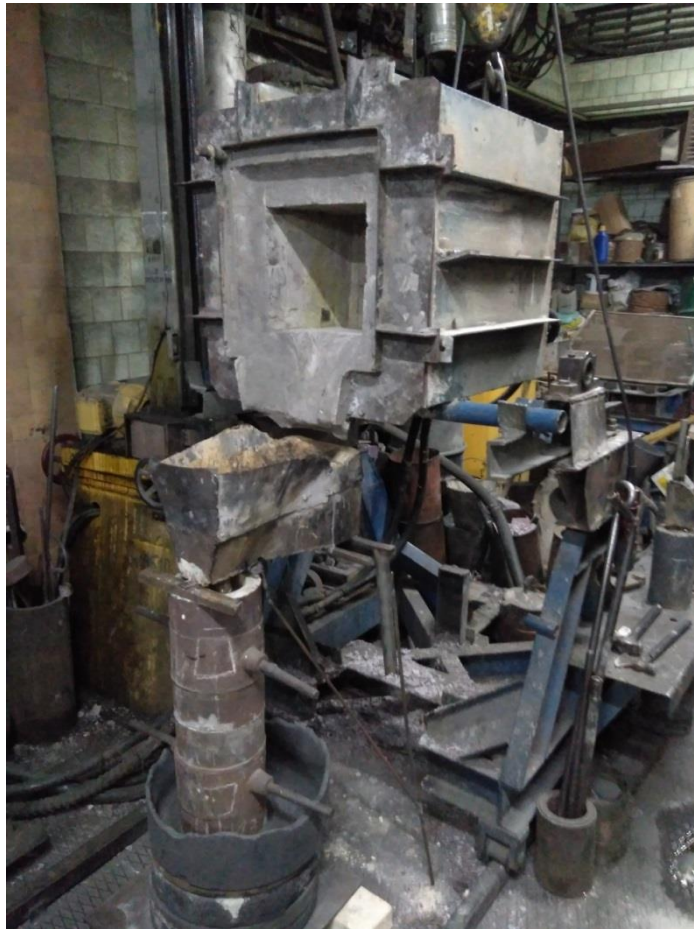


Рис. 2.4. Зовнішній вигляд електрошлакової тигельної печі для плавки некомпактних відходів нержавіючої сталі та жароміцних сплавів.

Стійкість, вартість і дефіцитність матеріалів для футерування плавильного простору є досить важливими факторами.

В процесі електрошлакової тигельної плавки футерівка печей може руйнуватися через хімічний і термічний вплив металевих і шлакових розплавів.

Найбільший хімічний і термічний вплив футерівка зазнає на рівні шлакового поясу, особливо якщо в склад шлаку входять елементи з високою хімічною активністю. Подібний негативний вплив призводить до руйнування футерівки, через що її матеріал потрапляє в шлаковий і металевий розплави. Це може призвести до того, що склад шлакового і металевих розплавів можуть суттєво змінюватись.

Якщо у склад сплаву, який переплавляється, входять хімічні елементи активніші, ніж елементи, які входять до складу футерівки, елементи з футерівки

будуть відновлюватись і переходити в металевий розплав, забруднюючи останній.

Потенційна зміна хімічного складу шлаку також є небажаною через порушення стабільності процесу.

Найбільш поширеними для ЕШТП є графітовані, шамотні та магнезитові футерівки.

Графітовані футерівки є досить стійкими по відношенню до шлакових розплавів, проте при їхньому використанні існує небезпека суттєвого науглецювання металу. Тому для ЕШТП використання графітованої футерівки часто небажане, а в нашому випадку взагалі виключене через жорсткі обмеження по вмісту вуглецю в досліджуваних сплавах.

Шамотна футерівка характеризується низькою теплопровідністю, що дозволяє значно зменшувати теплові втрати, але її стійкість до високих температур не дуже велика та не перевищує 1600 - 1700 °C. Крім того, шамотна цегла, яка має у своєму складі багато кислого оксиду  $\text{SiO}_2$  досить швидко руйнується під дією основних шлаків, якими є шлаки, що застосовуються в електрошлакових технологіях.

Магнезитова (периклазова) футерівка характеризується вищою теплопровідністю, ніж шамотна, проте визначальним фактором є надзвичайно висока температурна стійкість першої, що дозволяє використовувати її в умовах екстремально високих температур. Температурна стійкість магнезитової футерівки досягає 2000 - 2300 °C. Тому саме така футерівка плавильної ємності була обрана для проведення експериментів і досліджень по електрошлаковій тигельній плавці стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі. Тигель мав плавильний простір перетином 240x240 мм і розраховувався на накопичення у ньому до 120 кг рідкого металу (рис.2.5).

При електрошлаковому переплаві і технології на його основі для здійснення електрошлакового процесу передбачається використання спеціального струмопідвідного електроду. Він може бути невитратним, наприклад, графітовий або водоохолоджуваний металевий, або витратним, який



плавиться у шлаці. Витратний електрод зі стружки для виконання досліджень виготовляли двома методами: шляхом плавки стружки в індукційній печі з розливом металу в сталеву трубу (рис. 2.6), або пресуванням стружки з електронагрівом (під струмом).

У першому випадку використовувалась лабораторна індукційна піч ємністю 30 кг, яка оснащена високочастотним генератором ВПЧ-10 000/100, у другому – створена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона спеціальна установка, схема якої наведена на рис. 2.7. [11,17].



Рис. 2.5. Зовнішній вигляд плавильної ємності, футерованої периклазовою цеглою.

Пресування стружки на цій установці здійснювалося з електронагрівом (електротермічним методом), що дозволяє підвищити пластичність матеріалу, що компактується, і істотно (на 2 порядки) зменшити зусилля пресування.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд індукційної установки з розливним пристроєм для плавки металевої стружки та отримання витратних електродів.

Перевагою даної технології є можливість отримання довгомірних і великогабаритних заготовок, так як процес реалізується в прохідній матриці, а струм підводиться безпосередньо на заготовку, що в свою чергу скорочує енергетичні втрати і підвищує ККД процесу пресування.

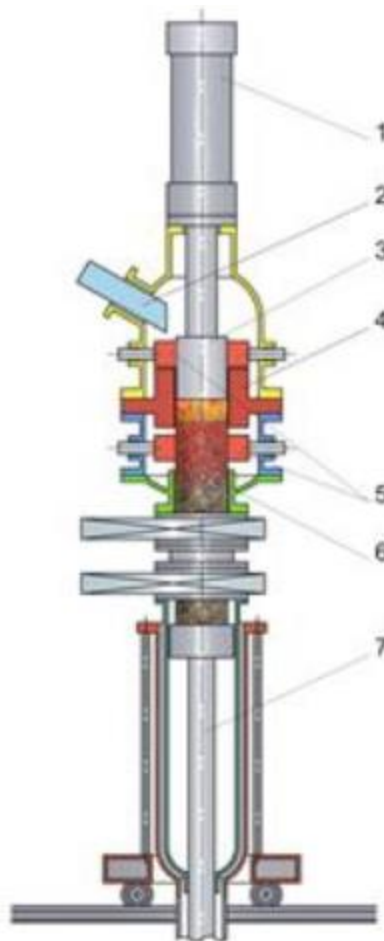


Рис. 2.7. Схема установки для отримання із металевої стружки спресованих витратних електродів для ЕШТП методом електротермічного брикетування:

1 - гідроциліндр; 2 - лоток для подачі стружки; 3 - пуансон;  
4 - прохідна матриця; 5 - струмопідводи;  
6 - зкомпактована заготовка; 7 - шток.

Розігрів порцій відбувається у два етапи: на першому – до температури десорбції і випаровування зі стружки вологи, газів і змазувально-охолоджуючої рідини, на другому – до температури гарячої деформації матеріалу, що пресується.

Такий режим забезпечує очищення стружки від органічних залишків механічної обробки, що знижує витрати на переробку (витрати на хім. реактиви, територія під промивку і сушку стружки), а також виникнення рідкої фази в зонах контактів стружки, що збільшує пластичність та призводить до утворення щільної пресованої заготовки.

Важливим є те, що зі зменшенням гранулометричного складу будь-якого металевих матеріалу, збільшується щільність зкомпактованих заготовок, що можна пояснити наявністю більшої кількості точок контакту між частками, що в свою чергу призводить до більш ефективного прогріву і локального розплавлення при компактуванні.

Для отримання витратних електродів стружка не промиватиметься і не очищуватиметься від ЗОР, а відразу піддаватиметься пресуванню, з отриманням заготовок діаметром 100 мм і довжиною до 1000 мм. Процес здійснюватиметься при відносно невеликих зусиллях пресування (до 2,5 МПа).

### **2.3. Методика проведення експериментів і досліджень.**

З метою визначення можливостей і особливостей різних способів переробки стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі проводитимуться експерименти за наступною методикою. Досліджуватимуться три основні варіанти плавки стружки:

1. Електрошлаковий переплав у водоохолоджуваному кристалізаторі діаметром 170 мм спресованих зі стружки вищеописаним електротермічним методом витратних електродів діаметром 100 мм. В якості шлакоутворюючих в цих експериментах використовуватиметься суміш флюсів АНФ-6 і АН-295 в кількості 3-4 кг у співвідношенні 1:1. Процес плавки починатиметься методом “твердого старту”, коли витратний електрод через струмопровідний флюс замикається на піддон, а в кристалізатор засипається флюс АНФ-6 в кількості 100-200 гр. Після цього подається напруга живлення і з початком плавлення флюсу в кристалізатор подається решта вже флюсової суміші. Відбувається електрошлаковий переплав витратного електрода з формуванням в кристалізаторі злитка ЕШП.

2. Індукційна плавка в печі ємністю 30 кг стружки у вигляді брикетів, отриманих компактуванням тим же електротермічним методом. А також плавка у цій печі небрикетованої стружки. При плавці брикетів у піч завантажуються близько половини маси садки і потім у міру плавлення металу в піч

завантажується решта садки у вигляді брикетів. Після розплавлення всіх брикетів рідкий метал через проміжний жолоб зливається в ту чи іншу форму, як це зазначено на рис. 2.6. При переробці небрикетованої стружки перша плавка починається із завантаження в тигель близько 10 кг брикетованої стружки і після розплавлення цих брикетів в піч поступово завантажується стружка до повного заповнення тигля розплавленим металом. Рідкий метал першої плавки зливається не в повному обсязі, в тиглі залишається його частина, приблизно  $\frac{1}{4}$ , і потім на цьому «болоті» рідкого металу починається друга плавка із завантаженням в індукційну піч небрикетованої стружки. Наступні плавки небрикетованої стружки здійснюються так само.

3. Плавка брикетованої та небрикетованої стружки в електрошлаковій тигельній печі з використанням в якості шлакоутворюючого флюсу АН-295 в кількості 8-10 кг. Проводяться плавки або витратного електрода діаметром 100 мм, отриманого компактуванням під струмом стружки, або електрода діаметром 130 мм, виготовленого зі злитків, отриманих при плавлі стружки в індукційній тигельній печі, або витратного електрода з кускового брухту, а також спільна плавка витратного електрода і небрикетованої стружки. Процес у всіх плавках починається методом «твердого старту» шляхом замикання струмопідвідного електрода на донний струмопідвід печі, завантаження всього необхідного шлаку в тигель з подальшою подачею напруги на електрод. При спільній плавлі витратного електрода і стружки остання завантажується в піч після повного наведення шлакової ванни (повного розплавлення шлакоутворюючих матеріалів).

Під час проведення експериментів фіксуються електричні параметри плавок, витрата електроенергії та продуктивність переплаву з подальшою оцінкою техніко-економічних показників різних видів переробки стружки. Також оцінюється якість металу, одержаного в експериментах.

В подальшому, враховуючи описані в розділі 1 можливості електрошлакової тигельної плавки, проводяться дослідження з переробки небрикетованої стружки саме цим способом. Вивчаються технологічні та

металургійні особливості процесу, у тому числі вплив ступеня заповнення плавильного простору на характер плавлення стружки та поведінка високоактивних елементів, що містяться в металі. Оцінюються втрати металу на вигар та відповідність хімічного складу виплавленого із стружки металу вимогам технічних умов. Проводяться металографічні дослідження отриманого металу та випробування його механічних властивостей.

Для контролю температури шлаку і металу під час плавки будуть використовуватись вольфрам-ренийові термопари, під'єднані до самописного приладу КСП4.

Хімічний склад металу визначатиметься за допомогою спектрального аналізу на емісійному спектрометрі ДФС - 10М. Для цього під час плавки спеціальними пробницями відбиратимуться проби рідкого металу, або ж вирізатиметься зразок із отриманого виливка.

Хімічний склад шлаку визначатиметься на рентгенівському флуоресцентному спектрометрі UNIQUE 2 фірми Philips. Для цього аналогічно відбиратимуться проби під час плавки. Кінцеву пробу можна відколоти від цільного шматка шлаку, утвореного після зливу розплаву.

Окрім того буде визначатись електропровідність шлаку та вплив оксиду титану на електропровідність шлаку АН-295. Електропровідність визначатиметься за методом Кольрауша, вимірюючи електричний опір між двома електродами, зануреними в рідину.

Отриманий метал буде досліджено на механічні властивості. У випадку нержавіючої сталі 12Х18Н10Т зразки будуть досліджені після термічної обробки (нагріву до 1050-1100 ° С і охолодження у воді). Механічні властивості металу, такі як межа плинності і опір розриву будуть досліджені на приладі ЦДМ 10, а по зруйнованим зразкам вимірюватиметься відносне подовження і звуження. Для визначення ударної в'язкості використовуватиметься маятниковий копер 2010КН-30.

В отриманих зразках також буде досліджено вміст газів, а саме кисню і водню на газоаналізаторі RH-2 фірми LECO.

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано вибір для проведення досліджень у якості вихідних металів жароміцних сплавів на нікелевій основі марок EI437Б і EI602 та нержавіючої сталі 12Х18Н10Т. А в якості шлакоутворюючих матеріалів шлаків марок АН-295 і АНФ-6.

2. На базі установки А-550 створено дослідно-промислову електрошлакову установку для експериментальних досліджень, яка включає в себе тигельну піч з механізмом обертання, розраховану на плавку 120 кг металу.

3. Визначено оптимальний матеріал футерівки плавильного простору електрошлакової тигельної печі - для проведення дослідних плавок вибрано периклазову (магнезитову) цеглу, яка характеризується високою хімічною стійкістю, механічною міцністю та стійкістю до високих температур.

4. Визначені методики проведення експериментів і досліджень по переробці стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі різними методами – ЕШП пресованого зі стружки електроду, ІТП брикетованої і небрикетованої стружки, ЕШТП пресованого зі стружки електроду та спільної плавки витратного електроду і небрикетованої стружки.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ РЕЦИКЛІНГУ СТРУЖКИ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ І НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ

#### 3.1. Компактування стружки під струмом.

У металургії в якості плавильних агрегатів найбільшого поширення набули електродугові та індукційні печі. При переробці стружки в подібних печах її необхідно попередньо компактувати (брикетувати) з метою зменшення при плавці втрат на вигар, а також зручності транспортування і завантаження в плавильний агрегат. Існують різні способи компактування стружки, серед яких найбільш простим є метод холодного пресування. Однак стружка нержавіючої сталі і особливо жароміцної, з огляду на високу міцність і пружність, важко піддається холодному пресуванню і для отримання з них міцних брикетів необхідно здійснювати компактування з нагріванням матеріалу.

Нами для проведення порівняльних досліджень з переробки стружки жароміцних сплавів і нержавіючої сталі в брикетованому вигляді здійснювалося їх компактування методом напівбезперервного гарячого пресування під струмом, розробленим в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [17,37]. Суть цього методу полягає у поєднанні процесу пресування з електричним нагріванням металу. Таке поєднання дозволяє підвищити пластичність матеріалу, що компактується в спеціальній матриці, і істотно (на два порядки) в порівнянні з холодним пресуванням зменшити питомий тиск при пресуванні.

Технологічна схема отримання скомпактованої заготовки передбачає низку послідовних операцій:

- завантаження порції некомпактної шихти в матрицю;
- попереднє стиснення (ущільнення) та електронагрів усієї порції шихти до температур у межах (0,5...0,8) температури плавлення (у локальних точках температура перевищує температуру плавлення металу);
- осадку та приварювання порції до раніше спресованої маси або затравки (на старті);



- проштовхування порції разом із заготовкою або затравкою вниз;
- підйом пуансона.

Після цього йде повторення операцій до досягнення готового виробу (заготовки) заданої довжини, її охолодження та вилучення.

Таким чином, в результаті ряду послідовних циклів виходить міцна зварено-спресована заготовка, в якій окремі елементи (частки та порції шихти) з'єднані між собою пресуванням після попереднього оплавлення в місцях їх контакту.

У роботі використовувалася стружка підприємства «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв). Стружка жароміцних сплавів являє собою окремі вигнуті лусочки товщиною в середньому 0,5-1,0 мм і довжиною до 50 мм, а стружка нержавіючої сталі трохи тонша, але більш загнута, аж до згортання в кільце, а також у вигляді кручених стрічок. Перед компактуванням стружка подрібнювалася до розміру 15-25 мм, так як при описаному способі пресування зі збільшенням довжини стружки знижується щільність і міцність одержуваних брикетів-заготовок. З досвіду компактування стружки різних розмірів було встановлено, що для отримання густини пресованих заготовок не нижче 50 % густини литого металу довжина стружки повинна бути менше 20-25 мм [17].

Компактування стружки здійснювалося з отриманням заготовок діаметром 100 мм і завдовжки 800-1200 мм (рис. 3.1), а також окремих брикетів того самого діаметра та товщиною від 30 до 50 мм. (Рис. 3.2).

При брикетуванні стружки жароміцних сплавів маса порцій металу, що завантажувались для пресування, становила 420-450 гр. Час пресування такої порції стружки становив 12-15 с при напрузі на джерелі живлення 8 В і струмі 10-12 кА. Витрата електроенергії за такої технології пресування склала 1,1-1,4 кВ·год/кг. Густина брикетів та заготовок становила від 55 до 60 % від густини литого металу.



Рис. 3.1. Вид заготовки діаметром 100 мм, скомпактованої електротермічним способом із стружки.



Рис. 3.2. Вид брикетів, скомпактованих електротермічним способом зі стружки.

Режими компактування стружки нержавіючої сталі через меншу її твердість і пружність порівняно зі стружкою жароміцних сплавів були іншими. При приблизно такій же масі порцій (440-480 гр.) час пресування становив від 5 до 7 с при напрузі на джерелі живлення 14-16 В і струмі 13-14 кА. Витрата електроенергії склала від 0,7 до 0,9 кВ·год/кг, а густина пресованих заготовок була приблизно такою ж, як і заготовок, отриманих з жароміцної стружки.

З метою оцінки можливостей різних видів переплаву стружки високолегованих жароміцних сплавів і нержавіючої сталі були проведені дослідження і експерименти за технологічними варіантами, опис яких наведено нижче.

### 3.2. Електрошлаковий переплав та індукційна плавка компактованої стружки.

Отримані пресуванням під струмом електроди діаметром 100 мм переплавлялися методом ЕШП на установці А-550 у кристалізаторі діаметром 175 мм з отриманням злитків масою 35-60 кг (рис. 3.3). При цьому в якості шлакоутворюючих використовували суміш флюсів АНФ-6 і АН-295.

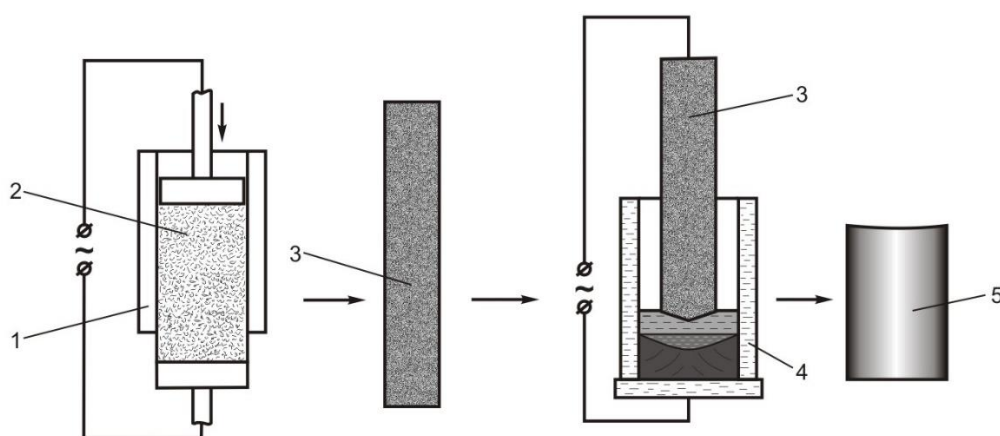


Рис. 3.3. Схема переробки стружки методом ЕШП:  
1-прес-форма; 2-стружка; 3-електрод, спресований зі стружки; 4-кристалізатор; 5-зливоч ЕШП.

Брикети зі стружки переплавлялися в індукційній тигельній печі (ІТП) ємністю 30 кг (рис. 3.4).

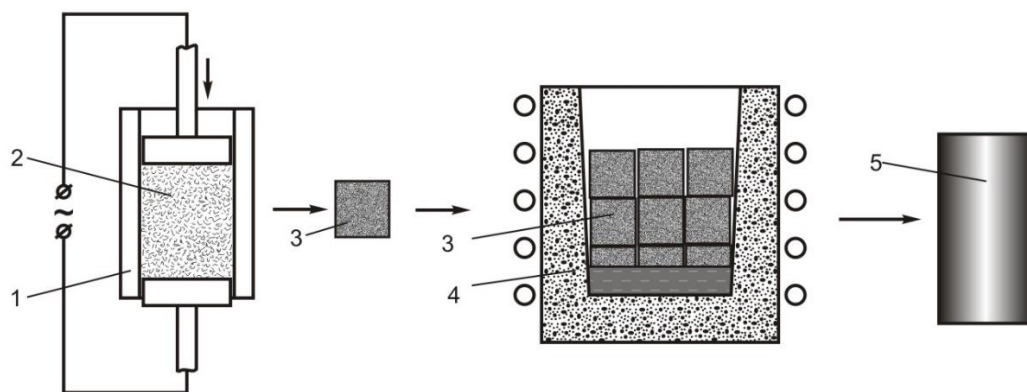


Рис. 3.4. Схема переробки пресованої стружки в індукційній печі:  
1-прес-форма; 2-стружка; 3-брикет, спресований із стружки;  
4-індукційна піч; 5-злиток ІТП.

Крім того, проводилися дослідні плавки в індукційній печі небрикетованої стружки. А також повторний переплав виплавлених із брикетів злитків за схемами, показаними на рис 3.5 та 3.6.

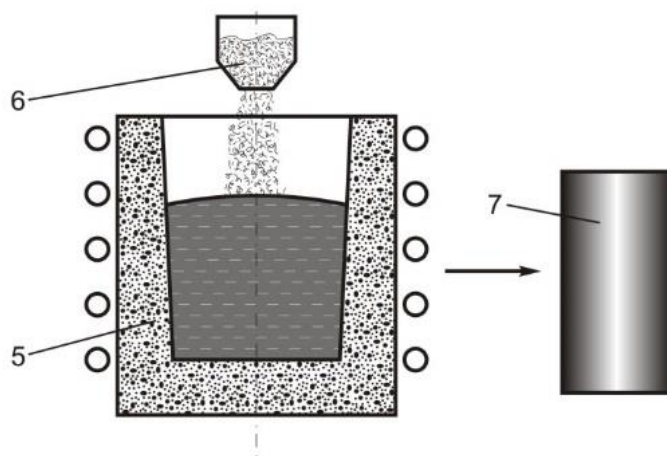


Рис. 3.5. Схема переробки непресованої стружки в індукційній печі:  
5-індукційна піч; 6-стружка; 7-зливоч ІТП.

Додаткові відомості щодо експериментів за вищеописаними технологічними схемами наведені в табл. 3.1.

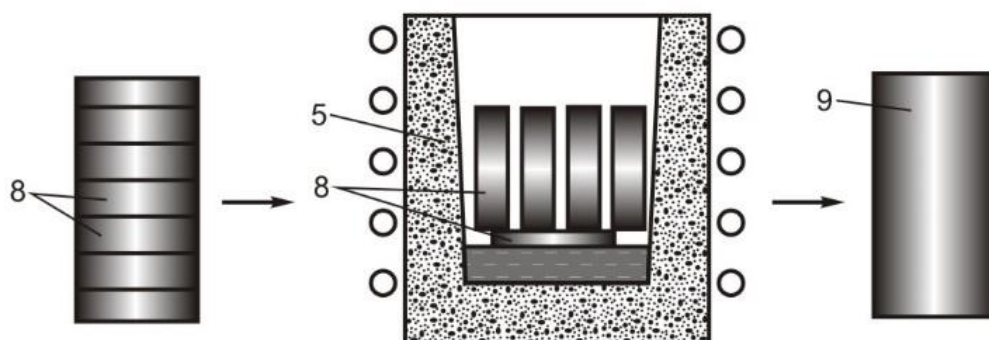


Рис. 3.6. Схема повторного переплаву злитка ІТП в індукційній печі.

**Таблиця 3.1.** Дані експериментів з переробки стружки методами ЕШП та ІТП

Варіанти плавки стружки	Марка металу	Початковий матеріал	Маса плавки, кг	Вид плавки
1	ХН75МБТЮ (ЕІ602)	Компактований електрод	35-42	ЕШП
2	ХН77ТЮР (ЕІ437Б)	Компактований електрод	38-40	ЕШП
3	ХН75МБТЮ (ЕІ602)	Компактовані брикети	29-31	ІТП
4	ХН77ТЮР (ЕІ437Б)	Стружка	29-31	ІТП
5	ХН77ТЮР (ЕІ437Б)	Злиток ІТП зі стружки	29-31	ІТП
6	12Х18Н10Т	Компактований електрод	35-62	ЕШП

Наступним етапом досліджень були експерименти з переплаву стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі в електрошлаковій тигельній печі.

### **3.3. Переробка стружки методом електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП).**

#### **3.3.1. Розробка основ технології ЕШТП стружки нержавіючої сталі та жароміцних сплавів.**

Для експериментальних досліджень з переробки стружки нержавіючої сталі і жароміцних сплавів була створена дослідно-промислова установка, що включає в себе два джерела живлення ТШС 3000/1, з'єднаних послідовно, колону типу А-550 з механізмом кріплення та переміщення електрода, футеровану периклазовою цеглою поворотну плавильну ємність (тигель) з донним струмопідводом, водоохолоджувані кабелі та системи водоохолодження піддону тигля та кабелів.

В електрошлакових технологіях для здійснення електрошлакового процесу і нагріву шлакової ванни до необхідних температур використовується спеціальний струмопідвід - витратний або невитратний електрод. Низький вміст вуглецю в стружці, що використовувалась, унеможливив застосування для струмопідводу та здійснення електрошлакового процесу невитратного графітованого електрода. Застосування невитратних водоохолоджуваних металевих електродів, крім додаткових витрат на їх експлуатацію та витрат тепла на охолодження, практично неминуче пов'язане з небажаним розчиненням в тій чи іншій мірі матеріалу накінецьника в шлаці і попаданням його в метал, що переплавляється [24, 38]. Тому при переробці низьковуглецевого металу виникає необхідність використання витратного металевого електрода. Враховуючи, що при ЕШТП немає жорстких вимог за геометричними параметрами струмопідвідного електрода, він може бути виготовлений зварюванням з різного за розмірами шматкового брухту хімічного складу, відповідного до складу стружки, що переробляється. Або за відсутності брухту попередньо отриманий тим чи іншим методом, наприклад, плавкою стружки в індукційній тигельній печі. Таким чином, переробка стружки нержавіючої сталі та жароміцних сплавів передбачає одночасну

плавку в електрошлаковій тигельній печі витратного електрода і стружки, як показано на рис. 3.7.

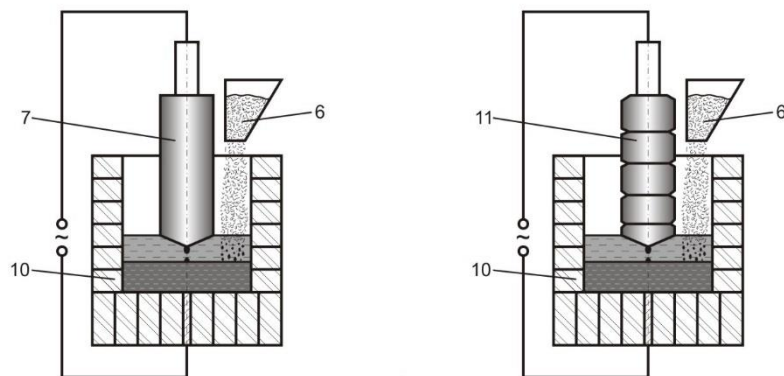


Рис. 3.7. Технологічні схеми переробки стружки методом ЕШТП:  
6 – стружка; 7 – витратний металевий електрод; 10 – тигель;  
11 – витратний металевий електрод, зварений із кускових відходів.

Ефективність будь-якої технології багато в чому залежить від правильно вибраних параметрів технологічного процесу. Стосовно переробки металеві стружки методом електрошлакової тигельної плавки основними параметрами, які вимагали уточнення і оптимізації, були електричні характеристики електрошлакового процесу і співвідношення між геометричними розмірами плавильної ємності і струмопідвідного електрода.

Струм і напруга, які підводяться до шлакової ванни, багато в чому визначаються складом шлаку, що використовується, та його електропровідністю. В роботі використовувався спеціально розроблений для електрошлакової тигельної плавки флюс марки АН-295, склад якого наведено в розділі 2. Він, для зменшення хімічної взаємодії з матеріалом тигля – периклазовою (магнезитовою) цеглою на основі оксиду магнію, містить порівняно невелику кількість фториду кальцію, обмежену кількість кислого оксиду кремнію і високий вміст нейтрального оксиду алюмінію. Порівняно зі шлаками для ЕШП із вмістом фториду кальцію 30, 40 і навіть 70 %, шлак АН-295 має високий електричний опір, що викликає необхідність під час його

використання підводити до шлакової ванни вищу напругу. З урахуванням наявних в літературі даних [39, 40], оптимальною для електрошлакових тигельних печей ємністю до 200-300 кг металу є напруга на шлаковій ванні близько 50 В. Для порівняння при ЕШП в кристалізаторі з такими широко розповсюдженими флюсами як АНФ-6, АНФ-28, АНФ-32 зазвичай використовується напруга 40-45 В. Тому в нашій роботі використовувалися в якості джерела живлення два трансформатори ТШС-3000/1, підключених паралельно один до одного для можливості роботи на більш високих напругах, ніж забезпечує один такий трансформатор.

Що стосується геометричних розмірів струмопідвідного електрода і плавильного простору, їх співвідношення необхідно вибирати з умови досягнення максимально можливого залучення стружки в переплав. Тобто досягнення максимальної кількості стружки, яку можна переробити під час проведення однієї плавки.

При класичному ЕШП відношення діаметра витратного електрода ( $d_{\text{ел}}$ ) до внутрішнього діаметру кристалізатора ( $D_{\text{кр}}$ ) зазвичай становить від 0,7 до 0,8. Така ступінь заповнення перерізу плавильної ємності (кристалізатора) викликана необхідністю забезпечення хорошої якості поверхні зливка та зменшення втрат тепла випромінюванням із відкритого дзеркала шлакової ванни. Останнє важливе з точки зору зниження питомих витрат електроенергії на переплав.

Незважаючи на те, що при електрошлаковій тигельній плавці злиток не формується, такі ж співвідношення між перетином переплавленого електрода і перерізом плавильної ємності ( $D_{\text{т}}$ ) приймаються і при ЕШТП, головним чином для зменшення втрат тепла випромінюванням. При виготовленні витратного електрода з кускового брухту його збирають також виходячи з того, що його середній діаметр буде близько 0,7 діаметра плавильної ємності.

У випадку ж спільної плавки витратного електрода і стружки, остання подається в зазор між електродом і стінкою плавильної ємності. Збільшення



площі цього зазору (вільного дзеркала шлакової ванни) і тим самим площі контакту стружки з шлаковою ванною за рахунок зменшення перерізу витратного електрода (відповідно і співвідношення діаметра електрода до діаметра плавильного простору) повинно сприяти збільшенню масової швидкості плавлення стружки. При цьому важливо, що таке збільшення відкритої (вільної) поверхні шлакової ванни при ЕШТП стружки не призводитиме до суттєвого збільшення втрат випромінюванням, тому що поверхня шлаку покривається шаром стружки, що подається на плавку.

Проте зменшення діаметра витратного електрода і збільшення відстані від нього до стінки тигля може призвести до заохолодження периферійних ділянок шлакової ванни і зменшення в цій зоні масової швидкості плавлення стружки. Для підвищення температури шлакової ванни поблизу стінки тигля потрібна зміна електричних характеристик процесу, зокрема підвищення напруги плавки. А це веде до підвищення температури шлакової ванни, особливо під електродом, та масової швидкості його плавлення. У результаті, незважаючи на збільшення площі зіткнення стружки з металом, можливе зменшення співвідношення кількості стружки, що переплавляється, до кількості переплавленого металевго електрода.

Для уточнення впливу геометричних параметрів витратного електрода і тигельної печі на умови переплаву стружки була проведена серія експериментів. З цією метою для спрощення виготовлення та зменшення маси металу, що переплавляється, з восьми стандартних периклазових цеглин, як показано на рис. 3.8, була виготовлена невелика тигельна піч з розмірами плавильного простору 160x160 мм (рис.3.9). Днище тигля, знову ж таки для спрощення виготовлення тигля, являло собою струмопровідну графітову плиту.

Дослідні плавки проводили з використанням стружки сталі 12Х18Н10Т дрібної фракції та шлаку АН-295. Загальна маса металу, що переплавлявся, становила 20-25 кг при кількості шлаку 2,5 кг. В експериментах використовувалися витратні електроди круглого перерізу діаметром 60, 70, 80, 90, 100 і 110 мм. Для кожного типорозміру електродів проводилися

щонайменше три плавки. Виконувалися вони за технологією «рідкого старту» із заливкою рідкого виплавленого шлаку в тигель. Стружка подавалася на плавку відразу після заливання шлаку в тигель та початку електрошлакового процесу.

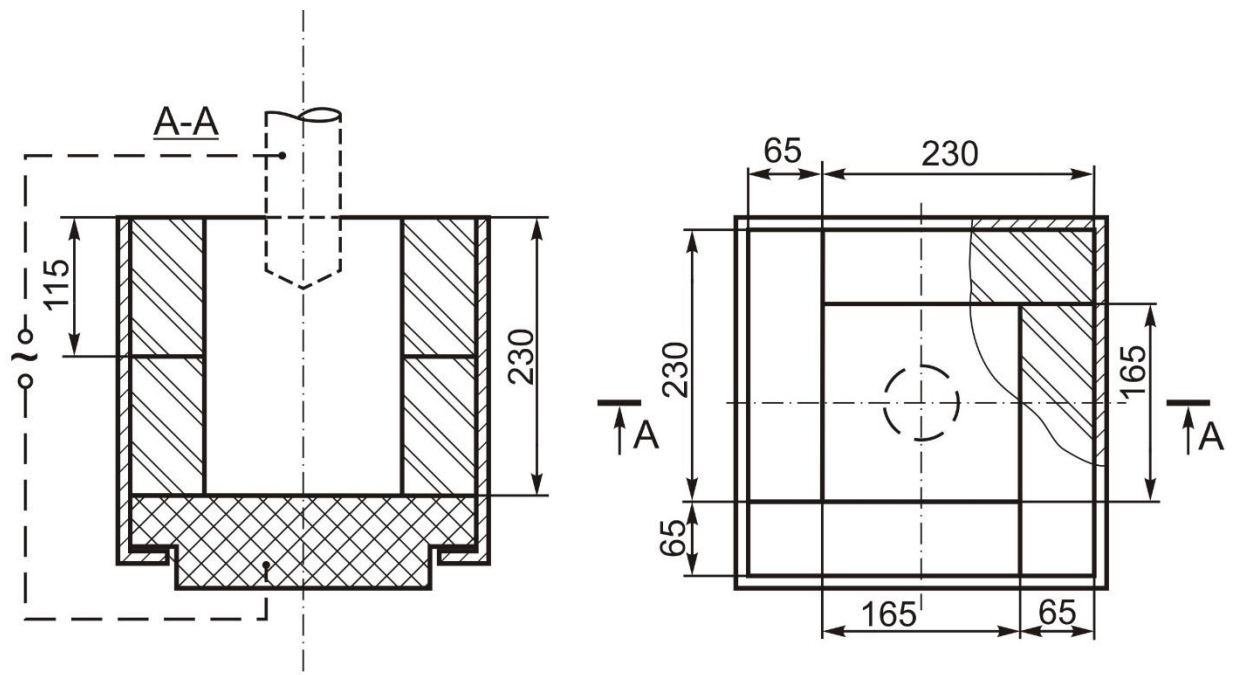


Рис. 3.8. Креслення тигельної печі для проведення досліджень, масштаб 1:5.



Рис. 3.9. Зовнішній вигляд тигельної печі для проведення досліджень.

Результати виконаних експериментів наведено у табл. 3.2 та на рис. 3.10. Як випливає з отриманих даних, найбільша кількість стружки, що

переплавляється, по відношенню до кількості переплавленого витратного електрода досягається при його діаметрі 80 і 90 мм. Звідси можна зробити висновок, що найкращі умови для переробки металеві стружки методом електрошлакової тигельної плавки створюються при відношенні діаметра електрода до приведенного діаметру плавильного простору (тигля) від 0,5 до 0,56.

**Таблиця 3.2.** Вплив геометричних параметрів витратного електрода і плавильної ємності на кількість стружки, що переробляється

Діаметр електрода $d_{\text{ел.}}$ , мм	Відношення $d_{\text{ел.}}/D_{\text{т}}$	Маса переплавленого металу, кг		Відношення кількості стружки до загальної маси переплавленого металу, % мас.	
		Електрода	Стружки	В плавках	Середнє
60	0,375	12,2	8,6	41,3	42,2
		12,7	8,7	40,8	
		13,4	10,7	44,6	
70	0,4375	10,3	13,5	46,6	52,5
		9,8	14,7	56,2	
		10,1	11,9	53,9	
		9,7	12,5	53,2	
80	0,5	8,9	12,1	57,6	58,6
		9,8	14,1	59,1	
		9,9	15,1	60,5	
		9,6	12,9	57,3	
90	0,56	9,8	13,4	57,8	58,7
		9,3	14,5	60,7	
		10,1	13,7	57,4	
		9,7	13,8	58,8	
100	0,625	10,7	13,4	55,7	55,2
		10,6	13,7	56,4	
		10,0	11,6	53,6	
110	0,69	12,6	10,7	45,8	48,5
		11,9	12,0	50,4	
		12,1	11,7	49,2	

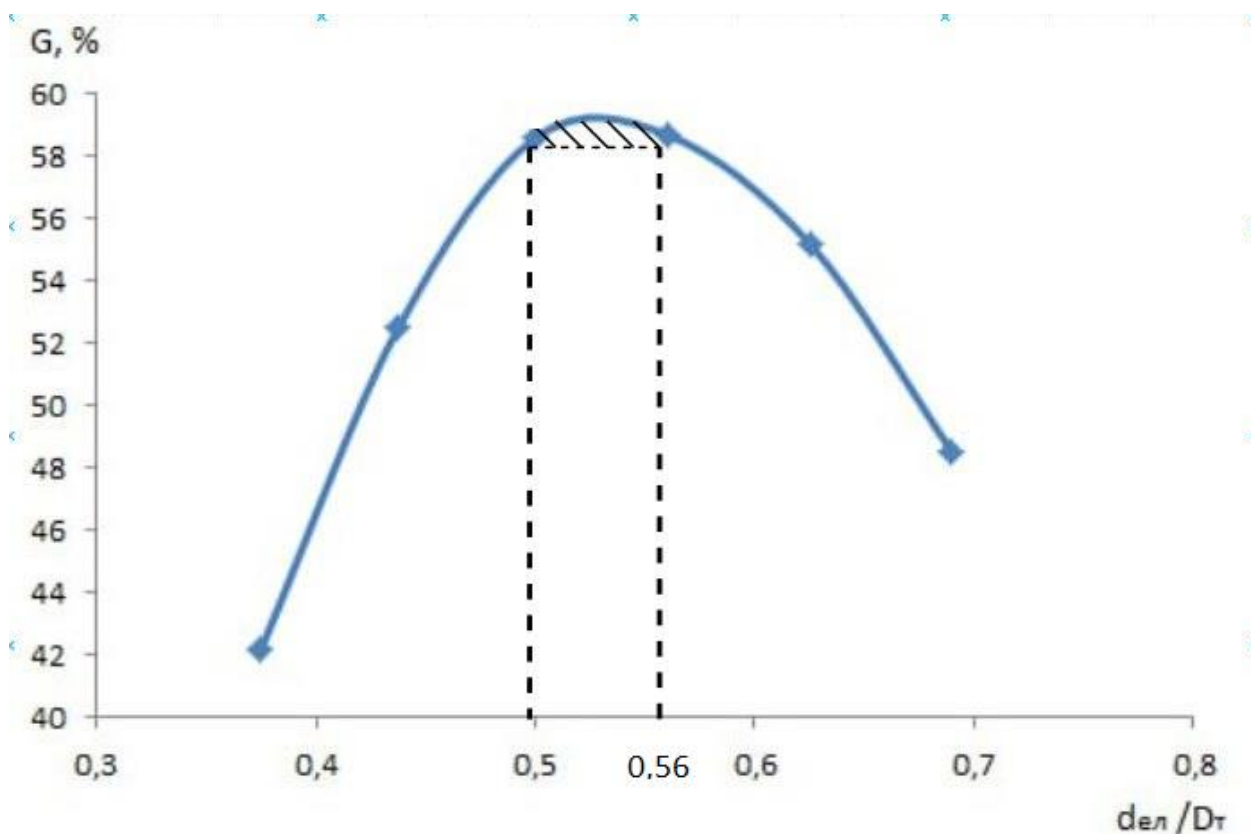


Рис. 3.10. Залежність між ступенем заповнення плавильного простору і кількістю стружки, що переплавляється при ЕШТП.

### 3.3.2. Порівняльні показники різних способів переробки металеві стружки.

Із врахуванням вищенаведених результатів проводилися дослідження з оцінки техніко-економічних показників переробки стружки зі сплавів ХН75МБТЮ (ЕІ602) та 12Х18Н10Т у створеній електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг рідкого металу і порівняння цих показників з даними по переробці стружки методом ЕШП в кристалізаторі і в індукційній тигельній печі.

Дослідні плавки проводили наступним чином. За допомогою витратного електрода, що має приведений діаметр від 120 до 140 мм, отриманого або ливарним методом, або зварюванням кускового лому, за схемою «твердого старту» у тиглі наводилася шлакова ванна із флюсу АН-295. Після повного розплавлення шлакоутворюючих та досягнення потрібної температури шлаку в тигель періодично подавалась стружка [5]. Здійснювалась комбінована плавка

витратного електрода і стружки. Після повного сплавлення витратного електрода накопичений в тиглі рідкий метал зливався в виливницю [22].

Технологічні дані проведених експериментів з переробки стружки методом ЕШТП наведено в табл. 3.3.

**Таблиця 3.3.** Дані експериментів з переробки стружки методом ЕШТП

Варіанти плавки стружки	Марка металу	Початковий матеріал	Маса стружки, кг	Маса плавки, кг	Вид плавки
7	ХН75МБТЮ (ЕІ602)	Злиток ІТП зі стружки	---	59-60	ЕШТП
8	ХН75МБТЮ (ЕІ602)	Злиток ІТП зі стружки з додаванням стружки	30-31	62-64	ЕШТП
9	ХН75МБТЮ (ЕІ602)	Злиток ІТП зі стружки з додаванням стружки	60-61	118-120	ЕШТП
10	12Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту	---	60-90	ЕШТП
11	12Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту з додаванням стружки	33-34	70-73	ЕШТП
12	12Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту з додаванням стружки	60-61,5	120-122	ЕШТП

При аналізі результатів переробки металевої стружки різними способами у першу чергу оцінювалися їх основні техніко-економічні показники. Такими є витрата електроенергії та продуктивність.

Узагальнені показники питомих витрат електроенергії, продуктивності та оцінки якості отриманого металу для різних варіантів плавок наведені в табл. 3.4. Стосовно електрошлакового переплаву враховувалися витрати електроенергії при виготовленні витратного електрода компактуванням

стружки під струмом (варіанти 1, 2, 6). При індукційній плавці брикетів також враховувалися витрати електроенергії на їх виготовлення, а при подвійній індукційній плавці (варіант 5) наведені дані сумарних витрат електроенергії цих двох плавок. При ЕШТП з використанням у якості витратного електрода злитків, отриманих плавкою стружки в ІТП (варіанти 7 та 8), враховувалися витрати електроенергії на ці плавки.

**Таблиця 3.4.** Показники різних видів переробки стружки високолегованих сталей і сплавів

Варіанти плавки стружки	Питомі витрати електроенергії, $q$ , кВт·год/кг	Продуктивність плавки, $P$ , кг/год.	Макроструктура металу
1	2,4-2,8	55-60	Щільна
2	2,5-2,8	55-60	Добра
3	1,7-2,1	55-60	Пористість
4	0,65-0,75	45-50	Пористість
5	1,35-1,5	55-65	Неметалеві включення
6	2,1-2,3	60-65	Щільна
7	1,7-1,75	90-105	Щільна
8	1,5-1,6	120-125	Щільна
9	1,4-1,5	120-135	Щільна
10	0,70-0,75	100-110	Щільна
11	0,60-0,65	125-130	Щільна
12	0,55-0,65	150-160	Щільна

Примітка. Питома витрата електроенергії розрахована без урахування втрат у короткій мережі та джерелі живлення.

Як і слід було очікувати, з огляду на значні енерговитрати на процес брикетування стружки під струмом (1,1-1,4 кВт·год/кг для сплавів EI602 і EI437Б та 0,7-0,9 кВт·год/кг для сталі 12X18H10T), а також електрошлаковий переплав в кристалізаторі, що охолоджується (1,2-1,4 кВт·год/кг), найбільші

питомі витрати електроенергії були при плавках за варіантами 1, 2 і 6. А найменші - при плавці небрикетованої стружки в індукційній печі і електрошлаковій тигельній плавці з використанням електрода з кускового брухту (варіанти 4 та 11, 12). Однак злитки, отримані з металу ІТП, як правило, мали внутрішні дефекти у вигляді поруватості (рис 3.11). Тільки після повторного їх переплаву в індукційній печі вони могли бути придатні для подальшого використання. Проте, якість металу при такому варіанті плавки поступалася якості металу, що був виплавлений в електрошлаковій тигельній печі з аналогічних злитків, отриманих ІТП. Що стосується плавки в ІТП брикетів, то отримані в цьому випадку зливки також можуть бути уражені порами, але значно меншою мірою, порівняно зі зливками, отриманими при плавці небрикетованої стружки.



Рис. 3.11. Вид поперечного перерізу злитка ІТП, виплавленого із небрикетованої стружки.

При спільній ЕШТП витратного електрода і стружки досягається максимальна продуктивність процесу (варіанти 8,9 і 11, 12), яка на 25-40 %

вище в порівнянні з плавкою тільки витратного електрода (варіанти 7 і 10). Більш того, стружка, що подається на плавку, зменшує теплове навантаження на стінки тигля, завдяки чому в кілька разів підвищується стійкість його вогнетривкої футерівки.

Кількість стружки, що додається на плавку, досягала 100 % від маси металевієї заготовки, що переплавлялась. Тобто маса стружки, що перероблялась при ЕШТП в печі ємністю 120 кг, при ступені заповнення плавильного простору витратним електродом, яка при проведенні вищеописаних експериментів коливалася в межах 0,48 - 0,57, становила близько 50 % від маси всієї плавки. Це менше, ніж було в експериментах у печі ємністю 25 кг (рис. 3.10), коли процес починався методом «рідкого старту» і не було витрат переплавленого електрода на наведення шлакової ванни. У разі застосування при плавках у печі ємністю 120 кг «рідкого старту» слід очікувати не меншої кількості стружки, яку можна переробити за одну плавку.

Проведені експерименти щодо різних видів переробки стружки показали, що найкращою з точки зору техніко-економічних показників є технологія електрошлакової плавки в тигельній печі витратного електрода, сформованого з кускових відходів, та одночасним додаванням стружки в процесі плавки.

При відсутності кускового брухту витратний електрод доцільно отримувати з металу, виплавленого в ЕШТП. Тоді при співвідношенні маси витратного електрода до маси стружки, що переплавляється, як 1 : 1 питомі витрати електроенергії на переробку стружки подвоюються і, з урахуванням умов експериментів, що проводились, будуть складати близько 1,1-1,3 кВт·год/кг. Для порівняння в роботі [33] наводяться дані щодо переробки стружки жароміцного сплаву на нікелевій основі EI617 (XH70BMTЮФ) методом ЕШТП, але з використанням невитратного електрода. Витрати електроенергії, згідно з наведеними в цій роботі даними, при такому варіанті плавки складають 1,4-1,8 кВт·год/кг, а продуктивність 120-140 кг/год. Дані показники близькі до тих, що мають місце в наших дослідженнях із використанням литого витратного електрода, отриманого зі стружки, але при



цьому повністю виключається забруднення металу матеріалом невитратного електрода.

Крім техніко-економічних показників у проведених дослідженнях оцінювалися втрати металу при різних варіантах переробки стружки. Зважаючи на те, що стружки нікелевих жароміцних сплавів була обмежена кількість, дані про втрати металу найбільш репрезентативними були при узагальненні великої кількості експериментів з нержавіючою стружкою (табл. 3.5).

**Таблиця 3.5.** Втрати металу при різних видах переробки стружки сталі 12X18H10T

Варіанти плавки стружки	Спосіб переробки стружки	Втрати металу, % мас.
1	ЕШП, компактований електрод	1 - 2
2	ІТП, компактовані брикети	3 – 5
3	ІТП, стружка	4 – 7
4	ЕШТП електрода із кускового брухту з додаванням стружки	2 – 2,5

У таблиці 3.5 наведено загальні втрати металу під час переробки стружки. Вони можуть складатися з вигару (окислення) тих чи інших елементів, що входять до складу металу, втрат у литниковій системі при розливі виплавленого металу в ту чи іншу форму, а також при відновленні оксидної плівки, яка в якійсь кількості може бути на поверхні стружки. Крім того, на поверхні стружки можуть бути залишки вологи та змазувально-охолоджуючої рідини (ЗОР).

Із наведених даних видно, що найменші втрати металу були при електрошлаковому переплаві скомпактованого електрода, а найбільші - при індукційній плавці стружки. Цього слід було очікувати, тому що саме при третьому варіанті переробки стружки метал найбільше схильний до контакту з

навколишньою атмосферою. Крім того, при індукційній плавці були втрати в проміжному жолобі, який використовувався при переливі рідкого металу з печі у виливницю.

Власне кажучи, втратами металу як такими, із загальних втрат є вигар та втрати в литниковій системі. Зменшити останні можливо за рахунок оптимізації процесу розливки, наприклад, розливати метал безпосередньо з індукційної або електрошлакової тигельної печі в ту чи іншу форму. Однак при індукційній плавці організувати таке розливання проблематично. При ЕШТП при можливості кріплення форми до зливного носка тигля, як це показано на рис. 3.12, втрати в литниковій системі виключаються.

Для зниження втрат на вигар у першу чергу необхідно виключити контакт металу, що плавиться, з навколишньою атмосферою. При ЕШП та ЕШТП метал плавиться у шарі перегрітого шлаку, тобто не контактуючи з киснем повітря. Однак кисень міститься в шлаках, які являють собою оксидно-фторидний розплав. Тому втрати легуючих елементів можуть бути при взаємодії металу зі шлаком.

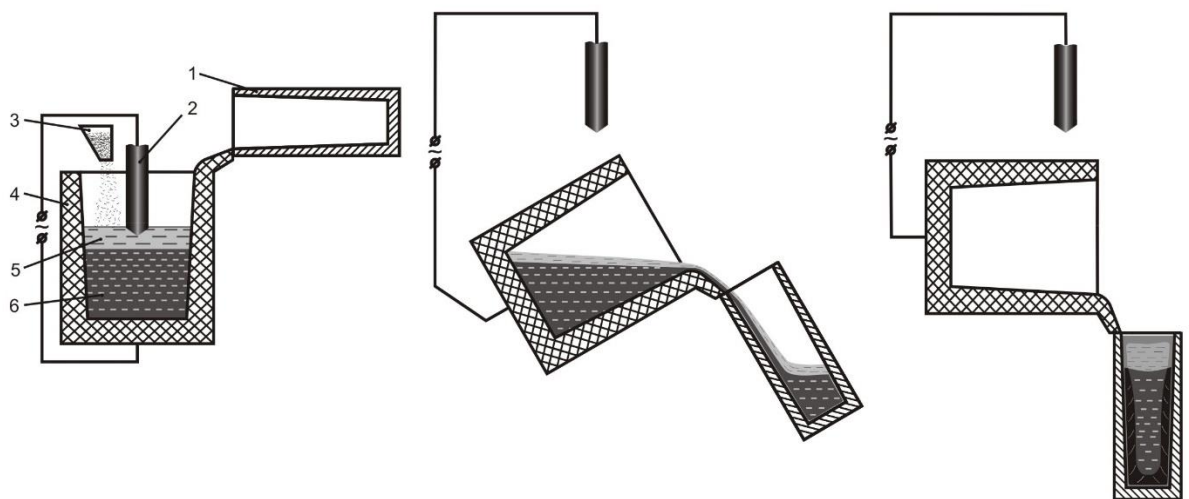


Рис. 3.12. Схема електрошлакової тигельної плавки з переливом металу з печі у форму.

Однією з переваг електрошлакової тигельної плавки є можливість проведення активних металургійних заходів для рафінування металу, його

розкислення та долегування, а також запобігання або компенсація вигару легуючих елементів. При плавці жароміцних сплавів та нержавіючої сталі особливої уваги вимагає вивчення поведінки титану та алюмінію, які при електрошлаковій плавці можуть окислюватися компонентами шлаку та їх вміст може виходити за межі вимог технічних умов на хімічний склад отриманого металу.

## ВИСНОВКИ

1. Виконані експерименти з компактування стружки жароміцних нікелевих сплавів та нержавіючої сталі під струмом. Визначено, що питомі витрати електроенергії на брикетування стружки сплавів EI602 і EI437Б складають 1,1-1,4 кВт·год/кг, а для сталі 12X18H10T – 0,7-0,9 кВт·год/кг.

2. Виконані, стосовно спільної плавки витратного електрода і стружки в електрошлаковій тигельній печі, дослідження впливу ступеня заповнення плавильного простору переплавленням електродом на кількість стружки, що переплавляється. Встановлено, що максимальна кількість стружки переробляється при ступені заповнення 0,5 – 0,56.

3. Виконано експерименти з переробки брикетованої та небрикетованої стружки різними методами – ЕШП, ІТП та ЕШТП. Показано, що найменші питомі витрати електроенергії 0,55-0,65 кВт·год/кг та найбільша продуктивність процесу 130-160 кг/год були при спільній плавці небрикетованої стружки та витратного електрода з кускового брухту в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг.

4. Показано, що при ЕШТП внаслідок того, що плавка стружки відбувається у шарі шлаку без контакту з атмосферою, втрати на вигар становлять 2,0-2,5 % головним чином за рахунок вигорання сторонніх домішок та залишків змазувально-охолоджувальної рідини.

## РОЗДІЛ 4

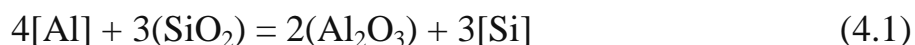
### МЕТАЛУРГІЙНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ПЛАВКИ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ ТА ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

Окрім техніко-економічних переваг при електрошлаковій тигельній плавці, як уже відмічалось, є можливість проведення активних металургійних заходів з метою запобігання або компенсації вигару легуючих елементів. Для застосування на практиці тих чи інших технологічних операцій, направлених на збереження хімічного складу металу, необхідні дані про особливості і закономірності поведінки легуючих елементів у конкретному технологічному процесі. Тому наступний етап робіт з рециклігу стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі був присвячений дослідженням вищезгаданих закономірностей.

#### **4.1. Термодинамічний аналіз поведінки титану та алюмінію при електрошлаковій плавці жароміцних нікелевих сплавів та нержавіючої сталі.**

В умовах електрошлакових переплавних процесів метал плавиться в товщі шлакового розплаву, не контактуючи з навколишньою атмосферою. Тому на відміну від плавки в індукційній печі, а тим більше в електродуговій, безповоротні втрати металу за рахунок його окислення киснем повітря відсутні. Проте, як добре відомо з теорії та практики електрошлакового переплаву, за наявності у складі металу, що переплавляється, елементів з високою активністю (високою спорідненістю до кисню), вміст їх може змінитися у бік зменшення [41,42].

Основою переважної більшості шлаків, що застосовуються при ЕШП, є окисно-фторидна система  $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ . У використаних в роботі жароміцних сплавах і нержавіючій сталі високоактивними елементами є алюміній і титан. Вони є відновниками по відношенню до оксиду кремнію та оксиду заліза, які містяться в шлаці, і можуть вступати з ними у реакції:



В результаті алюміній і титан переходять у шлак, утворюючи там відповідні оксиди, а кремній, як і залізо, розчиняються у металі. Тому при електрошлаковому переплаві металів, легованих елементами з високою спорідненістю до кисню, використовують шлаки з мінімально можливим вмістом оксидів, які можуть бути відновлені цими елементами. Такими є, наприклад, флюси марки АНФ-1П, АНФ-6 і використаний у нашій роботі флюс АН-295.

При ЕШП застосовуються плавлені флюси, тобто отримані плавкою вихідних шихтових компонентів в електродуговій флюсоплавильній печі з використанням в якості струмопідводів графітизованих електродів. При цьому оксид заліза легко відновлюється вуглецем електродів і його вміст у виплавленому флюсі досить низький, не більше 0,5 % мас. Кремнезем за температурних умов, які мають місце під час виплавки флюсу, якщо і відновлюється вуглецем, то незначно. Тому за рахунок підбору шихтових компонентів з низьким вмістом кремнезему домагаються вимог технічних умов на згадані вище флюси, в яких повинно бути не більше 2,5 % оксиду кремнію.

Неважко підрахувати, що при масі металу, що переплавляється в наших умовах при ЕШП, 120 кг, співвідношенні мас металу до шлаку 10:1 і вмісту в шлаці 2 % мас.  $\text{SiO}_2$  втрати алюмінію та титану за рахунок перебігу реакцій 4.1 та 4.2 можуть становити близько 144 та 192 гр. відповідно. У цьому випадку, наприклад, при вихідному вмісті титану 0,6 % мас. в металі, що переплавляється, його вміст може знизитися тільки за рахунок відновлення кремнію до 0,44 % мас. Але за наявності в металі алюмінію, який є сильнішим відновником у порівнянні з титаном, втрати останнього можуть бути набагато нижчими. Станеться це за рахунок переважного перебігу реакції 4.1 з відповідними втратами алюмінію.

Слід зазначити, що при електрошлаковій плавці взаємодія між металом і шлаком не обмежується реакціями 4.1 – 4.4. У масообмінних процесах беруть участь усі компоненти та елементи контактуючих фаз. А результати взаємодії залежать від складу металу та шлаку, а також температурних умов плавки. Крім того, необхідно розуміти, що в реальних умовах шлак контактує з атмосферою, що містить кисень, який може розчинятися у шлаці. А це може призвести до додаткового вигару високоактивних елементів.

Проблемі запобігання втратам алюмінію та титану при електрошлаковій плавці присвячено велику кількість робіт. Вони проводилися як на початку широкого освоєння технології ЕШП [43-45], так і продовжуються в сучасних умовах [46-49]. Справа в тому, що розширюється номенклатура металу, що переплавляється, змінюються склади шлаків, створюються нові електрошлакові технології та установки. Тому і виконуються відповідні дослідження, щоб уникнути відбракування за хімічним складом виплавленого металу.

Практично всі дослідження з даної теми стосуються класичного переплаву витратних електродів з поступовим затвердінням металу по ходу плавки у водоохолоджуваному кристалізаторі. Зазначається необхідність виключення зі складу використовуваних шлаків оксидів з низькою спорідненістю до кисню, пропонується використовувати витратні електроди з підвищеним вмістом титану і алюмінію для отримання зливка з необхідним їх вмістом. Важливим є захист плавильного простору від навколишньої атмосфери. У ряді робіт пропонується для запобігання вигару титану вводити в шлак оксид титану.

Фундаментальні дослідження поведінки титану та алюмінію у системі метал-шлак при ЕШП нікелевих суперсплавів провели корейські вчені. У своїй роботі [46] вони для сплавів нікелю з різним вмістом алюмінію та титану отримали важливі залежності рівноважного вмісту оксидів алюмінію та титану у шлаці від вмісту цих елементів та їх співвідношення у вихідному сплаві. Тим самим, як стверджують автори роботи, вони забезпечували коригуванням

складу шлаку збереження алюмінію і титану в 120 кг злитку ЕШП з нікелевих суперсплавів на рівні вмісту цих елементів в електроді, що переплавлявся.

Тим не менш, використання результатів даної роботи для оцінки втрат алюмінію та титану при ЕШТП жароміцних сплавів, що застосовувалися в наших дослідженнях, може призвести до помилкових результатів. Справа в тому, що в експериментах з розподілу цих елементів між шлаком і металом використовувалися не конкретні марочні нікелеві сплави, а модельні сплави, що складаються з основи (нікелю) з добавками 2,5 % мас. вуглецю та різними концентраціями алюмінію та титану [46]. Такий високий вміст вуглецю був обумовлений тим, що експерименти здійснювалися з використанням графітового тигля, в який встановлювалися алундові тиглі з випробовуваними металом та шлаком, і існувала можливість попадання графіту в метал. Крім того, використовувалися модельні шлаки системи  $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$  без оксиду кремнію, який у реальних умовах відіграє важливу роль у аналізованому процесі. Вміст фториду кальцію у цих модельних шлаках був від 30 до 50 % мас., оксиду кальцію від 25 до 40 % мас., оксиду алюмінію від 15 до 25 % мас., а оксиду титану від 1 до 30 % мас.

З тієї ж причини - суттєвої відмінності складу шлаків, не можна скористатися і даними роботи [47], присвяченої контролю Al і Ti при ЕШП нержавіючої сталі марки 1Cr21Ni5Ti. Вміст алюмінію в цій сталі був 0,04-0,05 % мас., а титану 0,5-0,6% мас., що практично такий же, як у нержавіючої сталі 12X18H10T.

Основна відмінність у складі шлаків, які використовуються при ЕШТП, є нижчий вміст  $\text{CaF}_2$ , ніж у шлаках для ЕШП. Пояснюється це необхідністю обмеження агресивного впливу фториду кальцію на футерівку плавильної ємності. Крім того, для підвищення електричного опору шлакової ванни і тим самим температури і швидкості плавки, шлаки, що застосовуються для ЕШТП, містять підвищену кількість оксиду алюмінію. Так, у використаному нами шлаці АН-295 кількість фториду кальцію знаходиться в межах від 11 до 17 % мас., а при ЕШП використовуються шлаки з вмістом фториду кальцію від 30 до



95 % мас. Вміст оксиду алюмінію згідно з технічними вимогами в шлаці АН-295 має бути в межах 49-56 % мас., у той час як у шлаках для ЕШП вміст цього компонента зазвичай не перевищує 30 % мас.

Така відмінність у хімічних складах шлаків ЕШТП та ЕШП визначає і відмінність у поведінці титану та алюмінію при плавці металів цими способами. Це ускладнює, про що йшлося вище, використання повною мірою розроблених стосовно ЕШП заходів щодо контролю вмісту високореакційних елементів у металі, що виплавляється. Тому був виконаний термодинамічний аналіз перерозподілу елементів в системі шлак-метал стосовно умов, що мають місце при електрошлаковій тигельній плавці.

При аналізі поведінки алюмінію та титану при ЕШТП жароміцних сплавів та нержавіючої сталі скористаємося реакцією взаємообміну (4.5) цих елементів, яка по суті є сумою реакцій 4.1 та 4.2.



Для розрахунків за участю розчинів, якими в нашому випадку є рідкий метал і рідкий шлак, необхідні дані щодо активностей елементів та компонентів у фазах, що контактують. Щодо металу, то в даний час вони визначаються із застосуванням спеціальних програм. За відсутності таких програм активність розчинених у металі елементів розраховують з використанням наявних у літературі даних параметрів взаємодії, які враховують взаємовплив компонентів розчину на їх термодинамічні характеристики.

Програми для визначення активності алюмінію і титану в нікелевих сплавах, враховуючи, що вони менш поширені і найчастіше мають спеціальне призначення, у нашому розпорядженні були відсутні. Також у доступній літературі відсутні надійні дані про параметри взаємодії для нікелевих сплавів, тим паче складнолегованих. Тому кількісний термодинамічний аналіз для таких сплавів виконати складно. Можна лише відзначити, що високий вміст оксиду алюмінію в шлаці АН-295 перешкоджатиме переходу алюмінію з металу в шлак і його втрати якщо і будуть, то повинні бути незначними. У той же час досить високий вміст алюмінію в досліджуваних сплавах EI602 та EI437Б буде,

у разі окислення титану з утворенням у шлаці оксиду титану, сприяти відновленню  $\text{TiO}_2$ , тобто перешкоджати вигару титану з металу. Більш того, додавання в шлак оксиду титану може призвести до збільшення вмісту титану в металі. Про це свідчать дані роботи [46], згідно з якими при витримці сплаву нікелю з вмістом 0,7 % мас. Al та 0,8 % мас. Ti під шлаком із вмістом  $\text{TiO}_2$  15 % мас. у рівноважному стані вміст титану в металі збільшився до 1,4 % мас.

На відміну від нікелевих сплавів, нержавіюча сталь досить добре вивчена і є перевірені термодинамічні дані про її властивості. Для визначення активності елементів сталі 12X18H10T використовували широко поширену програму «Termo-Calc». У табл. 4.1 наведено дані розрахунку за цією програмою активності основних елементів при температурі 1873K (1600°C).

**Таблиця 4.1.** Активність основних елементів в сталі 12X18H10T

Склад 1			Склад 2			Склад 3		
Вміст елемента, % мас.		Активність	Вміст елемента, % мас.		Активність	Вміст елемента, % мас.		Активність
C	0,1	$1,95 \cdot 10^{-5}$	C	0,1	$1,89 \cdot 10^{-5}$	C	0,1	$1,86 \cdot 10^{-5}$
Si	0,7	$4,2 \cdot 10^{-5}$	Si	0,7	$3,8 \cdot 10^{-5}$	Si	0,7	$3,95 \cdot 10^{-5}$
Mn	1,8	$1,35 \cdot 10^{-2}$	Mn	1,8	$1,36 \cdot 10^{-2}$	Mn	1,8	$1,37 \cdot 10^{-2}$
Cr	18	$1,76 \cdot 10^{-1}$	Cr	18	$1,78 \cdot 10^{-2}$	Cr	18	$1,78 \cdot 10^{-1}$
Ni	10	$7,27 \cdot 10^{-2}$	Ni	10	$7,34 \cdot 10^{-2}$	Ni	10	$7,36 \cdot 10^{-2}$
Ti	0,5	$4,74 \cdot 10^{-4}$	Ti	0,7	$6,71 \cdot 10^{-4}$	Ti	0,8	$8,80 \cdot 10^{-4}$
Al	0,04	$0,64 \cdot 10^{-4}$	Al	0,04	$0,62 \cdot 10^{-4}$	Al	0,04	$0,60 \cdot 10^{-4}$

Необхідні для розрахунків дані щодо активності компонентів шлаку визначали методом, описаним у роботі [50], в якій шлаковий розплав розглядається як ядерна матриця з колективізованою системою електронів. Розрахунки за такою методикою повністю забезпечені чисельними

енергетичними параметрами елементів ( $\chi_i$ ), необхідними для оцінки активностей. Відповідно до цього методу:

$$a_A = C_A \phi_A, \quad (4.6)$$

де  $a_A$  - активність елемента А шлакового розплаву;

$C_A$  - повна аналітична концентрація елемента А, виражена в атомних частках;

$\phi_A$  - атомний коефіцієнт активності елемента А.

У формулі (4.6) значення атомного коефіцієнта активності визначається енергією обміну (змішування) складових шлакового розплаву, їх концентрацією та температурою і розраховується за даними енергетичних параметрів елементів ( $\chi_i$ ).

Дані складу шлаку АН-295 з різним вмістом  $\text{TiO}_2$ , який вводиться для оцінки його впливу на перерозподіл титану між шлаком і металом, і розрахунку за методикою, що описується, активності елементів і компонентів цих шлаків при температурі 1873К (1600°C), наведені в табл. 4.2 та 4.3.

**Таблиця 4.2.** Склад шлаків

Шлак	Вміст, % мас.				
	$\text{CaF}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$
1	15	52,3	30,1	0,1	2,5
2	14	51,4	29,1	3	2,5
3	14	50,3	28,2	5	2,5
4	13,4	49,1	27	8	2,5

**Таблиця 4.3.** Активність елементів і компонентів в шлаці АН-295

Шлак	Активність							
	Ca	Al	Ti	Mg	F	O	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$
1	0,4095	0,5701	$0,71 \cdot 10^{-3}$	0,0362	0,2208	0,8976	$0,572 \cdot 10^{-3}$	0,235
2	0,3952	0,5638	0,0214	0,0364	0,2070	0,9049	0,0175	0,2355
3	0,3880	0,5565	0,0328	0,0366	0,2068	0,9052	0,0269	0,230
4	0,3735	0,5491	0,0577	0,0358	0,1929	0,9122	0,048	0,2288

Згідно з наведеними в роботі [51] даними зміна стандартної вільної енергії реакції (4.5), написаної у вигляді



рівна:

$$\Delta G^0 = -188\,200 + 32,33T \text{ Дж/моль} \quad (4.7)$$

Константа рівноваги (K) реакції (4.6)

$$K = \frac{a_{(Al_2O_3)}^{2/3} a_{[Ti]}}{a_{(TiO_2)} a_{[Al]}^{4/3}} \quad (4.8)$$

де  $a_{(Al_2O_3)}$  – активність оксиду алюмінію в шлаці;

$a_{(TiO_2)}$  – активність оксиду титану в шлаці;

$a_{[Ti]}$  і  $a_{[Al]}$  – активність титану і алюмінію в металі;

З (4.8) випливає, що рівноважну активність оксиду титану в системі метал-шлак можна визначити з виразу:

$$a_{(TiO_2)} = \frac{a_{(Al_2O_3)}^{2/3} \cdot a_{[Ti]}}{K \cdot a_{[Al]}^{4/3}} \quad (4.9)$$

Константа рівноваги реакцій пов'язана із зміною вільної енергії залежністю:

$$\Delta G^0 = -RT \cdot \ln K \quad (4.10)$$

де R – універсальна газова постійна, вона дорівнює 8,314 Дж/моль·Т.

Із (4.10) отримуємо  $\ln K = -\Delta G^0 / RT$  або  $\lg K = -\Delta G^0 / 2,303 \cdot RT$ .

Підставляючи обчислене із рівняння (4.7) для температури 1873К значення  $\Delta G^0$  можна визначити величину K:

$$\lg K = \frac{-188200 + 32,33T}{2,303 \cdot RT} = \frac{-188200 + 32,33 \cdot 1873}{2,303 \cdot 8,314 \cdot 1873} = 3,55. \quad (4.11)$$

Звідси  $K = 3\,548$ .

В цьому випадку при електрошлаковій плавці сталі 12Х18Н10Т із вмістом алюмінію 0,04 % мас. для збереження в металі 0,8 % титану активність оксиду титану в шлаці відповідно до рівняння (4.9) має бути

$$a_{(TiO_2)} = \frac{a_{(Al_2O_3)}^{2/3} \cdot a_{[Ti]}}{K \cdot a_{[Al]}^{4/3}} = \frac{0,235 \cdot 8,8^{-4}}{3548 \cdot 0,24^{-5}} = 0,0243. \quad (4.12)$$

За даними табл. 4.3 при вмісті в шлаці АН-295 3, 5 та 8 % мас.  $\text{TiO}_2$  активність цього оксиду становить відповідно 0,0175; 0,0269 та 0,048. Тобто отримана за рівнянням (4.12) розрахункова активність оксиду титану близька до такої при вмісті в шлаці 5 % мас.  $\text{TiO}_2$ .

Таким чином, виконаний термодинамічний аналіз поведінки титану та алюмінію стосовно електрошлакової плавки сталі 12Х18Н10Т з використанням шлаку АН-295 показує, що для виключення втрат титану необхідно вводити в шлак близько 5 % мас. оксиду титану. Для перевірки та уточнення цього висновку були проведені експерименти з контролем вмісту титану в металі та його оксиду в шлаці при ЕШТП нержавіючої сталі.

#### **4.2. Дослідження розподілу титану між шлаком та металом при ЕШТП нержавіючої сталі.**

Експерименти проводили шляхом плавки витратних електродів зі сталі 12Х18Н10Т діаметром 80 мм виробництва заводу «Дніпроспецсталь» у футерованій магнезитовою цеглою плавильній ємності перетином 160х160 мм, яка раніше використовувалася для дослідження впливу ступеня заповнення плавильного простору на кількість переплавленої стружки (розділ 3). В якості шлакоутворюючого використовували флюс марки АН-295 виробництва Нікопольського феросплавного заводу. Маса металу, що переплавлявся, становила 15 кг, а маса шлаку – 2 кг.

Хімічний склад використовуваної в експериментах сталі наведено в табл. 4.4, а хімічний склад шлаків - в табл. 4.5.

**Таблица 4.4.** Хімічний склад сталі 12Х18Н10Т

Вміст, % мас.								
C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Al	S	O
0,11	18,3	9,8	1,6	0,65	0,73	0,04	0,02	0,0045

**Таблиця 4.5.** Хімічний склад шлаку АН-295

Шлак	Вміст, % мас.					
	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>
1	14,8	51,6	29,1	0,05	2,8	1,6
2	14,3	50,4	28,5	3	2,8	1,6
3	14	50,3	28,2	5	2,7	1,55
4	13,4	49,1	27,0	8	2,6	1,5

У процесі електрошлакової плавки відбирали проби металу для визначення вмісту титану і проби шлаку для визначення вмісту оксиду титану. Результати, узагальнені за трьома-чотирма експериментами для кожного складу шлаку, наведені на рис. 4.1 та 4.2.

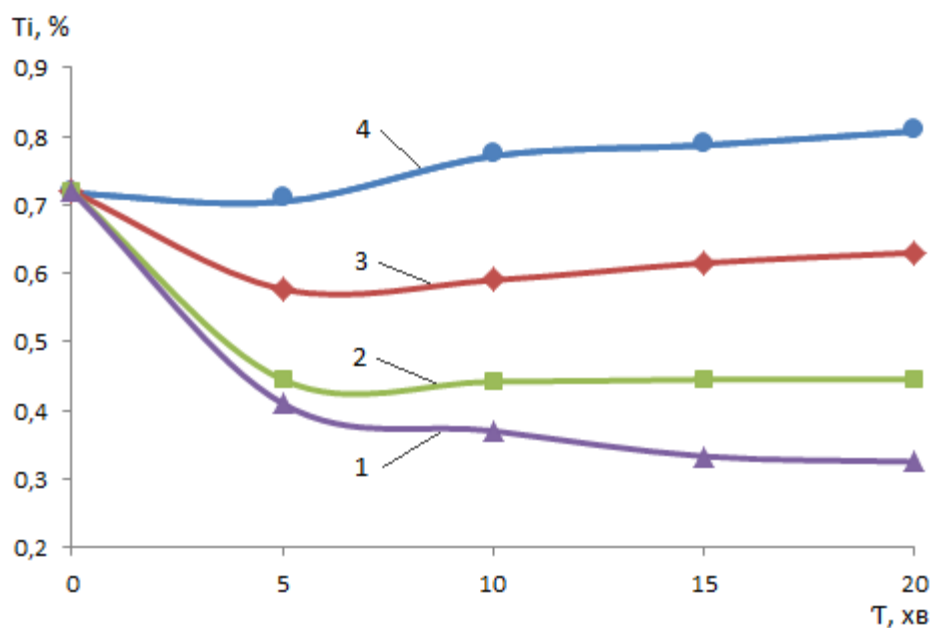


Рис. 4.1. Зміна вмісту титану у металі.  
1,2,3 і 4 – номери шлаків.

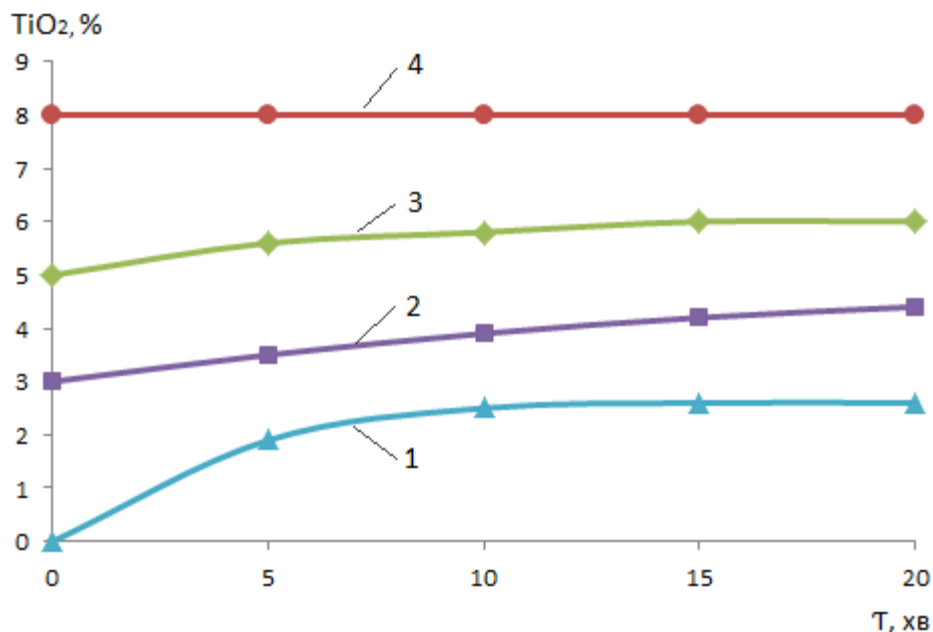


Рис. 4.2. Зміна вмісту оксиду титану в шлаці.  
1,2,3 і 4 – номери шлаків.

Як видно з отриманих даних, в умовах проведених експериментів за відсутності добавки оксиду титану в шлак вміст титану в металі знижується практично вдвічі, з 0,73 до 0,35 % мас. При додаванні до шлаку  $\text{TiO}_2$  втрати титану з металу зменшуються. Відповідно до термодинамічних розрахунків при вмісті оксиду титану в шлаці 5 % мас. рівноважний вміст титану у металі становить 0,8 % мас. Однак в умовах експериментів при введенні в шлак такої кількості  $\text{TiO}_2$  втрати титану відбувалися і його вміст встановлювався на рівні 0,65 % мас.

Пояснюється це, на нашу думку, дією двох чинників. По-перше, наявністю в шлаці оксиду кремнію, внаслідок чого протікає реакція (4.2) з втратами титану із металу. Це підтверджують дані експериментів, під час яких відбувалося різке зниження вмісту титану в металі у перші періоди плавки.

По-друге, температурними умовами. Термодинамічні розрахунки були проведені для температури шлаку і металу 1873K (1600°C). В реальних умовах електрошлакової плавки температура шлаку зазвичай на 50-100 ° вище за температуру металу. Крім того, температура нерівномірна в об'ємі шлакової ванни. Вона має максимальні значення під електродом, що плавиться, і

мінімальні по її периферії. Виконані під час проведення експериментів виміри показали, що температура шлаку була близько 1650 °С. А як показано в роботі [46] зі збільшенням температурних умов ЕШП нікелевих сплавів для збереження заданого вмісту титану в металі необхідно вводити в шлак більшу кількість оксиду титану.

Ці два фактори визначили, що в умовах експериментів вихідний вміст титану в металі зберігався при вмісті оксиду титану в шлаці 8 % мас. Більше того, в цьому випадку в деяких експериментах спостерігалось навіть невелике збільшення вмісту титану в металевій ванні.

У процесі проведених експериментів, крім титану, визначався вміст алюмінію в металі. Отримані дані наведено на рис. 4.3.

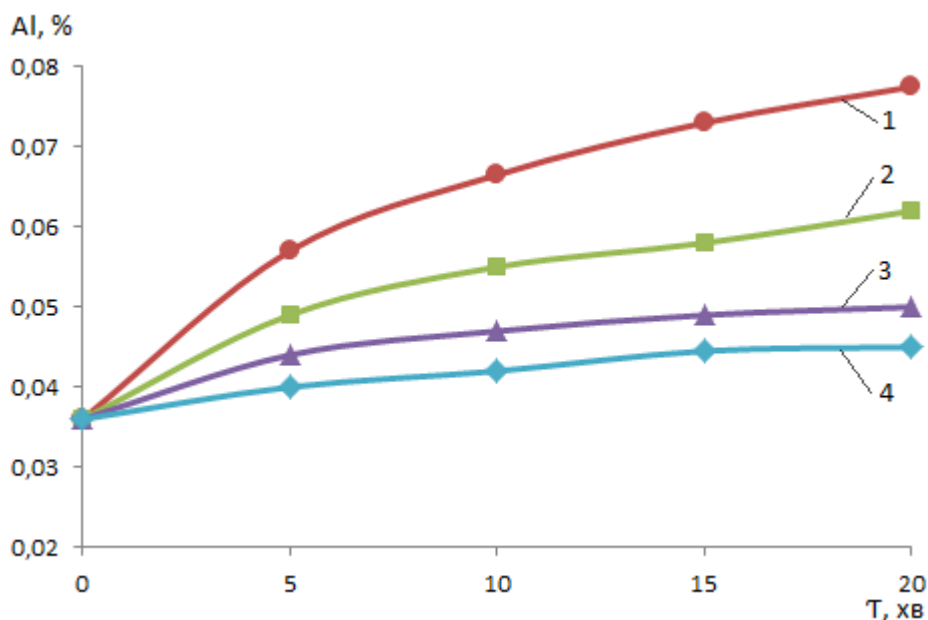


Рис. 4.3. Зміна вмісту алюмінію в металі.  
1,2,3 і 4 – номери шлаків.

Як видно з останнього рисунку, концентрація алюмінію в металі змінюється незначно, особливо при введенні в шлак оксиду титану. Алюміній у сталі 12Х18Н10Т не є легуючим елементом та вміст його не регламентується технічними умовами на цей метал. Враховуючи це, а також дані проведених експериментів, будь-яких технологічних заходів щодо коригування вмісту алюмінію не потрібно.



Аналогічні експерименти були виконані при переробці стружки нікелевих сплавів EI602 та EI437Б. При цьому як витратний струмопідвідний електрод використовувалися зливки діаметром 75-85 мм, отримані плавкою стружки цих сплавів в індукційній тигельній печі. У дослідженнях застосовувався шлак АН-295 без добавок до нього оксиду титану.

Аналіз поведінки титану і алюмінію показав, що в умовах проведених експериментів вміст цих елементів змінюється незначно і в одержуваному металі знаходиться в межах вимог технічних умов на розглянуті марки металу. Тільки в окремих плавках стружки сплаву EI437Б спостерігався невеликий вигар титану і його вміст був на 0,1 – 0,2 % нижче від необхідного. Причиною цього є порівняно високий вміст титану у цьому сплаві (2,4 – 2,8 %) і, відповідно, висока його активність у металі. Крім того, могло бути тимчасове підвищення температури шлаку, яка у порівняно невеликій за обсягом шлакової ванні може змінюватися навіть при коливаннях напруги в мережі 380 В, від якої живиться пічний трансформатор. А також, наприклад, через занижену швидкість подачі стружки на плавку.

При використанні великої плавильної ємності і більшої теплової інерційності шлакової ванни можливі короточасні, з тих чи інших причин, зміни технологічних параметрів процесу, які не будуть призводити до істотної зміни температури шлаку. Тим не менш, надалі при переробці стружки нікелевого сплаву EI437Б в електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг металу передбачається використання шлаку АН-295 з добавкою 3%  $\text{TiO}_2$ .

Що стосується переробки стружки нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, виконані термодинамічний аналіз та експерименти показують, що для запобігання втратам титану з металу необхідно вводити в шлак АН-295 5 – 8 % мас. оксиду титану. Така зміна складу шлаку може призвести до зміни його фізичних властивостей, зокрема електропровідності.

Електрошлакова плавка базується на електрошлаковому процесі, коли при проходженні електричного струму через розплав шлаку виділяється Джоулеве тепло, кількість якого багато в чому визначається

електропровідністю шлаку. Тому вона має бути в певних межах для забезпечення стабільного перебігу електрошлакового процесу та температурних умов плавки.

Занадто висока електропровідність може призвести до короткого замикання між електродом, що плавиться, і металевою ванною. А занадто низька електропровідність може перевести процес з електрошлакового в дугошлаковий з непередбачуваним вигаром металу, особливо його складових, що легко окислюються, зокрема титану.

На електропровідність шлаку впливає вміст та співвідношення в ньому компонентів, що сприяють підвищенню або зниженню цього показника. Приміром, фторид кальцію спеціально вводиться в оксидний розплав, тобто шлак, що складається з різних оксидів ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  та ін), для підвищення електропровідності шлаку. З літературних даних по виплавці з ільменіту титанового шлаку відомо, що збагачення шлакового розплаву оксидом титану призводить до збільшення його електропровідності [52]. Відомості про вплив оксиду титану на провідність шлаку АН-295 відсутні. Тому для розробки технології переробки стружки нержавіючої сталі методом ЭШТП необхідно було визначити вплив добавок оксиду титану на електропровідність шлаку АН-295.

#### **4.3. Дослідження впливу вмісту оксиду титану на електропровідність шлаку АН-295.**

Електропровідність шлаків визначали за стандартною методикою, описаною у роботі [53]. Заснована вона на вимірі за методом Кольрауша електроопору між двома електродами, зануреними в рідину. Пристрій для дослідження електропровідності за цим методом включає два основні елементи - електролітичну комірку, де знаходиться тигель з рідким шлаком, електроди, датчик температури і вимірювальну апаратуру. При виборі матеріалу тигля та електродів електролітичної комірки звертається увага на їх стійкість по відношенню до корозійно-агресивної дії шлакових розплавів, електропровідність яких необхідно визначати.

Дослідження здійснювалися на створеній в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона установці для визначення електропровідності рідких шлаків і флюсів, схема якої наведена на рис. 4.4 [54].

Установка укомплектована графітовою нагрівальною піччю опору ПВП-2 зі зварювальним трансформатором ТСШ-500, електро- та тепловимірювальною апаратурою, а також електролітичною коміркою. Ця комірка складається з молибденового тигля, в якому розплавляється і нагрівається шлак, двох молибденових електродів діаметром 1,5 мм, ізольованих один від одного алундовими трубочками, між якими в захисному алундовому чохлі розташований спай вольфрам-ренієвої термопари.

У схему компенсаційного мосту входять три магазини опору з межами вимірювання опору від 0,01 до 10 000 Ом та магазин ємності. Дані вимірювання фіксуються осцилографом і потім обробляються за допомогою комп'ютера. Отриманий під час вимірювань опір шлаку перераховується на його електропровідність.

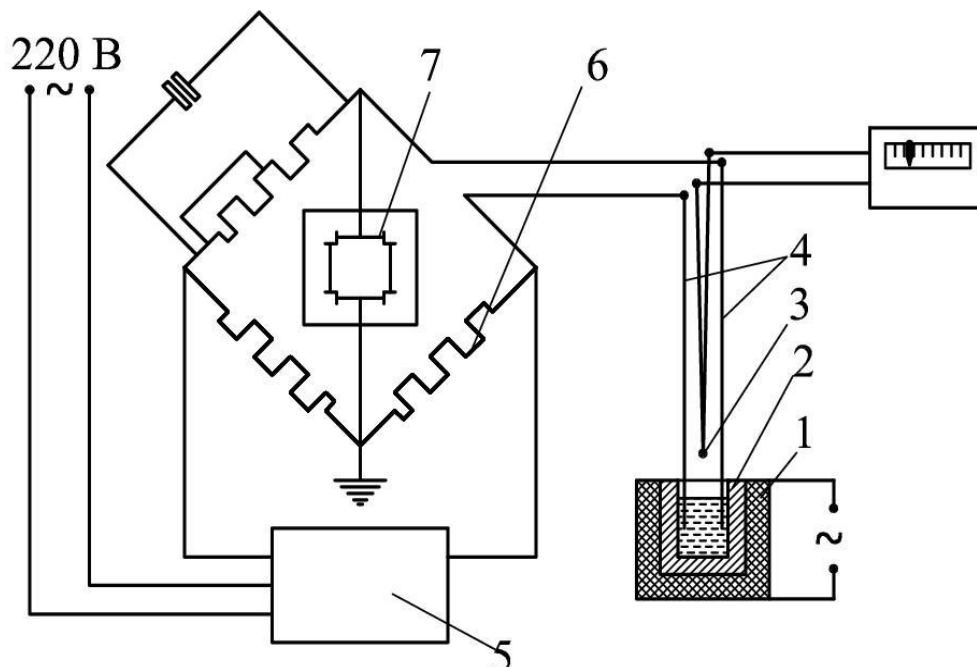


Рис. 4.4. Схема установки для вимірювання електропровідності розплавленого шлаку:  
1-графітовий нагрівник; 2-молибденовий тигель; 3-термопара;  
4-електроди; 5-звуковий генератор; 6-магазин опорів; 7-осцилограф.

Досліджувалися шлаки з добавками у флюс АН-295 три, п'ять, вісім і дванадцять відсотків оксиду титану. Результати досліджень наведено у табл. 4.6 та на рис. 4.5 і 4.6.

**Таблиця 4.6.** Результати вимірювання електропровідності шлаку АН-295 з різним вмістом оксиду титану

0 % TiO <sub>2</sub>		3 % TiO <sub>2</sub>		5 % TiO <sub>2</sub>		8 % TiO <sub>2</sub>		12 % TiO <sub>2</sub>	
t, °C	$\chi, \text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ 1	t, °C	$\chi, \text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	t, °C	$\chi, \text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ 1	t, °C	$\chi, \text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	t, °C	$\chi, \text{ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$
1610	33,97	1607	34,11	1600	57,01	1605	95,12	1603	96,15
1557	31,83	1576	32,22	1569	56,24	1555	94,87	1560	95,04
1504	29,67	1489	29,20	1511	56,14	1511	93,60	1533	94,97
1482	25,17	1482	26,55	1504	55,26	1504	92,07	1526	91,58
1468	23,76	1468	25,60	1489	55,45	1468	93,73	1511	93,18
1453	23,76	1453	25,72	1475	56,14	1453	91,31	1497	95,42
1439	21,84	1439	25,09	1446	54,69	1432	89,76	1482	89,77
1361	21,45	1425	24,73	1425	52,23	1411	77,57	1468	83,19
1347	20,91	1411	24,05	1411	51,16	1396	75,42	1439	77,32
1340	16,79	1396	22,00	1396	51,57	1382	72,11	1425	70,47
1333	14,94	1382	18,74	1382	51,99	1368	77,89	1411	76,76
1312	14,09	1368	16,43	1368	51,88	1354	64,42	1382	53,67
1298	12,94	1354	14,94	1354	50,42	1340	71,10	1361	48,80
1284	11,92	1340	13,29	1340	47,27	1326	66,76	1340	45,57
		1326	11,23	1326	42,30	1312	62,93	1326	42,51
		1312	9,59	1312	40,76	1298	58,41	1312	39,59
		1298	7,71	1298	38,00			1298	40,78
		1284	6,20	1284	36,40				

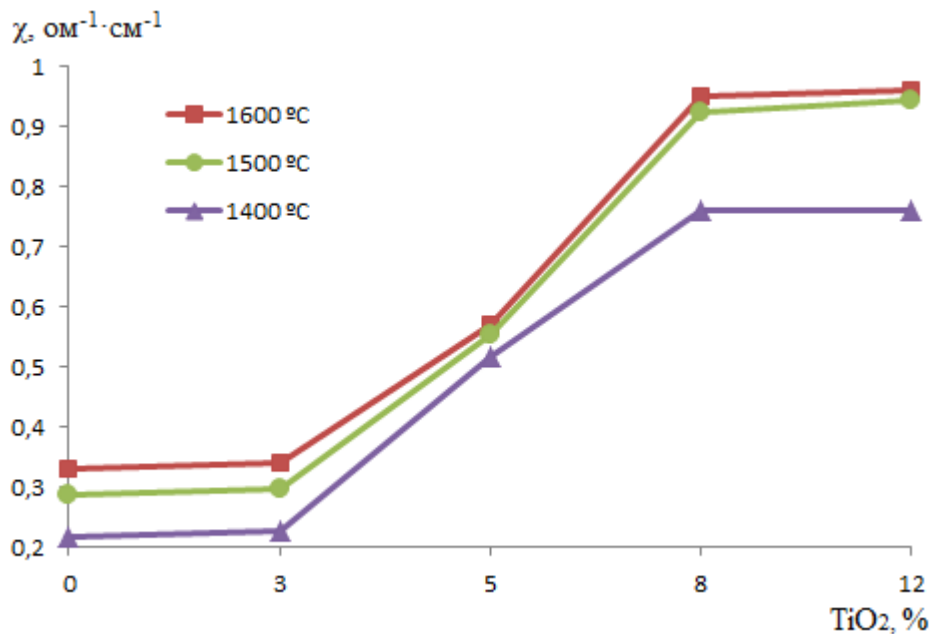


Рис. 4.5. Вплив вмісту оксиду титану на питому електропровідність шлаку АН-295.

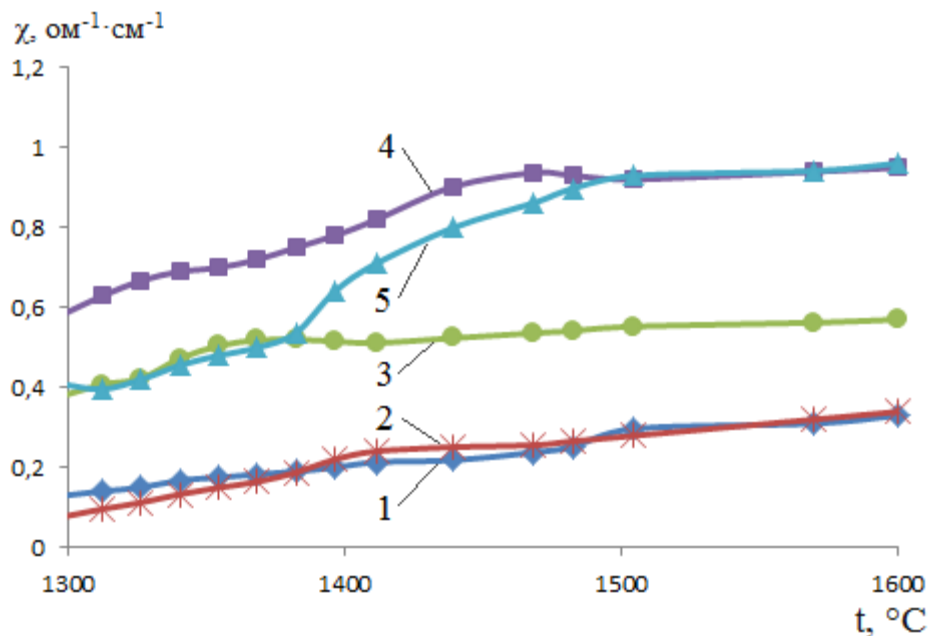


Рис. 4.6. Вплив температури на питому електропровідність шлаку АН-295 з різним вмістом оксиду титану.

1- шлак АН-295; 2 - АН-295+3 %  $\text{TiO}_2$ ; 3- АН-295+5 %  $\text{TiO}_2$ ; 4 - АН-295+8 %  $\text{TiO}_2$ ; 5 - АН-295+12 %  $\text{TiO}_2$ .

Виконані дослідження показали, що при введенні 3 %  $\text{TiO}_2$  в шлак АН-295 електропровідність шлакового розплаву незначно збільшується. Введення 5 %

TiO<sub>2</sub> призводить до суттєвого, у 2-3 рази, підвищення електропровідності шлаку. Так при 1400 °С питома електропровідність стандартного шлаку АН-295 складає близько 0,2 ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, то при вмісті в цьому шлаці 5 % оксиду титану вона зростає до 0,5 ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>, а при 1600 °С відповідно з 0,3 ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup> до майже 0,6 ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>.

Ще практично вдвічі в порівнянні зі шлаком з 5 % TiO<sub>2</sub> збільшується електропровідність при введенні 8 % TiO<sub>2</sub> в шлак АН-295. В останньому випадку при 1600 °С питома електропровідність досягає 0,95 ом<sup>-1</sup>·см<sup>-1</sup>. Приблизно таку ж електропровідність за цієї температури має і шлак, що містить 12 % TiO<sub>2</sub>. Однак при цьому спостерігається сильне димовиділення з поверхні шлаку. Схоже на те, що при цих концентраціях оксиду титану в шлаці утворюються у значних кількостях сполуки з низькою пружністю пари, які випаровуються.

На рис. 4.7 наведено для порівняння дані електропровідності стандартних шлаків для ЕШП марки АНФ-6, АНФ-8, АНФ-21 [39], хімічний склад яких наведено в табл. 4.7, та АН-295 з 8 % TiO<sub>2</sub>. Шлаки АНФ-6 і АНФ-8 вибрані для порівняння в якості популярних шлаків, що широко використовуються при ЕШП і не містять у своєму складі оксиду титану. Шлак АНФ-21 також широко застосовується при ЕШП, але в його складі присутній TiO<sub>2</sub>.

**Таблиця 4.7.** Хімічний склад шлаків

№№ п/п	Марка шлаку	Вміст, % мас.			
		CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
1	АНФ-6	Основа	≤ 8	23-31	≤ 2,5
2	АНФ-8	50-60	15-20	24-30	---
3	АНФ-21	45-55	---	20-30	21-28 TiO <sub>2</sub>

Привертає увагу характер зміни при високих температурах електропровідності шлаків, що містять оксид титану. На відміну від шлаків без

$\text{TiO}_2$  електропровідність шлаків АНФ-21 та АН-295 + 8 % зі збільшенням температури від 1500 до 1600 °С змінюється незначно. Це є наслідком того, що шлаки без  $\text{TiO}_2$  мають іонний тип провідності, а оксид титану, що вводиться в шлак, як до речі і оксид заліза, має електронний тип провідності. А електронна провідність, на відміну від іонної, має слабку температурну залежність [52].

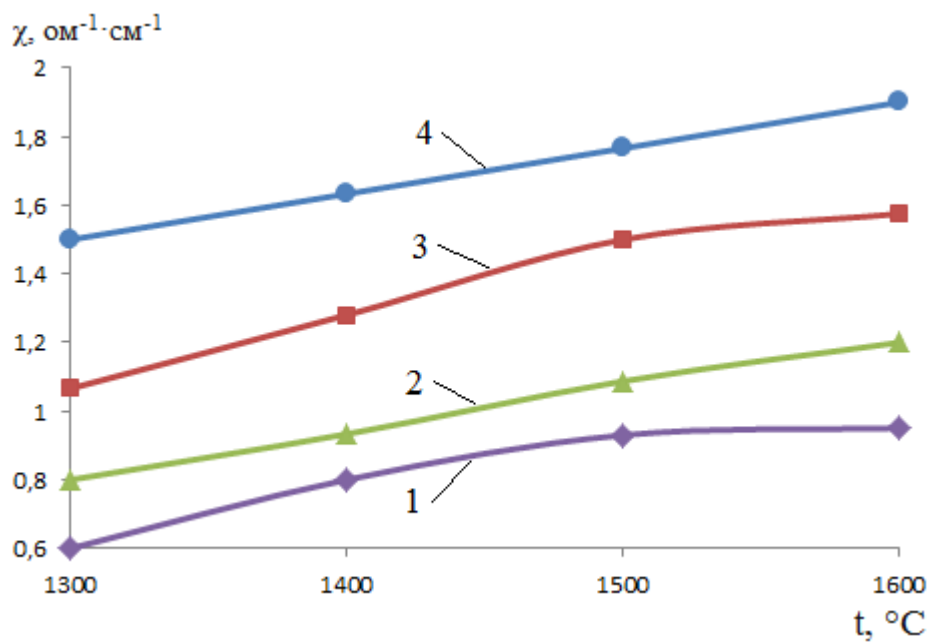


Рис. 4.7. Питома електропровідність шлаків:

1-АН 295 з вмістом 8 %  $\text{TiO}_2$ ; 2-АНФ-6; 3-АНФ-21; 4-АНФ-8.

З даних на рис. 4.7 видно, що електропровідність шлаку АН-295 з 8 %  $\text{TiO}_2$  при температурі 1600 °С ( $0,95 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ) є близькою до аналогічного показника у шлаку АНФ-6 ( $1,2 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ ). Питома електропровідність інших також широко використовуваних шлаків для ЕШП, таких як АНФ-1П, АНФ-28 та АНФ-32 набагато вища і при 1600 °С становить від 4 до  $6 \text{ ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  [39, 42]. Враховуючи вище сказане, при ЕШТП нержавіючої сталі з використанням шлаку АН-295 з 8 %  $\text{TiO}_2$  необхідно застосовувати електричні режими, орієнтуючись на такі, що мають місце при електрошлаковому процесі з використанням шлаку АНФ-6. Тому, порівняно з плавками жароміцних сплавів з використанням чистого шлаку АН-295 або з додаванням 3 % оксиду титану, при переробці стружки нержавіючої сталі необхідно процес здійснювати при більш низькій напрузі і при більшій силі струму.

## ВИСНОВКИ

1. Визначена розрахунковими методами активність титану та алюмінію в нержавіючій сталі 12X18H10T та активності компонентів у шлаці АН-295 і виконано термодинамічний аналіз розподілу цих елементів між шлаковою та металевою фазами.

2. Термодинамічними розрахунками показано, що при температурі 1600 °С рівноважний стан по титану при вмісті в сталі 12X18H10T 0,8 % Ti настає при вмісті в шлаці АН-295 близько 5 %  $\text{TiO}_2$ .

3. Розроблена методика, створено обладнання та проведено експериментальне дослідження поведінки титану при ЕШТП нержавіючої сталі та жароміцних сплавів на нікелевій основі.

4. Встановлено, що при ЕШТП сталі 12X18H10T з вихідним змістом 0,7-0,8 % мас. Ti з використанням шлаку АН-295, що містить 5 % оксиду титану, вміст титану в металі знижується до 0,6%. При використанні шлаку з 8 %  $\text{TiO}_2$  вміст титану в металі зберігається на вихідному рівні.

5. Показано, що при ЕШТП жароміцних сплавів EI602 і EI437Б з використанням шлаку АН-295 вміст титану та алюмінію в металі знаходиться в межах вимог технічних умов на досліджувані марки металу.

6. Виконано дослідження електропровідності шлаку АН-295 із вмістом оксиду титану три, п'ять, вісім та дванадцять відсотків. Визначено, що питома електропровідність шлаку АН-295 + 8 %  $\text{TiO}_2$  при 1600 °С є близькою до питомої електропровідності шлаку АНФ-6.



## **РОЗДІЛ 5**

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ МЕТАЛУ, ОТРИМАНОГО ПРИ ПЕРЕРОБЦІ СТРУЖКИ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЇ ТИГЕЛЬНОЇ ПЛАВКИ**

Раніше виконаними дослідженнями була показана можливість та ефективність переробки небрикетованої стружки високолегованих сталей методом її спільної плавки з витратним електродом в електрошлаковій тигельній печі. Були визначені основи технології, відповідно до яких проводилися плавки стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі у створеній установці, що оснащена плавильною ємністю на 120 кг рідкого металу. Уточнювалися технологічні параметри процесу та досліджувалася якість металу, отриманого аналізованим методом.

#### **5.1. Якість металу, виплавленого зі стружки жароміцних нікелевих сплавів EI602 та EI437Б.**

Зважаючи на відсутність кускових відходів спочатку витратні металеві електроди, які необхідні для здійснення електрошлакового процесу, отримували шляхом переплаву стружки в індукційній печі з отриманням литих заготовок діаметром 120-130 мм. В подальшому витратні електроди відливали з металу, виплавленого в печі ЕШТП.

Експерименти проводилися наступним чином (рис. 5.1). У футерованій периклазовою цеглою плавильній ємності (1) місткістю до 120 кг рідкого металу за допомогою металевого електрода (2), підключеного до джерела живлення (3), наводилася шлакова ванна (4) зі шлаку АН-295 в кількості 8-10 кг. Після повного розплавлення шлаку одночасно з плавленням витратного електрода в тигель поступово подавалася стружка (5). Після повного сплавлення витратного електрода накопичений у тиглі рідкий метал (6) зливався у виливницю з отриманням круглих злитків діаметром 200 мм (рис. 5.2). Плавки проводили з використанням шлаку АН-295 у кількості 8-10 кг. При

переробці стружки зі сплаву EI437Б, враховуючи наведені в розділі 4 дані, в шлак додавали 3 % оксиду титану.

В режимі який встановився (після наведення шлакової ванни в процесі плавки стружки) електричні параметри, виходячи з дослідів попередніх експериментів, підтримувалися на наступному рівні: напруга на джерелі живлення 52-54 В, струм плавки 1,6-1,8 кА. При такому режимі електрошлакового процесу і відношенні перерізу витратного електрода до перерізу плавильного простору (ступеня заповнення) 0,50 – 0,55 забезпечувалося рівномірне плавлення стружки по всій площі шлакової ванни.

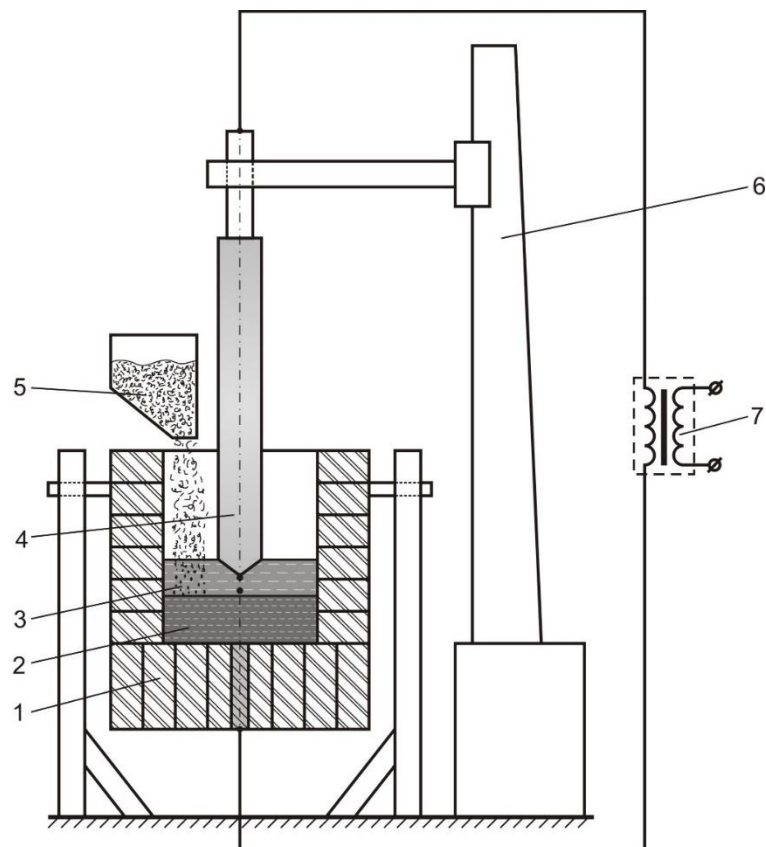


Рис. 5.1. Схема спільної електрошлакової тигельної плавки стружки і витратного електрода:  
1-вогнетривка цегла; 2-металева ванна; 3-шлакова ванна;  
4-витратний металевий електрод; 5-стружка;  
6-колонна з механізмом кріплення та переміщення електрода;  
7-джерело живлення (трансформатор).

Дані з кількістю металу, що переплавлявся, і техніко-економічними показниками плавок наведені в таблиці 5.1.

**Таблиця 5.1.** Показники ЕШТП стружки жароміцних сплавів

№ п/п	Сплав	Маса металу, кг		q, кВт·год/кг	P, кг/год
		Електрод	Стружка		
1	EI437Б	58,4	60,9	0,53	157,2
2		61,0	56,4	0,48	170,5
3		59,9	60,4	0,50	148,6
4		61,3	61,7	0,51	156,1
5		61,0	60,5	0,49	140,5
6	EI602	60,5	60,8	0,53	131,0
7		59,6	54,2	0,55	141,4
8		60,0	56,3	0,53	145,0
9		61,7	62,5	0,49	150,3
10		56,8	61,0	0,52	145,6



Рис. 5.2. Зовнішній вигляд злитка, виплавленого зі стружки жароміцного сплаву, і шлакової шапки.

У всіх проведених плавках кількість стружки становила від 48 до 52 % загальної маси металу, що переплавлявся. Тобто була такою ж, як і в попередньо проведених експериментах (розділ 3).

При виробництві жароміцних сплавів основною умовою для забезпечення службових властивостей виробів, що виготовляються з них, є дотримання хімічного складу відповідно до вимог технічних умов на ті чи інші марки. Тому з головної та донної частин злитків вирізалися зразки для спектрального аналізу та з трьох рівнів по висоті відбиралася стружка для визначення вмісту вуглецю та сірки в металі.

Усереднені дані вмісту легуючих та домішкових елементів, в отриманих електрошлаковою тигельною плавкою сплавах EI602 і EI437Б, наведені в табл. 5.2.

**Таблиця 5.2.** Хімічний склад жароміцних сплавів

Сплав	Метал	Вміст, % мас.												
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	Al	W	Mo	Nb	Fe	S	P
EI 602	ЕШТП	0,09-0,10	0,45-0,65	0,30-0,38	74,6-75,8	19,6-20,4	0,41-0,55	0,56-0,66	0,01-0,02	1,7-2,1	0,85-1,2	0,3-1,0	0,005-0,007	0,014-0,017
	ГОСТ 5632-72	≤0,1	≤0,8	≤0,4	Осн.	19-22	0,35-0,75	0,35-0,75	---	1,8-2,3	0,9-1,3	≤3,0	≤0,012	≤0,02
EI 437Б	ЕШТП	0,065-0,07	0,5-0,6	0,2-0,4	74,0-77,1	20,1-21,1	2,4-2,6	0,8-0,9	0,01-0,02	0,01-0,04	---	0,6-0,8	0,004-0,006	0,012-0,014
	ГОСТ 5632-72	≤0,7	≤0,6	≤0,4	Осн.	19-22	2,4-2,8	0,6-1,0	---	---	---	≤1,0	≤0,007	≤0,015

Дані хімічного аналізу свідчать, що вміст легуючих нікель елементів, у тому числі титану і алюмінію, знаходиться в межах, обумовлених ГОСТ 5632-72 на досліджувані марки жароміцних сплавів. Завдяки рафінуванню металу шлаком вміст сірки, особливо в сплаві EI602, суттєво нижчий від допустимого. Відповідно метал, виплавлений зі стружки методом ЕШТП, матиме меншу кількість сульфідних неметалевих включень, що має позитивно позначитися на

службових властивостях виробів із такого очищеного від небажаних домішок сплаву.

Зливки, отримані зі стружки нікелевих жароміцних сплавів, було відправлено на завод «Зоря»-«Машпроект», де метал пройшов додаткові металографічні та механічні випробування. Згідно з заводськими даними (Додаток 1) дослідна партія металу, отримана електрошлаковою тигельною плавкою зі стружки сплавів EI602 і EI437Б, за хімічним складом, структурою і механічними властивостями відповідає вимогам технічних умов на ці марки металу.

Враховуючи, що жароміцні нікелеві сплави типу EI602 та EI437Б в Україні не виробляються, рециклінг виробничих відходів таких металів, у тому числі стружки, є важливим не лише для роботи підприємства «Зоря»-«Машпроект», а й інших підприємств, що споживають подібні дороговартісні сплави. У зв'язку з цим технологія електрошлакової тигельної плавки та переробки стружки жароміцних сплавів, що дозволяє з низькосортних відходів отримувати якісний метал, може мати велике народно-господарське значення.

## **5.2. Якість металу, виплавленого із стружки нержавіючої сталі 12X18H10T.**

Переробка стружки нержавіючої сталі 12X18H10T також здійснювалася в електрошлаковій тигельній печі ємністю на 120 кг металу. При цьому витратний електрод повністю виготовлявся з різних шматкових відходів. На рис. 5.3 у якості прикладу показаний вид електродів, отриманих зварюванням різних відпрацьованих деталей зі сталі 12X18H10T, а на рис. 5.4 вид електрошлакової плавки з використанням такого електроду.

У шлак АН-295 для виключення втрат титану з металу, згідно з отриманими нами даними про розподіл цього елемента між шлаком і сталлю 12X18H10T, вводили 8 %  $\text{TiO}_2$ . Внаслідок цього було змінено електричні параметри плавки. Напрругу, порівняно з плавкою нікелевих сплавів, знизили до 44-46, а силу струму плавки збільшили до 2,0-2,2 кА. Такі параметри

забезпечували стійкий режим електрошлакового процесу та рівномірне прогрівання шлакової ванни.

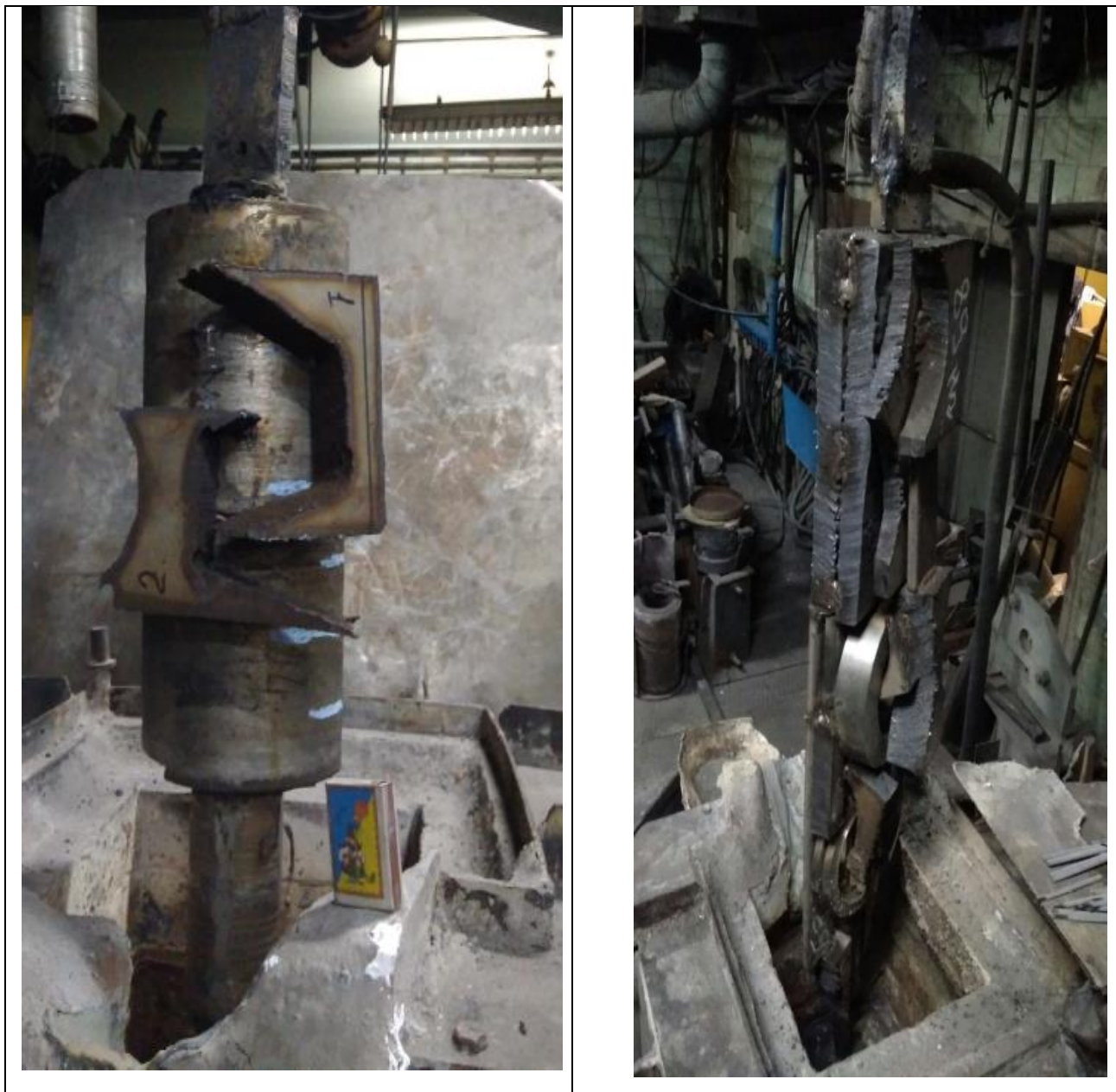


Рис. 5.3. Зовнішній вигляд електродів із кускового брухту для ЕШТП.

Отриманий спільною плавкою витратного електрода та стружки накопичений в тиглі рідкий метал зливався разом зі шлаком в круглу виливницю з отриманням злитків діаметром 200 мм або в прямокутну металеву



форму з отриманням плоских заготовок у вигляді плит розмірами 360x400x65...100 мм (рис. 5.5).

Плити відливали у рамках виконання договору з ДП „Інженерний центр зварювання тиском НТК“ ІЕЗ ім. Є.О. Патона на виготовлення з матеріалу Замовника (кусковий брут і стружка сталі 12Х18Н10Т) такого виду заготовок.



Рис. 5.4. Плавка в тигельній печі витратного електроду з кускових відходів.



Рис. 5.5. Зовнішній вигляд плоскої заготовки та злитка отриманих з нержавіючої сталі.

Узагальнені результати витрат електроенергії та продуктивності під час проведення плавки наведено у таблиці 5.3.

**Таблиця 5.3.** Показники ЕШТП стружки нержавіючої сталі

№ плавки	Маса металу, кг		q, кВт·год/кг	P, кг/год
	Електрод	Стружка		
1	53,2	54,2	0,58	136,6
2	69,5	70,3	0,55	150,5
3	62,3	59,4	0,54	149,6
4	58,6	60,1	0,56	152,1
5	61,0	62,2	0,52	155,5
6	57,5	55,8	0,58	141,0
7	59,6	60,2	0,55	145,4
8	60,3	59,3	0,53	145,0

Примітка. Питома витрата електроенергії розрахована без урахування витрат у короткій мережі та джерелі живлення.

Кількість стружки, що переплавлялась, при ЕШТП нержавіючої сталі становила близько 50 % від загальної маси металу, що переплавлявся. При цьому необхідно враховувати, що у стартовий період при наведенні шлакової ванни стружка не подавалася на плавку. У цей період сплавляється приблизно 25–30 % маси металевго електрода. Наприклад, у плавці № 7 стружку почали подавати у піч, коли сплавалося 18,5 кг металевго електрода з вихідних 59,6 кг. Потім при плавці 41,1 кг електрода, що залишився, було переплавлено 60,2



кг стружки, або близько 60 % від загальної кількості металу, що переплавлявся в період подачі стружки. Тобто можна збільшити ступінь залучення стружки на переробку, застосовуючи такі технологічні прийоми, як «рідкий старт» або спочатку використовуючи для наведення шлакової ванни невитратний електрод, з подальшою його заміною на металевий, який переплавлятиметься. При оптимізації всіх параметрів технологічного процесу, включаючи швидкість подачі стружки в піч, кількість стружки, що залучається на плавку, цілком можливо довести до 70 % від загальної маси плавки.

Згідно з отриманими даними при переробці в розглянутій електрошлаковій тигельній печі стружки нержавіючої сталі в кількості 49-51 % від загальної маси плавки питома витрата електроенергії (q) становить в середньому 0,54 кВт·год/кг, а продуктивність переплаву (P) 148 кг/год. Аналіз різних методів переробки сталюї стружки показує, що при більш високій продуктивності витрата електроенергії при ЕШТП знаходиться на рівні аналогічного показника при індукційній тигельній плавці [55].

Коригування складу шлаку АН-295 шляхом введення в нього 8 %  $\text{TiO}_2$  цілком себе виправдало. Вміст титану в металі придатних заготовок (плит), як і інших елементів (табл. 5.4), був у межах, що відповідають технічним умовам на нержавіючу сталь марки 12Х18Н10Т (табл.2.2).

**Таблиця 5.4.** Хімічний склад металу

Заготовка	Вміст, % мас.									
	Fe	C	Si	Mn	Ni	Cr	Ti	S	P	Cu
Злиток Ø 200 мм, h = 200 мм	Основа	0,085	0,61	1,03	11,2	16,9	1,21	0,005	0,034	0,24
Злиток Ø 200 мм, h = 400 мм	Основа	0,073	0,60	1,09	10,1	17,3	0,79	0,005	0,035	0,23
Злиток Ø 200 мм, h = 425 мм	Основа	0,074	0,52	1,38	11,5	17,4	0,93	0,004	0,032	0,34
Плита 1 360x400x65	Основа	0,1	0,58	1,34	9,2	17,5	0,57	0,004	0,024	0,29
Плита 2 360x400x100	Основа	0,09	0,53	0,9	10,1	17,5	0,65	0,004	0,023	0,20

При аналізі даних хімічного складу металу ЕШТП привертає увагу низький вміст сірки у металі електрошлакової виплавки – 0,004...0,005 % (табл. 5.4), а також кисню і водню (табл. 5.5). Це є результатом рафінуючої та захисної дії шлаку.

**Таблиця 5.5.** Вміст газів у металі

Елемент	Вміст у зразках, ppm							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Кисень	43	39	33	48	32	33	36	44
Водень	3,5	2,9	3,9	4,1	4,2	3,0	4,2	4,0

Відсутність втрат з металу титану і плавка стружки у шарі шлаку без контакту з атмосферою дозволила досягти мінімальних значень втрат на вигар. Тому втрати на вигар у проведених плавках були мінімальні і становили 1-2 % за рахунок вигорання сторонніх домішок та залишків змазувально-охолоджувальної рідини [32].

З плит, отриманих при переробці брухту та стружки нержавіючої сталі, після стандартної термічної обробки, яка полягала у загартуванні після нагрівання до 1050-1100 °С у воді, було відібрано зразки для механічних випробувань. Як видно з наведених у табл. 5.6 даних міцнісні властивості металу ( $\sigma_B$  та  $\sigma_{0,2}$ ) суттєво перевищують вимоги для литих виробів товщиною до 100 мм (ДСТУ 8781:2018) та знаходяться на рівні вимог, що висуваються до товстостінних поковок [32, 34].

**Таблиця 5.6.** Механічні властивості металу

Плита	Т випр., °С	Межа плинності, $\sigma_{0,2}$ МПа	Тимчасовий опір розриву, $\sigma_B$ , МПа	Відносне подов- ження, $\delta$ , %	Відносне звуженн я, $\psi$ , %	Ударна в'язкість, КСУ, кДж/см <sup>2</sup>
1	20	230-232	528-542	61-63	69-70	182-184
2	20	231-239	517-527	61-71	71-73	176-197
3	20	236-249	551-597	63-64	69-77	261-273
ДСТУ 8781:2018 Виливки зі сталі	20	196	441	25	32	60
ГОСТ 25054- 81 Поковки з корозійно- стійких сталей і сплавів	20	196	510	38	52	---

А пластичні властивості ( $\delta$ ,  $\psi$  і КСУ) у два-три рази перевищують вимоги технічних умов не тільки на литі, а й ковані товстостінні поковки [36]. Це свідчить про високу якість металу, що виплавляється при ЕШТП, що досягається як за рахунок його рафінування, так і за рахунок створення умов затвердіння, при яких виключається утворення в литій заготовці дефектів усадкового та ліквацийного походження і формується однорідна дрібнозерниста структура металу (рис. 5.6).



Рис. 5.6. Макроструктура плити з металу, отриманого електрошлаковою тигельною плавкою відходів сталі 12Х18Н10Т.

З дослідно-промислової партії плоских литих заготовок сталі 12Х18Н10Т, отриманих при електрошлаковій переробці стружки, виготовлені ножі (рис. 5.7) для зняття грата (рис. 5.8) при контактнo-стикoвoму зварюванні рейок. Ножі були поставлені на рейкозварювальні машини К922, К930 та К950 виробництва ДП «Зварювання тиском» НТК ІЕЗ ім. Є.О Патона НАНУ”.

Виконані дослідження показують, що технологія переплаву стружки нержавіючої сталі в електрошлаковій тигельній печі представляється економічно доцільною, особливо для отримання нестандартних литих заготовок високої якості. І підприємства, що спеціалізуються на виготовленні виробів з нержавіючої сталі, можуть використовувати метод ЕШТП для переробки стружки, що утворюється, з поверненням отриманого металу в основне виробництво.



Рис. 5.7. Ніж для зняття ґрата (ґратознімач).

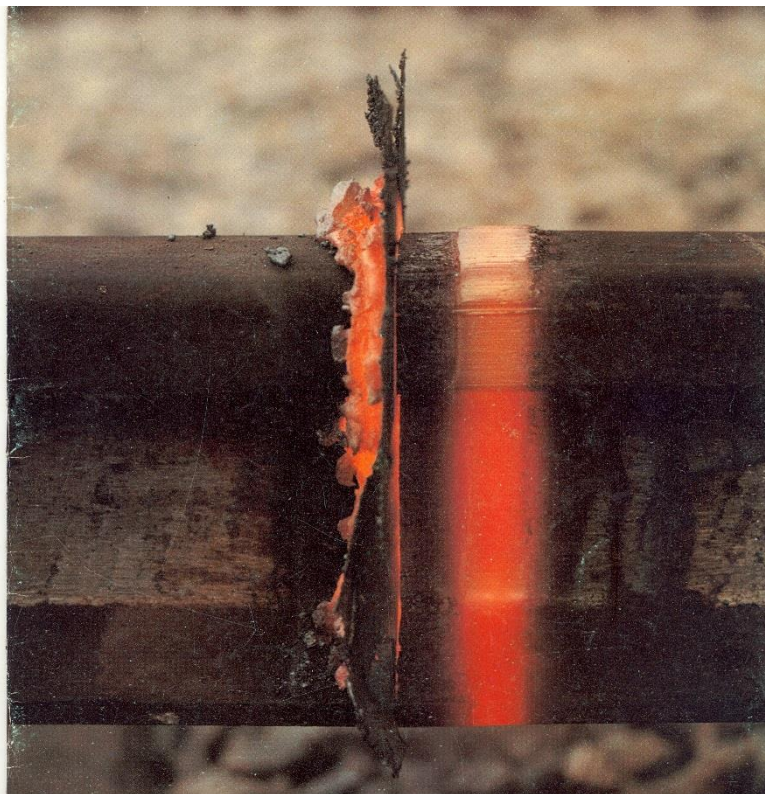


Рис. 5.8. Вид ґрата після контактнo-стикового зварювання рейок.

## ВИСНОВКИ

1. У створеній електрошлаковій тигельній печі ємністю 120 кг за розробленою технологією проведені експерименти з переплаву стружки жароміцних сплавів на нікелевій основі EI602 і EI437Б і нержавіючої сталі 12Х18Н10Т.

2. При переробці стружки сплаву EI602 застосовувався шлак АН-295, а при переробці сплаву EI437Б з метою унеможливлення втрат титану з металу застосовувався шлак АН-295 з добавками 3 %  $\text{TiO}_2$ . Показано, що вміст хімічних елементів у виплавлених зі стружки сплавах EI602 та EI437Б, в тому числі за вмістом титану та алюмінію, знаходиться в межах вимог на їх хімічний склад.

3. Проведені на заводі «Зоря»-«Машпроект» металографічні дослідження та механічні випробування показали, що за структурою і механічними властивостями метал злитків, отриманих електрошлаковою тигельною плавкою, зі стружки жароміцних сплавів EI602 та EI437Б відповідає вимогам технічних умов на ці марки металу.

4. З метою виключення втрат титану скоригований склад шлаку при ЕШТП стружки нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, у стандартний шлак АН-295 вводилося 8 %  $\text{TiO}_2$ . З огляду на це для забезпечення стабільного протікання електрошлакового процесу змінений, порівняно з плавками жароміцних сплавів, електричний режим – знижено напругу та збільшено струм плавки.

5. Показано, що хімічний склад отриманої методом ЕШТП сталі 12Х18Н10Т відповідає вимогам технічних умов на цю марку металу. При цьому метал рафінується від сірки та має низький вміст газів.

6. Випробування литих плит товщиною 65-100 мм, отриманих зі стружки та брухту нержавіючої сталі методом ЕШТП, показали, що за всіма показниками механічні властивості металу суттєво перевищують вимоги для литих виробів товщиною до 100 мм та знаходяться на рівні вимог, що висуваються до товстостінних поковок (ДСТУ 8781:2018).

7. З дослідно-промислової партії плоских литих заготовок сталі 12Х18Н10Т, отриманих при електрошлаковій переробці стружки, виготовлені ножі для зняття ґрата при контактнo-стикoвoму зварюванні рейок рейкозварювальними машинами К922, К930 та К950.

8. Визначено, що технологія переробки стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки за питомими витратами електроенергії та продуктивністю представляється економічно доцільною і дозволяє отримувати якісний метал придатний для використання за призначенням.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі виконаного аналізу існуючих методів переробки металевієї стружки, у тому числі з високолегованих сталей та сплавів показано, що перспективними для переробки брикетованої та небрикетованої стружки є електрошлакові технології, при яких метал плавиться без контакту з навколишньою атмосферою та рафінується від небажаних домішок.

2. Обґрунтовано вибір в якості вихідних жароміцних сплавів ХН77ТЮР (ЕІ437Б) і ХН75МБТЮ (ЕІ602), нержавіючої сталі 12Х18Н10Т та шлаку АН-295 для проведення експериментів по рециклінгу стружки цих металів методом електрошлакового переплаву. Створено обладнання та розроблено методику проведення досліджень.

3. Виконано експерименти з переробки брикетованої та небрикетованої стружки різними методами – ЕШП, ІТП та ЕШТП. Показано, що найменші питомі витрати електроенергії 0,55-0,65 кВт·год/кг та найбільша продуктивність процесу 130-160 кг/год були при спільній плавці небрикетованої стружки та витратного електрода з кускового брухту способом електрошлакової тигельної плавки (ЕШТП).

4. Виконані дослідження спільної плавки витратного металевих електрода і небрикетованої стружки в електрошлаковій тигельній печі та визначено вплив ступеня заповнення плавильного простору витратним електродом на кількість стружки, що переплавляється. Встановлено, що максимальна кількість стружки переробляється при ступені заповнення 0,5 – 0,56.

5. Термодинамічними розрахунками показано, що в умовах електрошлакової плавки сталі 12Х18Н10Т з вмістом титану 0,8 % і температурою 1600 °С рівноважний стан по титану настає при вмісті в шлаці АН-295 близько 5 %  $\text{TiO}_2$ . Експериментально встановлено, що при електрошлаковій плавці сталі 12Х18Н10Т з використанням шлаку АН-295 для збереження в металі концентрації титану в межах, регламентованих технічними умовами, необхідно вводити в шлак від 5 до 8 %  $\text{TiO}_2$ .



6. Виконано дослідження електропровідності шлаку АН-295 із вмістом оксиду титану три, п'ять, вісім та дванадцять відсотків. Визначено, що питома електропровідність шлаку АН-295 + 8 %  $\text{TiO}_2$  при 1600 °С є близькою до питомої електропровідності шлаку АНФ-6 серед шлаків, що широко застосовуються при ЕШП.

7. З урахуванням досліджень перерозподілу титану між металевою і шлаковою фазами та електропровідності шлаку АН-295 з додаванням у нього  $\text{TiO}_2$  удосконалено технологічні режими, у тому числі склад шлаку та електричні параметри процесу при ЕШТП жароміцних і нержавіючих сталей та сплавів.

8. Виконано дослідження якості металу, отриманого способом електрошлакової тигельної плавки стружки сплавів ХН77ТЮР (ЕІ437Б) і ХН75МБТЮ (ЕІ602) та нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, показано, що за всіма показниками, у тому числі за хімічним складом та механічними властивостями, він відповідає вимогам технічних умов на дані марки металу.

9. Визначено, що технологія переробки стружки жароміцних сплавів та нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки за питомими витратами електроенергії та продуктивністю представляється економічно доцільною і дозволяє отримувати якісний метал придатний для використання за призначенням. Отримані акти дослідно-промислового випробування від ДП «НПО «Зоря-Машпроект» та ДП ІЦЗТ «НТК ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України», які це підтверджують.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kukuj D.M., Emeljanovich I.V., Petrovskij V.P., Rovin L.E., Rovin S.L. (2009) Experience of utilization of metal shavings. Foundry production and Metallurgy, no. 1, 47–50.
2. Lee, C.M., Choi, Y.H., Ha, J.H. *et al.* (2017) Eco-friendly technology for recycling of cutting fluids and metal chips: A review. Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech. **4**, 457–468. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0051-9>.
3. Luísa Simon, Carlos A.M. Moraes, Regina C.E. Modolo, Mônica Vargas, Daiane Calheiro, Feliciane A. Brehm (2017) Recycling of contaminated metallic chip based on eco-efficiency and eco-effectiveness approaches. Journal of Cleaner Production, Volume 153, 417-424. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.058>.
4. Ящерицин П.И., Єременко М.Л., Жигалко Н.І. (1981) Основи різання матеріалів і ріжучий інструмент. Вища школа, с. 560.
5. Biktagirov, F.K., Veretilnyk O.V., Shapovalov, V.O. *et al.* (2023) Electroslag Processing of High-Temperature Alloy Shavings. *AIST Transactions*, Vol. 20, No. **9**, 200-203. DOI: <https://10.33313/TR/0923> (Scopus).
6. Abdullah Aslan, Omer Sinan Sahin, Emin Salur, Aydin Gunes, Ahmet Akdemir, Hakan Burak Karadag (2015) A New Method for Recycling of Metal Chips. Journal of Selcuk university, Volume 4, No 1.
7. Terleckiy S. V. (2005) Some problems of processing chips in modern arc steel-melting furnaces. Foundry production and metallurgy, no. 3, pp. 76–78.
8. Reshad Guluzade, Ahmet Avcı, M. Turan Demirci, Ö. Faruk Erkendirici (2013) Fracture toughness of recycled AISI 1040 steel chip reinforced AlMg1SiCu aluminum chip composites. Materials & Design, Volume 52, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.025>.
9. Steblov A. B., German M. L. (2007) Processing of ferrous metal shavings. Secondary market, no. 1/39, pp. 46–49.
10. Абрамов К.Б., Самуйлов С.Д., Фиглин Ю.А. (1998) Брикетування титанової стружки під впливом коротких імпульсів електричного струму. Кольорові метали, 12, 70-74.

11. Шаповалов В.О., Біктагіров Ф.К., Бурнашев В.Р. і ін. (2011) Електротермічне компактування металевих матеріалів: можливості та перспективи. Заготівельні виробництва у машинобудуванні, 5, 5-10.
12. Веретільник О.В., Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Ігнатов А.П. (2020). Технології переробки металевої стружки. Сучасна електрометалургія, 2, 31-38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.06>
13. Rovin L. E., Valickaya O. M., Rovin S. L. (2013) The rotary device for heat treatment and drying of dispersed and bulk materials. Patent no. 2428, МРК F27B 7/00.
14. Шаповалов В. О., Бурнашев В. Р., Біктагіров Ф. К. і ін. (2009) Переробка стружки жароміцної сталі ЕП609Ш способом компактування під електричним струмом з наступним електрошлаковим переплавом, 3, 43-45.
15. Фарнасов Г.А., Варламова А.В., Ромашов А.С. (2013) Спосіб утилізації замасленої стружки нержавіючої сталі 10Х18Н9Л. Електрометалургія, № 1, стр. 45-48.
16. Шаповалов В. О., Бурнашев В. Р., Біктагіров Ф. К. і ін. (2011) ЕШП електродів, спресованих із стружки аустенітних нержавіючих сталей. Сучасна електрометалургія, 4, 46—48.
17. Шаповалов В.О., Біктагіров Ф.К., Бурнашев В.Р. і ін. (2011) Електротермічне компактування металевих матеріалів. Сучасна електрометалургія, 4, 42-45.
18. Волков А.Е., Гохман Г.З., Шалімов Ал. Г. (1984) Плавлення та рафінування металу в перегрітому шлаці некомпактних матеріалів. Сталь, 7, 30-33.
19. Кузьменко О.Г. (2004) Поведінка частинок некомпактної присадки на межі повітря-шлак при електрошлаковій наплавці. Автоматичне зварювання, 10, 11-15.
20. Волков А.Е., Шалімов Ал. Г. (1989) Виробництво легованої сталі методом електрошлакового переплаву стружки. Сталь, 12, 27-29.

21. Молдован Г.А., Вишне夫斯基 А.В., Заводовский В.К., Олейниченко В.І. (1975) Виплавка шихтових злитків способом ЕШП із високолегованої сталі. Проблеми спеціальної електрометалургії, 1, 45-47.
22. Біктагіров Ф.К., Веретільник О.В., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Ігнатов А.П. (2021) Переробка стружки нержавіючої сталі методом електрошлакової тигельної плавки. Перспективні технології, матеріали й обладнання у ливарному виробництві: матеріали VIII науково-технічної конференції, Краматорськ, 21-24 вересня 2021, 24-25. ISBN 978-617-7889-00-6.
23. Біктагіров Ф.К. (2003) Поведінка вуглецю при електрошлаковій обробці металів. Проблеми зварювання, металургії та споріднених технологій, зб. праць VIII міжн. наук.-техн. Конференції, Тбілісі: Модемі, 255-265.
24. VV Satya Prasad, A Sambasiva Rao, U. Prakash, V Ramakrishna Rao, P. Krishna Rao and Krishna M. Gurt (1996) Recycling of Superalloy Scrap through Electro Slag Remelting. [ISIJ International](#), 1, 1459-1464.
25. Кусков Ю.М., Кузьменко О.Г., Лентюгов І.П. (2019) Застосування стружки зі сталі 5ХНМ при електрошлаковій наплавці штампів у струмопідвідному кристалізаторі. Автоматичне зварювання, 6, 44-50.
26. Кусков Ю.М. (2001) Електрошлаковий перепплав відходів різних виробництв з використанням невитратного водоохолоджуваного електрода. Електрометалургія, 2, 28-28.
27. Кусков Ю.М., Безкоровайный В.І., Ус В.І., Медовар Л.Б. (1992) Безелектродна технологія електрошлакового перепплаву мідних відходів. Проблеми спец. Електрометалургії, 3, 29-32.
28. Альтман В.А., Орлов О.І. Спосіб виплавлення високоякісних інструментальних сталей із відходів інструментального виробництва. Патент №2405843.
29. Біктагіров Ф.К. (2003) Застосування електрошлакового процесу з невитратними електродами для плавки, рафінування та обробки металів. Повідомл. 2. Сучасна електрометалургія, 1, С. 5-9.

30. Біктагіров Ф.К., Гнатушенко О.В., Шаповалов В.О., Ігнатов А.П.(2009) Переробка алюмінієвої стружки в сольових розплавах. Вісник ДДМА, № 1(15), м. Краматорськ, стр. 79-83.
31. Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В., Ігнатов А.П (2011) Спосіб електрошлакової виплавки бронзи КН1-3. Патент на корисну модель № 59967.
32. Веретільник О.В., Біктагіров Ф.К. (2024) Електрошлакова переробка стружки нержавіючої сталі Х18Н10Т. Сучасна електromеталургія, 3, 31-35.  
<https://doi.org/10.37434/sem2024.03.04>
33. Жеребцов С. Н. (2012) Застосування технології електрошлакового переплаву стружки високолегованих сталей та сплавів для отримання мірної заготівлі. Електromеталургія, 4, 32-34.
34. Веретільник О.В., Біктагіров Ф.К. (2024) Аналіз використання електрошлакових технологій для рециклінгу сталєвої стружки. Метал та лиття України, 1, 8-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2024.01.001>.
35. Бутко В.І. (2010) Спосіб отримання злитків зі стружки. Патент на корисну модель, № 54324.
36. Веретільник О.В., Біктагіров Ф.К., Шаповалов В.О. і інш. (2023) Застосування електрошлакової тигельної плавки для переробки стружки високолегованих сталей і сплавів. XV Міжнародної науково-технічної конференції «НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ», Київ, 2023, 80-86. ISSN 2524-0544.
37. Пат. 7997 Укрона, МПК (2006) С 22 В 1/248. Спосіб компактування металеві шихти / Б.Е. Патон, М.Л. Жадкевич, В.О. Шаповалов та інш. Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
38. Яковенко В.А., Лютий І.Ю., Латаш Ю.В. (1985) Дослідження охолоджуваних електродів для електрошлакового процесу. Проблеми спец. електromеталургії, № 1, С. 19-24.

39. Медовар Б.І., Шевцов В.Л., Мартин В.М. і ін. (1988) Електрошлакова тигельна плавка та розливка металу. Київ: Наукова думка, 215 стр.

40. Медовар Б.І., Цикуленко А.К, Дяченко Д.М. (1990) Якість електрошлакового металу. Київ: Наукова думка, 312 стр.

41. Медовар Б.І., Ступак Л.М, Бойко Г.А. і ін. (1981) Електрошлаковий метал. Київ, Наукова думка.

42. Ключев М.М, Каблуковский А.Ф. (1969) Металургія електрошлакового переплаву, Металургія.

43. Дакуорт У.Э., Хойл Дж. (1973) Електрошлаковий переплав, Металургія.

44. Латаш Ю.В., Медовар Б.І. (1970) Електрошлаковий переплав, Металургія.

45. Schwerdtfeger K., Wepner W., and Pateisky G. (1978) Modeling of chemical reactions occurring during electrosag remelting: oxidation of titanium in stainless steel. *Ironmak. steelmak.*, No. 3, 135-143.

46. JUN GIL YANG and JOO HYUN PARK (2017) Distribution Behavior of Aluminum and Titanium Between Nickel-Based Alloys and Molten Slags in the Electro Slag Remelting (ESR) Process. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS*, VOLUME 48B, AUGUST, 2147- 2156.

47. Dong Hou, Zhou-hua Jiang, Tian-peng Qu, etc. 31 (2019) Aluminum, titanium and oxygen control during electrosag remelting of stainless steel based on thermodynamic analysis. *Journal of Iron and Steel Research International*, volume 26, 20.

48. Fu-Bin Liu, Jun-Zhe Gao, Hai-Bo Cao, etc. (2021) Effect of slag composition on elements oxidation behavior of GH984G superalloy for electrosag remelting withdrawal process. *J. Iron Steel Res. Int.*, DOI:[10.1007/s42243-021-00602-5](https://doi.org/10.1007/s42243-021-00602-5).

49. P. Zhang, G. Li, Ch. Zhu, Z. Zhang, Yu. Liu. (2023) Thermodynamics on compositional design of slag for the Ti content control in bearing steel. *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 26, September–October, 88-98.

50. Пономаренко А.Г. (1974) Питання термодинаміки фаз змінного складу, які мають колективну електронну систему. *ЖФХ*, т. 48, № 7, 1668-1671.
51. Turkdogan E.T. (1980) *Physical Chemistry of High Temperature Technology*. Academic Press, New York.
52. Резниченко В.А. (1969) Електротермія титанових руд, Наука.
53. Линчевський Б.В. (1979) Техніка металургійного експерименту, Металургія.
54. Ждановский А. А., Латаш Ю. В., Горчинский О. А. і ін. (1978) Установка для вимірювання електропровідності розплавлених флюсів. Проблеми спеціальної електromеталургії, вип. 8, 113–115.
55. Біктагіров Ф.К., Веретільник О.В., Шаповалов В.О. та інш. (2021). Порівняльні показники різних методів переробки стружки високолегованих сталей та сплавів. *Сучасна електromеталургія*, 4, 11–15.

## ДОДАТКИ



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Перший заступник генерального  
директора-головний інженер  
ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»  
Аніщенко В.Л.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заст. директора ІЕЗ  
ім. Є.О. Патона  
академік НАНУ  
Кучук-Яценко С.І.

АКТ

дослідно - виробничого випробування

Акт складено про те, що Інститутом електрозварювання проведений об'ємний комплекс робіт з визначення технології утилізації стружки із жароміцних та корозійностійких марок сплавів, які є відходами виробництва на ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

1. Випробувані наступні схеми переробки стружки сплавів марок ЭИ602 та ЭИ437Б, а саме:

1.1. Пресування стружки в витратні електроди і їх переплав ( ЕШП та ПДП) у водоохолоджуваних кристалізаторах і отриманням злитків.

1.2. Пресування стружки в витратні електроди з подальшим використанням останніх при електрошлаковій тигельній плавці (ЕШТП) з розливкою металу в ливарні форми і отриманням відливок. При цьому під час плавки додатково вводити в шлакову ванну до 50 % стружки від загальної маси виплавленого металу ідентичного хімічного складу.

1.3. ЕШТП електродів, зварених із компактних відходів, таких як куски і обрізи металу, відпрацьовані і відбраковані деталі з додаванням в плавку стружки того ж хімічного складу в кількості до 70 % від загальної маси виплавленого металу.

2. Найбільш перспективною та доцільною з економічної точки зору є переробка металеві стружки методом ЕШТП витратного електрода, отриманого тим або іншим способом, з додаванням в плавку стружки в кількості 50-70 % від загальної маси виплавленого металу. При цьому майже

вдвічі збільшується продуктивність плавки при знижені питомих витрат електроенергії на 40-50 % порівняно з плавкою одного витратного електроду.

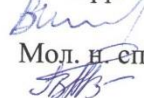
3. Відпрацьовано експериментальну технологію переробки відходів жароміцних і корозійностійких сплавів методом ЕШТП з додаванням в плавку стружки цих металів. Виплавлена дослідно-промислова партія злитків, метал яких за хімічним складом та властивостям відповідає вимогам ТУ цих марок сплавів..

Від ДП НВКГ  
«Зоря»-«Машпроект»  
Заст. головного металурга  
к.т.н., доцент  
Г.Ф. Мяльниця



Від ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Зав. від № 20  
чл.-корр. НАНУ  
Мол. н. співр. від № 20



В.О. Шаповалов



О.В. Веретільник



«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Директор ДП ЦЗТ «НТК ІЕЗ  
ім. Є.О. Патона НАН України»

КРИВЕНКО В.Г.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Заступник директора  
«ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ»  
член-кор. НАН України

ШАПОВАЛОВ В.А.

АКТ

виробничого випробування

Київ

« » квітня 2021 р.

Ми, що нижче підписалися, представники державного підприємства «Інженерний центр зварювання тиском НТК «ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАН України» директор Кривенко В.Г., заст. директора Квашук Т.В. і представники ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України пров. наук. співр. Біктагіров Ф.К., мол. наук. співр. Веретільник О.В. склали цей акт про те, що в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена і реалізована технологія електрошлакової переробки стружки та дрібних відходів нержавіючої сталі 12Х18Н10Т з отриманням плоских заготовок у вигляді плит розмірами 360х400х65...100 мм.

Дослідження отриманого з відходів металу показало, що за хімічним складом він відповідає вимогам технічних умов на сталь 12Х18Н10Т, а його механічні властивості суттєво перевищують вимоги для литих виробів товщиною до 100 мм (ДСТУ 8781:2018) та знаходяться на рівні вимог, що висуваються до товстостінних поковок. Це свідчить про високу якість металу, яка досягається як за рахунок його рафінування при електрошлаковій плавці так і за рахунок відсутності в литій заготовці дефектів усадкового і ліквацийного походження.

З отриманих плит були виготовлені ножі для зняття грату, який утворюється при контактнo-стиковому зварюванні рейок. Ножі були поставлені на рейкозварювальні машини К922, К930 та К950 виробництва ДП «Інженерний центр зварювання тиском НТК «ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» і показали високу експлуатаційну стійкість у роботі.

Від ІЕЗ ім. Є.О. Патона  
Ф.К. Біктагіров  
О.В. Веретільник

Від ДП ЦЗТ «Зварювання тиском»  
Т.В. Квашук