

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 сталевих 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 металевих стружки визначено, що найкращі техніко-економічні показники має спільна плавка небрикетованої стружки та витратного електроду 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 сталевих стружки, особливо високолегованої, енерго- та ресурсозбереження, а також зменшення забруднення навколишнього середовища. Виконано аналіз існуючих технологій переробки металевих відходів і показані проблеми плавки сталевих 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 сталевих 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 % Ti, настає при вмісті в шлаці АН-295 близько 5 % TiO_2 . Експериментально визначено, що в умовах ЕШТП сталі 12Х18Н10Т з використанням шлаку АН-295 для збереження вмісту в металі 0,7-0,8 % Ti необхідно вводити в шлак 8 % TiO_2 . Визначено, що питома електропровідність шлаку АН-295 з добавками 8 % 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 12X18H10T. При плавці стружки сплаву EI602 застосовувався шлак АН-295, сплаву EI437Б, з метою виключення втрат із металу титану, в шлак додавалось 3 % TiO_2 , а нержавіючої сталі – 8 % 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 12X18H10T металу отримано дослідно-промислову партію литих заготовок у вигляді товстостінних плит розміром 360х400х65...100 мм, з яких виготовлено ножі для зняття ґрата при контактному-стиковому зварюванні рейок рейкозварювальними машинами К922, К930 та К950. 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% TiO₂ 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% TiO₂ into the slag. It was determined that the specific electrical conductivity of AN-295 slag with additives of 8 % TiO₂ 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 % TiO_2 was added to the slag, and for stainless steel — 8 % 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://10.33313/TR/0923> (Scopus).

2. **Веретільник О.В.**, Біктагіров Ф.К.(2024) Електрошлакова переробка стружки нержавіючої сталі X18H10T. *Сучасна електрометалургія*, 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 електрометалургія*, 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 електрометалургія*, 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