

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПРОТОВОІЛОВ ІГОР ВІКТОРОВИЧ

УДК 669.187.56

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ВИСОКОРЕАКЦІЙНИХ І
ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ З
НЕСТАЦІОНАРНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО
ЖИВЛЕННЯ І ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВПЛИВУ**

05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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

_____ І.В. Протоковілов

Науковий консультант:

КОМΠΑН Ярослав Юрійович

доктор технічних наук, професор

Київ - 2023

АНОТАЦІЯ

Протоковілов І.В. Електрошлаковий переплав високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестаціонарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2023.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми покращення експлуатаційних характеристик високореакційних і прецизійних сплавів, шляхом підвищення хімічної і структурної однорідності металу зливків при електрошлаковому переплаві (ЕШП). Проведено комплекс теоретичних досліджень та експериментальних розробок процесів плавлення, перенесення і кристалізації металу при ЕШП в умовах нестаціонарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу. Запропоновано нові способи ЕШП і технологічні рішення з керування процесами структуроутворення металу зливків. Вони базуються на веденні електрошлакового процесу в імпульсному режимі, із забезпеченням пошарового формування зливка, а також на імпульсному впливі на гідродинамічний стан металеві ванни електричними і магнітними полями.

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій. Викладено загальні відомості про властивості і області застосування високореакційних і прецизійних металів та сплавів, проаналізовано технологічні особливості і проблеми їх виплавки в печах ЕШП. Показано, що через жорсткі вимоги щодо хімічного складу і однорідності таких сплавів, їх виробництво потребує застосування додаткових заходів, спрямованих на гарантоване відтворення заданих характеристик металу. Невирішеною проблемою при цьому залишається керування структуроутворенням зливків ЕШП з метою отримання литого

металу з дрібнозернистою, гомогенною структурою. Показано, що перспективною областю досліджень у цьому напрямку є застосування нестационарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу.

У другому розділі розглянуті процеси плавлення витратного електроду і формування кристалічної будови зливоків ЕШП. Досліджено вплив технологічних параметрів ЕШП на характер плавлення витратних електродів з прецензійного сплаву 29НК, встановлено залежності струму плавки від швидкості подачі електроду, визначено вплив напруги і швидкості подачі на форму торця електроду і глибину його занурення у шлак. Шляхом фізичного моделювання досліджено процеси крапельного перенесення металу при ЕШП в умовах дії зовнішнього подовжнього магнітного поля. Встановлено, що під дією подовжнього магнітного поля суттєво змінюється структура і інтенсивність течій модельного розплаву, що у свою чергу, впливає на особливості формування електродних крапель та траєкторії їх руху у ванні. Показано, що застосування подовжнього магнітного поля призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу та зменшення їх маси. При цьому довжина траєкторій руху крапель і час їх перебування в ванні збільшуються, а місця їх попадання на дзеркало рідкого металу стають більш розосередженими. На основі отриманих результатів запропоновані підходи щодо керування структуроутворенням металу зливоків ЕШП, які базуються на зменшенні об'єму металеві ванни і впливі на її гідродинамічний стан.

У третьому розділі запропоновано і експериментально досліджено процес ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення. Показано, що параметри нестационарного живлення визначаються ступенем інерційності теплофізичного стану витратного електроду, металеві і шлакової ванн та гарнісажної кірки. При цьому процес формування гарнісажної кірки є більш чутливим до зміни режимів живлення і є обмежуючим чинником реалізації процесу ЕШП з нестационарними

режимами електричного живлення. Встановлено, що в залежності від параметрів живлення, можливо два принципово різних варіанти реалізації електрошлакового процесу: у безперервному режимі або з забезпеченням періодичності процесів плавлення і кристалізації металу. Експериментально доведено, що нестаціонарне електричне живлення дає можливість керувати техніко-економічними характеристиками процесу ЕШП і структурою отриманого металу. Встановлено факти зменшення на 7...10% питомих витрат електроенергії та подрібнення і гомогенізації структури металу, у порівнянні традиційним ЕШП. Показано, що механізм дії нестаціонарних режимів живлення на процес ЕШП полягає в примусовій періодичній зміні теплового і гідродинамічного стану металургійної ванни за рахунок зміни потужності.

Четвертий розділ присвячено дослідженню процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Встановлено, що для реалізації пошарового формування зливка періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, при яких в шлаковій ванні підтримується електричний струм і заданий тепловий режим. При цьому, визначальними параметрами процесу пошарового формування є тривалість імпульсів та пауз плавлення електроду, об'єм окремого шару наплавленого металу, режими підігріву шлакової ванни під час пауз плавлення електроду та характер їх зміни в перехідних процесах. Показано, що висоту окремих шарів наплавленого металу доцільно обирати в межах $(0,1...0,5) \times d_{зл}$, ($d_{зл}$ – діаметр зливка) а тривалість пауз плавлення електроду розраховувати виходячи з умов твердіння за цей час 75...95 % об'єму металеві ванни. Встановлено, що зливки, отримані способом пошарового формування, мають щільну структуру, без пористості та неметалевих включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по вісі зливка. При цьому, максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару, а дисперсність структури значно вище, ніж у аналогічних зливків традиційного ЕШП.

У п'ятому розділі досліджено можливості використання розрядів емнісних накопичувачів електричної енергії (конденсаторів) з метою оптимізації процесів кристалізації зливків ЕШП. Визначені механізми їх впливу на формування структури металу, які засновані на магнітогідродинамічних ефектах у розплавах шлакової та металеві ванн при дії імпульсними електричним і магнітним полями та на формуванні гідродинамічних "ударів" по фронту кристалізації зливка. Встановлено, що найбільш дієвим є застосування одночасних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і металургійну ванну. В цьому випадку періодично збільшуються електричний струм процесу та електромагнітна сила, яка діє на розплав, що повністю усуває формування стовбчастої структури металу, забезпечує її подрібнення і гомогенізацію, наближаючи до структури деформованого металу.

У шостому розділі проведені дослідження процесу ЕШП в умовах вакууму. Показано, що лімітуючим чинником реалізації переплаву у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. Встановлено, що тиск закипання флюсу при ЕШП залежить як від складу флюсу, так і від електричних режимів, які визначають теплову потужність процесу. Визначено критичний рівень тиску для сольових та фторидно-оксидних флюсів. Встановлена можливість зменшення вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму.

У сьомому розділі, виходячи з результатів проведених досліджень, розроблено технологічні процеси камерного ЕШП високореакційних і прецизійних металів та сплавів з використанням нестаціонарних режимів живлення і електромагнітного впливу. Створено дослідно-промислове обладнання для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів потужністю 724 кВт. Отримані дослідні зразки і промислові партії зливків титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому, метал яких характеризується високою хімічною і структурною

однорідністю.

Отримані у дисертаційній роботі результати є теоретичним узагальненням та підґрунтям для вирішення важливої науково-технічної проблеми, що має народногосподарське значення, а саме – створення в Україні конкурентоспроможного виробництва високореакційних і прецизійних сплавів та імпортозаміщення виробів з них.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, фізичне моделювання, титанові сплави, прецизійні сплави, нікелід титану, магнітне поле, нестационарне живлення, пошарове формування, розряди конденсаторів, зливок, кристалізація, макроструктура.

ABSTRACT

Protokovilov I.V. **Electroslag remelting of high-reaction and precision metals and alloys with non-stationary modes of electric power supply and electromagnetic impact.** – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Sciences degree on specialty 05.16.02 – «Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys». – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the chemical and structural homogeneity of ingots of high-reaction and precision alloys during electroslag remelting (ESR). A complex of theoretical developments and experimental studies of the processes of melting, transfer and crystallization of metal during ESR in the conditions of non-stationary regimes of electric power supply and external electromagnetic influence has been carried out. New methods of ESR and technological solutions for controlling the processes of structure formation of ingots metal are proposed. They are based on conducting the electroslag process in pulse mode, ensuring the layer-by-layer formation of the ingot, as well as on the pulse effect on the hydrodynamic state of the metal pool by electric and magnetic fields.

At the first section, the current state and trends in the development of electroslag technologies were considered. General information about the properties and areas of application of high-reaction and precision metals and alloys is presented, the technological features and problems of their melting in ESR furnaces are analyzed. It is shown that due to strict requirements regarding the chemical composition and homogeneity of such alloys, their production requires the use of additional measures aimed at guaranteed reproduction of the specified characteristics of the metal. At the same time, an unsolved problem remains the control of the structure formation of ESR ingots in order to obtain a cast metal with a fine-grained, homogeneous structure. It is shown that a promising field of research in this direction is the application of non-stationary regimes of electric power supply and external electromagnetic influence.

In the second section, the processes of melting of the consumable electrode and the formation of the crystal structure of the ESR ingots are considered. The influence of the technological parameters of the ESR on the nature of the melting of consumable electrodes made of precision alloy 29NK was investigated, the dependence of the melting current on the electrode feed rate was determined, the influence of voltage and feed rate on the shape of the electrode end and the depth of its immersion in the slag was determined. By means of physical modeling, the processes of droplet transfer of metal during ESR under the conditions of action of an external longitudinal magnetic field were investigated. It was established that under the action of a longitudinal magnetic field, the structure and intensity of the flows of the model melt significantly changes, which affects the peculiarities of the formation of electrode drops and the trajectory of their movement in the pool. It was shown that the application of a longitudinal magnetic field leads to an increase in the frequency of the electrode metal drops detachment and a decrease in their mass. At the same time, the length of the droplet trajectories and the time they stay in the pool increase, and the places where they hit the liquid metal become more dispersed. On the basis of the obtained results, approaches are proposed to control the ESR ingots metal structure formation, which are based on reducing the volume

of the metal pool and influencing its hydrodynamic state.

In the third section, the process of ESR with non-stationary modes of electric power supply is proposed and experimentally investigated. It is shown that the parameters of non-stationary power supply are determined by the degree of inertia of the thermophysical state of the consumable electrode, metal and slag pools, and garnish crust. At the same time, the process of formation of the garnish crust is more sensitive to the change of power supply modes and is a limiting factor in the implementation of the ESR process with non-stationary power supply modes. It was established that, depending on the power supply parameters, two fundamentally different options for implementing the electroslag process are possible: in continuous mode or with periodicity of metal melting and crystallization processes. It has been experimentally proven that non-stationary electrical power supply provides an opportunity to control the technical and economic characteristics of the ESR process and the structure of the obtained metal. The facts of reduction by 7...10% of the specific consumption of electricity and grinding and homogenization of the metal structure, in comparison with the traditional ESR, have been established. It is shown that the mechanism of action of non-stationary power supply modes on the ESR process consists in a forced periodic change of the thermal and hydrodynamic state of the metallurgical pool due to a change in power.

The fourth section is devoted to the study of the ESR process with layer-by-layer ingot formation. It was established that for the realization of layer-by-layer formation of the ingot, periods of melting of the consumable electrode should alternate with pauses, when the electrode does not melt and is not supplied, but the electric current and the specified thermal regime are maintained in the slag pool. The determining parameters of the layer-by-layer formation process are the duration of pulses and pauses of electrode melting, the volume of a separate layer of deposited metal, the heating modes of the slag pool during electrode melting pauses, and the nature of their changes in transient processes. It is shown that the height of layers of deposited metal should be chosen within $(0.1...0.5) \times d_{in}$, and

the duration of electrode melting pauses should be calculated based on the conditions of solidification during this time of 75...95% of the volume of the metal pool. It was established that ingots obtained by the method of layer-by-layer formation have a dense structure, without porosity and non-metallic inclusions, characterized by the absence of large columnar crystals and a zone of counter-crystallization along the axis of the ingot. At the same time, the maximum length of the crystals is limited by the height of a separate deposited layer, and the dispersity of the structure is much higher than that of ingots of traditional ESR.

The fifth section explores the possibilities of using of capacitors discharges to control the processes of ESR ingots crystallization. The mechanisms of their influence on the the metal structure formation are determined, which are based on magnetohydrodynamic effects in the melts of slag and metalpools under the influence of a pulsed magnetic field and on the formation of hydrodynamic "shocks" along the front of the ingot crystallization. It was established that the most effective is the application of simultaneous electric discharges to the solenoid of the crystallizer and the metallurgical pool. In this case, the electric current of the process and the electromagnetic force acting on the melt are periodically increased, which completely eliminates the formation of the columnar structure of the metal, ensures its grinding and homogenization, bringing it closer to the structure of the deformed metal.

In the sixth section, studies of the ESR process under vacuum conditions are carried out. It is shown that the limiting factor for the implementation of the ESR process in a vacuum is the boiling of the flux caused by the intensive evaporation of volatile compounds, primarily chlorides and fluorides. It was established that the boiling pressure of the flux during the ESR depends both on the composition of the flux and on the electrical modes that determine the thermal power of the process. The critical pressure level for salt and fluoride-oxide fluxes was determined. The possibility of reducing the hydrogen content in titanium alloys by conducting the ESR process under vacuum conditions has been established.

In the seventh section, based on the results of the conducted research, the

technological processes of the chamber ESR with the non-stationary power modes and electromagnetic influence of high-reaction and precision alloys are developed. Pilot/industrial equipment for ESR of high-reaction and precision alloys with a capacity of 724 kW has been created. Experimental samples and industrial batches of ingots of titanium alloys, titanium nickelide, precision alloys of the type 29NK, 50N, 46N, 49KF, chromium, whose metal is characterized by high chemical and structural homogeneity, were obtained.

The results obtained in the dissertation are a theoretical generalization and a basis for solving an important scientific and technical problem of national economic importance, namely, the creation of competitive production of high-reaction and precision alloys in Ukraine and import substitution of the corresponding products.

Key words: electroslag remelting, physical modeling, titanium alloys, precision alloys, titanium nickelide, magnetic field, non-stationary power supply, layer-by-layer formation, capacitor discharges, ingot, crystallization, macrostructure.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз
Scopus та Web of Science*

1. **Igor Protokovilov**, Victor Shapovalov, Vitaly Porokhonko. (2021). Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure. *Ironmaking & Steelmaking*. Vol. 48, No. 1, 62–68. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>. (*Scopus, Web of Science*).
2. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko, T. Beinerts (2021). Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magnetohydrodynamics* Vol. 57, No. 4, pp. 559–568. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>. (*Scopus, Web of Science*).
3. V. Shapovalov, **I. Protokovilov**, V. Porokhonko. (2022). Structure and

mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. *Procedia Structural Integrity*, 36, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033> (*Scopus*)

4. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. (2010). Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys // *Magneto hydrodynamics* Vol. 46, No. 3, pp. 317–324 (*Scopus, Web of Science*).

Статті у фахових виданнях

5. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковиллов И.В.** К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*. 2007. №4. С.3-7.

6. **Протоковиллов И.В.** Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Современная электрометаллургия*. 2008. №2. С.13-16.

7. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковиллов И.В.** Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. Теория и практика металлургии. 2008. №2. С.35-40.

8. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Белов А.М., **Протоковиллов И.В.** Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Современная электрометаллургия*. 2009. №1. С.1-11.

9. **Протоковиллов И.В.** Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.3–5.

10. **Протоковиллов И.В.** МГД-технологии в металлургии (Обзор). *Современная электрометаллургия*. 2011. №4. С.32–41.

11. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д. А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. *Титан*. 2011. №4(34). С.40-44.

12. **Протоковиллов И.В.** Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭШП.

Современная электрометаллургия. 2012. №1. С.12–15.

13. **Протокилов И.В.**, Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.8–13.

14. **Протокилов И.В.**, Скиба И. А., Петров Д. А. Технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки и термомеханической обработки никелида титана. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.17–20.

15. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия. Вісник НУК імені адмірала Макарова. 2012. №5. С.170-176 (електронне видання).

16. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., **Протокилов И.В.** Физическое моделирование электровихревых течений при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2013. №1. С.3–7.

17. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Изготовление расходимых электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.8–11.

18. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2013. №4. С.21–26.

19. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. и др. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки. Автоматическая сварка. 2013. №12. С.45-50.

20. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием. Современная электрометаллургия. 2014. №2. С.10–14.

21. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.7–15.

22. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование процесса плавления расходоуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия. 2015. №1. С.8–12.

23. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Гончаров И.А., Мищенко Д.Д. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. Современная электрометаллургия. 2015. №3. С.7–12.

24. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б., Петров Д.А. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2015. №4. С.3–8.

25. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Современная электрометаллургия. 2016. №2. С.18–22.

26. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо β -сплава ТС6. Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.16–20.

27. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2017. №1. С.9–14.

28. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С.9–14.

29. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Современная

електрометаллургия. 2018. №2. С.45–51.

30. **Протоковиллов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка. Современная электрометаллургия. 2019. №1. С.11–16.

31. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа. Современная электрометаллургия. 2019. №2. С.3–6.

32. **Протоковиллов И.В.**, Порохонько В.Б., Биктагиров Ф.К. та ін. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки. Современная электрометаллургия. 2019. №3. С.3–9.

33. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходного электрода из прецизионного сплава 29НК. Сучасна електрометалургія. 2019. № 4. С.4–8.

34. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме. Сучасна електрометалургія. 2020. № 2. С.3–9.

35. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на електричні режими ЕШП. Сучасна електрометалургія. 2021. № 3. С.5–8.

Тези та матеріали доповідей на науково-технічних конференціях

36. Белов А.М, Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковиллов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов в продольном магнитном поле. Материалы IV всеук. н-тех. конф. молодых ученых “Сварка и смежные технологии”, 23-25 мая 2007г. С.97.

37. Компан Я.Ю., **Протоковиллов И.В.** Технологические аспекты получения однородных мелкозернистых слитков титановых сплавов. Материалы междунар. конф. HighMatTech “Материалы и покрытия в экстремальных условиях”, 15-19 октября 2007 г., Киев, С. 152.

38. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. Материалы междунар. конф. “Ti-2008 в СНГ”, 18-21 мая 2008 г. С.96-99.

39. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка в импульсных магнитных полях. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие”, 24-26 ноября 2008, Киев. С.212-213.

40. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Возможность получения γ -алюминидов титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Материалы V Всеукр. науч. тех. конф. молодых ученых и спец. “Сварка и смежн. технологии”, 27-29 мая 2009 г. Киев. С.130.

41. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Yu. Gelfgat. Magnetically-Controlled Electroslag Melting (MEM) of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Conf. on Electro-magnetic processing of materials EMP 2009, Oct. 19-23, 2009, Germany. P.615.

42. Компан Я.Ю., **Протокилов И.В.** Электрошлаковые технологии плавки и сварки титановых сплавов с управляемыми гидродинамическими процессами. Материалы междунар. конф. “Ti-2010 в СНГ”, 16-19 мая 2010 г, Екатеринбург. С. 154–157.

43. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, Sep. 16-17, 2010. P.85-90.

44. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Технологические аспекты получения сплавов с эффектом памяти формы системы Ti-Ni методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. XI меж. конф. “Эффективность реализации науч., ресурсного и пром. потенц. в соврем. услов.”, 10-14 фев. 2011г, п. Плавыя, С. 68-70.

45. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Получение слитков никелида титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Материалы VI Научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 25-27 мая 2011г. Киев. С.125.

46. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. междунар. конф. “Ti-2011 в СНГ”, 25-28 апреля 2011 г, Львов. С. 144–147.

47. Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Особливості електрошлакового зварювання титану з використанням електромагнітних методів впливу. Матеріали II всеукр. науково-практичної конф. “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв. С. 19.

48. Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Бабич Л.М. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана. Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», Киев: Международ. ассоциация «Сварка», 2012. С. 49.

49. Петров Д.А., **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Дослідження технологічних особливостей виплавки γ -TiAl методом МЕР. Материалы VII науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. С.145.

50. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Назарчук А.Т., Бабич Л.М. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка никелида титана. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее”, 25-26 ноября 2013, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев. С.195.

51. Ivochkin Y., Teplyakov I., Guseva A., Vinogradov D., Tokarev Y., **Protokovilov I.** Influence of the swirled electrovortex flow on the melting of the eutectic alloy IN-GA-SN. Proc. of the 9th Int. Conf. on Fundamental and Applied MHD. Riga, Latvia, June 16-20, 2014, Volume 1, P. 105-109.

52. Порохонько В.Б., **Протокилов И.В.** Фізичне моделювання

плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій: матер. Всеукр. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2014. С. 94-96.

53. Петров Д.А., **Протоковилів І.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.150.

54. Порохонько В.Б., **Протоковів І.В.** Фізичне моделювання процесу ЕШП в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.152.

55. **Igor Protokovilov.** Magnetically-Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. The 34-th ISTC-Korea workshop on titanium materials and their manufacturing technology. Pusan, Korea, November 26-27, 2015. P. 171-183.

56. **I. Protokovilov**, A. Nazarchuk, V. Porokhonko. ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. Proceedings of the Medovar memorial symposium. Kyiv, Ukraine, June 7-10, 2016, P. 110-115.

57. **Протоковилів І.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка интерметаллидных сплавов на основе титана. Тези доповідей IV Міжнар. конф. “Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні”. “МоторСіч”. Запоріжжя, 2016 р. С. 32-36.

58. **I. Protokovilov**, V. Porokhonko, A. Nazarchuk. Control of metal solidification during ESR using the energy of the electric discharges. Proceed. of the 9-th Int. conf. of young scientists on welding and related technologies. Kyiv, May 23-26, 2017, P. 44-49.

59. V. Porokhonko., **I. Protokovilov.** Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field. Proceedings of the Int. conf. "Welding and related technologies - present and future". 5-6 December, 2018, Kyiv, Ukraine. P. 128.

60. **Протоковилів І.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б.

Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. Киев, 2018. С. 128-133 с.

61. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko. Control of the crystallization of the ESR ingots using non-stationary power supply modes. Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». Dnipro, Ukraine, November 22-24, 2022, P. 39-40.

Патенти

62. Патент України на винахід № 119931. Спосіб електрошлакового переплаву. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б., Шаповалов В.О., Назарчук О.Т. Опубл. 27.08.2019, бюл. № 16.

63. Патент України на корисну модель № 123715. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

64. Патент України на винахід № 110591 С2. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

65. Патент України на винахід № 97778. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів. Компан Я. Ю., Назарчук О. Т., **Протоковілов І.В.** Опубл. 12.03.2012, бюл. №5.

ЗМІСТ

ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНІ МЕТОДИ І НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ	32
1.1 Сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій	32
1.2 Технологічні особливості і проблеми виплавки високореакційних і прецизійних сплавів в печах ЕШП	41
1.2.1 Основні характеристики досліджуваних високореакційних і прецизійних сплавів	42
1.2.2 Технологічні особливості і проблеми ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів	52
1.3 Керування структуроутворенням металу зливків ЕШП	56
1.3.1 Вплив технологічних параметрів ЕШП на глибину металеві ванни	57
1.3.2 Способи впливу на кристалізацію зливків ЕШП	61
Висновки до розділу 1	71
РОЗДІЛ 2. ПЛАВЛЕННЯ ВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДУ І ФОРМУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ ЗЛИВКІВ ЕШП	74
2.1 Плавлення витратного електроду і крапельне перенесення металу	74
2.1.1 Вплив технологічних параметрів на особливості плавлення витратного електроду з прецизійного сплаву 29НК	76
2.1.2 Крапельне перенесення електродного металу в умовах зовнішнього електромагнітного впливу	82
2.2 Кристалізація металу при ЕШП	93
Висновки до розділу 2	103
РОЗДІЛ 3. ЕШП З НЕСТАЦІОНАРНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ	105
3.1 Аналіз механізмів впливу нестационарних режимів електричного живлення на процес ЕШП	105

3.2 Дослідження режимів нестационарного живлення електрошлакового процесу	113
3.2.1 Нестационарне живлення шляхом зміни режимів роботи силового трансформатора	113
3.2.2 Нестационарне живлення . шляхом імпульсної подачі витратного електроду	120
3.3 Вплив нестационарних режимів електричного живлення на формування поверхні і структуроутворення зливків ЕШП	123
Висновки до розділу 3	133
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕШП З ПОШАРОВИМ ФОРМУВАННЯМ ЗЛИВКА	136
4.1 ЕШП з пошаровим формуванням зливка	136
4.2 Експериментальні дослідження температурних і геометричних параметрів металеві ванни	140
4.3 Дослідження процесу структуроутворення металу при ЕШП з пошаровим формуванням зливка	148
Висновки до розділу 4	172
РОЗДІЛ 5. КЕРУВАННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ МЕТАЛУ ПРИ ЕШП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗРЯДІВ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	175
5.1 Аналіз можливостей використання імпульсних електромагнітних впливів в електрошлакових процесах	175
5.2 Створення експериментальної бази для проведення досліджень з впливу розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії на процес ЕШП	184
5.2.1 Розроблення експериментального джерела живлення для імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес із застосуванням ємнісних накопичувачів електричної енергії	184

5.2.1.1 Аналіз схем реалізації імпульсного електромагнітного впливу з використанням розрядів конденсаторів	184
5.2.1.2 Розроблення пристрою для створення розрядних імпульсів струму для впливу на процес ЕШП	191
5.2.2 Розроблення магнітного контуру для імпульсного впливу на процес ЕШП	198
5.2.3 Розроблення експериментального обладнання для імпульсної дії електричних розрядів на металургійну ванну	202
5.3 Дослідження технологічних і металургійних особливостей застосування електричних розрядів при ЕШП	204
5.3.1 Дослідження ефективності дії на кристалізацію металу електричних розрядів на металургійну ванну	204
5.3.2 Дослідження процесу ЕШП під впливом імпульсних магнітних полів, створених розрядами конденсаторів на зовнішній магнітний контур	209
5.3.2.1 Вплив імпульсного магнітного поля на режими ЕШП	210
5.3.2.2 Вплив імпульсного магнітного поля на структуроутворення злиwkів ЕШП	218
5.3.3 Дослідження сумісної дії електричних розрядів на зовнішній магнітний контур і металургійну ванну	223
Висновки до розділу 5	229
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕШП У ВАКУУМІ	232
6.1 Тиск у плавильному просторі, як параметр управління електрошлаковим процесом	232
6.2 Дослідження технологічних особливостей і допустимих тисків процесу ЕШП в вакуумі	237
6.3 Вплив тиску на структуру і газовий склад металу ЕШП	244
6.3.1 ЕШП титану	244

	22
6.3.2 ЕШП феротитану	250
6.4 Дегазація електроду, спресованого з губчастого титану, в процесі вакуумування камерної печі ЕШП	254
Висновки до розділу 6	260
РОЗДІЛ 7. ЗАСТОСУВАННЯ КАМЕРНОГО ЕШП В ПРОЦЕСАХ ВИПЛАВКИ ВИСОКОРЕАКЦІЙНИХ І ПРЕЦИЗІЙНИХ СПЛАВІВ	263
7.1 ЕШП титанових сплавів	263
7.2 ЕШП нікеліду титану	273
7.3 ЕШП прецизійних сплавів	283
7.4 ЕШП хрому	288
Висновки до розділу 7	291
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	294
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	298
ДОДАТОК А	327
ДОДАТОК Б	328
ДОДАТОК В	329
ДОДАТОК Г	330

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема створення ефективних методів керування структуроутворенням металу залишається пріоритетною в сучасній електрометалургії. Вона в повній мірі стосується електрошлакових технологій і загострюється з підвищенням ступеня легування сплавів та маси зливків.

Сьогодні електрошлаковий переплав (ЕШП) широко застосовують для виробництва високолегованих сталей і сплавів: інструментальних, високоміцних, теплостійких, жароміцних та ін. Окрім цих, традиційних галузей застосування ЕШП, перспективним напрямком розвитку даного процесу є виробництво прецизійних сплавів, складнолегованих сплавів на основі титану, функціональних матеріалів типу нікеліду титану та ін. Ці сплави вимагають точного дотримання заданого хімічного складу. Вони дуже чутливі до хімічної та структурної неоднорідності, наявності домішок і дефектів, вимагають певної форми, дисперсності та розподілу структурних фаз. До складу таких сплавів входять високореакційні метали, що потребує застосування спеціальних заходів для запобігання їх взаємодії з атмосферними газами в процесі виплавки.

При виробництві згаданих сплавів, на перший план виходять проблеми, пов'язані з керуванням показниками якості металу, включаючи забезпечення високого ступеня фізичної і хімічної однорідності, дисперсності первинної литої структури, відсутності дефектів ліквацийного характеру. Разом з тим, застосування традиційних схем ЕШП не завжди забезпечує необхідну металургійну якість зливків складнолегованих сплавів. Умови кристалізації металевої ванни, великий її об'єм, малоінтенсивна некерована конвекція рідкого металу сприяють формуванню грубої крупнозернистої структури литого металу та утворенню дефектів ліквацийного характеру.

У зв'язку з цим, актуальним напрямком подальшого розвитку електрошлакових технологій є розробка нових технологічних схем переплаву і методів керування теплофізичними, гідродинамічними і металургійними

процесами, які визначають формування структури зливка в процесі ЕШП і забезпечують необхідні показники якості складнолегованих сплавів.

Слід зауважити, що зараз в Україні відсутнє власне промислове виробництво цілого ряду затребуваних прецизійних сплавів, деяких титанових сплавів (наприклад, легованих марганцем), функціональних сплавів на основі нікеліду титану та ін. З огляду на це, розроблення нової перспективної електрошлакової технології має стати підґрунтям для створення в Україні конкурентоспроможного виробництва цих сплавів, що дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів та забезпечить розширення їх застосування вітчизняними підприємствами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота була виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, відповідно до планів науково-дослідних робіт, у яких автор приймав участь як відповідальний виконавець та керівник: № 1.6.1.1.38.84.28 (4.3) «Дослідження фізико-хімічних засад структуроутворення гетерогенних високоміцних сплавів титану з інтерметалідним зміцненням при магнітокерованій електрошлаковій плавці» (2007-2011 рр., № д/р 0107U002788); № 1.6.1.1.38.3 (38/3) «Дослідити методи керування кристалізацією металів і сплавів із застосуванням енергії електромагнітних розрядів і розробити електрошлакові технології і устаткування для одержання злиwkів з регламентованою структурою» (2013-2015 рр., № д/р 0113U002026); № 1.6.1.1.38.33 (4/7) «Розробити наукові засади технології отримання гомогенних з подрібненою структурою злиwkів нікелідів титану сплавів з ефектом пам'яті форми, із застосуванням магнітокерованої електрошлакової плавки» (2012-2016 рр., № д/р 0112U000621); № 1.6.3.20.6 (20/6) "Дослідження процесів плавлення і кристалізації прецизійних сплавів при електрошлаковому переplаві з імпульсними режимами електричного живлення і магнітного впливу" (2016-2018 рр., № д/р 0115U006704); № 1.6.1.1.20.31 (20/31) "Дослідження процесів плавлення та кристалізації металу при плазмово-дуговій та електрошлаковій виплавці злиwkів із відходів

тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазмово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену" (2018-2020 рр., № д/р 0118U100514); № 1.6.2.1.20.1 (20/1) "Дослідження і розробка методів впливу на структуроутворення металевих зливків при їх отриманні із застосуванням електрошлакових і плазмових технологій" (2022 р. - до тепер, № д/р 0118U100514).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення закономірностей структуроутворення металу при ЕШП в умовах нестационарних режимів електричного живлення і зовнішнього електромагнітного впливу та розроблення на цій основі технологічних процесів і обладнання для виплавки зливків високореакційних і прецизійних металів та сплавів.

Відповідно до зазначеної мети були поставлені наступні основні завдання:

- розробити фізичну модель і дослідити вплив зовнішніх магнітних полів на особливості плавлення витратного електроду і крапельне перенесення металу;
- дослідити режими нестационарного електричного живлення електрошлакового процесу і їх вплив на формування структури зливків;
- визначити основні параметри процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка і їх вплив на структуроутворення металу;
- розробити джерело живлення і магнітний контур для імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес із застосуванням розрядів конденсаторів;
- дослідити вплив імпульсних магнітних і електричних полів, створених розрядами конденсаторів, на режими ЕШП і структуроутворення металу зливків;
- визначити технологічні особливості і припустимі тиски процесу ЕШП у вакуумі при використанні фторидно-оксидних та сольових флюсів;

- визначити вплив пониженого тиску на газовий склад металу зливків титанових сплавів;

- розробити технологічні процеси і обладнання для виплавки зливків високореакційних і прецизійних металів та сплавів, з забезпеченням більш високої якості металу та техніко-економічних показників технології.

Об'єкт дослідження. Процес ЕШП високореакційних і прецизійних металів та сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу.

Предмет дослідження. Закономірності плавлення, перенесення та структуроутворення металу при ЕШП в умовах нестационарних режимів електричного живлення і зовнішніх електромагнітних впливів; хімічна і структурна однорідність металу; газовий склад металу при ЕШП у вакуумі.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовували аналітичні та експериментальні методи досліджень. Дослідження процесів плавлення електроду і крапельного перенесення металу здійснювали шляхом фізичного моделювання за авторською методикою, верифікацію результатів моделювання проводили шляхом натурних експериментів. Експериментальні дослідження здійснювали в лабораторних умовах на модернізованій електрошлаковій установці камерного типу. Дослідження властивостей металу здійснювали із застосуванням стандартних методик металографічних досліджень макро- і мікроструктури металу, методів газового, спектрального і хімічного аналізів та механічних випробувань. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Уперше теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість керування структурою металу зливків при ЕШП шляхом застосування нестационарних режимів електричного живлення, які призводять до періодичної зміни теплового і гідродинамічного стану металеві ванни, збільшуючи, при щільності струму у ванні $\geq 0,4$ А/мм², в

1,5...2 рази дисперсність структури литого металу, при зменшенні на 7...10% питомих витрат електроенергії.

2. Уперше встановлено, що для ефективного керування структуроутворенням металу при ЕШП і забезпечення періодичності процесів плавлення і кристалізації металу та пошарового формування зливка з дрібнозернистою структурою і відсутністю дефектів по границях сплавлення окремих шарів періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, коли електрод не плавиться, але в шлаковій ванні підтримується електричний струм і тепловий режим, що забезпечує твердіння під час пауз 75...95 % об'єму рідкої металевої ванни при висоті шарів наплавленого металу в межах $(0,1...0,5) \times d_{зл}$, де $d_{зл}$ – діаметр зливка.

3. Запропоновано новий спосіб управління структуроутворенням злиwkів ЕШП за допомогою сумісних розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії на соленоїд кристалізатора і на шлакову та металеву ванни, з питомою енергією розрядів $0,3...0,4$ Дж/мм² і частотою 0,6...3 Гц. Встановлено, що в цьому випадку періодично збільшуються електричний струм процесу та електромагнітна сила, яка діє на розплав, що, в свою чергу, збільшує гідродинамічний вплив на фронт кристалізації зливка забезпечуючи подрібнення і гомогенізацію його литої структури, наближаючи до структури деформованого металу.

4. Уперше встановлено, що імпульсне поздовжнє магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до періодичного падіння струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля і його відновлення під час пауз. Показано, що механізм зміни струму плавки пов'язаний з магнітогідродинамічними процесами в шлаковій ванні, внаслідок чого періодично зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

5. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив поздовжнього магнітного поля на плавлення і перенесення електродного металу.

Встановлено, що під дією магнітного поля індукцією 0,35 Тл максимальна швидкість потоків в шлаковій ванні збільшується з 22 до 420 мм/с, що призводить до збільшення на 21...38 % частоти краплеутворення та зменшення на 8...24 % маси крапель. Обертання розплаву шлаку збільшує довжину траєкторій руху крапель і час їх перебування у шлаковій ванні, зменшуючи кількість крапель, які потрапляють на дзеркало металевої ванни по її осі з 78 до 40 %.

6. Встановлено, що критичний рівень вакууму, при якому відбувається закипання шлакової ванни, залежить від складу флюсу і електричних режимів, які визначають теплову потужність процесу. Чим вище потужність, тим при більш високому тиску відбувається закипання флюсу. Уперше визначено, що критичний тиск для сольових флюсів типу АН-Т2, АН-Т4 становить 12...26 кПа, а для фторидно-оксидних флюсів АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 – 3...15 кПа.

Практичне значення отриманих результатів.

1. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено технологічні процеси, захищені патентами України:

- ЕШП титанових сплавів в камерній печі з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу. Технологія була випробувана при виплавці широкої номенклатури титанових сплавів і типорозмірів зливків, в тому числі циліндричних, прямокутних і порожнистих;

- ЕШП відходів прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ із застосуванням імпульсного електромагнітного впливу на кристалізацію металу. Отримані дослідні та промислові партії зливків і деформованих напівфабрикатів згаданих сплавів;

- ЕШП сплавів з ефектом пам'яті форми системи Ti-Ni, під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Запропоновані режими деформації зливків, отримані напівфабрикати у вигляді пластин і дроту;

- ЕШП відпрацьованих катодів з хрому у камерній печі. Отримано

дослідні зразки злиwkів хрому, які за хімічним складом відповідають вимогам стандарту до хрому марки Х99Н1.

2. Комплекс запропонованих в роботі технологічних рішень підвищення ефективності електрошлакового процесу реалізовано в створеній дослідно-промисловій установці потужністю 724 кВт для камерного ЕШП злиwkів високореакційних і прецизійних металів та сплавів діаметром до 260 мм і довжиною до 900 мм. Розроблені технологічні процеси і обладнання використовуються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона при виготовленні промислових партій злиwkів для вітчизняних підприємств.

3. Основні положення дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі під час підготовки аспірантів в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (курс "Методи підвищення ефективності металургійного виробництва").

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійною роботою автора. При підготовці публікацій вклад автора був визначальним. У роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [1, 6, 11, 14, 20, 30, 32-34, 44-46, 50, 58] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [2, 22, 28, 52, 54, 59] - ідея і розробка концепції фізичного моделювання, аналіз критеріїв подібності, перевірка адекватності моделювання, формулювання висновків, підготовка рукописів статей; у [3, 7, 25-27, 31, 40, 49, 53] - розробка режимів експериментальних плавок (зварювання), узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [19, 21, 29] - аналіз і узагальнення літературних даних; підготовка рукописів статей; у [13, 15, 17-18, 24, 35, 37-39, 42, 47-48, 57, 60-61] - аналіз і узагальнення експериментальних даних; підготовка рукописів публікацій; у [4-5, 8, 41, 43] - підготовка та проведення експериментальних плавок, аналіз одержаних результатів; у [16, 23, 36, 51] - аналіз результатів експериментів, формулювання висновків; у [62-65] - ідея, обґрунтування та підготовка рукописів патентів.

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях, зокрема: Всеукраїнській науково-технічній конференції "Наука і металургія" (Дніпро, листопад, 2022); 75th IW Annual Assembly and International Conference (Tokyo, Japan 17-22 July 2022); International Conference "In-service damage of materials, its diagnostics and prediction" (Ternopil, Ukraine, 11-13 October 2021); Міжнародній конференції "Титан-2018. Виробництво і застосування в Україні" (Київ, червень, 2018); Міжнародній конференції "Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні і споріднених технологіях" (Одеса, вересень, 2018); Міжнародній конференції "Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні" (Запоріжжя, листопад, 2016); Medovar memorial symposium (Kyiv, Ukraine, 7-10 June 2016); 34th ISTC-Korea workshop on titanium materials and their manufacturing technology (Pusan, Korea, 26-27 November 2015); 9th International PAMIR Conference on Fundamental and Applied MHD, Thermo Acoustic and Space Technologies (Riga, Latvia, 16-20 June 2014); Міжнародній конференції "Сучасні проблеми металургії, технології зварювання та наплавлення сталей та кольорових металів" (Київ, жовтень, 2012); XI міжнародній конференції "Ефективність реалізації наукового ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах" (Плав'я, 10-14 лютого 2011); 6th Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing (Riga, Latvia, 16-17 Sep. 2010); 6th Int. Conf. on Electro-magnetic processing of materials EMP 2009 (Dresden, Germany, 19-23 Oct. 2009); Міжнародній конференції HighMatTech "Матеріали та покриття в екстремальних умовах" (Київ, жовтень, 2007); П'ятій всеукр. міжгалуз. науч. техн. конф. "Зварювання та споріднені технології" (Київ, 18-20 квітня 2012); міжнародних конференціях "Ti-2011" (Львів, 25-28 квітня 2011), "Ti-2010" (16-19 травня 2010), "Ti-2008" (18-21 травня 2008); всеукраїнських наук.-техн. конференціях "Зварювання та споріднені процеси і технології"- (2012, 2014 рр., Миколаїв, Україна); міжнародних конференціях "Зварювання та споріднені технології – сучасне і

майбутнє" (2008, 2013, 2018 рр., Київ, Україна); міжнародних конференціях молодих учених та спеціалістів "Зварювання та споріднені технології" (2007, 2009, 2011, 2013, 2015, 2017, 2021 рр., Київ, Україна).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковано в 65 друкованих роботах, в тому числі: 35 статей які задовольняють вимоги МОН України щодо публікації результатів дисертаційних робіт (з яких 4 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science); 3 патенти України на винахід і 1 патент України на корисну модель; 26 – матеріали наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, 7 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 279 найменувань на 29 сторінках та 4 додатків на 12 сторінках. Дисертація має загальний обсяг 338 сторінок, містить 143 рисунки і 32 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНІ МЕТОДИ І НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Сучасний стан і тенденції розвитку електрошлакових технологій

ЕШП був винайдений і розроблений в Інституті електрозварювання ім. Е.О. Патона в 50-х роках минулого століття. У 1958 році на заводі "Дніпроспецсталь" в м. Запоріжжя був виплавлений перший промисловий зливочок за класичною схемою ЕШП витратного електроду у стаціонарному (глухондонному) кристалізаторі [1].

Сьогодні ЕШП широко розповсюджений в усьому світі: в Китаї, США, Німеччині, Великій Британії, Австрії, Франції, Італії, Японії, Україні та ін. За різними оцінками в світі виплавають від 1,2 до 3,0 млн. тонн електрошлакового металу на рік [1-7].

За минулі, більш ніж 60 років розвитку ЕШП, виникли нові схеми і галузі його застосування, які зараз визначаються терміном "електрошлакові технології". Це електрошлакове лиття, електрошлаковий обігрів, електрошлакове наплавлення, ЕШП в захисній атмосфері і під тиском, ЕШП з використанням некомпактного та рідкого металу та ін. Створено технологічні процеси виробництва зливків квадратного і прямокутного перерізів (слябів), порожнистих зливків, фасонних виливочок. Електрошлакові технології використовують для виробництва зливків з конструкційних і інструментальних сталей, нержавіючих сталей, суперсплавів, сплавів на основі нікелю, кобальта, міді, титану та ін. Вага електрошлакових зливків становить від сотень грам до 250 тонн (рис. 1.1) [8].

Основні конкурентні переваги, що визначають ефективність застосування ЕШП в сучасному виробництві такі:

- можливість рафінування і легування металу в процесі переплаву внаслідок його взаємодії зі шлаком на торці витратного електроду, при проходженні електродних крапель крізь шлак і на поверхні поділу "шлакова ванна - металева ванна";
- послідовна направлена кристалізація, яка сприяє формуванню щільної макроструктури литого металу;
- відсутність (або мінімальний ступінь) неконтрольованого випаровування з розплаву легуючих компонентів, що створює передумови для виплавки сплавів з заданим хімічним складом;
- можливість виплавки зливок різного поперечного перерізу: циліндричних, прямокутних, порожнистих, фасонних;
- висока якість формування бічної поверхні зливок, внаслідок чого зменшуються витрати на їх механічну обробку;
- широкі межі стійкого протікання електрошлакового процесу, що зумовлює великі можливості керування процесами плавлення і твердіння металу, за рахунок металургійних засобів і зовнішніх фізичних впливів.



Рисунок 1.1 – Зливки ЕШП вагою від 0,5 кг до 250 тон

Аналізуючи тенденції розвитку ЕШП і раціональні галузі його застосування необхідно звернути увагу на сортамент сплавів, що виплавляють.

Сьогодні методи позапічної обробки цілком забезпечують необхідну високу якість вуглецевих, низьколегованих, конструкційних сталей і сплавів, без додаткового металургійного переділу. Тому, ефективним застосуванням

електрошлакових технологій є виробництво сталей і сплавів, необхідні показники якості металу яких неможливо досягти традиційними металургійними засобами. Це, перш за все, високолеговані сталі (інструментальні, нержавіючі, штампові, високохромисті, високоазотисті), суперсплави на основі нікелю, прецизійні сплави, нові складнолеговані сплави, в тому числі з інтерметалідним зміцненням та ін. [9-12]. Перспективним залишається застосування ЕШП для виробництва сплавів на основі титану, переробки відходів хрому та ін. [13-19].

Тобто однією з тенденцій сучасного ЕШП є збільшення ступеню легування сплавів, які виплавляють. В той же час відомо, що зі збільшенням ступеню легування сплаву значного розвитку набувають ліквідаційні процеси при твердінні металу, внаслідок чого утворюються дефекти, які неможливо усунути при наступній термомеханічній обробці. При цьому, чим більше і складніше легований метал, тим при меншому діаметрі зливка виникають сегрегаційні дефекти.

Тому, при ЕШП складнолегованих сплавів, гостро стоїть проблема керування показниками якості металу, включаючи забезпечення високого ступеню фізичної і хімічної однорідності, дисперсності первинної литої структури, низького вмісту і рівномірного розподілу неметалевих включень. Сьогодні ця проблема повністю не вирішена.

Для отримання металу необхідної якості вживають заходи, спрямовані на суворе дотримання заданих параметрів виробничого процесу, контроль якості і підготовки вихідних компонентів (витратний електрод, шлак, захисний газ, розкислювачі і т.і.), створення комп'ютеризованих систем виробничого менеджменту і систем керування технологічним процесом [20].

У сучасних печах ЕШП особлива увага надається системам автоматичного керування процесом переплаву. Якщо раніше системи керування ЕШП базувались на контролі струму і потужності переплаву переважно шляхом зміни швидкості подачі витратного електроду, то сьогодні застосовують комплексні алгоритми керування, з контролем таких

параметрів як електричний струм і напруга переплаву, швидкість плавки, розташування і глибина шлакової ванни, маса електроду, глибина його занурення в шлак, температура охолоджуючої води та ін. [21]. При цьому, серед основних контрольованих параметрів, таких як потужність і швидкість переплаву, має бути величина занурення електроду у шлак [22].

Формування дефектів ліквідаційного характеру при ЕШП безпосередньо пов'язане з формуванням глибокої V-подібної ванни рідкого металу і тривалим терміном його твердіння в умовах малоінтенсивної конвекції, що супроводжується формуванням різного роду неоднорідностей і сегрегацій. Тому основні зусилля металургів спрямовані на зменшення об'єму рідкої металеві ванни в процесі переплаву і твердіння зливка.

З огляду на це, широкі можливості керування об'ємом і формою металеві ванни зливка відкривають запропоновані в ІЕЗ ім. Є.О. Патона схеми ЕШП із застосуванням струмопідвідного кристалізатора, у тому числі за двоконтурною схемою живлення [23-27]. Периферійний характер тепловиділення при плавці в струмопідвідному кристалізаторі та відсутність жорсткої залежності між температурним режимом і продуктивністю процесу дозволяють змінювати в широких межах швидкість плавки і форму металеві ванни. Якщо при канонічній схемі ЕШП глибина металеві ванни зазвичай порівняна з радіусом зливка, то при ЕШП у струмопідвідному кристалізаторі металева ванна може бути у рази менше і мати практично плоску форму [23]. Це дозволяє боротися з сегрегаційними явищами, зменшуючи швидкість переплаву без втрати якості поверхні зливка.

Зменшити перегрів металу і розширити можливості керування твердінням дозволяє також застосування різноманітних схем ЕШП з рідким металом [24, 28-30].

На підвищення якості злиwkів спрямовані також різні методи електрошлакового обігріву і підживлення [31-33]. Вони дозволяють підвищити щільність металу, зменшити його хімічну неоднорідність, звести до мінімуму дефекти усадкового походження і обріз головної частини зливка.

При виробництві зливків ЕШП окрім питань забезпечення показників якості металу гостро стає завдання поліпшення енергетичних характеристик процесу. З огляду на це слід звернути увагу на конструкцію струмовідводу печей ЕШП. Суттєво знизити втрати електричної енергії у вторинному ланцюгу дозволяє застосування біфілярного струмопідводу. Тому, сучасні печі ЕШП комплектуються повністю збіфільованими коаксіальними струмопідводами, що дозволяє мінімізувати індуктивні втрати електричної енергії [34-35]. Крім цього, застосування коаксіального струмопідводу зменшує асиметрію електромагнітного поля, яке може негативно впливати на структуроутворення складнолегованих сплавів [22].

Традиційно, електрошлакові установки комплектуються однофазними джерелами живлення змінним струмом промислової частоти (50, 60 Гц). Проте, при живленні таким струмом у вторинному ланцюгу (навіть при коаксіальній його конструкції) і витратному електроді є індуктивні втрати електроенергії. Тому, сьогодні все більше розповсюдження знаходять установки ЕШП, що живляться змінним струмом пониженої частоти (зазвичай 1..5 Гц), що дозволяє зменшити на 10...25% питомі витрати електроенергії і підвищити коефіцієнт потужності [34, 36-39]. Наголошується, що окрім покращення техніко-економічних показників процесу ЕШП, вищезгадані джерела дозволяють плавно регулювати електричну напругу в процесі плавки, зменшувати асиметрію споживаної з мережі потужності і уникати різких коливань навантажень. Крім того, як стверджують автори робіт [12, 40-41], живлення процесу ЕШП змінним струмом пониженої частоти забезпечує низку металургійних переваг, зокрема:

- додаткові можливості керування процесом структуроутворення металу, за рахунок зміни теплофізичних умов переплаву і твердіння;
- підвищення хімічної однорідності і дисперсності кристалічної структури металу зливків;
- вплив на морфологію і розподіл неметалевих включень.

Механізми впливу на металургійні процеси в ванні і умови твердіння металу, при живленні процесу ЕШП струмом пониженої частоти, пов'язують, перш за все, зі зміною розподілу електричного струму в металевій ванні, що призводить до зміни напрямку і інтенсивності гідродинамічних течій в ванні [42]. Це пояснюють тим, що зі зменшенням частоти струму зменшується скін-ефект, внаслідок чого відбувається перерозподіл щільності струму в розплаві (зменшується радіальна складова струму), що, в свою чергу, призводить до перерозподілу сили Лоренца і структури течій розплаву [43-44]. Це впливає на тепломасоперенос в шлаковій і металевій ваннах, змінює профіль фронту кристалізації і тим самим впливає на металургійну якість металу.

Важливою тенденцією розвитку електрошлакових технологій і відповідного обладнання є створення в плавильному просторі контрольованої атмосфери: захисної атмосфери інертного газу, атмосфери азоту, розрідженої атмосфери або вакууму.

Більшість печей нового покоління для виплавки складнолегованих сталей і сплавів мають спеціальні камери або ковпаки, які герметично з'єднуються з кристалізатором, що дозволяє вести процес ЕШП в атмосфері інертного газу [34]. Застосування захисної атмосфери дозволяє виплавляти складнолеговані сплави, що містять компоненти, які легко окислюються, сплави на основі титану, нікелю, хрому та ін. Зазвичай, плавку проводять в атмосфері аргону, при його надлишковому тиску. При виплавці високореакційних матеріалів таких як титан, для гарантованого запобігання його взаємодії з атмосферними газами, необхідне попереднє вакуумування плавильного простору. Для цього установки ЕШП оснащують вакуумними системами (вакуумними насосами, трубопроводами, засувками та ін.).

Окрім камерних печей, для плавки в захисній інертній атмосфері, компанія ALD Vacuum Technologies пропонує камерні печі для ЕШП у вакуумі [45]. Відмічається, що процес вакуумного ЕШП поєднує переваги технології ЕШП і вакуумно-дугового переплаву (ВДП) [46]: відсутність

окислення компонентів сплаву; рафінування сплаву від водню і кисню; зведення до мінімуму небезпеки утворення дефектів типу "білих плям". Підкреслюється, що даний процес може бути перспективним для отримання жароміцних сплавів і титану, проте відомостей щодо його практичного застосування нема.

Ще одним сучасним напрямком застосування камерних печей ЕШП є виплавка зливок під тиском [49-50]. Використання печей, в яких реалізована можливість керування тиском, відкриває перспективи створення нових матеріалів і систем легування, які неможливо отримати традиційними методами. Печі ЕШП для переплаву під тиском до 40 ат (4 МПа) експлуатуються в Німеччині (м. Ессен), для виплавки зливок високоазотистих сталей аустенітного і мартенситного типів [47-48]. Компанія ALD Vacuum Technologies пропонує печі ЕШП для роботи під тиском до 42 ат, в виробничих умовах, і до 70 ат, в лабораторних умовах (рис. 1.2) [49].

Якщо аналізувати конструкції сучасних печей ЕШП, то найбільш використовуваною залишається канонічна схема переплаву у стаціонарному глуходонному кристалізаторі, дещо меншою мірою - схеми переплаву з витяжкою зливка. Це пов'язане з простотою конструкцій печей канонічної схеми ЕШП, легкістю забезпечення захисної атмосфери, як для плавильного простору, так і для зливка, що охолоджується. Крім того, реалізація схеми ЕШП з витяжкою зливка для деяких сплавів (наприклад на основі титана) пов'язана зі значними труднощами, через високу рідкотекучість і "короткість" шлаків, які використовують для переплаву даних сплавів.

Серед конструктивних особливостей сучасних печей ЕШП необхідно ще виділити наявність двокоординатних систем для центрування електроду у кристалізаторі і можливість заміни електродів по ходу переплаву [22]. Ці засоби дозволяють зменшити висоту печі і витрати на підготовку довгих витратних електродів та підвищити коефіцієнт заповнення. Точне центрування електроду у кристалізаторі покращує симетрію теплових і гідродинамічних процесів в шлаковій і металевій ваннах і якість зливка.

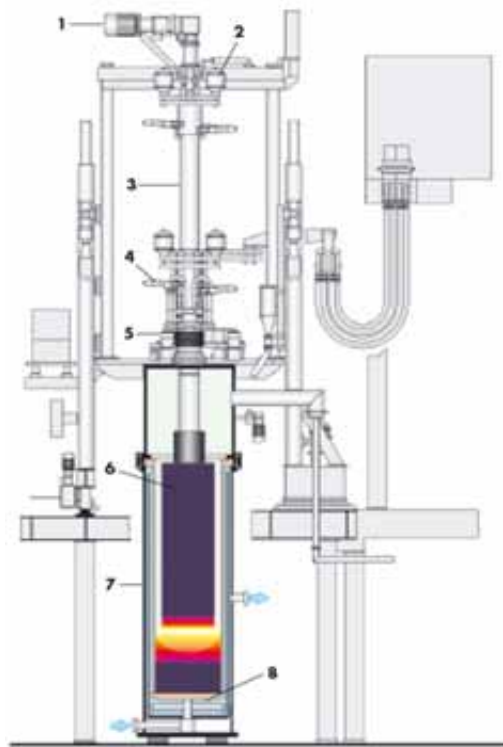


Рисунок 1.2 – Схема печі ЕШП під тиском компанії ALD Vacuum Technologies [49]: 1 – привод вертикального переміщення електроду; 2 – система горизонтального корегування положення електроду; 3 – шток вертикального переміщення; 4 – ковзний контакт; 5 – датчик навантаження; 6 – витратний електрод; 7 – водоохолоджуваний кристалізатор; 8 – піддон

Окрім виплавки циліндричних зливків і слябів перспективним напрямком застосування ЕШП залишається виробництво порожнистих зливків для виготовлення труб, посудів, кілець та інших виробів [19, 51-54]. ЕШП трубних заготовок має як економічні, так і технологічні переваги. Його застосування дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу, скоротити виробничий цикл. При цьому, досвід застосування ЕШП для виробництва труб показує, що механічні властивості і працездатність литого електрошлакового металу в ряді випадків не поступаються металу кованих труб. Це дозволяє використовувати труби ЕШП для трубопроводів теплових і атомних електростанцій навіть в литому стані [19, 52-56].

При виплавці порожнистих зливків охолодження відбувається з двох сторін, що суттєво впливає на характер твердіння металу і його структуру.

Внаслідок високих швидкостей твердіння цей процес є більш чуттєвий до зміни режимів переплаву. Через неправильно вибрані режими можливо утворення глибокої металевої ванни, з радіальним напрямком росту кристалітів і формуванням дефектів у місцях їх з'єднання [52]. Тому при ЕШП порожнистих зливків необхідно вживати заходи для утворення неглибокої металевої ванни, при якій напрямок росту кристалітів наближається до осьового.

Окрім розглянутих вище сучасних галузей застосування ЕШП перспективним напрямком розвитку даного процесу є виробництво складнолегованих сплавів, які важко отримати традиційними металургійними методами. Це різноманітні прецизійні сплави, функціональні матеріали типу нікеліду титану, сплави на основі титану та ін. [9-15].

При виробництві таких матеріалів здебільшого нема потреби у виплавці великовагових зливків, а зливки діаметрами 100...200 мм вже вважаються промисловими. Проте, при отриманні таких сплавів, гостро стоять проблеми забезпечення високого рівня структурної однорідності сплавів, суворо заданого вмісту легуючих компонентів і рівномірного їх розподілу по об'єму зливка, мінімальної наявності домішок, оптимального складу, морфології і розподілу зміцнюючих фаз.

Електрошлаковий процес завдяки характерним рисам, таким як послідовна направлена кристалізація, розосереджене і відносно низькотемпературне джерело тепловиділення, можливості рафінування і легування металу, внаслідок взаємодії "*шлак - метал*" та широким можливостям керування процесами плавлення і твердіння металу є перспективним технологічним процесом для виплавки складнолегованих і прецизійних сплавів. Разом з тим, застосування традиційних схем ЕШП не завжди забезпечує необхідну металургійну якість зливків таких сплавів. Тому, актуальним завданням є розробка нових методів керування теплофізичними, гідродинамічними і металургійними процесами, які визначають формування структури зливка ЕШП і забезпечують необхідні показники якості металу.

Таким чином, на основі проведеного аналізу, можна виділити наступні тенденції застосування і розвитку електрошлакових технологій і обладнання:

- збільшення ступеня легування сплавів, які виплавляють;
- розширення типорозмірів і номенклатури зливоків (циліндричні, порожнисті, змінного перерізу);
- створення і застосування печей для плавки в контрольованій захисній атмосфері інертного газу або при надлишковому тиску;
- розробка і застосування систем автоматичного керування параметрами процесу ЕШП, з контролем потужності, швидкості переплаву, маси електроду і глибини його занурення у шлак;
- застосування конструктивних і технологічних заходів для покращення техніко-економічних показників процесу: коаксіальні струмопідводи, живлення змінним струмом пониженої частоти, заміна електродів в процесі переплаву;
- розробка нових технологічних схем ЕШП і методів керування процесами плавлення і твердіння металу, які визначають показники якості зливка: хімічну і структурну однорідність, відсутність дефектів ліквідаційного походження, вміст домішок та ін.

1.2 Технологічні особливості і проблеми виплавки високореакційних і прецизійних сплавів в печах ЕШП

Як було показано вище, пріоритети застосування електрошлакових технологій в останні десятиріччя дещо змінилися. Сьогодні, завдання ЕШП це вже не стільки рафінування металу від домішок, скільки отримання високоякісного зливка складнолегованого сплаву заданого хімічного складу і заданої структури [57]. При цьому, застосування електрошлакового процесу доцільно при виробництві матеріалів, які важко отримати традиційними металургійними методами.

Серед широкої номенклатури сплавів для отримання або переробки яких ефективним може бути застосування ЕШП можна виділити сплави на

основі титану, нікелю, хрому, прецизійні сплави та ін. Нижче наведені основні характеристики матеріалів, які використовували в роботі.

1.2.1. Основні характеристики досліджуваних високореакційних і прецизійних сплавів

Титанові сплави.

Однією з груп матеріалів, для отримання або переробки яких перспективне застосування ЕШП, є сплави на основі титану [58-63].

Переваги титанових сплавів загальновідомі: низька густина (4,5-4,6 г/см³), висока міцність (до 1700 МПа), корозійна стійкість (вища, ніж у корозійностійкої сталі), висока біологічна сумісність, гарна зварюваність, досить широке поширення в земній корі та ін. [64-65]. При цьому титанові сплави мають одну з найвищих (серед металевих сплавів) питому міцність, що робить їх є надзвичайно корисними матеріалами в тих галузях техніки, де вигреш у вазі має вирішальну роль.

Обсяги застосування титанових сплавів у світі постійно збільшуються. Сьогодні їх використовують в літакобудуванні (≈30-40% від загального обсягу), у військовому секторі (≈10-15%), хімічній промисловості (ємності, труби, колонни, силові елементи), газо - та нафтовидобуванні (труби, силові конструкції, елементи газо - та нафтовидобувних платформ), харчовій промисловості (ємності і трубопроводи, котли, теплообмінники, холодильники), автомобілебудуванні (деталі двигуна, вихлопні системи, диски коліс, силові конструкції спортивних авто), в медицині (імпланти, протези, інструмент, інвалідні коляски), будівництві (елементи фасадів і дахів), при виготовленні спортивного і туристичного інвентарю та ін. (усі останні галузі ≈40-60 %).

Легування титану дозволяє значно підвищити його механічні характеристики. Наприклад, межа міцності високоміцних титанових сплавів може сягати до 1700 МПа, в той час як нелегованого титану, в середньому, становить 300...400 МПа (тобто збільшується майже в 5,5 разів) [65]. Тому

сьогодні використовують переважно титанові сплави, а не чистий титан. Серед основних легуючих елементів, що додають до титанових сплавів є Al, V, Mo, Cr, Zr, Fe, Sn, при тому їх сумарний вміст в сплаві може досягати 25 % і вище [66-67].

Сьогодні розроблена велика кількість титанових сплавів, які по типу структури поділяють на α , псевдо- α , $\alpha+\beta$, псевдо- β і β - сплави [65]. Розробляються сплави із дисперсійним зміцненням до складу яких входять інтерметалідні з'єднання: алюмініди, бориди, силіциди титану та ін. [10, 66-72]. При виробництві таких сплавів гостро стоїть проблема забезпечення суворо заданого хімічного складу сплаву, з високим рівнем його однорідності і дисперсності розподілення інтерметалідних фаз. В протилежному випадку тверді інтерметалідні фази можуть об'єднуватися в конгломерати і ставати, по суті, дефектами, які призводять до зародження тріщин і руйнування металу при його експлуатації.

Наразі основним промисловим способом виробництва титанових сплавів залишається подвійний (іноді потрійний) вакуумно-дуговий переплав [73-74]. Все більшого застосування знаходить технологія електронно-променевої плавки з проміжною ємністю [75-76]. В меншій мірі використовують процеси індукційної плавки з холодним тиглем, плазмово-дуговий переплав, електрошлаковий переплав [77-79].

Технологічні особливості виплавки титанових сплавів обумовлені, перш за все, високою хімічною активністю титану, який при температурах вище 400⁰С починає активно взаємодіяти з атмосферними газами. Тому, плавку титанових сплавів необхідно здійснювати виключно в умовах вакууму або інертного середовища. Висока хімічна активність титану також виключає можливість його плавки в графітових тиглях або ємностях, футерованих матеріалами, що містять оксиди. Тому плавлення титану і сплавів на його основі здійснюється, переважно, в мідних водоохолоджуваних кристалізаторах, рідше – у титановому гарнісажі [73].

Серед основних проблем виробництва титанових сплавів можна виділити проблему надійного забезпечення заданих характеристик металу (перш за все структурної і хімічної однорідності) при гарантованій відсутності металургійних дефектів. Це стосується складнолегованих титанових сплавів, в тому числі легованих елементами з високою пружністю пари (Mn, V та ін.), які інтенсивно випаровуються при переплаві у вакуумі. Не менш важливим є також зменшення собівартості переплавного процесу.

В таблиці 1.1 наведено хімічний склад титанових сплавів, які використовували в роботі.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад досліджуваних титанових сплавів

Сплав	Вміст елементів, % мас.											
	Ti	Al	V	Mo	Zr	Mn	Cr	Fe	Nb	Домішки, не більше		
										O	H	N
BT1	Основа	-	-	-	-	-	-	-	-	0,2	0,010	0,04
Grade 4	Основа	-	-	-	-	-	-	≤0,5	-	0,4	0,015	0,05
OT4	Основа	3,5-5,0	-	-	0,3	0,8-2,0	-	0,3	-	0,15	0,012	0,05
BT6	Основа	5,3-6,8	3,5-5,3	-	0,3	-	-	0,3	-	0,2	0,015	0,05
BT22	Основа	4,4-5,7	4,0-5,5	4,0-5,5	0,3	-	0,5-1,5	0,5-1,5	-	0,18	0,015	0,05
Ti-10-2-3	Основа	2,6-3,4	9,0-11,0	-	-	-	-	1,6-2,2	-	0,13	0,015	-
TC6	Основа	3	6	3,0-5,0	-	-	10-11	-	-	0,2	0,015	0,05
γTiAl	Основа	48	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-

Нікелід титану (NITINOL).

До матеріалів, при виробництві яких перспективне застосування електрошлакових технологій також слід віднести сплави на основі нікеліду титану TiNi. Сплави системи Ti-Ni, це високотехнологічні, функціональні матеріали, які мають унікальні властивості – ефект пам'яті форми (ЕПФ) і надпружність [80-86].

Фізична основа прояву ЕПФ в сплавах такого типу вперше, в 1948 р., була визначена і досліджена українським вченим, академіком

Курдюмовим Г.В. (ефект Курдюмова) [87]. Цей ефект пов'язаний з явищем термоупружньої рівноваги фаз при перетвореннях мартенситного типу, яке проявляється у поступовому зростанні (або зникненні) кристалів мартенситу, при зміні температури або напруженого стану.

Пізніше, в 1959 р., в США був розроблений сплав системи 55Ni-45Ti (мас. %) з ефектом пам'яті форми, що отримав назву NITINOL (аббревіатура від Nickel Titanium-Naval Ordnance Laboratory).

Нікелід титану (NITINOL) – це інтерметалідний сплав еквіатомного складу – 50Ni-50Ti ат. % (у масових відсотках – 55Ni-45Ti мас. %). Його температура плавлення складає 1240...1310°C, густина 6,45 г/см³, питомий електроопір 82×10^{-6} Ом×см, коефіцієнт термічного розширення 11×10^{-6} 1/°C. Сплав є немагнітним.

Вихідна структура нікеліду титану – це стабільна об'ємно-центрована кубічна решітка – мартенсит. При високих температурах нікелід титану переходить до аустенітної форми, з простою кубічною структурою.

На основі нікеліду титану розроблені промислові сплави, властивості деяких з них наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад та механічні властивості сплавів на основі нікеліду титану [88]

Сплав	Хімічний склад, % мас.	σ_B	$\sigma_{0,2}$	КСУ, МДж/м ²	$t_{в.ф.}$, °C	$\sigma_{повер.}$ МПа
		МПа				
ТН1	Ti-(53,5-56,5)Ni	600-900	150-200	0,3-0,4	-10 ÷ +90	300
ТН1К	Ti-(53,5-56,5)Ni-(2,0-4,5)Fe	500-900	100-250	0,3-0,5	-160 ÷ -80	400
ТНМЗ	Ti-(48,0-52,5)Ni-(3,0-6,0)Cu	600-700	150-250	0,4-0,6	+80	200

Позначення: $t_{в.ф.}$ – температура відновлення форми; $\sigma_{повер.}$ – напруга повернення.

ЕПФ, у поєднанні з високими характеристиками корозійної стійкості, високою біологічною сумісністю і низьким модулем пружності, зумовлюють

ефективність використання нікеліду титану в якості медичних імплантатів (для ортопедії, травматології, судинної хірургії, стоматології), термочутливих датчиків, з'єднувальних елементів і різноманітних термомеханічних пристроїв та ін.

ЕПФ – це властивість матеріалу відновлювати вихідну форму при нагріванні після значного непружного деформування (в мартенситному стані чи в інтервалі температур мартенситного перетворення). В процесі проявлення ЕПФ приймають участь мартенситні перетворення двох типів – пряме та зворотне (рис.1.3). Відповідно, кожне з них здійснюється в своєму температурному інтервалі: M_H та M_K – початок та кінець прямого мартенситного перетворення при деформації; A_H та A_K – початок та кінець зворотного мартенситного перетворення при нагріванні (рис. 1.3).

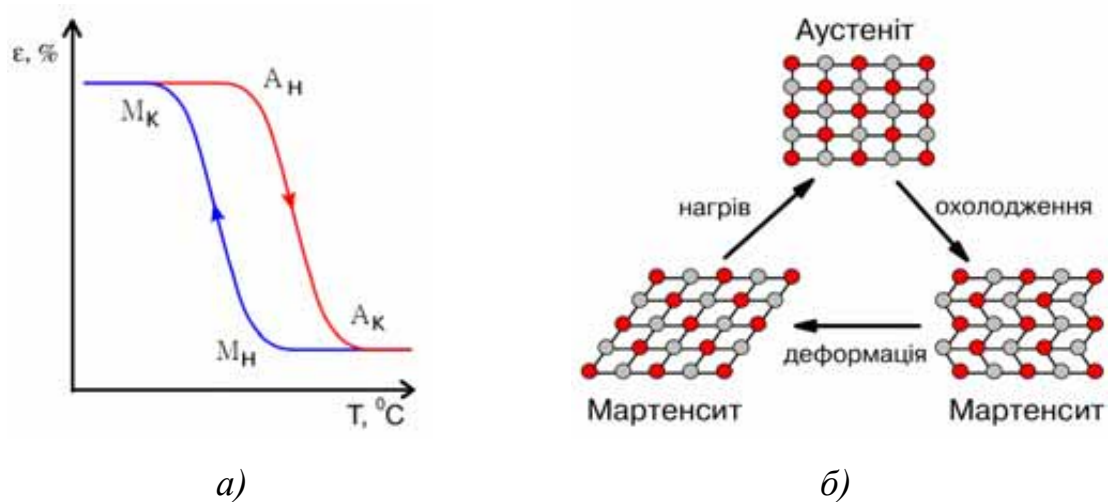


Рисунок 1.3 – Тепловий гістерезис фазових перетворень (а) і зміна кристалічної структури нікеліду титану в процесі охолодження і нагріву (б)

Температури мартенситних перетворень сильно залежать від співвідношення компонентів сплаву. Навіть невелика зміна хімічного складу сплаву значно впливає на ці температури [89]. Наприклад, збільшення на 0,5 % наявності в сплаві нікелю (з 50 до 50,5 %) призводить до зменшення температури мартенситного перетворення (M_H) аж на 35°C . В свою чергу, для більшості виробів з нікеліду титану, температури відновлення форми

повинні дотримуватися з точністю до $\pm 10^0\text{C}$, а в деяких випадках, наприклад, для термочутливих датчиків і виробів медичного призначення – до $\pm 1^0\text{C}$ [90]. Через це, до сплавів на основі TiNi пред'являються високі вимоги до точності хімічного складу (відхилення компонентів до 0,2...0,3 %), що обумовлює необхідність застосування складного багатоступеневого технологічного процесу для їх отримання. При цьому, метал піддають повному тестуванню і відбирають тільки невелику частину від партії з необхідними характеристиками (до 50 % іде у брак), що, як наслідок, позначається на його ціні (понад 800 \$ за кг) [90].

Сьогодні, для виробництва сплавів на основі нікеліду титану, використовують переважно методи вакуумно-дугового переплаву з витратними і невитратними електродами [90-91], або індукційної плавки в холодному тиглі [92-93]. Для підвищення гомогенності металу застосовують багаторазовий переплав (в деяких випадках 3-х чі 4-х кратний). Ведуться дослідження з отримання зливків нікеліду титану способом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю [94].

Проблему надійного відтворення характеристик металу вирішують шляхом підвищення вимог до якості шихтових компонентів, строгою регламентацією технологічних параметрів переплаву металу та оптимізацією режимів термомеханічної обробки сплавів в твердому стані. Але зазначені заходи не завжди гарантують необхідні характеристики однорідності і бездефектності металу. Очевидно, що для гарантованого відтворення заданих характеристик нікеліду титану необхідне використання додаткових засобів впливу на однорідність металу, ще на стадії виплавки зливків.

Прецизійні сплави.

Відповідно з ДСТУ 10994-74 до прецизійних сплавів відносяться високолеговані сплави зі суворо заданими фізичними і фізико-механічними властивостями, зумовленими точністю хімічного складу, мінімальною кількістю домішок, ретельністю їх виплавки і подальшої обробки [95-97].

Завдяки цьому прецизійні сплави володіють аномаліями магнітних, теплових, електричних, пружних або інших властивостей.

За фізичними властивостями та специфікою застосування прецизійні сплави поділяються на 7 груп: магнітом'які сплави, магнітотверді сплави, сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, сплави з високими пружними властивостями, надпровідні сплави, сплави із високим електричним опором, термобіметали.

Сьогодні існує понад 200 марок прецизійних сплавів, які відрізняються за хімічним складом, способами виплавки та методами оптимізації заданих фізичних властивостей (табл. 1.3) [97]. Серед них, велику групу представляють сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР). Їх використовують у метрології, радіоелектронній та криогенній техніці, для виготовлення вимірювального інструменту, електровакуумних та напівпровідникових приладів, газових лазерів, терморегуляторів тощо.

Більшість сплавів такого типу складають сплави на залізонікелевій основі. Таке становище визначається наявністю в системі Fe-Ni області, в якій сплави мають різко виражену аномалію теплового розширення [97-98].

Для вакуумнощільних з'єднань зі склом та керамікою застосовують сплави на основі системи Fe-Ni-Co. З них найбільш типовим і поширеним є сплав 29НК (ковар), ТКЛР якого ($4...12 \times 10^{-6}$ град⁻¹), близький до ТКЛР скла та кераміки. Його використовують для виготовлення чисельних електровакуумних і напівпровідникових приладів, де необхідні герметичні спаї зі склом. Сплав виплавляють переважно в дугових електропечах з ретельним контролем хімічного складу сплаву.

Таблиця 1.3 – Хімічний склад деяких прецизійних сплавів [97]

Марки сплавів	Хімічний склад, %											
	Вуглець	Кремній	Марганець	Сірка	Фосфор	Хром	Нікель	Молібден	Кобальт	Мідь	Залізо	Інші елементи
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Сплави з високою магнітною проникливістю (магнітно - м'які)												
34НKM	Не більше	0,15-0,30	0,3-0,6	Не більше		-	33,5-35,0	2,8-3,2	28,5-30,0	-	Решта	-
	0,03			0,02	0,02							
40Н	0,05	0,15-0,30	0,3-0,6	0,02	0,02	-	39,0-41,0	-	-	Не більше 0,2	Решта	-
46Н	0,05	Не більше 0,30	Не більше 0,4	0,02	0,02	-	45,5-46,5	-	-	Не більше 0,2	Решта	-
50Н	0,03	0,15-0,30	0,3-0,6	0,02	0,02	-	49,0-50,5	-	-	Не більше 0,2	Решта	-
49КФ	0,05	Не більше 0,30	Не більше 0,30	0,02	0,02	-	Не більше 0,50	-	48-50	-	Решта	Ванадій 1,3-1,8
Магнітно - тверді												
52К10Ф	Не більше			Не більше				-	52,0-54,0	-	Решта	Ванадій 9,8-11,2
	0,12	0,50	0,5	0,02	0,025	0,5	0,7					
52К13Ф	0,12	0,50	0,5	0,02	0,025	0,5	0,7	-	52,0-54,0	-	Решта	Ванадій 12,6-13,5
35КХ6Ф	0,08	0,30	0,4	0,02	0,02	7,5-2,5	-	-	34,3-35,8	-	Решта	Ванадій 5,5-6,5
Сплави із заданими температурами коефіцієнтами лінійного розширення												
29НК	Не більше			Не більше			28,5-29,5	-	17,0-18,0	Не більше 0,2	Решта	Алюміній не більше 0,2
	0,03	0,3	0,4	0,015	0,015	0,1						
36Н	0,05	0,3	0,3-0,6	0,015	0,015	0,15	35,0-37,0	-	-	0,1	Решта	Алюміній не більше 0,1
36НХ	0,05	0,3	0,3-0,6	0,015	0,015	0,4-0,5	35,0-37,0	-	-	0,25	Решта	-

Іншою групою прецизійних сплавів, які широко використовуються у промисловості, є магнітно-м'які сплави типу пермалой, пермендіур (46Н, 50Н, 49КФ та ін), що мають високу магнітну проникність і високу індукцію насичення. Їх використовують для виготовлення сердечників малогабаритних силових трансформаторів та трансформаторів звукових частот, дроселів, реле та деталей магнітних ланцюгів, електромагнітних екранів та різних магнітопроводів.

Незважаючи на різний хімічний склад і застосування зазначених вище прецизійних сплавів особливості їх металургійного виробництва багато в чому схожі. Процеси виплавки та подальшої термодформаційної обробки сплавів повинні забезпечувати їх точний хімічний склад, гомогенність, чистоту від шкідливих домішок та включень, заданий структурний стан.

Слід зазначити, що сьогодні в Україні немає промислового виробництва сплавів даного типу. Тому розробка ефективних способів їх отримання з вихідної сировини або переробки відходів прецизійних сплавів є актуальним завданням, яке має практичне значення для промисловості України.

Хром.

Металевий хром широко використовують в металургії, як легуючий компонент при виробництві нержавіючих, жаростійких, інструментальних та ін. сталей [99-102].

Нелегований хром (ВХ-1), низьколеговані і високолеговані пластичні сплави хрому (ВХ-2, ВХ-2И, ВХ-4А та ін.) використовують як конструкційний матеріал для виготовлення деталей, що працюють в агресивних середовищах за температур до 1300 °С (деталі термічного обладнання, труби, чохла, жаротривкі піддони, кокілі для лиття, деталі двигунів, внутрішні канали установок для нафтопереробної промисловості та ін.). Хром і сплави хрому використовують для нанесення покриттів на поверхні деталей, які експлуатують при високих температурах в агресивному середовищі. Хром також входить в склад сплавів з високим електроопором

(ніхром), сплавів для термопар (хромель) та нікелевих жароміцних сплавів для деталей газотурбінних двигунів.

В усіх випадках до хрому висуваються високі вимоги щодо вмісту домішок. Наприклад, концентрація багатьох елементів в хромі марки Х99Н1 обмежується на рівні 0,005...0,01 % мас (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Хімічний склад хрому [103]

Марки (ДСТУ)	Масова доля, %							
	Cr	Si	Al	Fe	C	S	P	Cu
	не менше	не більше						
X99Н1	99,0	0,2	0,5	0,5	0,01	0,02	0,005	0,005
X99Н2	99,0	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,01	0,008
X99Н4	99,0	0,2	0,2	0,5	0,03	0,02	0,02	0,01
X99Н5	99,0	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	0,01
X99	99,0	0,2	0,5	0,5	0,03	0,02	0,02	0,02
X98,5	98,5	0,4	0,7	0,6	0,03	0,02	0,02	0,02
(продовження)								
Марки (ДСТУ)	Масова доля, %							
	As	Bi	Sb	Zn	Pb	Sn	Co	N
	не більше							
X99Н1	0,01	0,0004	0,002	0,005	0,0005	0,004	–	0,01
X99Н2	0,01	0,0005	0,006	0,006	0,0008	0,004	0,005	0,02
X99Н4	0,01	0,0005	0,008	0,006	0,0008	0,004	0,005	0,04
X99Н5	0,01	0,0005	0,008	0,006	0,0008	0,004	–	0,05
X99	0,01	0,0005	0,008	0,01	0,001	0,004	–	–
X98,5	0,01	0,0005	0,008	0,01	0,001	0,004	–	–

Хром металургійного призначення (для легування) отримують переважно алюмінотермічним методом (позапічним чи в електропечах).

Більш чистий, за наявності домішок, хром отримують електролітичним способом з наступним водневим рафінуванням ($[O] \leq 0,005\%$, $[N] \leq 0,007\%$, $[Al] \leq 0,006\%$, $[C] \leq 0,008\%$, $[S] \leq 0,002\%$). Цей метод малопродуктивний та енергоємний. При цьому отриманий за цією технологією метал має некомпактну форму (луски, пластини), що обмежує можливості його використання як конструкційного матеріалу.

Особливості металургійного переділу хрому пов'язані з його фізико-хімічними властивостями: високою температурою плавлення (1860 °C), високою пружністю пари (81,8 Па при 1700 °C), а також взаємодією в розплавленому стані з атмосферними газами і вуглецем. Це обмежує можливості переплаву хрому у відкритих печах та в умовах вакууму.

З огляду на це, ефективним методом металургійного переділу хрому може бути ЕШП в камерних печах в захисній інертній атмосфері [9, 104-107]. Його можна використовувати для виплавки зливків заданих розмірів і геометрії, при переплаві литих заготовок-електродів, отриманих алюмінотермічним методом, пресованих заготовок з кальційгідридного або електролітичного хрому, а також при переплаві відходів хрому.

1.2.2 Технологічні особливості і проблеми ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів

Усі розглянуті вище метали і сплави мають різні хімічний склад, призначення і галузі застосування. Проте, вони мають і спільні риси, що зумовлює схожі підходи до їх металургійного виробництва. Ці сплави вимагають точного дотримання заданого хімічного складу. Вони дуже чутливі до хімічної та структурної неоднорідності, наявності домішок і різних дефектів, вимагають певної форми, дисперсності та розподілу структурних фаз. Спільною рисою згаданих сплавів є наявність в їх складі високореакційних елементів, які при нагріванні активно реагують з атмосферними газами, що потребує вживання спеціальних заходів при їх виплавці.

Як вже відмічалось вище, сьогодні такі сплави виплавляють переважно способами спеціальної металургії: індукційною плавкою у відкритих печах або у вакуумі, ВДП, електронно-променевою плавкою (ЕПП), плазмово-дуговим переплавом (ПДП), ЕШП та комбінацією цих методів [9, 73-79, 89-94, 96, 99-100, 104-111]. Порівняльні характеристики цих способів плавки надані в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльна оцінка різних процесів спеціальної металургії * [73-75, 77, 96, 116-118, 120, 250, 259]

Процес	Джерело нагріву	Витрата електроенергії, квт·ч/кг	Продуктивність, т/год	Тиск в робочій зоні, Па	Середовище в робочій зоні	Матеріал тигля	Взаємодія з матеріалом тигля	Шихта	Можливість додавання легуючих	Ефект випаровування	Можливість рафінування шлаком	Видалення газів	Вартість обладнання
Ш	Струм високої частоти	0,6–0,8	0,6–1,0	10^2	повітря	суміші Al_2O_3 , MgO , ZrO_2	є взаємодія	некомпактні шихтові матеріали	є в любий період плавки	практично нема	є і використовується	не спостерігається	невисока
ВП	Струм високої частоти	1,0–2,2	0,6–1,0	$\sim 10^{-1}$	вакуум, аргон	секційний водоохолоджуваний кр-р	нема	некомпактні шихтові матеріали	обмежена	є	обмежена	є	висока
ВДП	Електрична дуга	0,8–1,4	до 1,5	$\sim 10^{-1}$	вакуум	мідний водоохолоджуваний кр-р	нема	витратний електрод (литий, набірний, пресований)	нема	є, більш інтенсивний ніж при ВП	нема	є	висока
ЕШП	Джоулеве тепло	1,2–1,8	0,8–1,2	10^2	аргон (можливо He, N, вакуум)	мідний водоохолоджуваний кр-р	нема	витратний електрод (литий, набірний, пресований)	є	не спостерігається	є основою процесу	незначне	невисока
ЕПП	Електроплавний промінь	1,8–2,5	0,3–0,7	$< 10^{-2}$	вакуум	мідний водоохолоджуваний кр-р	нема	некомпактні шихтові матеріали	обмежена	значний	нема	помітне	висока
ПДП	Плазмова дуга	1,5–2,0	0,3–0,7	10^2	аргон (суміші Ar, He, N, H)	мідний водоохолоджуваний кр-р	нема	витратний електрод (литий, набірний, пресований)	є	є незначний	є	є (окрім N)	висока
ПДГП	Плазмова дуга	0,9–1,2	0,4–0,8	$\sim 10^2$	аргон (суміші Ar, He, N, H)	плавлення відбувається в гарнісажі	нема	некомпактні шихтові матеріали	є	є незначний	є	є (окрім N)	висока

* для злиwkів масою 1-2 т.

Для досягнення заданих характеристик металу суворо регламентують вимоги до якості вихідних шихтових компонентів, технологічних параметрів переплаву, режимів подальшої термомеханічної і термічної обробки литого металу. Для підвищення однорідності металу використовують багаторазовий переплав (до 4-х разів), що помітно відображується на вартості готової продукції.

Зазначені вище заходи в тій чи іншій мірі дозволяють отримувати високореакційні і прецизійні сплави, метал яких відповідає технічним умовам його експлуатації. Проте, проблема забезпечення необхідних характеристик однорідності і бездефектності металу, його структурного стану, при зниженні собівартості виробництва, залишається однією з пріоритетних в сучасній металургії.

Аналіз металургійних і технологічних особливостей процесу ЕШП і його порівняння з іншими технологіями (табл. 1.5) свідчить про перспективність його застосування для виплавки високореакційних і прецизійних металів і сплавів. Це зумовлено низкою факторів, серед яких слід виділити наступні:

- послідовна, спрямована кристалізація сприяє формуванню щільної структури металу зливків, без усадкової раковини і пористості;
- відсутність випаровування в процесі ЕШП легуючих компонентів з високою пружністю пари (Mn, Al, Cr, B та ін.), що створює передумови для точного "потрапляння" в заданий склад сплаву;
- можливість ведення процесу в різній атмосфері (Ar, He, N) і при різному тиску (розріджений, надлишковий);
- можливість коригування складу металу шляхом застосування відповідного флюсу;
- наявність шлакового гарнісажу між зливком і стінкою кристалізатора зводить до мінімуму контакт рідкого металу з матеріалом формуючого пристрою;

- розосереджене, відносно низькотемпературне джерело тепловиділення, яким є шлакова ванна, сприяє рівномірному обігріву рідкого металу без значного його перегріву;
- порівняно невисока вартість технологічного обладнання.

Слід підкреслити, що наведені особливості і переваги процесу ЕШП є певною мірою наслідком великої кількості ступенів свободи, властивих цьому процесу. Це широкий діапазон електричних режимів, що забезпечують стаке протікання електрошлакового процесу і відповідний їм широкий діапазон допустимих швидкостей плавлення, можливість застосування в процесі ЕШП різних флюсових композицій, захисних атмосфер та зовнішніх фізичних впливів. При цьому, з ускладненням вимог до сучасних сплавів, наявність ступенів свободи, характерних для електрошлакового процесу, набуває все більшого значення.

Проте, виробництво вказаних сплавів електрошлаковим способом висуває додаткові вимоги до процесу їх виплавки. Ці вимоги стосуються якості шихтових матеріалів, підготовки витратних електродів, технологічних схем і параметрів переплаву металу, флюсових композицій і обладнання, що використовується тощо.

Перш за все, це стосується організації газового захисту рідкого металу і розігрітого до високих температур витратного електроду. Очевидно, що переплав високореакційних металів і сплавів має здійснюватися в камерних печах. Проте, питання необхідності попереднього вакуумування плавильного простору, режимів газового захисту, надлишкового тиску інертного середовища або рівню вакууму потребують подальших досліджень.

Високі вимоги до хімічного складу і наявності домішок в сплавах, що розглядаються, виключають можливість застосування при їх плавці невитратних графітованих електродів, графітових тиглів і футерованих ємностей. З огляду на це, найбільш технологічною схемою виплавки таких

сплавів є традиційна схема ЕШП витратних електродів в мідному, водоохолоджуваному кристалізаторі.

Найбільш важливим завданням є дослідження процесів плавлення і структуроутворення високореакційних і прецизійних сплавів при ЕШП та розробка методів керування цими процесами. Як зазначалося вище, структурний фактор – це той потенціал підвищення експлуатаційних властивостей сплавів, який ще не використаний в повній мірі. Виходячи з цього ЕШП, з його ступенями свободи і можливостями застосування методів зовнішнього фізичного впливу, є досить перспективним процесом. Нижче будуть розглянуті методи впливу на структуроутворення зливок ЕШП.

1.3 Керування структуроутворенням металу зливок ЕШП

Електрошлаковий переплав – це складний багатофакторний процес, в якому поєднані різні явища: теплові, електромагнітні, гідродинамічні, хімічні; процеси перенесення тепла і маси, формування макро- і мікроструктури та інші. Відповідно, залежності між технологічними параметрами процесу, з одного боку, структурою зливка і його хімічним складом, з другого, теж мають складний, багатофакторний характер.

Утворення в металі зливок ЕШП різного роду неоднорідностей і дефектів слід розглядати у взаємозв'язку з умовами формування його структури при кристалізації [1, 112-115]. В свою чергу, формування структури металу зливка ЕШП визначається наступними чинниками:

- швидкістю переплаву і кристалізації;
- інтенсивністю охолодження рідкої металевої ванни і температурним градієнтом на фронті твердіння;
- утворенням перед фронтом твердіння двофазної зони, ширина якої визначається хімічним складом і властивостями сплаву;
- структурою і інтенсивністю гідродинамічних течій у рідкометалевій ванні і двофазній зоні;

- характером введення тепла в металеву ванну з краплями рідкого металу.

Наведені вище чинники визначають глибину і форму рідкометалевої ванни, які вирішальними чином впливають на умови структуроутворення металу зливка. Це пов'язане з тим, що напрямок зростання стовбчастих кристалів співпадає з напрямком температурного градієнту на фронті кристалізації, тобто головні осі дендритів перпендикулярні дну металевий ванни. Більш детально ці процеси будуть розглянуті в другому розділі.

Керувати глибиною металевий ванни, а, відповідно, і характером структуроутворення металу ЕШП, можна традиційними засобами (змінюючи технологічних параметрів процесу), а також – використовуючи різноманітні технологічні прийоми та методи зовнішнього фізичного впливу.

1.3.1 Вплив технологічних параметрів ЕШП на глибину металевий ванни

Закономірності впливу основних параметрів ЕШП (швидкість переплаву, глибина шлакової ванни, коефіцієнт заповнення кристалізатора, електрична напруга і сила струму плавки та ін.) на форму металевий ванни висвітлені в роботах [1, 116-119]. Показано, що основні механізми впливу параметрів ЕШП на форму металевий ванни полягають в зміні температурного поля шлакової ванни, зумовленого Джоулевим тепловиділенням, перерозподілом ліній проходження електричного струму в ній, а також ступенем перегріву електродних крапель і характером їх надходження до металевий ванни.

Найбільший вплив на глибину ванни чинить швидкість переплаву. Залежність глибини ванни від швидкості переплаву, в діапазоні припустимих його значень, має близький до лінійного характер, що дозволяє в широких межах змінювати глибину металевий ванни традиційними засобами (рис. 1.4, надані фото власних досліджень).

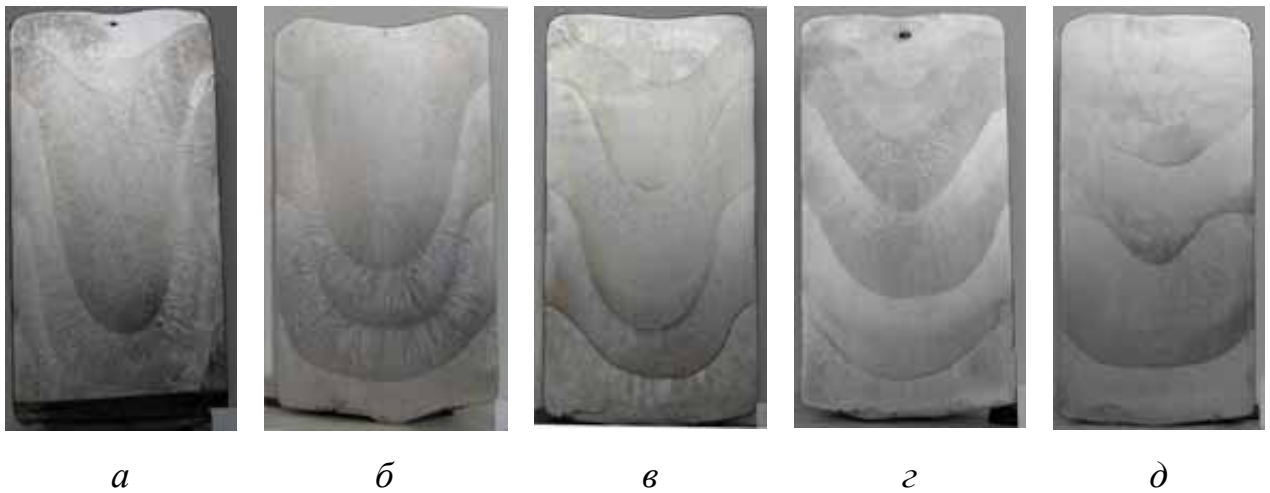


Рисунок 1.4 – Форма металевої ванни при ЕШП титанових зливків діаметром 105 мм, з різними швидкостями переплаву витратного електроду діаметром 75 мм, кг/хв: *а* – 1,25; *б* – 0,84; *в* – 0,75; *г* – 0,72; *д* – 0,67. (*а, б, в, г* – глибина шлакової ванни 30 мм; *д* – 55 мм)

Нижче розглянуто вплив інших технологічних параметрів ЕШП на глибину металевої ванни.

Збільшення струму плавки (внаслідок збільшення швидкості подачі електроду), при рівних інших умовах, веде до пропорційного збільшення глибини металевої ванни [117, 118]. Головним чином це пов'язане з переміщенням зони тепловиділення у шлаковій ванні ближче до поверхні металевої ванни, внаслідок зменшення міжелектродного проміжку і відповідного збільшення щільності струму в цій зоні. Напрямок зростання кристалів при збільшенні струму плавки змінюється від осьового (поздовжнього) до радіального.

Збільшення електричної напруги на шлаковій ванні, при інших рівних умовах, навпаки призводить до зменшення глибини металевої ванни. Це пов'язане з переміщенням зони плавлення витратного електроду у верхні шари шлакової ванни, збільшенням доли струму, що тече по ланцюгу кристалізатора і розосередженням зони тепловиділення у шлаковій ванні.

Аналогічний результат зменшення глибини металевої ванни спостерігається при збільшенні глибини шлакової ванни, при незмінних

електричних режимах переплаву [117, 118]. Це пов'язане зі зменшенням потужності, яку вводять на одиницю обсягу шлаку, і відповідним зменшенням швидкості плавлення, а також з перерозподілом щільності струму у шлаковій ванні і збільшенням долі струму кристалізатора. У випадку незмінної швидкості плавлення електроду глибина металевої ванни мало залежить від глибини шлакової ванни [116, 120].

Форма і об'єм металевої ванни залежать також від коефіцієнта заповнення кристалізатора (співвідношення діаметрів електроду і кристалізатора). При незмінній швидкості плавлення збільшення діаметру електроду призводить до зменшення глибини металевої ванни. Це пов'язане зі збільшенням долі струму кристалізатора, збільшенням міжелектродного проміжку і розосередженням тепловиділення в шлаковій ванні [118].

В роботах [121, 122] показано, що на глибину металевої ванни впливає вид струму (змінний, постійний) і його полярність. Відзначається, що металева ванна має набагато більшу глибину при переплаві на постійному струмі прямої полярності, ніж при зворотній полярності, навіть при дещо більшій потужності. У порівнянні з переплавом на змінному струмі при зворотній полярності утворюється металева ванна такої ж глибини [121], або дещо меншої [122].

В роботі [42] показано, що на форму металевої ванни впливає частота струму плавки, причому цей вплив має складний, нелінійний характер (рис.1.5). Для досліджуваних частот струму плавки (0,01; 1; 2,5; 5; 60 Гц) мінімальна глибина металевої ванни була при 0,01 Гц а максимальна – при 5 Гц. Зміну глибини і форми металевої ванни пов'язують зі зміною структури і інтенсивності гідродинамічних течій розплаву, внаслідок перерозподілу щільності струму у ванні, а відповідно і електромагнітної сили (сили Лоренца), яка діє на рідкий метал.

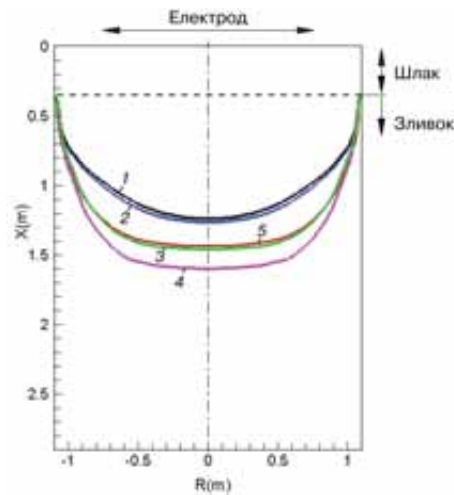


Рисунок 1.5 – Розрахункові профілі металеві ванни (50% твердої фази) при різних значеннях частоти струму переплаву, Гц [42]: 1 – 0,01; 2 – 1; 3 – 2,5; 4 – 5; 5 – 60

Крім зазначених вище факторів суттєвий вплив на глибину і форму металеві ванни має хімічний склад металу і, відповідно, його фізичні властивості. Чим вище теплопровідність металу, тим менше глибина металеві ванни і більш плоский фронт кристалізації. Це дозволяє, наприклад, при ЕШП міді на традиційних режимах мати неглибоку металеву ванну з практично осьовою орієнтацією кристалів (рис. 1.6, власні данні).

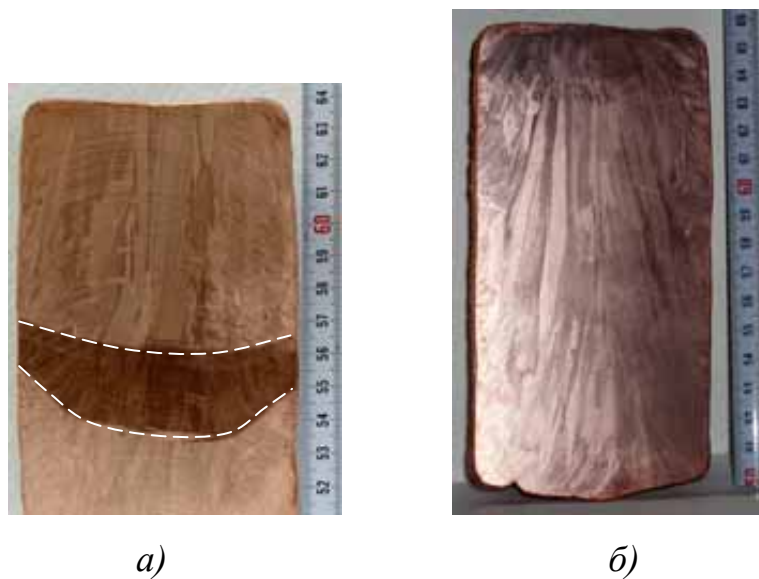


Рисунок 1.6 – Форма металеві ванни (а) і макроструктура зливка (б) при ЕШП міді: $U=35$ В, $I=2200$ А, $V_{пл}=1,2$ кг/хв

Наведені вище дані показують, що в залежності від схеми та режимів процесу ЕШП можна в широких межах змінювати глибину та форму рідкої металевої ванни. При цьому, змінюється температурний градієнт в розплаві, довжина двофазної області, напрямок росту кристалітів, і як наслідок – характер структуроутворення металу зливка.

Проте, тісний зв'язок, який існує при класичній схемі ЕШП між плавленням витратного електроду і кристалізацією металу зливка, не завжди дозволяє досягти бажаної структури металу зливка, без дефектів ліквацийного походження, при збереженні стабільності електрошлакового процесу і якості формування бічної поверхні зливка. Так, зменшення швидкості переплаву призводить до зменшення глибини металевої ванни і покращення "внутрішніх" характеристик металу, але водночас – до погіршення формування бічної поверхні зливка з утворенням грубих поверхневих дефектів (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Залежності якості поверхні зливку і його внутрішніх властивостей від швидкості переплаву при ЕШП

1.3.2 Способи впливу на кристалізацію злиwkів ЕШП

Як було вже показано, зміною лише параметрів процесу ЕШП не завжди можна створити бажані умови кристалізації металу. В зв'язку з цим, подальший розвиток електрошлакових технологій був спрямований на розробку різноманітних технологічних прийомів і способів управління процесом первинної кристалізації злиwkів [123].

Серед них можна виділити наступні (рис. 1.8):

- введення в ванну частинок-модифікаторів, мікро- і макрохолодильників (інокуляторів) [1, 112, 124-131];
- створення у ванні пружних коливань та різних механічних і ультразвукових коливань вібрацій [1, 112, 132-136];
- обертання витратного електроду [122, 137];
- продування шлакової і металеві ванн газами [138-141];
- способи ЕШП із застосуванням струмопідвідного кристалізатора (ЕШП за двоконтурною схемою, ЕШП з рідким металом, ЕШП некомпактних матеріалів) [23-27];
- застосування різних схем електричного живлення: біфілярна, трьохфазна, живлення струмом пониженої частоти, імпульсне електроживлення [142-145];
- вплив на ванну зовнішніми магнітними полями [43, 146-152].



Рисунок 1.8 – Способи впливу на кристалізацію зливків ЕШП

Зазначені вище способи впливу на кристалізацію зливків ЕШП докладно описані в нашому огляді [123]. Тому, нижче будуть розглянути лише деякі з них.

Способи впливу на кристалізацію зливка, пов'язані з введенням в ванну різного роду модифікаторів або інокуляторів, призводять до зміни хімічного складу металу. Тому їх не можна розглядати при виплавці більшості складнолегованих і прецизійних сплавів, хімічний склад яких суворо регламентований. В цих умовах ефективним є застосування методів, заснованих на фізичних впливах на структуроутворення металу зливків, які не призводять до зміни хімічного складу металу.

Важливим чинником, що впливає на формування металеві ванни і умови кристалізації металу зливка, є місце потрапляння крапель електродного металу у ванну. У роботах [122, 137] показано, що змінити характер утворення крапель на торці електроду і траєкторії їх руху у шлаковій ванні можна за допомогою обертання витратного електроду в процесі переплаву (рис. 1.9 *а, б*). Відцентрові сили, що виникають при обертанні електроду, зумовлюють периферійний відрив крапель металу від його торця, які потім рухаються по різним траєкторіям. При цьому, шлях, який вони проходять, довше, ніж при перепаві без обертання електроду. Розосереджуючи місце доставки електродного металу на дзеркало рідкого металу вдається підтримувати плоску форму металеві ванни, що дозволяє отримати більш виражену осьову направленість зростання кристалів [137]. Наголошується, що при правильно обраній швидкості обертання електроду збільшується продуктивність переплаву і зменшуються витрати електроенергії. Показано, що для електродів діаметром 40...250 мм оптимальні значення швидкості обертання становлять 30...90 об/хв [122, 137].

До недоліків даного методу слід віднести необхідність створення додаткового механізму обертання електроду із застосуванням ковзких струмопідводів розрахованих на десятки кілоампер, що ускладнює конструкцію установки. Крім того, при неправильно підібраних режимах

обертання електроду горизонтальні обертання розплавів шлаку і металу (викликані обертанням електроду) можуть призводити і до негативних ефектів – сприяти збільшенню глибини металевої ванни і небажаній зміні її форми. Сьогодні немає відомостей про промислове застосування даного методу впливу на електрошлаковий процес.

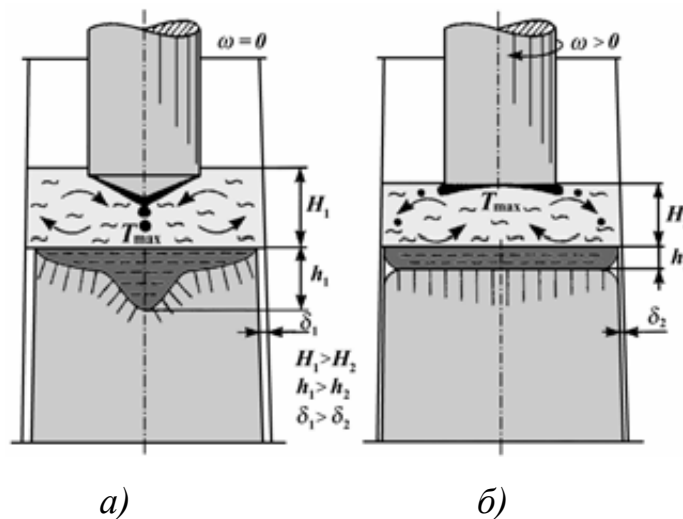


Рисунок 1.9 – Схеми плавлення електроду і формування металевої ванни при традиційному ЕШП (а) і ЕШП з обертанням витратного електроду (б) [137]: ω – швидкість обертання електроду; T_{max} – центр зони з максимальною температурою шлаку; H – висота шлакової ванни; h – висота металевої ванни; δ – товщина шлакового гарнісажу

Як вже було зауважено вище, при класичній схемі ЕШП існує прямий зв'язок між потужністю, що вводиться в шлакову ванну, і швидкістю переплаву. Це не завжди дозволяє досягти бажаної форми металевої ванни і структури металу зливка, без погіршення якості формування його поверхні. Причина в тому, що нема можливості знизити в достатній мірі швидкість переплаву і підтримувати, при цьому, необхідну температуру шлакової ванни, в першу чергу біля стінки кристалізатора.

Для того, щоб подолати залежність між швидкістю плавлення і температурою шлаку, в ІЕЗ ім. Е.О. Патона [27, 153-154] і пізніше компанією

INTECO [155-159] були запропоновані методи ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі. Ці методи засновані на однаковій концепції, яка дозволяє здійснювати введення певного рівня потужності в шлакову ванну, незалежно від потужності, що вводиться через витратний електрод. Відрізняються вони переважно конструкцією кристалізатора.

Зазвичай, струмопідвідний кристалізатор складається з формуючої, проміжної і струмопідвідної секцій, які електрично ізольовані одна від одної (рис. 1.10). Така конструкція дозволяє незалежно регулювати потужність, що вводиться по ланцюгам "струмопідвідна секція - зливоч" і "витратний електрод - зливоч", використовуючи різноманітні схеми електричного живлення із застосуванням одного або декількох джерел [160-163]. В свою чергу, це дає можливість змінювати в широких межах лінійну швидкість плавки і мати неглибоку металеву ванну, з плоским дном, при формуванні поверхні зливка без дефектів [23]. Слід підкреслити, що використання струмопідвідного кристалізатора дозволяє також створити примусове обертання розплаву шлакової ванни, завдяки чому досягаються позитивні металургійні ефекти [17, 164].

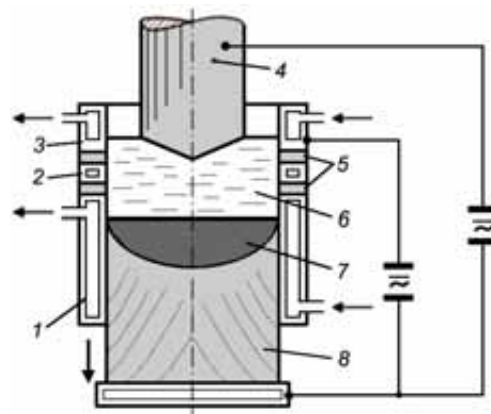


Рисунок 1.10 – Схема процесу ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі за двоконтурною схемою: 1, 2, 3 – формуюча, проміжна і струмопідвідна секції кристалізатора; 4 – витратний електрод; 5 – ізолятори; 6 – шлакова ванна; 7 – металевая ванна; 8 – зливоч

Використання струмопідвідного кристалізатора дає можливість реалізовувати різні схеми ЕШП з рідким металом, такі як електрошлакове укрупнення зливків (рис. 1.11 *а*) [30, 165-167], електрошлакове наплавлення прокатних валків (рис. 1.11 *б*) [168-173], виплавка композитних зливків (рис. 1.11 *в*) [175]. В цих умовах суттєво зменшується об'єм рідкого металу, який одночасно кристалізується, що, в свою чергу, стримує розвиток ліквідаційних процесів і покращує умови структуроутворення металу.

Недоліком процесів ЕШП з рідким металом є необхідність застосування окремого плавильного агрегату для розплавлення і підтримки металу в рідкому стані, а також пристрою для його дозованої подачі в кристалізатор. В разі виплавки високореакційних металів і сплавів це стає суттєвою проблемою, через необхідність організації газового захисту усього металургійного комплексу: плавильний агрегат, устрій дозованої подачі рідкого металу, кристалізатор.

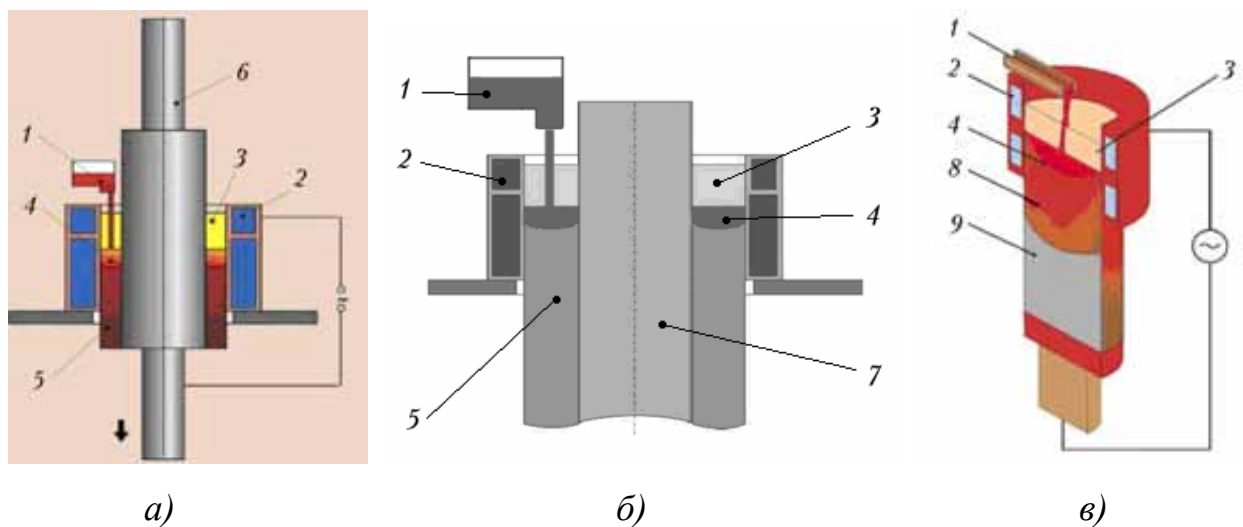


Рисунок 1.11 – Схеми процесів ЕШП з рідким металом для виробництва прокатних валків (*а*) укрупнення зливків послідовним кільцевим наплавленням (*б*) та виплавки композитних зливків (*в*) [30, 175]: 1 – пристрій для подачі рідкого металу в кристалізатор; 2 – струмопідвідний кристалізатор; 3 – шлакова ванна; 4 – металева ванна; 5 – наплавлений шар металу; 6 – валок, що наплавляється; 7 – центральний зливков; 8, 9 – композитний зливков хімічного складу А та Б, відповідно

Аналогічний ефект подолання жорсткої залежності між швидкістю плавлення і температурою шлаку може бути досягнутий за рахунок використання невитратних електродів. Вони можуть бути різної конструкції [176-180]. Варіант такого невитратного електроду, який вводять в шлакову ванну коаксіально витратному електроду, надано на рис. 1.12. Застосування невитратних електродів дає можливість перерозподіляти тепловий баланс в шлаковій ванні і регулювати її температуру, незалежно від швидкості плавлення електродного металу.

До недоліків схем ЕШП з використанням невитратних електродів слід віднести недостатню їх стійкість і, відповідно, можливість забруднення металу матеріалом невитратного електроду.

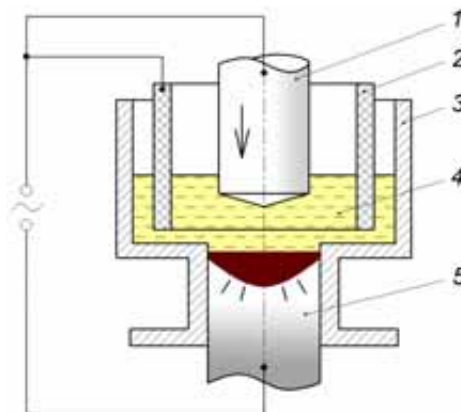


Рисунок 1.12 – Схема ЕШП з використанням додаткового невитратного електроду [177]: 1 – витратний електрод; 2 – невитратний електрод; 3 – кристалізатор; 4 – шлакова ванна; 5 – зливоч

Ще одним із способів впливу на процеси плавлення і кристалізації металу ЕШП є застосування нестационарних режимів живлення електрошлакового процесу електричною енергією [142-145]. На перспективність використання даного методу вказувалося досить давно [142]. Однак, апаратура для імпульсного керування високими струмами (десятки кілоампер) тоді була дуже складною, ненадійною і дорогою. Це

суттєво обмежувало можливості практичного використання даного методу для впливу на ЕШП. Сьогодні, з появою потужних силових напівпровідникових приладів, перш за все потужних силових тиристорів і сучасних мікропроцесорних систем, можливості імпульсного регулювання потужності для управління електрошлаковим процесом помітно розширились. Перспективність цих методів полягає в тому, що вони не потребують переробки електрошлакового обладнання і застосування додаткових, громіздких пристроїв. Вони можуть бути реалізовані за допомогою досить компактних блоків, якими дооснащують стандартні пічні трансформатори.

Механізми впливу нестационарних режимів електричного живлення на процеси плавлення і кристалізації металу мають комплексний характер. Загалом, вони пов'язані з примусовою періодичною зміною теплового і гідродинамічного стану металеві ванни за допомогою нестационарного (імпульсного) живлення електрошлакового процесу електричною енергією. Це дає можливість впливати на умови кристалізації металу зливка, продуктивність ЕШП і його тепловий коефіцієнт корисної дії. Більш докладно ці методи впливу на електрошлаковий процес будуть розглянуті у розділах 3 і 4 цієї роботи.

Окремо можна виділити способи керування кристалізацією злиwkів ЕШП за допомогою зовнішніх фізичних впливів.

Перш за все це способи основані на створенні в ванні механічних вібрацій. Ці методи розглянуті в роботі [123]. Тому відзначимо лише основні їх особливості. Використовуються як низькочастотні коливання (0,5...100 Гц), так і ультразвукові коливання частотою 20 кГц і вище [1]. Для їх створення застосовують електрогідроімпульсні, електрогідролінійні, електромагнітні, пневматичні, магнітострикційні, механічні та ін. перетворювачі [136]. Коливання можуть бути введені у ванну через піддон, витратний електрод або кристалізатор.

При введенні коливань через піддон вони через зливочок передаються безпосередньо на фронт кристалізації металу збільшуючи ефективність його обробки. Однак слід враховувати, що із збільшенням у процесі переплаву висоти зливка змінюється резонансна частота системи, а самі коливання згасають.

При введенні коливань через витратний електрод з'являється можливість впливати також на процеси плавлення і краплеутворення електродного металу, підвищувати на 20-30% швидкість плавлення електроду, поліпшувати умови реагування краплі з шлаком і сприяти підвищенню ступеня рафінування металу [132].

Загалом, позитивний ефект від вібрації і викликаних нею пружних коливань полягає у збільшенні центрів кристалізації і формуванні металу зливка, з більш рівноосними зернами, рівномірним розподілом зміцнюючих фаз і суттєвим зменшенням розмірів мікрозерна.

Слід підкреслити, що застосування ультразвукових коливань при ЕШП може мати і негативні наслідки, які полягають у погіршенні формування поверхні зливків, зниженні ефективності очищення металу від неметалевих включень та утворенні дефектів у вигляді "полосчастості" структури по висоті зливку [1, 132].

До способів керування кристалізацією зливків ЕШП за допомогою зовнішніх фізичних впливів належать також способи, основані на застосуванні зовнішніх магнітних полів [43, 146-152]. Основна перевага їх використання полягає в можливості безконтактного силового впливу на розплави шлакової та металеві ванн. При цьому, електрошлаковий процес є досить сприятливим з точки зору електромагнітного керування. Це пов'язане, по перше, з тим, що ЕШП є досить інерційним процесом, який характеризується широким діапазоном стійких режимів протікання (через що, зовнішні електромагнітні впливи не призводять до порушення стабільності переплаву), а по друге, з тим, що при ЕШП крізь розплави шлаку і металу проходять високі робочі струми (десятки кілоампер). Ці струми можна

використовувати для електромагнітного керування. Тобто, при ЕШП, для електромагнітного керування нема необхідності використовувати складні електромагнітні пристрої індукційного типу, які основані на створенні в розплаві індуктованих електричних струмів (як в металургійних процесах, де через розплав не тече електричний струм) [181-185].

Фізичний механізм електромагнітного впливу на процес ЕШП полягає у зміні структури і інтенсивності гідродинамічних течій розплавів шлаку і металу за допомогою об'ємної сили F_e , яка утворюється в цих розплавах внаслідок взаємодії струму плавки I з зовнішнім (прикладеним) магнітним полем B . Величина і напрям цієї сили визначаються векторним добутком струму та індукції зовнішнього магнітного поля:

$$\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}.$$

Відповідно, змінюючи частотні і амплітудні характеристики зовнішнього магнітного поля (або струму плавки), можна змінювати напрямок і інтенсивність електровихрових течій розплавів шлаку і металу, або, наприклад, створювати вібрацію у ванні (якщо використовувати змінний струм плавки і постійне магнітне поле, або навпаки) [43-44].

Через вплив на гідродинамічну ситуацію в шлаковій і металевій ваннах, магнітні поля дозволяють впливати на основні металургійні процеси, які відбуваються при ЕШП: плавлення електродного металу, його крапельне перенесення в шлаковій ванні, процеси хімічної взаємодії металу та шлаку і кристалізацію зливка.

Основними завданнями електромагнітного впливу при ЕШП є підвищення хімічної однорідності металу зливка, гомогенізація і подрібнення його кристалічної структури. Досвід електромагнітного керування при ЕШП вказує, що в тій чи іншій мірі вдається вирішити ці завдання [9, 10, 123, 150-152, 186-188]. Проте, залишається і ряд важливих проблем:

- великі масогабаритні характеристики пристроїв для створення магнітних полів;

- необхідність додаткового джерела для живлення електромагнітної системи;
- додаткові витрати електроенергії для живлення електромагнітної системи;
- зменшення ефективності гомогенізації і подрібнення структури зливка, при збільшенні його діаметра;
- обмежені можливості щодо керування об'ємом рідкої металеві ванни;
- погіршення якості формування бічної поверхні зливка.

З огляду на це, актуальним завданням є дослідження можливостей інтенсифікації електромагнітного впливу на процес ЕШП. В цьому напрямку перспективним може бути застосування енергії електромагнітних розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії (конденсаторів). Конденсатори можна використовувати для живлення обмоток електромагнітної системи, що дозволить суттєво зменшити її масогабаритні показники, або – для безпосередньої дії на металургійну ванну (тут і далі по тексту під металургійною ванною при ЕШП мається на увазі сукупність шлакової та металеві ванн). В останньому випадку, взагалі, можна позбутися необхідності застосовувати громіздкі соленоїди. Більш детально ці процеси будуть розглянуті у розділі 5 цієї роботи.

Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз сучасного стану електрошлакових технологій виявив наступні тенденції їх застосування і розвитку: зміна номенклатури сплавів, що виплавляють в бік більш складнолегованих сплавів зі спеціальними властивостями, розширення типорозмірів зливків ЕШП, широке застосування печей для плавки в захисній атмосфері інертного газу, застосування систем автоматичного керування з контролем потужності, швидкості переплаву, маси електроду і глибини його занурення у шлак, застосування заходів для покращення техніко-економічних показників

процесу (коаксіальні струмопідводи, живлення змінним струмом пониженої частоти, заміна електродів в процесі переплаву).

2. Показано, що одним з основних завдань подальшого розвитку електрошлакових технологій є розробка нових технологічних схем переплаву і методів керування процесами плавлення і кристалізації металу, які визначають показники якості зливка: хімічну і структурну однорідність, відсутність дефектів ліквацийного походження, вміст домішок.

3. ЕШП з витратним електродом є гнучким технологічним процесом, який через зміну технологічних параметрів переплаву дозволяє в широких межах змінювати глибину та форму рідкої металевої ванни. Проте, зв'язок між плавленням витратного електроду і кристалізацією металу зливка обмежує ці можливості.

4. Розширити можливості керування процесами плавлення і кристалізації металу ЕШП можна шляхом застосування нестационарних режимів живлення електрошлакового процесу.

5. Зовнішні магнітні поля є ефективним інструментом безконтактної силової дії на розплави шлакової та металевої ванн при ЕШП, що дозволяє впливати на металургійні процеси: плавлення електродного металу, його крапельне перенесення в шлаковій ванні, хімічну взаємодію металу та шлаку і кристалізацію зливка.

6. ЕШП є перспективним процесом, з точки зору електромагнітного керування. Це пов'язане з широким діапазоном стійких режимів його протікання, а також з тим, що при ЕШП крізь розплави шлаку і металу проходять високі робочі струми (десятки кілоампер), які можна використовувати для впливу на гідродинамічні процеси в металургійній ванні.

7. Перспективним напрямком підвищення ефективності електромагнітного впливу на електрошлаковий процес є застосування розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії (конденсаторів), які

можна використовувати для живлення обмоток електромагнітної системи, або для безпосередньої дії на металургійну ванну.

8. Аналіз металургійних і технологічних особливостей процесу ЕШП свідчить про перспективність його застосування для виплавки високореакційних і прецизійних металів і сплавів на основі титану, нікелю, хрому та ін. Проте, виробництво цих сплавів електрошлаковим способом висуває додаткові вимоги до процесу їх виплавки, включаючи підготовку витратних електродів, організацію газового захисту, вибір технологічних схем і параметрів переплаву, керування структуроутворенням металу зливка тощо.

РОЗДІЛ 2

ПЛАВЛЕННЯ ВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДУ І ФОРМУВАННЯ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ ЗЛИВКІВ ЕШП

2.1 Плавлення витратного електроду і крапельне перенесення металу

Як відомо, характер плавлення витратного електроду при ЕШП суттєво впливає на якість металу виплавлених з нього зливок. Швидкість плавлення електроду, процеси хімічної взаємодії в пливці рідкого металу на його торці, особливості формування і відриву крапель електродного металу значною мірою визначають ступінь рафінування металу від шкідливих домішок і неметалевих включень та умови кристалізації зливка. Основні закономірності плавлення витратних електродів при ЕШП вивчені давно [1, 3, 116-118, 189]. Було показано, що при ЕШП є широкі можливості керування характером плавлення витратного електроду за рахунок зміни потужності і швидкості переплаву (рис.2.1). У фундаментальних роботах з металургії електрошлакового процесу зазначається, що оптимальними режимами ЕШП є режими, що забезпечують форму оплавленого торця електроду у вигляді правильного конусу [1, 3, 117-118]. Це досягається при відносно великій глибині занурення електроду в шлак, співрозмірній з його радіусом.

Такий підхід був пов'язаний, в першу чергу, з забезпеченням стабільності електрошлакового процесу а також з умовами захисту рідкого металу від взаємодії з атмосферними газами. При плавленні металу біля самої поверхні шлакової ванни умови захисту гірші, ніж при глибинному плавленні електроду. При цьому процес є менш стабільним і потребує більш ретельного дотримання заданих режимів переплаву.

Зараз, підхід до оптимальних режимів плавлення витратного електроду при ЕШП дещо змінився. Як було зазначено в першому розділі сучасні печі ЕШП передбачають захист плавильного простору інертним газом. Через це

питання окислення найбільш розігрітої частини витратного електроду, при його плавленні в верхніх шарах шлакової ванни, вже не є настільки актуальним, як раніше.

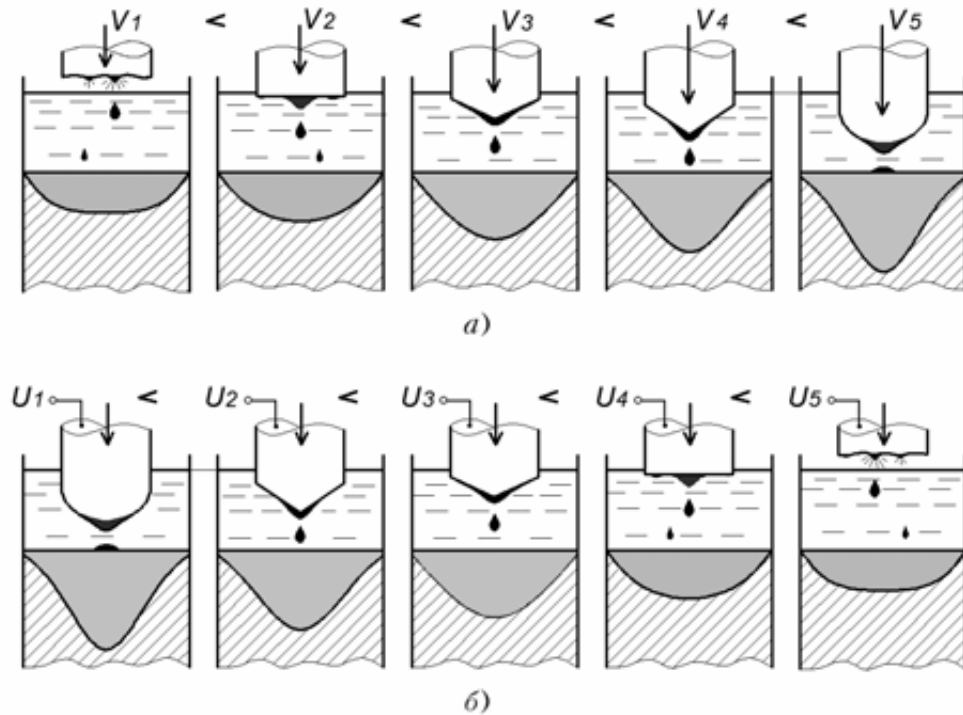


Рисунок 2.1 – Характер плавлення електроду і зміни форми металевої ванни при збільшенні швидкості подачі електроду ($V_{\text{ел}}$) за умов $U = \text{const}$ (а), і при збільшенні напруги на ванні (U) за умов $V_{\text{ел}} = \text{const}$ (б)

З точки зору якості металу зливків, особливо при виплавці сплавів, схильних до ліквації, вважається більш ефективним ведення процесу ЕШП з мінімальним зануренням електроду в шлак, що, в свою чергу, забезпечує формування плоского торця витратного електроду [22]. Це пов'язане з більш сприятливими умовами формування кристалічної будови зливка і зменшенням лікваційних процесів при невеликих швидкостях плавлення. При плавці з мінімальним зануренням електроду його торець набуває плоску форму, з декількома осередками краплеутворення (замість одного на вершині конусу оплавлення, рис 2.1). Внаслідок цього розосереджуються місця потрапляння крапель на поверхню металевої ванни, і відповідно – тепло, що

надходить до металевої ванни з краплями електродного металу. Це, в комплексі зі зменшенням потужності переплаву, призводить до зменшення глибини металевої ванни, вирівнювання фронту кристалізації і покращення умов структуроутворення зливка.

2.1.1 Вплив технологічних параметрів на особливості плавлення витратного електроду з прецизійного сплаву 29НК

Як вже наголошувалось, при ЕШП є широкі можливості керування характером плавлення витратного електроду за рахунок зміни технологічних параметрів процесу. Серед цих параметрів основними є електрична напруга на ванні і сила струму плавки (разом визначають потужність переплаву) а також швидкість переплаву. Остання, окрім електричних режимів плавки визначається ще й швидкістю подачі витратного електроду в шлакову ванну (при умові відсутності переміщення кристалізатору і витягування зливка). Згадані параметри тісно пов'язані між собою, і зміна одного зумовлює зміну іншого.

Високі вимоги до точності хімічного складу і однорідності прецизійних сплавів вимагають ретельного вибору режимів їх виплавки. Це потребує вивчення особливостей плавлення витратних електродів з прецизійних сплавів, при різних режимах їх переплаву.

Досліджували вплив таких технологічних параметрів як струм і напруга плавки а також швидкість подачі електроду на особливості плавлення та профіль торця оплавленої частини витратних електродів з широко розповсюдженого прецизійного сплаву 29НК [190].

Електроди діаметром 55 мм переплавляли в кристалізаторі діаметром 84 мм під флюсом АНФ-1 в камерній печі в атмосфері аргону. Плавки проводили при напрузі 20, 30 і 38 В. Швидкість подачі електроду змінювали в межах 0,6...4,68 м/год. Глибина шлакової ванни в усіх експериментах складала 45 мм.

Плавки здійснювали наступним чином. Після наведення шлакової ванни і виходу на заданий стаціонарний режим плавлення здійснювали відключення напруги і різко підіймали електрод до його виходу зі шлакової ванни. Це дозволяло візуально фіксувати глибину занурення електроду в шлак і форму оплавленої його частини. Режими плавки і їх результати наведені в табл. 2.1. та на рис 2.2 – 2.5.

Таблиця 2.1 – Режими плавки і параметри плавлення витратного електроду

№ плавки	U , В	I , А	$V_{\text{ел}}$, м/год	Кут вершини конуса оплавлення α , град	Глибина занурення електроду у шлак $H_{\text{ел}}$, мм	Примечание (характеристика процесу)
323	20	1650	0,6	123	23	сталий
324		2640	1,25	95	37	сталий
325		3700	2,0	86	47	сталий
326	30	1500	0,7	147	17	несталий, періодичний
327		1650	1,25	137	18	сталий
328		2970	2,0	125	21	сталий
329		3960	2,6	110	24	сталий
330		4780	3,3	103	28	сталий
337		6450	3,84	86	44	відносно сталий
331		38	1155	1,25	153	15
332	1600		2,0	145	17	сталий (на поверхні)
333	3135		2,6	130	17	сталий
334	4290		3,3	125	20	сталий
335	5115		3,7	115	24	сталий
336	7090		4,68	110	28	відносно сталий

На рис. 2.2 надані залежності струму плавки від швидкості подачі електроду, для різних значень напруги. Як видно, величина струму, при інших рівних умовах, лінійно збільшується зі збільшенням швидкості подачі

електроду. Як відомо, це пов'язане зі збільшенням глибини занурення електроду у шлак і зменшенням електричного опору міжелектродного проміжку.

При незмінній швидкості подачі електроду збільшення напруги на ванні спочатку призводить до збільшення струму плавки а потім, з встановленням стаціонарних режимів, область плавлення електроду зміщується в верхні шари шлакової ванни, і струм плавки зменшується. Саме тому, на рис. 2.2 графікам з меншою напругою відповідають більші значення струму плавки.

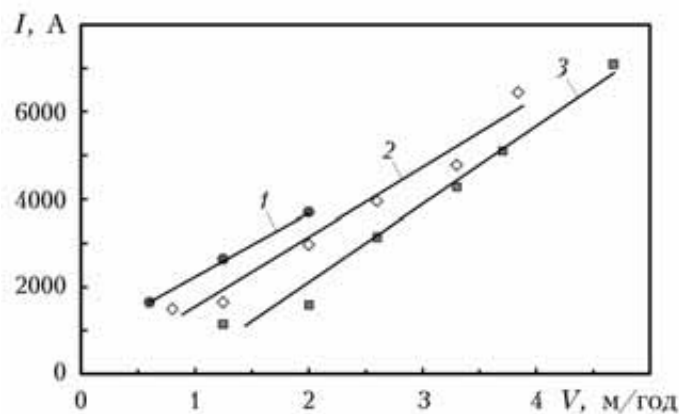


Рисунок 2.2 – Залежність струму плавки від швидкості подачі електроду: 1 – $U=20$ В; 2 – $U=30$ В; 3 – $U=38$ В

Зовнішній вигляд оплавлених торців електродів наведено на рис. 2.3. При малих швидкостях подачі електроду, які зумовлюють малий струм плавки, плавлення електроду відбувається біля поверхні шлаку. При цьому, торець електроду має плоску форму, з одним, рідше декількома осередками краплеутворення (рис. 2.3, плавки № 323, 326, 331). Причому, зі збільшенням напруги, при незмінній швидкості подачі електроду, глибина занурення електроду у шлак зменшується і його торець набуває більш плоскої форми (рис. 2.3, плавка 331, у порівнянні з плавкою 323).

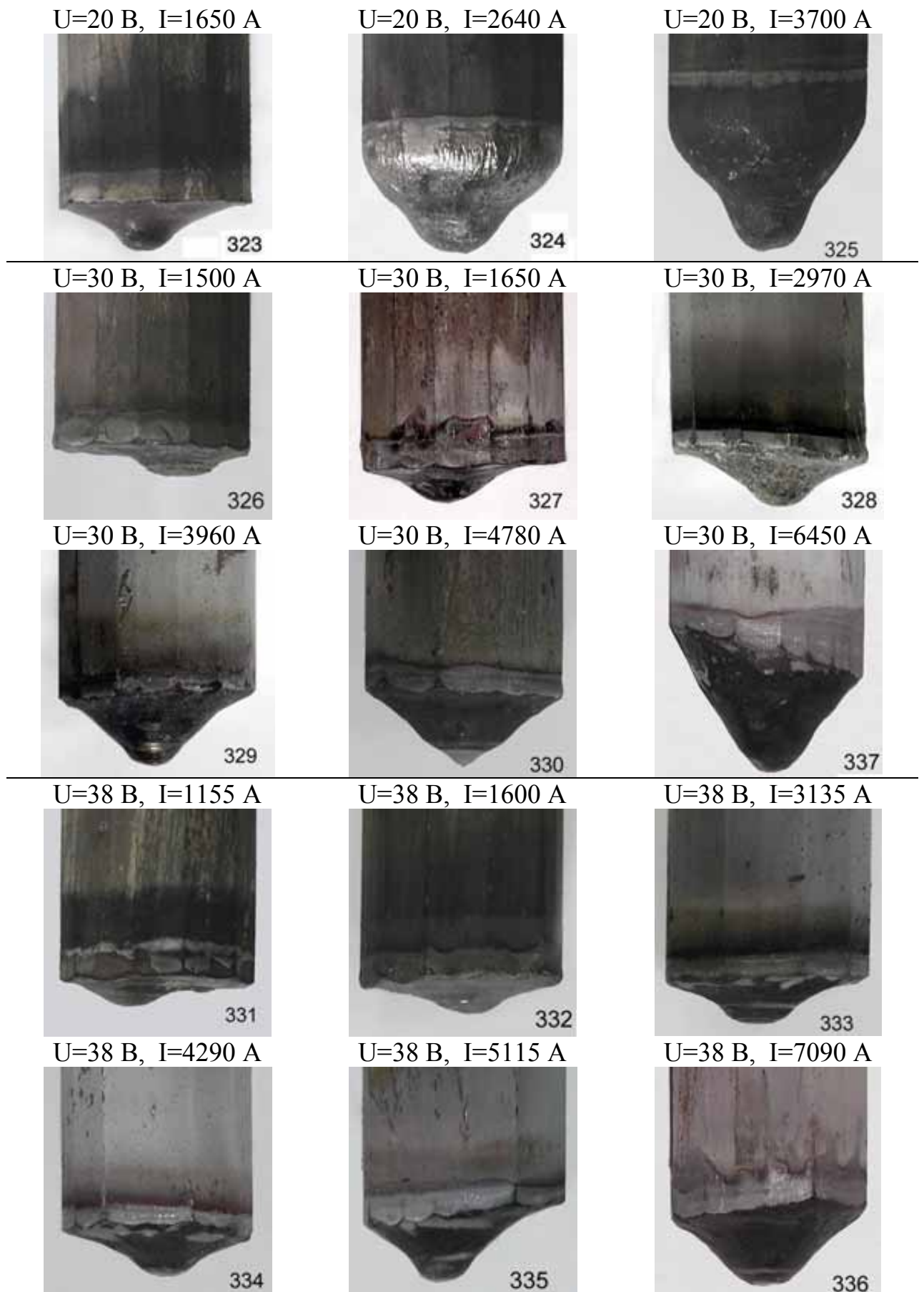


Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд оплавлених поверхонь електродів (цифрами вказані номери плавок)

При збільшенні швидкості подачі електроду глибина його занурення в шлак збільшується, а торець набуває конічної форми (рис. 2.3, плавки № 334, 329, 330, 336). Формування і відрив крапель електродного металу, при цьому, відбувається на вершині конусу оплавлення. Подальше збільшення швидкості подачі електроду призводить до збільшення і округлення його конусної частини та зменшення кута α вершини конуса (рис. 2.4 а). Гранично допустимі значення швидкості подачі електроду становили: при напрузі 20 В – 2,6 м/год; 30 В – 3,9 м/год; 38 В – 4,7 м/год. Подальше збільшення швидкості подачі, вище вказаних значень, призводило до коротких замикань на металеву ванну та порушення стабільності електрошлакового процесу.

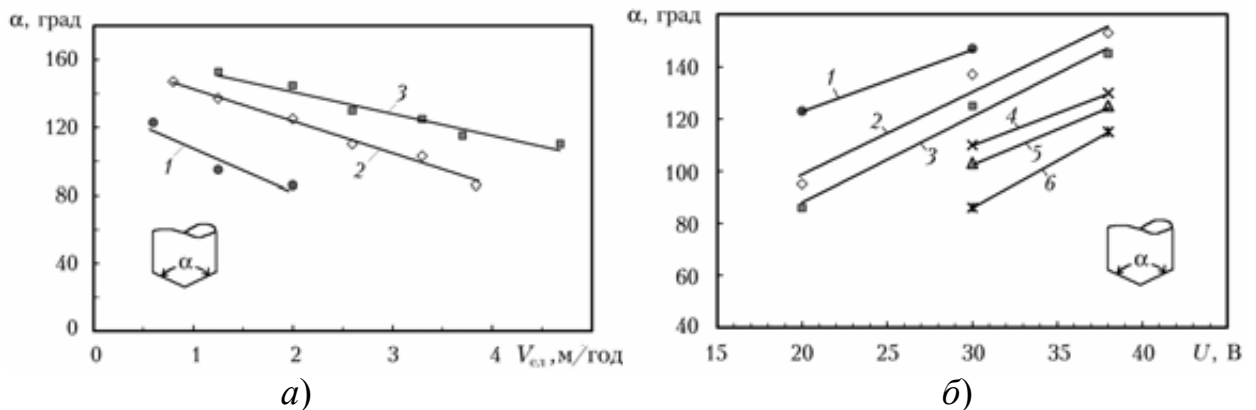


Рисунок 2.4 – Залежність кута α вершини конуса оплавленої частини електроду: а – від швидкості його подачі для різних значень U : 1 – $U=20$ В; 2 – $U=30$ В; 3 – $U=38$ В:

б – від напруги плавки для різних значень $V_{\text{ел}}$: 1 – 0,6 м/год; 2 – 1,25 м/год; 3 – 2,0 м/год; 4 – 2,6 м/год; 5 – 3,3 м/год; 6 – 3,8 м/год

У цілому, залежність глибини занурення електроду в шлак від швидкості подачі носить лінійний характер (рис. 2.5 а). При цьому, практично в усіх випадках, навіть при невеликій швидкості подачі, електрод, крім оплавленої конусної частини, занурювався у ванну ще й циліндричною частиною, яка не оплавлялась (рис.2.3, плавки № 323, 326).

При збільшенні напруги, при незмінній швидкості подачі електроду, глибина занурення електроду в шлак зменшується і його торець набуває

більш плоскої форми (рис. 2.3, плавка 331 порівняно з плавкою 323). Відповідно кут α із збільшенням напруги на ванні збільшується (рис. 2.4 б). При цьому, залежність глибини занурення електроду в шлак від напруги має нелінійний характер (рис. 2.5 б).

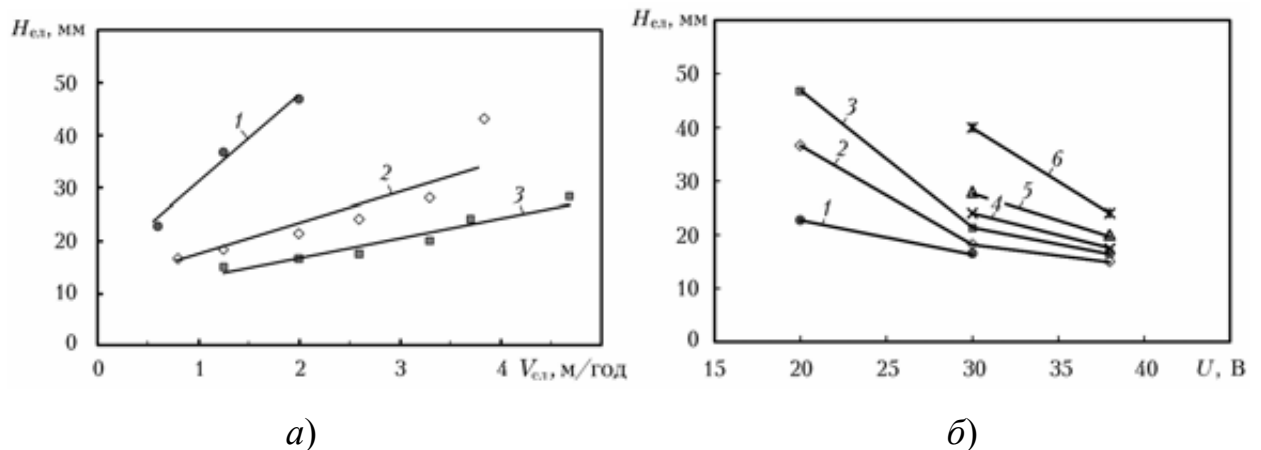


Рисунок 2.5 – Залежність глибини занурення електроду $H_{ел}$:

a – від швидкості його подачі для різних значень U : 1 – $U=20$ В; 2 – $U=30$ В; 3 – $U=38$ В;

б – від напруги плавки для різних значень $V_{ел}$: 1 – 0,6 м/год; 2 – 1,25 м/год; 3 – 2,0 м/год; 4 – 2,6 м/год; 5 – 3,3 м/год; 6 – 3,8 м/год

Слід зазначити, що однакова форма оплавленої поверхні електроду може бути отримана при суттєво відмінних електричних режимах плавки (рис. 2.3, плавки № 323 і 334). Так, наприклад, практично однаковий торець електрода був при плавці № 323 ($U=20$ В, $I=1650$ А, $V_{ел}=0,65$ м/год) і при плавці № 334 ($U=38$ В, $I=4290$ А, $V_{ел}=3,3$ м/год). Вочевидь, що визначальним показником в даному випадку є питома потужність переплаву, тобто потужність процесу віднесена до швидкості переплаву.

Загалом, отримані в результаті проведених експериментів дані збігаються з відомими уявленнями про характер плавлення витратного електроду при ЕШП. Відмінність полягає у тому, що в наших експериментах, в усіх випадках, навіть при невеликій швидкості подачі, електрод, крім конусної частини, занурювався у ванну ще й циліндричною частиною, яка не

оплавлялась. Тобто, формування конусної частини торця електроду починалося тільки після певного занурення в шлак циліндричної його частини. Поверхня шлакової ванни перетинала електрод завжди в циліндричній його частині, на певній відстані від конусу оплавлення. Скоріш за все, це пов'язане з характером розподілу струму в шлаковій ванні і невеликою часткою струму кристалізатора, в проведених експериментах.

Слід наголосити, що зі збільшенням діаметру електроду характер його плавлення буде змінюватися, що виявлятиметься в зменшенні конусності і більшої кількості осередків краплеутворення на торці електроду [191].

В результаті проведених експериментів були отримані кількісні дані щодо плавлення витратного електроду сплаву 29НК, при різних електричних режимах і швидкостях переплаву. Як наслідок, були розроблені таблиці для визначення глибини занурення і форми оплавленого торця витратного електроду при різних режимах ЕШП. Вони становлять практичний інтерес для вибору раціональних режимів ЕШП зливків прецизійних сплавів типу 29НК діаметром 80...150 мм.

2.1.2 Крапельне перенесення електродного металу в умовах зовнішнього електромагнітного впливу

Важливим фактором, який визначає якість металу зливків, є характер крапельного перенесення електродного металу. Розмір і форма крапель, частота їх відриву і траєкторії руху в шлаковій ванні визначають площу поверхні і час взаємодії металу з рафінуючим середовищем, і тим самим – ступінь видалення домішок з металів і сплавів, що переплавають.

Дослідженню закономірностей крапельного перенесення при ЕШП присвячено багато робіт [192-196]. Встановлено вплив основних параметрів електрошлакового процесу (сили струму, напруги, швидкості плавлення, роду та полярності струму, діаметра електрода та ін.) на величину та час утворення крапель. Вивчено вплив на крапельне перенесення механічних дій та ультразвукових коливань [133, 137].

Нами (спільно з Порохонько В.Б.) були проведені роботи по дослідженню процесів крапельного перенесення металу при ЕШП витратного електроду, в умовах зовнішнього електромагнітного впливу поздовжніми полями [197-200]. В цьому випадку, на краплю додатково діє електромагнітна сила, викликана взаємодією електричного струму в краплі з зовнішнім магнітним полем (рис. 2.6). Крім того, внаслідок зміни напрямку і інтенсивності течій шлаку суттєво змінюється сила в'язкого тертя, яка обумовлена рухом шлакового розплаву.

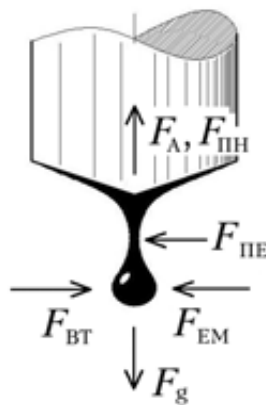


Рисунок 2.6 – Схема сил, що діють на краплю: F_A – Архімедова сила; $F_{ПН}$ – сила поверхневого натягу; F_g – сила тяжіння; $F_{ПЕ}$ – сила Пінч ефекту; $F_{ВТ}$ – сила в'язкого тертя; $F_{ЕМ}$ – електромагнітна сила (напрямок зображений умовно)

Експерименти проводили з використанням розробленої фізичної моделі, описаної у роботах [197, 199]. Модель базується на плавленні витратного електроду зі сплаву Вуда (50 Вi–25 Pb–12,5 Sn–12,5 Cd, $T_{пл}=68,5$ °C), зануреного в оптично прозорий розчин хлористого цинку (рис. 2.7). Нагрів та плавлення витратного електроду відбувається за рахунок Джоулевого тепла, яке виділяється у розчині хлористого цинку при проходженні в ньому електричного струму, тобто – аналогічно тому, як це відбувається при ЕШП. Зовнішнє поздовжнє магнітне поле формували за допомогою електромагнітної системи, що складається з двох соленоїдів і дозволяє генерувати в робочій зоні поздовжнє поле індукцією до 0,4 Тл. Для

дослідження особливостей плавлення витратного електроду, краплеутворення і перенесення металу використовували метод відеофіксації (частота – 240 кадрів в секунду) а також методику осцилографування струму. Структуру і швидкість течій електроліту оцінювали за допомогою аналізу руху завислих часток.

Моделювання проводили з дотриманням критеріїв геометричної подібності та критерію електровихрової течії

$$S = \mu_0 I^2 / \rho v^2 ,$$

де μ_0 – магнітна проникність середовища, I – електричний струм, ρ – густина рідини, ν – кінематична в'язкість рідини. Критерій S характеризує співвідношення електромагнітної сили, яка діє на розплав, до сили в'язкості і є вирішальним щодо визначення інтенсивності течій рідини, викликаних електромагнітною силою [201-202].

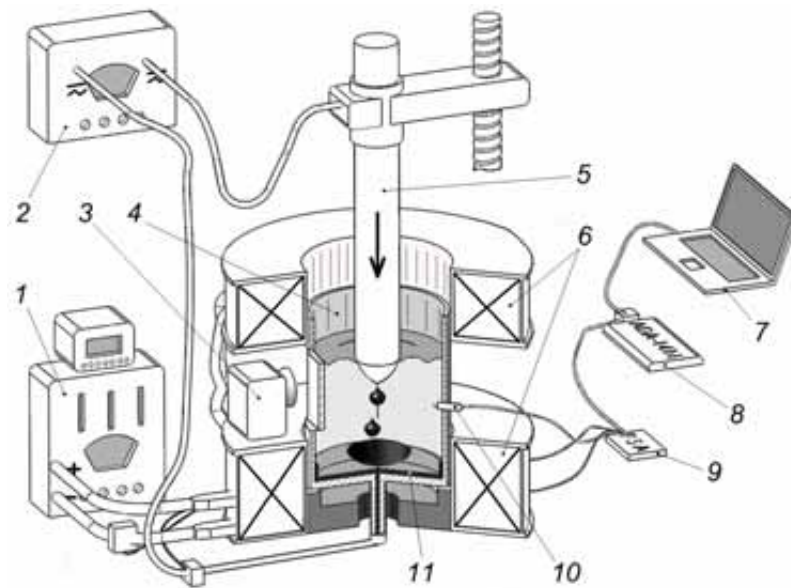


Рисунок 2.7 – Схема фізичної моделі для дослідження процесів плавлення витратного електроду: 1 – джерело живлення електромагнітної системи; 2 – джерело живлення моделі; 3 – швидкісна відеокамера; 4 – ємність з оптично прозорого матеріалу; 5 – електрод з сплаву Вуда; 6 – соленоїди електромагнітної системи; 7 – комп'ютер; 8 – АЦП; 9 – перетворювач з гальванічною ізоляцією; 10 – термопара; 11 – нижній струмопідвід

Режими проведення експериментів наведено у табл. 2.2. Досліджували характер крапельного перенесення без використання зовнішнього магнітного поля і під дією постійного ($B=0,2$ Тл) і імпульсного ($B=0,32\dots0,35$ Тл) магнітних полів. При проведенні експериментів були незмінними сила струму в електроді (на рівні 12 А) та глибина занурення електрода в модельну рідину – 10 мм.

Таблиця 2.2 – Режими експериментів з фізичного моделювання крапельного перенесення металу

№ п/п	Напруга на електроді, В	Струм плавки, А	параметри магнітного поля			
			тип	індукція, Тл	імпульс, с	пауза, с
1	10 АС	12	без магнітного поля			
2	10 АС	12	постійне	0,2	-	-
3	10 АС	12	імпульсне	0,32	0.5...3	2...4
4	10 АС (10 DC)	12 АС (12 DC)	імпульсне	0,35	2	4...6
5	10 АС (25 DC)	12 АС (25 DC)	імпульсне	0,35	2	6...10

Також проводили експерименти з імпульсним впливом магнітного поля та амплітудно-фазовою модуляцією струму, що пропускається через електрод (струм плавки) (табл. 2.2, експ. № 4-5,). В даних експериментах, під час дії імпульсів магнітного поля, періодично випрямляли та збільшували струму плавки. Це робилося для посилення електромагнітного впливу на рідку ванну шляхом випрямлення та підвищення струму плавки і збільшення, внаслідок цього, електромагнітної сили \vec{F}_e , яка діє на рідину і яка визначається векторним добутком струму плавки \vec{I} та індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} : $\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}$.

Для оцінки адекватності результатів фізичного моделювання проводили натурні експерименти при переплаві титанових електродів діаметром 35 мм в кристалізаторі діаметром 65 мм. Крапельне перенесення

вивчали методом осцилографування, який заснований на зміні струму плавки при утворенні та відриві краплі.

Результати експериментів показали, що зовнішнє магнітне поле змінює структуру та інтенсивність течій електроліту, що, у свою чергу, суттєво впливає на особливості формування електродних крапель та траєкторії їх руху у ванні.

Без застосування зовнішнього магнітного поля структура течій представляла тороїдальні потоки рідини у вертикальній площині, вниз, вздовж осі ванни і вгору, біля стінок ємності. Максимальна швидкість таких потоків складала 22 мм/с (рис. 2.8).

При накладенні зовнішнього поздовжнього поля течії у вертикальній площині трансформувалися у горизонтальні обертання електроліту навколо осі ванни. Це пояснюється взаємодією радіальної складової струму в електроліті з зовнішнім поздовжнім магнітним полем, внаслідок чого утворюється азимутальна електромагнітна сила, що призводить до обертання розплаву навколо осі ванни. Інтенсивність таких течій була значно вище, ніж при відсутності магнітного поля (рис. 2.8). Швидкість потоків збільшувалась при збільшенні індукції магнітного поля, а також при випрямленні та збільшенні струму плавки. Максимальна швидкість потоків була в експерименті № 5 і становила 420 мм/с, що майже в 20 разів вище, ніж без використання зовнішнього магнітного поля (рис. 2.8).

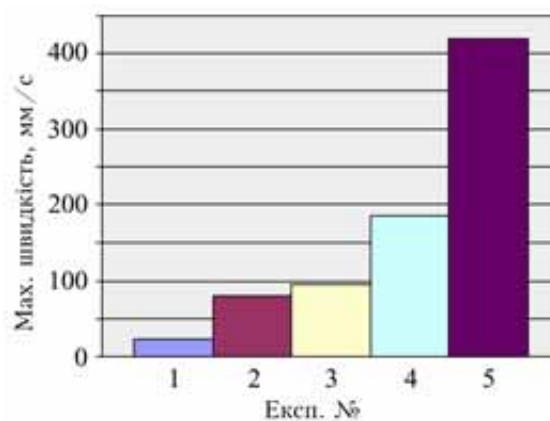


Рисунок 2.8 – Максимальна швидкість потоків у ванні при різних схемах моделювання

Було встановлено, що в разі застосування імпульсного магнітного поля, швидкість потоків у ванні залежить як від величини індукції магнітного поля, так і від тривалості його імпульсів. Спочатку, зі збільшенням тривалості імпульсу до 1,5...2,5 с, швидкість обертання рідини зростала, а далі – стабілізувалась на певному рівні (рис. 2.9). Це говорить про те, що для формування стійких потоків рідини тривалість імпульсів магнітного поля має перевищувати певне мінімальне значення, яке у нашому випадку становило 2,5 с.

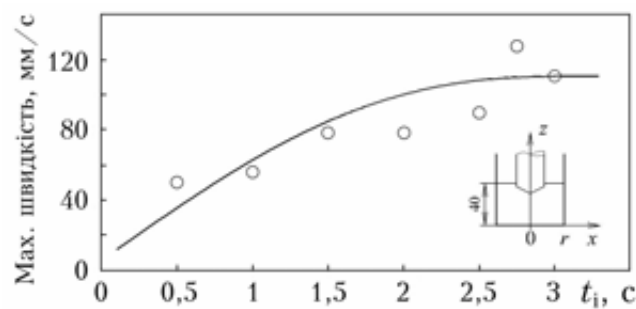


Рисунок 2.9 – Залежність максимальної швидкості потоків у ванні від тривалості імпульсу магнітного поля: $B=0,32$ Тл, $I=12$ А, $x=0,5r$, $z=25$

Основні характеристики плавлення і крапельного перенесення, отримані при фізичному моделюванні, наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики плавлення і крапельного перенесення при фізичному моделюванні

№ п/п	Швидкість плавлення, г/с	Частота відриву крапель, Гц	Середня маса краплі, г	Середній діаметр краплі, мм	Довжина траєкторії руху краплі, мм	Час знаходження краплі у ванні, с
1	0,87	0,62	1,4	6,5	30	0,22
2	0,96	0,75	1,28	6,3	38	0,28
3	0,92	0,86	1,07	5,9	39	0,29
4	0,92	0,80	1,15	6,1	53	0,34
5	1,0	0,82	1,22	6,2	80	0,60

Встановлено, що використання магнітного поля призводить до збільшення швидкості плавлення електроду. Так, при однакових електричних характеристиках процесу, в експериментах № 2-4 швидкість плавлення електроду була вищою на 6...10 %, ніж в експерименті № 1. Очевидно, що це пов'язано з інтенсифікацією течій електроліту біля поверхні електроду і з активізацією процесів теплообміну на границі поділу *електрод – рідка ванна*. Отримане в експерименті № 5 збільшення на 15% швидкості плавлення електроду пов'язане також зі збільшенням теплової потужності процесу через циклічне збільшення струму плавлення.

Інший ефект від дії магнітного поля полягав у збільшенні частоти відриву крапель металу та зменшенні їх розмірів. Так, за відсутності магнітного поля середня частота відриву крапель становила 0,62 Гц, при їх середній масі – 1,4 г. В експериментах з застосуванням зовнішнього магнітного поля частота відриву крапель збільшувалася в середньому до 0,75...0,86 Гц, при зниженні маси крапель до 1,07...1,28 г (табл. 2.3). Таким чином, накладення магнітного поля призвело до збільшення на 21...38% частоти відриву крапель електродного металу, при зменшенні їхньої середньої маси на 8...24%. Отриманий ефект підвищення частоти відриву електродного металу, пов'язаний з інтенсифікацією течій рідини біля крапель, що формуються на торці електроду (збільшенням силової дії потоків рідини на краплі, що формуються), а також – з вібрацією електроду, яка виникає внаслідок дії імпульсів магнітного поля.

На рис. 2.10 наведено основні фази формування крапель у проведених експериментах.

За відсутності зовнішнього магнітного поля у більшості випадків (88%) формування та відрив крапель відбувався по осі електроду (на вершині конусної частини, яка оплавлялася). Із зростанням краплі між нею та електродом утворюється перемичка, яка поступово витягується і потім руйнується в нижній частині. Частина металу, що утворює перемичку, затримується на електроді і знову розтягується на поверхні, яка оплавляється за рахунок сил поверхневого натягу. Як правило, під час руйнування перемички утворювалася одна або декілька додаткових крапель діаметром

менше ніж 1 мм. У ванні краплі рухалися прямолінійно вниз по її осі (рис. 2.10, експ. № 1 в.1). Іноді, у 6 % випадків, на торці електроду спостерігалось одночасне утворення кількох крапель (рис. 2.10, експ. № 1 в.2).

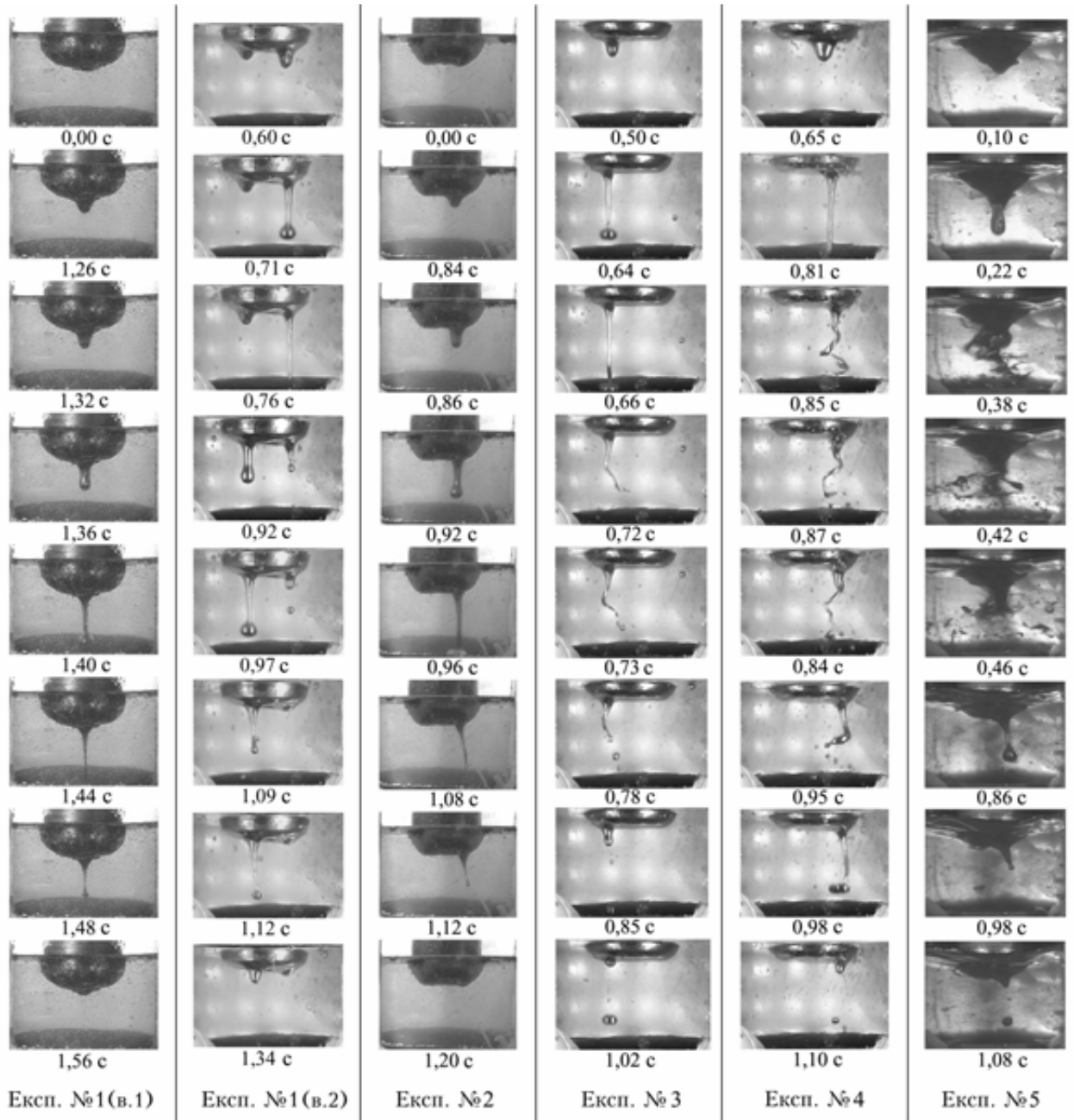


Рисунок 2.10 – Еволюція крапель при різних схемах моделювання

При накладенні зовнішнього магнітного поля зародження краплі в 75% випадків відбувалося по осі електроду. Однак, із зростанням краплі, під впливом горизонтального обертання електроліту, вона поступово зміщувалася від осі електроду (рис. 2.10, експ. № 2-4). За рахунок цього

відрив крапель відбувався в різних місцях на торці електрода. Після відриву краплі, перемичка, що залишилася на електроді, за рахунок обертання рідини закручувалась і потім руйнувалася з утворенням додаткових малих крапель, кількість яких була більшою, ніж у разі відсутності зовнішнього поля (рис. 2.10, експ. № 3, 4). У ванні краплі рухалися переважно по спіралі, радіус якої залежав від місця відриву краплі та швидкості обертання рідини.

В експерименті № 5, де застосовували модуляцією (збільшення та випрямлення) струму плавки, вплив імпульсного магнітного поля на характер перенесення електродного металу був найбільшим. При формуванні на торці електрода краплі достатнього розміру імпульс магнітного поля призводив до руйнування краплі і перемички, що утворилася між нею і електродом, з утворенням великої кількості крапель малого розміру. Ці краплі, під впливом відцентрових сил, розкидалися в об'ємі ванни (рис. 2.10, експ. № 5).

Внаслідок зазначених ефектів під дією зовнішнього магнітного поля краплі металу мали менший розмір і проходили більш довгий шлях у ванні. У середньому довжина траєкторій руху крапель в електроліті під дією магнітного поля збільшилася в 1,3...2,5 рази (рис. 2.11). Аналогічним чином збільшився час перебування крапель в електроліті, що відтворював шлакову ванну.

Слід зазначити, що збільшення шляху та часу знаходження крапель у ванні є позитивним результатом впливу магнітного поля, бо це сприяє більш повному перебігу процесів хімічної взаємодії шлаку з металом.

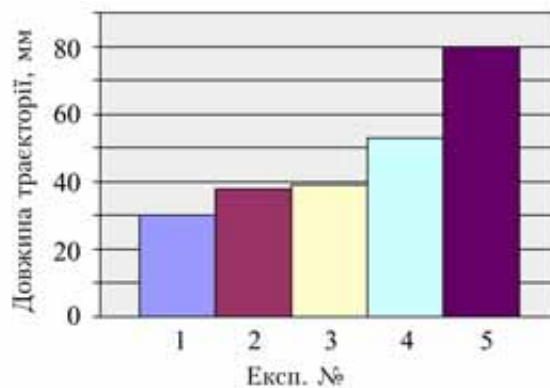


Рисунок 2.11 – Довжина траєкторії руху краплі в електроліті при різних схемах моделювання

Також, позитивним ефектом від дії магнітного поля є розосередження місць потрапляння крапель на поверхню металеві ванни. Якщо в експерименті без електромагнітного впливу 78% крапель потрапляли на поверхню металеві ванни по осі електроду, то в експерименті із зовнішнім магнітним полем індукцією 0,35 Тл цей показник знижувався до 40 % (рис. 2.12). Це пояснюється як зміщенням місць відриву крапель від осі електроду на його периферію, так і відхиленням і закрученням траєкторій руху крапель у шлаковій ванні. В умовах натурального ЕШП це призведе до того, що тепло, що надходить у металеву ванну з краплями електродного металу, буде розподілятися більш рівномірно. У свою чергу це сприятиме формуванню більш плоскої металеві ванни, що позитивно впливає на умови кристалізації зливка.

Слід зазначити, що для більш ефективного впливу на крапельне перенесення металу, імпульси магнітного поля доцільно синхронізувати з моментами формування крапель на поверхні електроду, що оплавляється. В цьому випадку імпульси магнітного поля стимулюватимуть відрив крапель і забезпечуватимуть досягнення описаних вище ефектів [203].

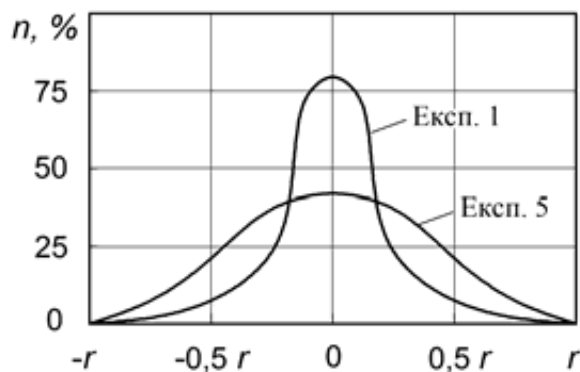


Рисунок 2.12 – Розподіл місць потрапляння крапель на поверхню металеві ванни при різних схемах проведення експериментів

У таблиці 2.4 наведено параметри крапельного перенесення, отримані при натурних експериментах при ЕШП титанових електродів аналогічних

розмірів (масштабний фактор фізичної моделі і натурального процесу 1:1). Отримані дані свідчать, що швидкість плавлення металу і частота краплеутворення в при реальному ЕШП були вищими за значення, які отримані при моделюванні (табл. 2.3 і 2.4). Однак, закономірності збільшення частоти відриву крапель електродного металу, зменшення їхньої маси та підвищення швидкості плавлення електроду при накладенні зовнішнього магнітного поля, які були встановлені при моделюванні, збереглися і при реальному електрошлаковому процесі. Так, при ЕШП титану накладення зовнішнього поздовжнього магнітного поля призвело до збільшення на 3...5 % швидкості плавлення електроду, збільшення на 20...53 % частоти відриву крапель електродного металу та зменшення на 15...31 % їхньої середньої маси. В цілому, ці дані узгоджуються з результатами, отриманими при фізичному моделюванні. Це говорить про адекватність розробленої фізичної моделі та правомірність її використання для оцінки з впливу зовнішнього магнітного поля на крапельне перенесення металу при ЕШП. При цьому, фізичне моделювання, за рахунок можливості візуального спостереження за процесом, дозволяє отримувати додаткову інформацію про еволюцію краплі та інші параметри, які складно отримати шляхом натурних експериментів або математичним моделюванням. Ці дані дозволять оптимізувати режими електромагнітного впливу на електрошлаковий процес, задля досягнення необхідних металургійних ефектів.

Таблиця 2.4 – Характеристики плавлення і крапельного перенесення при натурному процесі ЕШП титану

Параметри магнітного поля	Швидкість плавлення електроду, г/с	Частота відриву крапель, Гц	Середня маса краплі, г	Середній діаметр краплі, мм
Без магнітного поля	4,05	2,70	1,50	8,6
Постійне поле, $V=0,2$ Тл,	4,27	4,15	1,03	7,6
Імпульсне поле, $V=0,24$ Тл, $t_{\text{імп.}}=1,5$ с, $t_{\text{паузи}}=8$ с	4,16	3,25	1,28	8,2

2.2 Кристалізація металу при ЕШП

В першому розділі були наведені основні чинники, які визначають умови формування структури зливка ЕШП. Показано, що ЕШП характеризується послідовною, направленою кристалізацією металу зливка. При цьому профіль рідкої металевої ванни є свого роду показником внутрішньої будови зливка. Так як зростання кристалів завжди відбувається паралельно відведенню тепла (тобто перпендикулярно фронту кристалізації металу), тому від форми рідкої металевої ванни залежить напрямок розвитку головних осей дендритів і, відповідно, кристалічна структура зливка. Чим менше глибина ванни, тим менше кут між головними осями дендритів і віссю ванни, і навпаки, чим глибше ванна, тим більш радіальну спрямованість набуває фронт зростання дендритів (рис. 2.13). Це наочно ілюструють структури злиwkів, які були нами отримані при різних потужності і швидкостях переplаву (рис. 2.14). В більшості випадків структура злиwkів складається лише з стовбчастих кристалітів (рис. 2.14 *a, б, в*). В залежності від введеної потужності можна отримати злиwки з вертикально орієнтованою структурою (рис. 2.14 *a*), з кристалітами спрямованими під кутом до вісі зливка (рис. 2.14 *б*), з радіально орієнтованими кристалітами (рис. 2.14 *в*). Остання структура є небажаною, так як сприяє формуванню зони "слабини" по вісі зливка, збагаченої домішками (добре помітна на рис. 2.14 *в*).

Загалом структура злиwkів ЕШП є однорідною. Виняток становить лише придонна частина зливка, де дається взнаки охолоджуюча дія піддону (рис. 2.14). Зазвичай висота цієї зони становить від 1,0 до 1,5 діаметра зливка.

При значному збільшенні об'єму металевої ванни в злиwках ЕШП можливе утворення зони рівноосних кристалів у центральній частині (рис. 2.14 *г*). Ці кристаліти формуються в умовах відсутності спрямованого тепловідведення. Загалом, перехід від стовбчастої структури до рівноосної визначається критерієм G/R , де G – температурний градієнт а R – швидкість

кристалізації. Зі зменшенням G/R кристалізаційна структура переходить від стовбчастої до рівноосної.

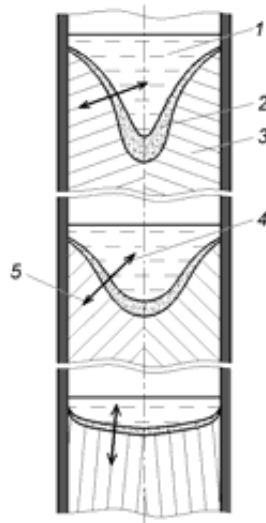


Рисунок 2.13 – Вплив форми ванни на орієнтацію кристалів зливка ЕШП: 1 – металева ванна; 2 – двофазна зона; 3 – твердий метал; 4 – напрямок зростання головних осей дендритів; 5 – напрямок тепловідведення

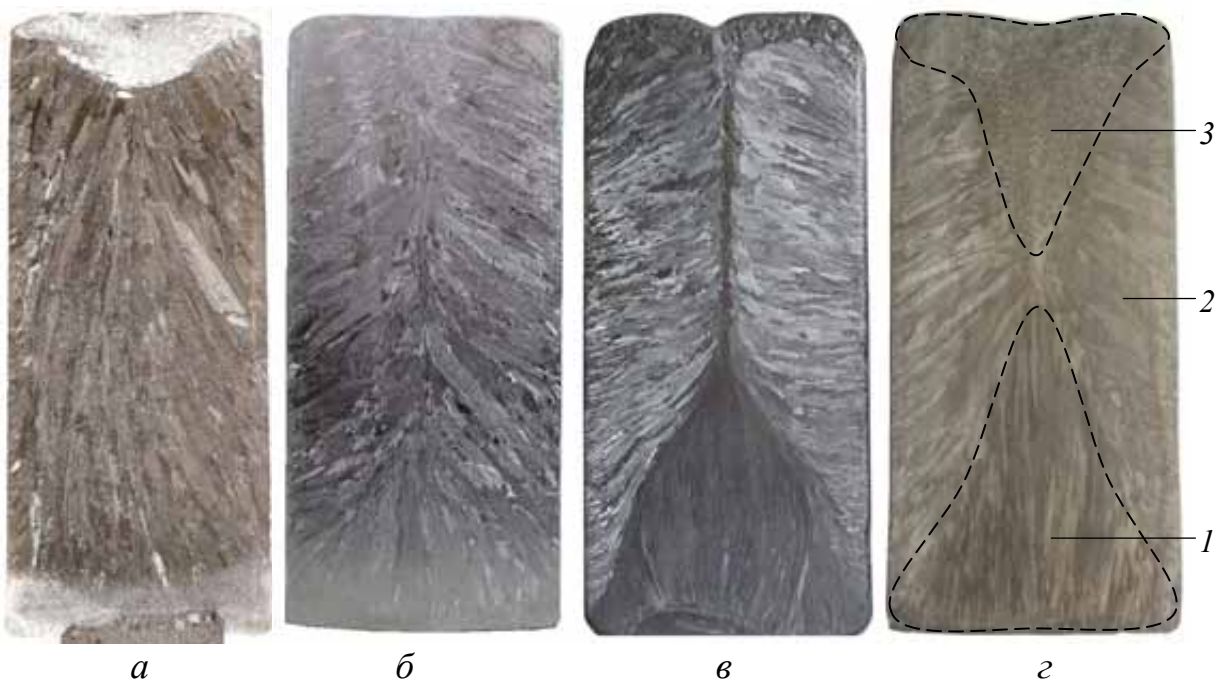


Рисунок 2.14 – Структура титанових зливок ЕШП $\varnothing 110$ мм з вертикально (*a*) і радіально (*б, в*) орієнтованими кристалами, та зоною рівноосних кристалів (*г*): 1 – придонна зона вертикально орієнтованих кристалів; 2 – зона радіально орієнтованих кристалів; 3 – зона рівноосних кристалів

Слід зазначити, що зона рівноосних кристалів (особливо місця переходу від стовбчастих кристалітів до рівноосних) найбільш схильна до утворення ліквідаційних дефектів і її утворення є небажаним. Тому зазвичай, при ЕШП прагнуть до формування неглибокої металевої ванни з вертикально орієнтованими кристалами (рис. 2.14 *a*). Проте для складнолегованих сплавів схильних до ліквідації таку структуру не можна вважати сприятливою. Наявність великих стовбчастих кристалів призводить до розвитку міждендритної ліквідації, що призводить до крихкості литого металу. Такий метал важко піддається деформації, і дефекти (хімічна неоднорідність) повністю не усуваються в процесі подальшої термомеханічної обробки.

Важливим питанням є визначення механізмів переходу від стовбчастої (транскристалітної) структури зливоків ЕШП до рівноосної.

Сучасні теорії кристалізації по різному описують механізм завершення транскристалізації і утворення зони рівноосних кристалів [114-115, 204-215]. Згідно одних, стовбчасті кристали припиняють своє зростання тоді, коли число і розміри вільних кристалів, що ростуть перед фронтом транскристалізації, стають порівняними з числом і поперечними розмірами стовбчастих кристалів на границі з розплавом. В свою чергу, вільні кристали з'являються на активних домішках у ділянках розплаву, переохолоджених перед фронтом транскристалізації. Крім того, вільні кристали перед фронтом зростають від затравок, якими є фрагменти кристалів, що утворюються внаслідок фрагментації гідродинамічними струменями або інших чинників. Тобто, згідно цих теорій, причиною припинення зростання стовбчастих кристалів є виникнення та зростання вільних кристалів. Згідно інших теорій, навпаки, вільні кристали в центральній частині зливка виникають вже після того, як припинилася транскристалізація.

Причини припинення зростання стовбчастих кристалів пояснюють зменшенням швидкості тепловідведення від фронту транскристалізації, а також зникненням перегріву незатверділої частини зливка. В роботі [208] так описується цей процес: стовбчасті кристали припиняють своє зростання в

той момент, коли температурний градієнт на межі фронту транскристалізації досягає деякого мінімального значення, при якому "організована доставка" часток, що йдуть на побудову орієнтованих кристалів, порушується в результаті розвитку хаотичного теплового руху цих частинок.

Трохи по іншому пояснюється припинення зростання стовпчастих кристалів в роботі [209]. По мірі просування фронту стовпчастих кристалів до центру зливка швидкість транскристалізації зменшується. У зв'язку з цим прискорюється дифузія розчинних домішок з розплаву між гілками дендритів до розплаву перед фронтом. Домішки, накопичуються біля вершин стовпчастих кристалів і майже повністю зупиняють їх зростання. У зв'язку з цим, розплав, в деяких ділянках перед фронтом транскристалізації, термічно переохолоджується, там з'являються вільні кристали, які зароджуються на активних домішках. Ці кристали, розростаючись, остаточно зупиняють транскристалізацію зливка.

Незважаючи на деякі розбіжності всі існуючі теорії говорять, що для утворення зони рівноосних кристалів необхідний певний об'єм рідкого металу і час його існування. При ЕШП такі умови створюються зі збільшенням температурного інтервалу кристалізації сплаву (ширини двофазної зони), швидкості переплаву і діаметру зливка. В цих умовах збільшується локальний час кристалізації (ЛЧК) металу, що призводить до розвитку ліквідаційних процесів [216-217]. Тому, для сплавів схильних до ліквідації, використовуючи лише традиційні засоби керування кристалізацією металу (зміна потужності і швидкості переплаву) не завжди вдається уникнути утворення зони рівноосних кристалів в центральній частині зливка, ураженої ліквідаційними дефектами.

З цього приводу, для зменшення об'єму металевої ванни і придушення ліквідаційних процесів, перспективним може бути ведення процесу ЕШП в періодичному режимі з послідовним порційним формуванням зливка. В цьому випадку додається можливість регулювання процесів твердіння зливка вибором таких параметрів, як маса наплавленої порції, час витримки (паузи),

режими обігріву металеві ванни. Більш детально ці процеси будуть досліджені в наступних розділах.

Розглянемо від яких ще чинників залежать умови кристалізації зливоків при ЕШП (рис. 2.15). Після наведення шлакової ванни і наплавлення зливка висотою більш ніж 1,5 діаметра, форма і розміри рідкої металеві ванни стабілізуються і стають незмінними (за умов збереження теплової потужності, що виділяється в шлаковій ванні). Кристалізація металу відбувається в умовах введення тепла в металеву ванну з краплями електродного металу і через теплообмін зі шлаковою ванною та відведення тепла в стінки кристалізатора і зливок. При цьому, слід зауважити на утворенні на поверхні зливка шлакового гарнісажу (5, рис. 2.15) і повітряного зазору між зливком і стінкою кристалізатора, внаслідок усадки металу (6, рис. 2.15), які зменшують тепловий потік в стінку кристалізатора. Наявність такого теплового бар'єру призводить до того, що зростання стовбчастих кристалів відбувається відразу від стінок кристалізатора (бічної поверхні зливка) (рис. 2.14). Тому зона дрібних заморожених кристалів біля бічної поверхні зливка при ЕШП практично відсутня, а якщо і існує, то виражена значно меншою мірою, ніж при твердінні зливка в виливниці. Наявність шлакового гарнісажа також не дозволяє суттєво впливати на форму і об'єм металеві ванни шляхом збільшення інтенсивності охолодження кристалізатора.

Вплив технологічних параметрів на об'єм і форму металеві ванни був розглянутий в першому розділі. При цьому, формою ванни вважали форму лінії солідус. Проте не менш важливим чинником, з точки зору впливу на якість металу, є утворення перед фронтом твердіння двофазної зони (рис. 2.15). Ширина цієї зони залежить від властивостей металу (сплаву) і теплофізичних умов кристалізації. Чим більше тепла підводиться до поверхні начала твердіння (поверхня ліквідус) і чим швидше тепло відводиться від поверхні солідус, ти менше двофазна зона. Зазвичай, протяжність двофазної

зони при ЕШП менше, ніж у зливків, які відливають в виливницю, що визначає більш високу якість металу ЕШП.

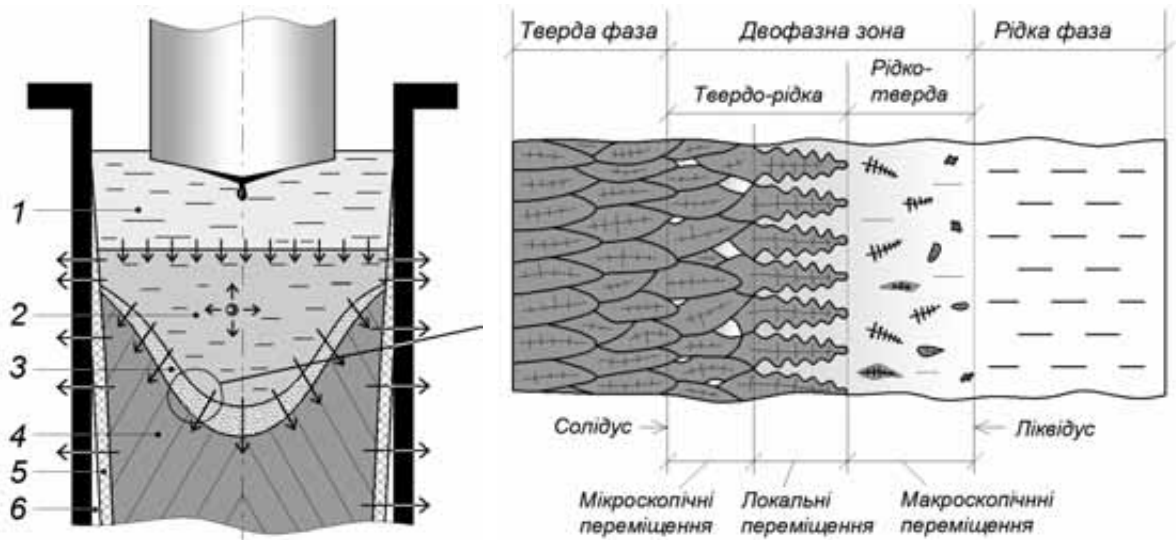


Рисунок 2.15 – Схема кристалізації зливка ЕШП і структура двофазної зони (стрілками позначений напрямок теплового потоку): 1 – шлакова ванна; 2 – металева ванна; 3 – двофазна зона; 4 – твердий метал (зливоч); 5 – шлаковий гарнісаж; 6 – усадковий зазор

Двофазна зона не є однорідною в своєму об'ємі. Умовно її можна розділити на рідко-тверду зону, яка прилягає до поверхні ліквідус, і твердо-рідку зону, яка прилягає до поверхні солідус (рис. 2.15). Рідко-тверда зона характеризується макроскопічними переміщеннями розплаву і являє собою рідку фазу з розрізненими виділеннями твердої фази. Це можуть бути зародки кристалів, які утворюються в умовах об'ємної кристалізації, фрагменти вже сформованих дендритів, які були відокремлені конвективними потоками рідини (внаслідок підплавлення або тиску) та ін.

Твердо-рідка зона характеризується вже сформованим жорстким каркасом з зрощених дендритів, між осями яких знаходиться рідина. В свою чергу твердо-рідка зона поділяється на зону, де рідина повністю оточується сформованими кристалами і її підживлення неможливе, і зону, де дендрити проростають в рідку фазу і між гілками яких є рідина з вільним доступом до

рідкої фази. Перша зона характеризується мікроскопічними переміщеннями розплаву, друга – локальними.

Сьогодні переважна більшість дослідників прийшли до висновків, що в процесах лиття та виготовлення зливок усі типи макросегрегацій і хімічної неоднорідності утворюються в двофазній зоні [114-115, 204-207, 210-213]. Механізм їх утворення пов'язують з потоками міждендритної рідини, яка збагачена домішками, і масообміном між рідиною і твердим металом в двофазній зоні. Рух міждендритної рідини відбувається за рахунок таких процесів:

- конвективних потоків, спричинених градієнтами густини внаслідок зміни температури і хімічного складу рідини (thermosolutal convection) (1, рис. 2.16);

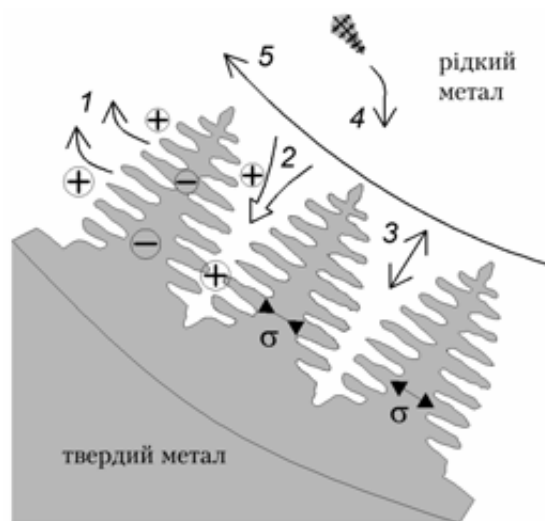


Рисунок 2.16 – Схема процесів, що призводять до виникнення руху міждендритної рідини: 1 – конвекція внаслідок градієнту температури і концентрації "thermosolutal convection" (символи "+" позначають збагачення розчиною речовиною, "-" збіднення); 2 – потоки, для живлення рідини внаслідок усадки; 3 – рухи, внаслідок деформації дендритної сітки; 4 – осадження твердих фрагментів; 5 – конвекція, внаслідок зовнішніх чинників (дії електромагнітних сил)

- руху рівноосних зерен або твердих фрагментів, які гетерогенно зародилися в розплаві або відокремилися від дендритів. Як правило такі фрагменти мають більшу густину, ніж навколишня рідина, і тому мають тенденцію тонути (4, рис. 2.16);

- потоків, спричинених стисненням рідини при охолодженні та усадкою при твердінні (2, рис. 2.16);

- деформації суцільної дендритної сітки через термічні напруги, напруги усадки та металостатичний напір (тобто тиск, створюваний рідким металом, що знаходиться вище), (3, рис. 2.16);

- потоків, викликаних зовнішніми чинниками (при ЕШП термогравітаційна конвекція і магнітогідродинамічна (МГД) - конвекція), (5, рис. 2.16).

Слід зазначити, що в умовах вільного твердіння зливків в виливниці конвективні потоки рідини дуже повільні і останній, з наведених вище чинників впливу на рух міждендритної рідини, не можна вважати переважаючим (5, рис. 2.16). На відміну від цього, ЕШП характеризується інтенсивним гідродинамічним станом рідкої металевої ванни внаслідок її нерівномірного теплового поля і конвекції, викликані електромагнітними силами. Очевидно, що конвективні потоки в металевій ванні будуть впливати і на рух міждендритної рідини в двофазній зоні (як в рідко-твердій так і частково в твердо-рідкій ділянках (рис. 2.16)). Особливо це стосується випадків примусового перемішування розплаву при ЕШП із застосуванням, наприклад, зовнішніх магнітних полів.

Рух розплаву під час твердіння також має величезний вплив на кристалічну будову зливка. З цього приводу важливим є розуміння фізичних механізмів дії руху розплаву на формування кристалічної будови зливка. Досить давно встановлено, що примусове перемішування розплаву призводить (за певних умов) до суттєвого подрібнення кристалічної структури зливків [219-220]. Очевидно, що подрібнення зерна можна пов'язати зі збільшенням центрів кристалізації в розплаві, що твердіє в

умовах примусового перемішування. Нижче наведені основні механізми, які пояснюють це явище [114-115, 204-207, 210-215, 218-223]:

- механічне перемішування розплаву пришвидшує його охолодження, внаслідок чого розширюється область його переохолодження перед фронтом транскристалізації. Відтак, прискорюється початок рівноосної кристалізації, скорочується зона стовбчастих кристалів і подрібнюється зерно зливка;

- вільні кристали, що виникають біля поверхні кристалізатора і перед фронтом транскристалізації, при перемішуванні розносяться по всьому об'єму розплаву і стають затравками для рівноосної кристалізації. Зі збільшенням інтенсивності руху кількість вільних кристалів збільшується, що призводить до подрібнення кристалічного зерна в зливках;

- при перемішуванні потоки розплаву оплавляють і руйнують фронт кристалізації, уламки кристалів розносяться по всьому об'єму розплаву і стають затравками кристалізації розплаву перед фронтом. При збільшенні інтенсивності руху, число уламків збільшується, що призводить до подрібнення структури зливка;

- потоки розплаву призводять до збільшення локального тиску, що підвищує фактичне переохолодження розплаву перед фронтом кристалізації і, відповідно, призводить до збільшення швидкості зародження центрів кристалізації перед фронтом.

Аналіз структури електрошлакових зливків, які переважною більшістю мають стовбчасту (транскристалічну) структуру, вказує на те, що в процесі ЕШП інтенсивність потоків рідкого металу недостатня для досягнення вказаних вище ефектів подрібнення кристалів. Тим не менш, гідродинамічні процеси в металевій ванні при ЕШП мають величезний вплив як на формування кристалічної будови зливка, так і на утворення різного роду макросегрегацій і неоднорідності. Це вказує на доцільність застосування при ЕШП додаткових гідродинамічних механізмів впливу на структуроутворення зливків. Особливо це стосується методів, оснований на використанні

прикладених електричних і магнітних полів. Дослідженню цих процесів будуть присвячені наступні розділи цієї роботи.

Підводячи підсумок аналізу умов кристалізації металу при ЕШП можна виділити наступні положення.

- При збільшенні діаметра зливка зменшується тепловідведення від його центральної частини, що призводить до збільшення об'єму рідкої металевої ванни і ширини двофазної зони та збільшення локального часу кристалізації металу. В свою чергу, це провокує утворення зони рівноосних кристалів в центральній частині зливка і розвиток ліквідаційних процесів. Уникнути цього, змінюючи лише параметри переплаву і режими охолодження зливка, неможливо.

- Рух розплаву під час твердіння, через механізми збільшення переохолодження розплаву перед фронтом кристалізації, збільшення кількості центрів кристалізації, оплавлення і руйнування зростаючих кристалів, має значний вплив на кристалічну будову зливка.

- Рух розплаву в об'ємі металевої ванни впливає на рух рідини в рідко-твердій і частково твердо-рідкій областях двофазної зони, і тим самим – впливає на утворення різного роду макросегрегацій.

- При ЕШП, через недостатню інтенсивність гідродинамічних течій в металевій ванні, ефект подрібнення структури металу, який може бути досягнутий в умовах примусового перемішування розплаву, не відбувається.

Виходячи з цього можна запропонувати два різні підходи, щодо керування процесами структуроутворення електрошлакового металу.

Перший підхід, оснований на локалізації (зменшенні об'єму) металевої ванни задля придушення ліквідаційних процесів. В умовах класичної схеми ЕШП витратного електроду такий підхід можна реалізувати шляхом ведення електрошлакового процесу в імпульсному режимі, з забезпеченням періодичності процесів плавлення електроду і пошарового формування зливка. Це дасть змогу зменшити об'єм рідкої металевої ванни і регулювати процеси твердіння металу вибором таких параметрів, як маса (об'єм)

наплавленої порції металу, час витримки, режими обігріву металевої ванни тощо.

Другий підхід оснований на активному впливі на гідродинамічний стан рідкої металевої ванни шляхом зовнішніх фізичних впливів з використанням електричних і магнітних полів. Їх застосування забезпечить силовий вплив на струмонесучу рідку металеву ванну і фронт кристалізації зливка, що, в свою чергу, дасть можливість впливати на характер структуроутворення металу, подрібнювати структуру злиwkів і підвищувати рівень їх фізичної і хімічної однорідності.

Перспективним також слід вважати використання одразу обох, зазначених вище, підходів керування якістю електрошлакового металу.

Висновки до розділу 2

1. Визначено вплив режимів ЕШП на особливості плавлення витратних електродів зі сплаву 29НК. Показано, що основним чинником, що визначає форму і розміри торця витратного електроду є питома потужність переплаву. При цьому, зі збільшенням напруги плавки (при постійній швидкості подачі електроду) конусна частина торця електроду зменшується (торець електроду стає більш пласким), а зі збільшенням швидкості подачі електроду (при постійній напрузі плавки) – збільшується. При цьому, при сталих режимах ЕШП завжди існує циліндрична частина електроду, яка занурена у шлак.

2. Методом фізичного моделювання встановлено, що під дією поздовжнього магнітного поля індукцією 0,35 Тл швидкість потоків в шлаковій ванні збільшується з 22 до 420 мм/с, що, у свою чергу, впливає на особливості формування електродних крапель та траєкторії їх руху у ванні. Зокрема, це призводить до збільшення на 21...38% частоти відриву крапель електродного металу, при зменшенні на 8...24% їх середньої маси. Швидкість плавлення електроду при цьому збільшилась на 6...10 %. Під дією магнітного поля траєкторії руху крапель в шлаковій ванні набувають спіралеподібну форму, збільшуючи в 1,3...2,5 рази довжину траєкторій руху крапель в

шлаковій ванні і час їх перебування там, а також – зменшуючи кількість крапель, які потрапляють на дзеркало металеві ванни по її осі з 78 до 40 %.

3. Шляхом натурних експериментів при ЕШП титану встановлено, що застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,24 Тл призводить до збільшення на 3...5 % швидкості плавлення електроду, збільшення на 20...53 % частоти відриву крапель електродного металу та зменшення на 15...31 % їх середньої маси. Ці дані узгоджуються з результатами фізичного моделювання, що говорить о правомірності "якісної" оцінки впливу магнітного поля на крапельне перенесення металу при ЕШП, за допомогою розробленої фізичної моделі.

4. На основі аналізу умов кристалізації зливків ЕШП було запропоновано два підходи щодо керування структуроутворенням металу. Перший підхід оснований на зменшенні об'єму металеві ванни шляхом ведення електрошлакового процесу в імпульсному режимі із забезпеченням періодичності процесів плавлення електроду і пошарового формування зливка. Другий – на цілеспрямованому впливі на гідродинамічний стан рідкої металеві ванни, з використанням електричних і магнітних полів.

РОЗДІЛ 3

ЕШП З НЕСТАЦІОНАРНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ

3.1 Аналіз механізмів впливу нестационарних режимів електричного живлення на процес ЕШП

Одним зі способів впливу на процеси плавлення і кристалізації зливків при ЕШП є примусова періодична зміна теплового і гідродинамічного стану металеві ванни шляхом нестационарних режимів електричного живлення електрошлакового процесу [142-144]. Така можливість з'являється завдяки тому, що шлакова і металеві ванни мають значну теплову інерційність, через що є можливість в достатньо широких межах змінювати режими нестационарного живлення процесу ЕШП, впливаючи тим самим на тепломасоперенос і кристалізацію металу, при збереженні стабільності електрошлакового процесу і високої якості формування поверхні зливка.

Практично реалізувати процес ЕШП з нестационарними електричними режимами можна, наприклад, за рахунок періодичної зміни швидкості подачі витратного електроду, внаслідок чого буде періодично змінюватись струм плавки, а відповідно – і тепла енергія, що виділяється в шлаковій ванні. Другий шлях – це зміна (модуляція) потужності за рахунок періодичної зміни режимів роботи джерела живлення електрошлакового процесу.

Механізм впливу нестационарних режимів електричного живлення на процеси плавлення і кристалізації металу при ЕШП має комплексний характер.

По перше, за рахунок нестационарного (імпульсного) електроживлення з'являється можливість періодично змінювати теплову потужність, що виділяється в шлаковій ванні. Як відомо, кількість тепла Q , що виділяється в шлаковій ванні в одиницю часу визначається співвідношенням $Q=0,24I^2R$, де I – струм, що проходить крізь шлак; R – електричний опір шлакової ванни

[118]. В свою чергу величина струму залежить від електричної напруги на шлаковій ванні. Таким чином, під час пауз електроживлення припиняється тепловиділення в шлаковій ванні, зменшується перегрів рідкого металу, що сприяє більш інтенсивному зародженню кристалів. Зниження теплової потужності, що виділяється у шлаковій ванні, також призводить до відповідного зменшення об'єму металевої ванни, що має позитивно впливати на умови кристалізації металу зливка.

По друге, нестационарні (імпульсні) режими електроживлення призводять до періодичної зміни гідродинамічного стану шлакової і металевої ванн. Це пов'язане з тим, що на структуру і інтенсивність гідродинамічних течій шлаку і рідкого металу при ЕШП впливають сили електромагнітного походження, що утворюються в згаданих розплавах внаслідок взаємодії струму плавки з власним магнітним полем [43-44]. Зміна режимів електроживлення, а відповідно і струму плавки, призводить до зміни електромагнітної сили і інтенсивності гідродинамічних течій розплавів шлаку і металу. При цьому, за умов різкої зміни електричних режимів процесу ЕШП, наприклад при включенні і відключенні напруги, мають місце гідродинамічні "удари". Якщо такі зміни робляться періодично, то в цьому випадку утворюються вібрації, які впливають на фронт кристалізації і кристали, що ростуть.

Слід додати, що сили, які викликають термогравітаційну конвекцію при ЕШП, через періодичну зміну теплового стану ванни, також періодично змінюються. Таким чином, нестационарні режими електричного живлення дають можливість впливати на структуру і інтенсивність течій шлаку і рідкого металу, тобто на гідродинамічний стан ванни. При цьому, з'являється можливість, наприклад, створювати механічні коливання в ванні та інші ефекти для досягнення бажаних металургійних результатів.

Описані вище механізми, мають сприяти подрібненню литої структури металу, його гомогенізації і підвищенню ізотропності механічних властивостей.

Поряд з цим, нестаціонарне (імпульсне) електричне живлення дозволяє впливати на утворення і відрив крапель електродного металу (зменшувати розмір крапель і підвищувати частоту їх відриву), підвищувати продуктивність електрошлакового процесу та його тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) [144].

Таким чином нестаціонарне живлення електрошлакового процесу електричною енергією є одним із інструментів, яким потенційно можна впливати як на техніко-економічні характеристики переплаву, так і на якість електрошлакового металу.

У зв'язку з цим було поставлено завдання дослідити технологічні і металургійні особливості процесу ЕШП в умовах нестаціонарних режимів живлення електричною енергією. Для цього необхідно було розробити обладнання для імпульсного живлення електрошлакового процесу, дослідити нестаціонарні режими електричного живлення, вивчити закономірності формування зливка і його кристалізаційної структури.

На рис. 3.1 наведені різні варіанти нестаціонарних режимів електричного живлення електрошлакового процесу. Це можуть бути імпульси (періоди) електричного живлення, які чергуються з паузами, коли потужність відключається повністю (рис. 3.1 *а*) або частково (рис. 3.1 *б*), групи імпульсів, які чергуються з паузами (рис. 3.1 *в*), короткотривалі імпульси більш високої потужності на фоні стаціонарних режимів плавки (рис. 3.1 *г*), модуляція потужності по заданій програмі (рис. 3.1 *д*, *е*) та ін.

Усі згадані варіанти нестаціонарного живлення базуються на періодичній (циклічній) зміні потужності процесу, від робочих значень до деяких мінімальних значень (або, навпаки, до більш високих значень, рис. 3.1 *г*) з різною скважністю імпульсів, рівнем і формою модуляції. Загалом, аналіз різних варіантів нестаціонарних режимів живлення при ЕШП вказує на можливість реалізації двох принципово відмінних процесів.

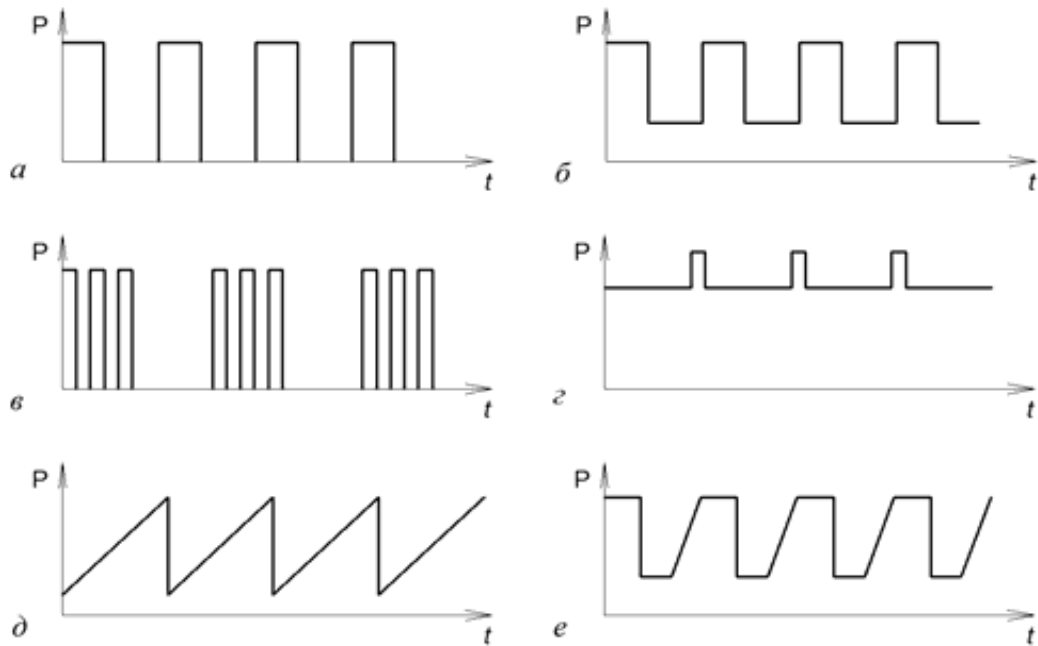


Рисунок 3.1 – Варіанти нестационарних режимів живлення процесу ЕШП електричною енергією (а–е дивись в тексті)

Якщо тривалість пауз електроживлення невелика (від десятої долі секунди до декількох секунд), тобто її нижнє значення співрозмірне з періодом краплеутворення, а верхнє не перевищує постійну часу шлакової ванни [224], або під час пауз виділяється достатня для плавлення металу теплова потужність, то тоді періодичність електричного живлення не викликає періодичності процесів плавлення електроду і кристалізації металу зливка. В цьому випадку імпульсне електроживлення впливає, головним чином, на гідродинамічний стан металургійної ванни викликаючи її механічні коливання і вібрації, а також на процеси краплеутворення металу на торці електроду.

В другому випадку, якщо тривалість пауз електроживлення достатньо велика (десятки секунд і більше) і тепло, яке виділяється в період пауз недостатнє для плавлення металу, то такий характер живлення призводить до періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації металу, викликаючи, тим самим, пошарове формування зливка по його висоті. В цьому випадку з'являється можливість керувати об'ємом металеві

ванни (суттєво зменшувати його), що позитивно впливає на умови кристалізації металу і сприяє придушенню ліквідаційних процесів.

Таким чином, обидва згаданих вище варіанти можуть бути ефективними для впливу на електрошлаковий процес. При цьому, очевидно, що параметри живлення, які викликають, або не викликають, періодичність процесів плавлення і кристалізації металу (тобто пошарове формування зливка) залежать як від марки сплаву так і, головним чином, від перерізу зливка, що виплавляють.

Аналіз можливості практичного використання нестационарних режимів живлення вказує на те, що вони обмежуються динамічними характеристиками теплових режимів основних складових робочої зони ЕШП, а саме: шлакової ванни, металеві ванни, витратного електроду і гарнисажної кірки.

Динамічні характеристики (наприклад, зміна температури або зміна геометричних параметрів при зміні введеної потужності) визначають ступінь інерційності теплових процесів в металургійній ванні. Вони можуть бути оцінені за допомогою такого параметру як постійна часу. Постійна часу характеризує тривалість протікання перехідного процесу. Фізичний її зміст полягає у проміжку часу, протягом якого реакція системи на відхилення параметру досягає $1/e$ від свого первісного значення (e – число Ейлера). У нашому випадку це проміжок часу, протягом якого, при зміні введеної потужності, температура в заданій точці впаде до рівня $\approx 36,8\%$, від свого первісного значення.

Як вже було вище зазначено шлакова і металева ванни являють собою значну теплову ємність і характеризуються високою тепловою інерційністю. Динамічні характеристики їх теплового режиму можуть бути описані передаточною функцією інерційної ланки першого порядку [225]:

$$W(P) = K_P / (1 + PT_{ш(М)}),$$

де: $K_P = \Delta t_{ш(М)} / \Delta P_{ш(М)}$ – коефіцієнт передачі по потужності ванни; $T_{ш}$ і $T_{М}$ – постійні часу теплового процесу шлакової і металеві ванн, відповідно; $\Delta t_{ш(М)}$, $\Delta P_{ш(М)}$ – відносна зміна потужності і температури ванни.

Ступінь впливу потужності на температуру шлакової ванни, який визначається коефіцієнтом передачі, складає 0,15...0,17 для лабораторних печей ЕШП (для зливків діаметром 0,1...0,2 м) і зменшується до 0,04...0,08 для великих промислових печей [225]. Це пов'язане із стабілізацією температури шлаку при плавленні великогабаритних електродів та обмеженням припустимих значень потужності процесу.

В роботі [226] наведені дані щодо впливу періодичної зміни потужності, що виділяється в шлаковій ванні, на коливання її температури. Зазначено, що при ЕШП з модуляцією потужності з періодом часу, рівним постійної часу шлакової ванни, і скважністю, що дорівнює двом, для зливків діаметром 110, 150 і 200 мм амплітуда коливань температури шлакової ванни становить 100, 120 і 150 °С (за умов, якщо максимальна температура шлаку становить 1800 °С).

Важливе значення при виборі режимів нестационарного живлення процесу ЕШП має ступінь інерційності шлакової і металеві ванн, яка характеризується постійною часу. В роботі [224] зазначено, що постійна часу росте зі збільшенням маси і розмірів зливка приблизно по квадратичній параболі. Постійна часу шлакової ванни складає десятки секунд для лабораторних печей (52, 76 і 110 с для зливків діаметром 110, 150 і 200 мм, відповідно) і десятки хвилин для промислових печей (рис. 3.2). При цьому, постійна часу металеві ванни ще вище і може складати сотні хвилин для великогабаритних промислових зливків.

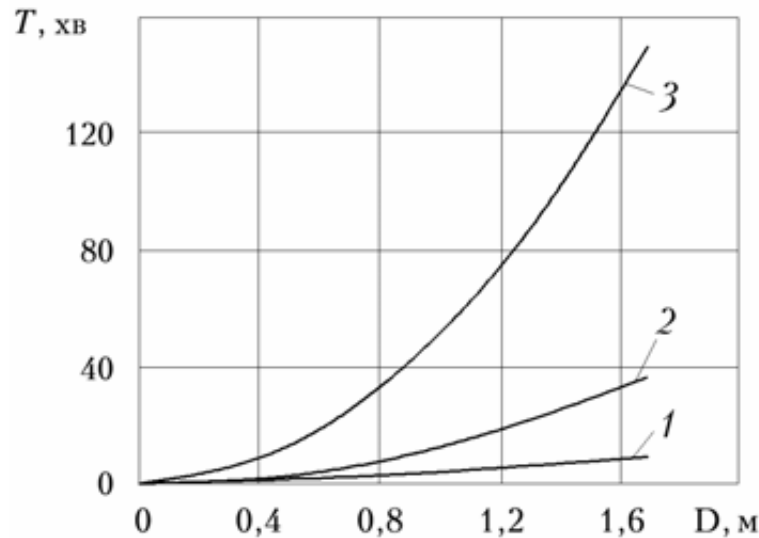


Рисунок 3.2 – Вплив діаметру зливка на постійні часу гарнісажу (1), шлакової ванни (2) і рідкої металеві ванни (3) [224]

Окрім динамічних характеристик теплового режиму шлакової і металеві ванн вагоме значення має і інерційність теплового режиму витратного електроду. За даними [224] нагрівання електроду відбувається інерційно, з постійною часу

$$T_E = \rho_E c_E d_E / 4\alpha_{EC},$$

де: ρ_E і c_E – питомі густина и теплоємність матеріалу електроду; d_E – лінійний розмір перерізу електроду (діаметр); α_{EC} – коефіцієнт тепловіддачі від електроду в навколишнє середовище.

Звідси випливає, що інерційність теплового режиму електроду пропорційна лінійному розміру його перерізу. За даними роботи [227] для електродів перерізом 240×240 мм постійна часу нагрівання становить біля 1 години. Ці данні свідчать про те, що ступінь інерційності теплових процесів в витратному електроді вище, ніж в шлаковій ванні і співрозмірна з аналогічними показниками в рідкометалеві ванні.

Важливим завданням при виборі режимів нестационарного живлення є забезпечення якісного формування бічної поверхні зливків ЕШП. Як відомо, якість формування зливка визначається товщиною і стабільністю формування гарнісажної кірки на поверхні зливка.

Динамічні характеристики гарнісажної кірки можуть бути описані передаточною функцією [224]

$$W_{\Gamma}(P) = K_{\Gamma P} / (1 + PT_{\Gamma}),$$

де: $K_{\Gamma P}$ – коефіцієнт передачі потужності гарнісажу; T_{Γ} - постійні часу теплового процесу гарнісажу.

Постійна часу гарнісажу T_{Γ} зростає з ростом ємності печі (рис. 3.2). Проте вона значно (у 3...10 разів) менша ніж аналогічний показник шлакової і металевій ванн. Для лабораторних печей вона складає від часток секунди до декількох секунд, для промислових печей може сягати декількох хвилин.

Загалом, аналіз наведених вище даних вказує на те, що перехідні теплові процеси в витратному електроді і металевій ванні відбуваються досить повільно і не є вирішальними при визначенні режимів нестационарного живлення. В шлаковій ванні теплові процеси є менш інерційними, що пов'язане з інтенсивним тепловим потоком від ванни до водоохолоджуваної стінки кристалізатора. Порівняння значень постійних часу теплових режимів витратного електроду, металевій ванни, шлакової ванни і гарнісажної кірки вказує на те, що саме гарнісаж є більш чутливим до зміни режимів живлення електрошлакового процесу. Це пов'язане як з малою тепловою ємністю гарнісажу (через його малий об'єм), так і з його інтенсивним охолодженням стінкою кристалізатора. Тому процес формування гарнісажної кірки, який суттєво впливає на якість формування поверхні зливків, є обмежуючим чинником при виборі режимів нестационарного живлення. Особливо це важливо при виплавці невеликих зливків діаметром 80...200 мм, де нестационарне живлення з паузами в декілька секунд може призводити до порушення якості формування зливка.

Слід наголосити, що розглянуті вище значення постійних часу теплових режимів відображують крайній випадок, коли потужність під час пауз відключається повністю. В протилежному випадку, якщо введена потужність зменшується частково, тривалість пауз живлення може значно перевищувати постійну часу гарнісажної кірки, при збереженні високої

якості формування бічної поверхні зливка. Очевидно, що важливим при цьому є також і форма кривих зміни потужності (рис. 3.1), зокрема фронту її зменшення і зростання, та інші параметри нестационарного живлення.

Встановлення взаємозв'язку між параметрами нестационарного живлення, стабільністю електрошлакового процесу, якістю формування поверхні злиwkів і їх макроструктурою вимагало проведення експериментальних досліджень при переплаві злиwkів різних сплавів і типорозмірів.

3.2 Дослідження режимів нестационарного живлення електрошлакового процесу

Як було відмічено вище реалізувати процес ЕШП з нестационарними електричними режимами можна за рахунок періодичної зміни режимів роботи джерела живлення або за рахунок періодичної зміни швидкості подачі витратного електроду. Необхідно було дослідити можливості практичної реалізації вказаних методів керування електричними режимами при ЕШП, оцінити стабільність електрошлакового процесу в умовах різних схем нестационарного живлення, визначити припустимі діапазони і характерні особливості зміни електричних параметрів процесу.

3.2.1 Нестационарне живлення шляхом зміни режимів роботи силового трансформатора

Для проведення досліджень процесу ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення необхідно було провести реконструкцію і дооснащення силового трансформатора і системи керування електричними параметрами електрошлакової печі. Схема відповідної експериментальної установки для ЕШП наведена на рис. 3.3.

Для плавного регулювання потужності електрошлакового процесу в первинну обмотку силового трансформатора ТШП-10000-1 був доданий блок водоохолоджуваних керуючих тиристорів таблеткового типу Т253-800-24,

включених зустрічно-паралельно. Схема управління тиристорами дозволяє плавно регулювати напругу в процесі плавки в діапазоні 0...72 В, при струмі до 10 кА, і передбачає швидкодіючий захист від перевантажень. Для реалізації нестационарних режимів роботи трансформатора в ланцюг управління тиристорами включений програмуєчий логічний модуль Zelio Logic SR2 B1218D. Даний модуль дозволяє з дискретністю 0,1 с, в широких межах (від 0,1 до 999 с), керувати тривалістю імпульсів і пауз напруги у вторинному ланцюзі силового трансформатора, реалізуючи різні схеми імпульсного живлення (імпульс - пауза, група імпульсів - пауза, різну глибину модуляції і т.д.).

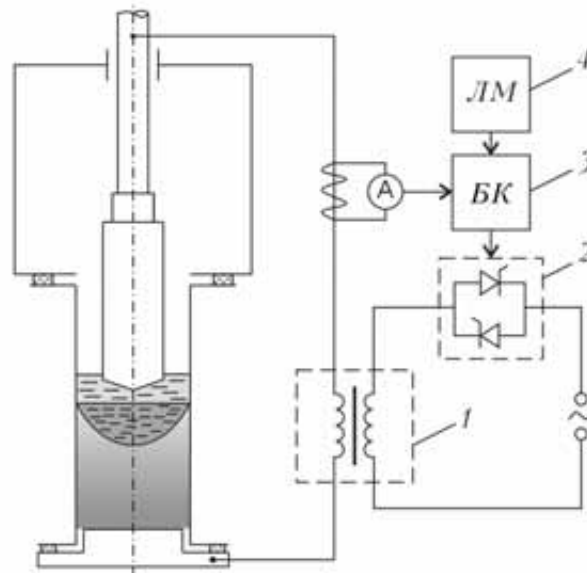


Рисунок 3.3 – Схема експериментальної установки для ЕШП з нестационарними режимами електричного живлення: 1 – силовий трансформатор ТШП-10000-1; 2 – блок тиристорів; 3 – блок керування тиристорами; 4 – програмуєчий логічний модуль

Експериментальні дослідження проводили при виплавці титанових зливків діаметром 84 і 120 мм під флюсом АН-Т4. Схеми імпульсних режимів електричного живлення, які досліджували, наведені на рис. 3.4. В усіх випадках потужність процесу змінювали за рахунок періодичної зміни електричної напруги у вторинному ланцюгу джерела живлення, при

незмінній швидкості подачі електроду. Тривалості імпульсів і пауз потужності змінювали в межах $t_i = 1 \dots 10$ с, $t_n = 1 \dots 15$ с.

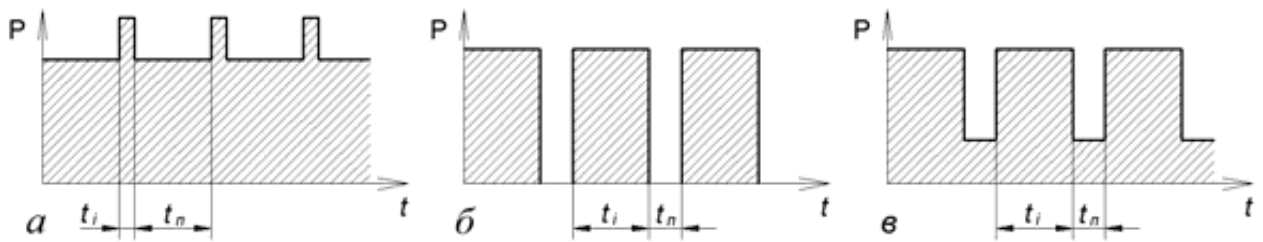


Рисунок 3.4 – Досліджувані варіанти нестационарних режимів живлення процесу ЕШП електричною енергією: *а* – циклічне підвищення потужності; *б*, *в* – циклічне зменшення потужності (t_i , t_n – тривалість імпульсу і паузи відповідно)

Ідея застосування схеми електричного живлення, яка наведена на рис. 3.4 *а*, полягала в періодичному, короткотривалому підвищенні потужності процесу від робочих значень до максимально припустимих з метою циклічного, електродинамічного і гідродинамічного впливу на металургійну ванну. В експериментах це здійснювали шляхом періодичного підвищення напруги на шлаковій ванні від 30...36 до 52...70 В. Тривалість імпульсів підвищення напруги становила $t_i = 1 \dots 4$ с, при тривалості пауз $t_n = 8 \dots 15$ с.

Проведені експерименти частково підтвердили можливість практичної реалізації даної схеми живлення електрошлакового процесу.

При періодичному підвищенні електричної напруги на шлаковій ванні з 30 до 52 В (тобто на 73 %), в усьому досліджуваному діапазоні тривалості імпульсів t_i , електрошлаковий процес протікав стабільно.

В експериментах з періодичним підвищенням напруги на ванні з 30 до 60 В (на 100 %) спостерігалось часткове порушення стабільності електрошлакового процесу, яке виявлялося у виникненні періодичних дугових розрядів між витратним електродом і шлаковою ванною. При тривалості імпульсів $t_i = 1$ с цей ефект був мало помітним, при тривалості

імпульсів $t_i = 2...4$ с дугові розряди були більш вираженими. Проте характер і інтенсивність розрядів дозволяли продовжувати процес плавки з отриманням зливків з бездефектною бічною поверхнею.

В експериментах з підвищенням напруги на ванні з 30 до 70 В (на 133 %), при тривалості імпульсів $t_i > 2$ с, дугові розряди і викликане ними розбризкування шлаку робили процес ЕШП нестабільним.

На рис. 3.5 наведені фрагменти реєстрограм, які показують характер зміни електричного струму при періодичному збільшенні напруги в процесі плавки (при незмінній швидкості подачі витратного електроду).

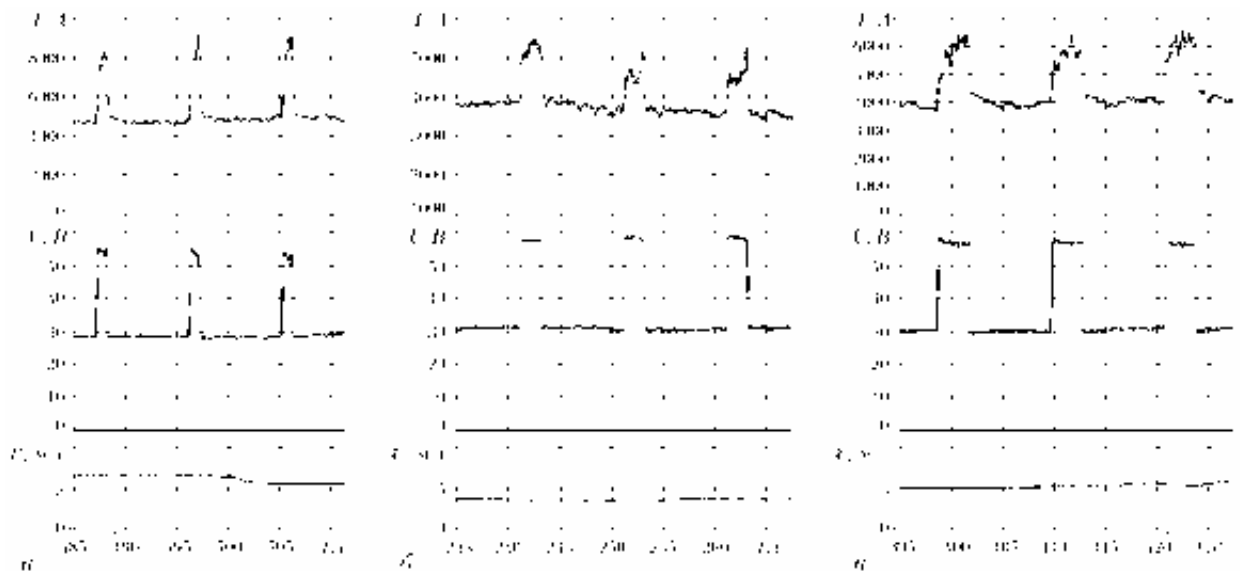


Рисунок 3.5 – Фрагменти реєстрограм режимів ЕШП з періодичним підвищенням напруги на ванні: *a* – $t_i=1$ с, $t_{\text{п}} = 8$ с; *б* – $t_i=2$ с, $t_{\text{п}} = 8$ с; *в* – $t_i=3$ с, $t_{\text{п}} = 8$ с (в усіх випадках флюс АН-Т4)

Аналіз наведених кривих вказує, що при короткотривалих імпульсах ($t_i < 1$ с) струм плавки підвищується пропорційно збільшенню напруги $U_i/U_{\text{п}}=I_i/I_{\text{п}}$, де: U_i , $U_{\text{п}}$ – напруга на ванні під час імпульсу і паузи; $I_i/I_{\text{п}}$ – струм плавки під час імпульсу і паузи, відповідно. Тобто, збільшення напруги на ванні в два рази призводить до відповідного збільшення струму плавки (рис. 3.5 *a*). Проте, при більш тривалих імпульсах $t_i = 2...3$ с, збільшення струму плавки відбувається менш інтенсивно $U_i/U_{\text{п}}=k \cdot (I_i/I_{\text{п}})$, де: $k = 1,2...1,6$ (рис. 3.5

б, в). Це можна пояснити зміною природи електричної провідності, коли при збільшенні напруги електрошлаковий процес частково переходить в дуговий. Дані результати вказують на те, що довготривалі імпульси підвищення напруги не призводять до бажаного, пропорційного підвищення струму плавки і, відповідно, до формування потужних гідродинамічних впливів на фронт кристалізації зливка.

При виборі режимів імпульсного живлення також слід враховувати динаміку зростання струму плавки, при збільшенні електричної напруги на ванні. Якщо характер зміни електричної напруги обмежений лише швидкодією тиристорів, то зміна струму плавки залежить від багатьох факторів: індуктивності короткого кола печі, динаміки зміни температури шлаку, процесів утворення і відриву крапель металу на торці витратного електроду та ін. Аналіз кривих, наведених на рис. 3.6 свідчить, що при різкому збільшенні електричної напруги збільшення і стабілізація струму відбувається протягом 0,7...0,8 с. При цьому, протягом перших 0,2...0,3 с струм зростає досить швидко (до 80...90 % від свого кінцевого значення), потім швидкість його зростання уповільнюється і після цього струм стабілізується.

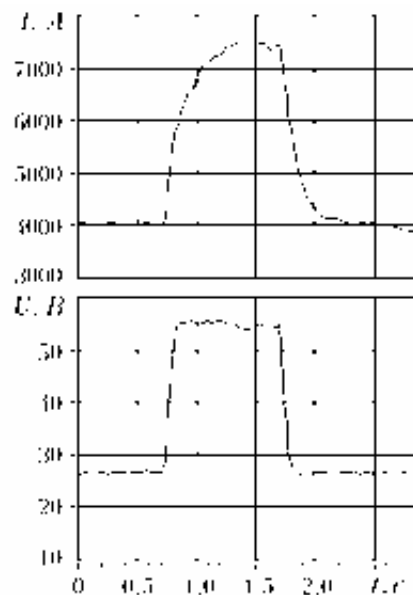
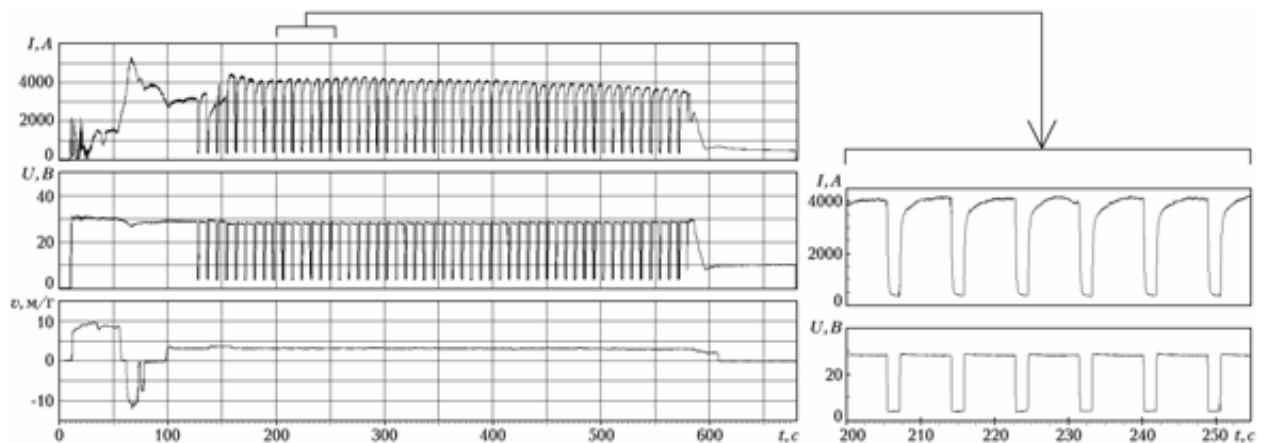


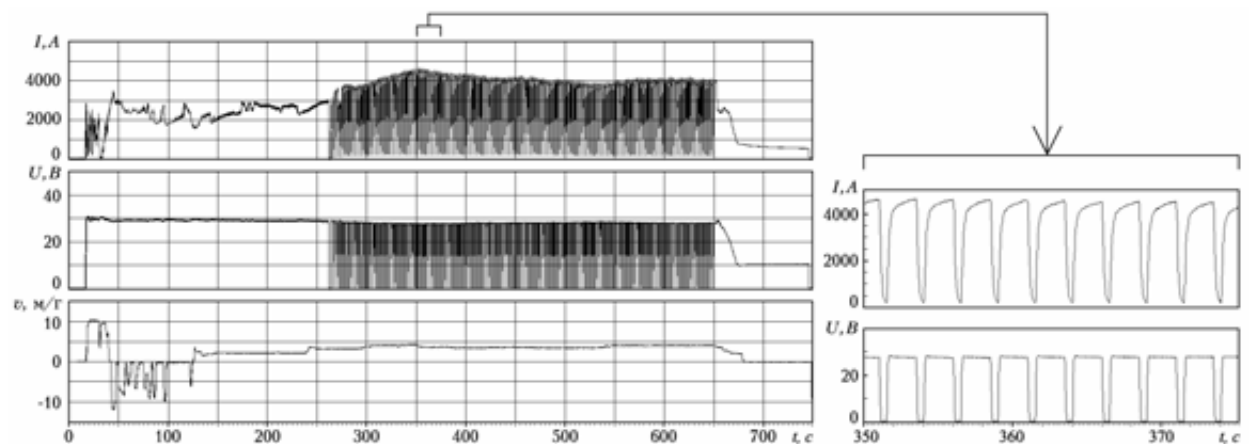
Рисунок 3.6 – Динаміка зміни струму плавки при імпульсному підвищенні напруги на ванні з 28 до 56 В (флюс АН-Т4)

На відміну від періодичного підвищення потужності процесу інші досліджувані схеми нестаціонарних режимів електричного живлення полягали в періодичному, короткотривалому зменшенні потужності процесу від робочих значень до нуля (рис. 3.4 б) або до деякого мінімального значення (рис. 3.4 в). В цих експериментах тривалості імпульсів потужності змінювали в межах $t_i = 2...10$ с, а тривалості пауз в межах – $t_{п} = 0,5...4$ с. Скважність (прогальність) імпульсів становила 2...6.

Проведені експерименти показали, що у всьому досліджуваному діапазоні режимів імпульсного живлення електрошлаковий процес протікав без порушення стабільності. Характерні реєстрограми режимів ЕШП, з нестаціонарним електроживленням, наведені на рис. 3.7.



a)



б)

Рисунок 3.7 – Реєстрограми режимів ЕШП з нестаціонарним електроживленням: а – $t_i=7$ с, $t_{п} = 1,4$ с; б – $t_i=2$ с, $t_{п} = 0,5$ с (флюс АН-Т4)

В першому випадку електричне живлення здійснювали імпульсами змінної напруги тривалістю 7 с при паузах 1,4 с, під час яких напругу знижували з 30 до 4 В (рис. 3.7 а). В другому – тривалість імпульсів напруги на ванні становила 2 с при паузах 0,5 с, під час яких напругу відключали повністю (рис. 3.7 б). Ідея застосування даних режимів живлення полягала в тому, щоб створити коливання (вібрації), частота яких наближається до частоти власних коливань металевої ванни, з метою можливого досягнення ефекту резонансу [142].

Наведені реєстрограми показують, що відповідно до зміни електричної напруги на ванні циклічно змінюється струм плавки. Аналогічно випадку з імпульсним збільшенням потужності (рис. 3.6) фронт наростання струму має більш пологі форму, ніж фронт наростання напруги (рис. 3.8).

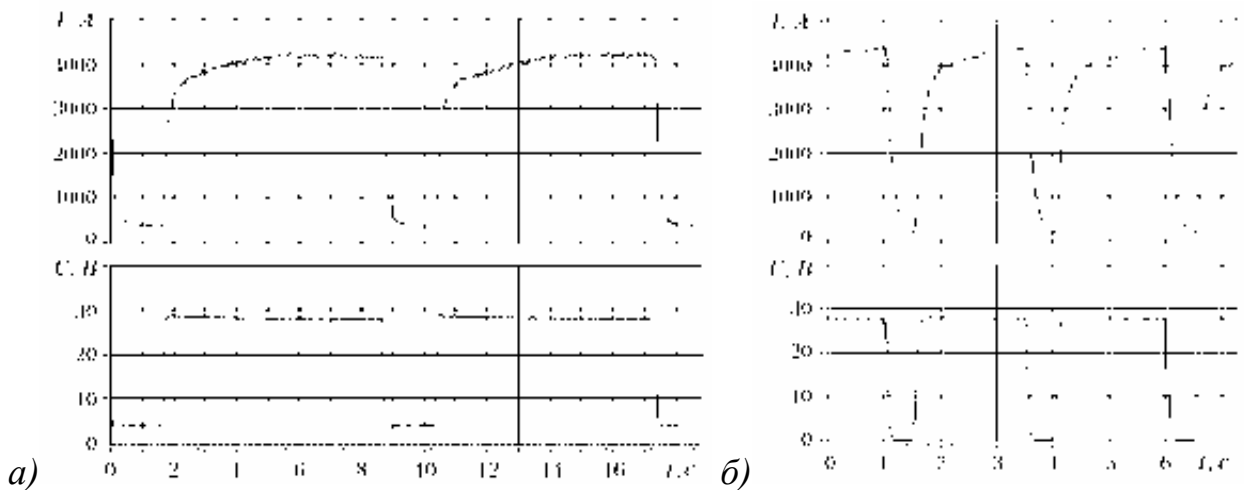


Рисунок 3.8 – Динаміка зміни струму плавки при ЕШП з нестационарним електроживленням: а – $t_i=7$ с, $t_n = 1,4$ с, $U_i=28$ В, $U_n=4$ В; б – $t_i=2$ с, $t_n = 0,5$ с, $U_i=28$ В, $U_n=0$ В (флюс АН-Т4)

В середньому, при імпульсному збільшенні електричної напруги збільшення струму відбувається протягом 0,7...1,5 с (на величину до 80...90 % від свого кінцевого значення), а його стабілізація протягом 2,5...3 с. Ці значення вище, ніж у випадку з імпульсним збільшенням потужності. Тобто, зростання і стабілізація струму плавки після пауз електричного живлення

відбувається більш повільно. Ймовірно, це пов'язане з охолодженням шлакової ванни під час пауз живлення, а також з нелінійністю зміни електроопору шлаку, при зміні його температури.

Результати експериментів з періодичним зменшенням потужності показали, що зменшення введеної потужності при плавках в імпульсному режимі (в досліджуваному діапазоні) викликало зменшення швидкості плавлення витратного електроду і відповідне зменшення продуктивності процесу в середньому на 3...5%. Однак, при цьому, питомі витрати електроенергії, у порівнянні з плавками в стаціонарному режимі (з безперервним електроживленням), знизились в середньому на 7...10 %. Тобто, в цілому, процес ЕШП з імпульсним електроживленням є більш енергоефективним.

Очевидно, це пов'язане з рядом факторів. По перше, імпульсне електроживлення призводить до періодичної перебудови течій шлаку, що в цілому сприяє інтенсифікації гідродинамічних і тепломасообмінних процесів на поверхні поділу *витратний електрод – шлакова ванна*. По друге – гідродинамічні "удари", що виникають в момент включення і відключення електричної напруги, і створені ними вібрації, сприяють збільшенню частоти відриву крапель електродного металу і зменшенню товщини плівки рідкого металу на торці витратного електроду [228]. Сукупність цих факторів призводить до підвищення теплового ККД плавки, а відповідно і до зменшення питомих витрат електроенергії. Ці дані погоджуються з результатами інших дослідників, які теж вказують на підвищення теплового ККД при ЕШП в імпульсному режимі [144].

3.2.2 Нестационарне живлення шляхом імпульсної подачі витратного електроду

Як відомо, при класичній схемі ЕШП з витратним електродом, струм плавки, а відповідно і потужність, що виділяється в шлаковій ванні, залежать від швидкості подачі витратного електроду. Чим більше швидкість подачі,

тим більше глибина занурення електроду у шлак, менше міжелектродний проміжок, а відповідно – менше електроопір ділянки *витратний електрод* – *металева ванна* і вище струм плавки. Тому нестационарні режими живлення електрошлакового процесу можуть бути досягнуті шляхом періодичної зміни швидкості подачі витратного електроду. Імпульсна подача витратного електроду також потенційно може сприяти постійній перебудові структури течій в шлаковій ванні і чинити позитивний вплив на процес виплавки і формування зливка.

Для оцінки можливості і ефективності керування режимами нестационарного живлення при ЕШП, шляхом імпульсної подачі витратного електроду, були проведені експериментальні дослідження, які здійснювали при переплаві витратних електродів діаметром 84 мм з технічного титану в кристалізаторі 120 мм під флюсом АН-Т4. Для реалізації імпульсної подачі електроду в електричний ланцюг механізму подачі був доданий релейний блок, що дозволило в автоматичному режимі, по заздальгідь заданій програмі, змінювати швидкість подачі електроду. В експериментах, після наведення шлакової ванни, подачу електроду здійснювали в імпульсному режимі (переривчасто, від робочих значень до зупинки), з тривалістю імпульсів подачі 7 с і тривалістю пауз 1,0...4,0 с. При цьому, електричну напругу на ванні залишили незмінною.

Проведені експерименти показали можливість ведення процесу ЕШП з імпульсною подачею витратного електроду без порушення його стабільності (в досліджуваному діапазоні) і формуванням зливка з якісною бічною поверхнею.

На рис. 3.9 наведені характерні фрагменти реєстрограм режимів ЕШП з імпульсною подачею витратного електроду. Отримані дані свідчать, що при періодичних паузах подачі електроду тривалістю 1,5 с струм плавки залишається практично незмінним (рис. 3.9 *a*). Тобто, зупинки подачі тривалістю 1,5 с не призводили до значної зміни в положенні оплавленого торця електроду в шлаковій ванні, а відповідно, і до помітного впливу на

струм плавки. При більш тривалих паузах подачі електроду – 2,5 с спостерігалась незначна дестабілізація (коливання) струму плавки (рис. 3.9 б). Проте, змінення струму не мало закономірного періодичного характеру, який би відповідав періодам імпульсів і пауз подачі електроду. Збільшення пауз подачі електроду до 4,0 с вже помітно відобразилося на струмі плавки (рис. 3.9 в). На реєстрограмі чітко помітні характерні періоди зменшення і збільшення струму, які повторюють, з певною затримкою, періоди імпульсів і пауз подачі електроду. Максимум струму плавки припадав на момент зупинки подачі електроду, мінімум струму плавки спостерігався, в середньому, через 4...5 с після зупинки електроду, тобто в момент, коли електрод вже знов починали подавати в шлакову ванну (рис. 3.9 в). Це пов'язане з інерційністю процесів тепломасопереносу і плавлення витратного електроду. Слід підкреслити, що наведені вище результати були отримані при ЕШП відносно невеликих електродів діаметром 84 мм. Очевидно, що при збільшенні перерізу витратного електроду інерційність процесів його плавлення буде збільшуватись, а ефективність оперативного керування електричними режимами - зменшуватись.

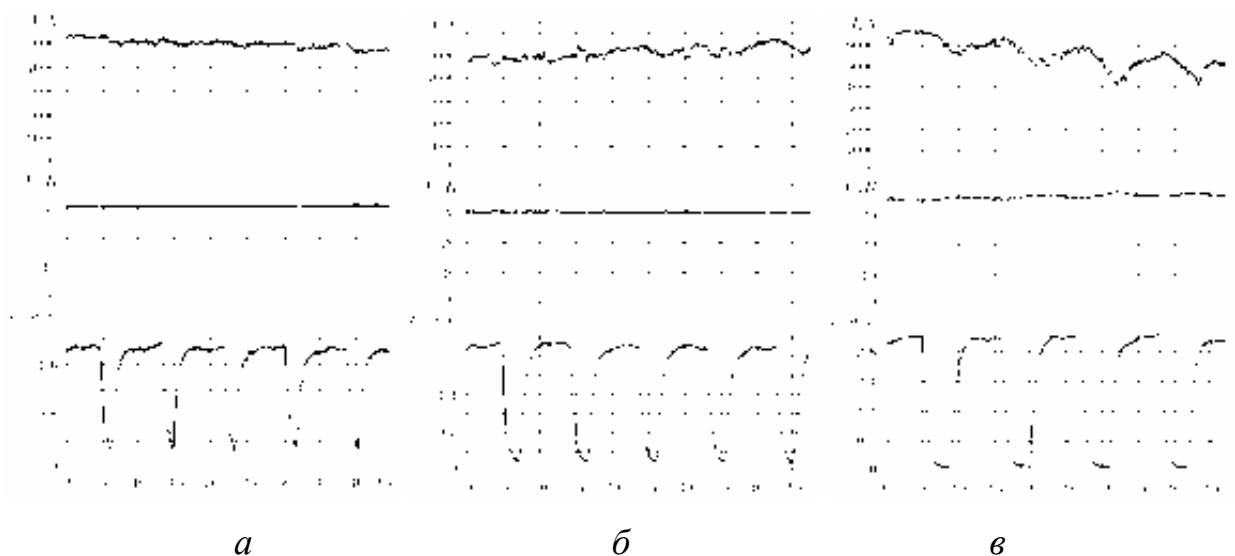


Рисунок 3.9 – Регістрограми режимів ЕШП з імпульсною подачею витратного електроду діаметром 84 мм: *а* – $t_i=7$ с, $t_n = 1,5$ с; *б* – $t_i=7$ с, $t_n = 2,5$ с; *в* – $t_i=7$ с, $t_n = 4,0$ с (флюс АН-Т4)

Загалом, проведені експерименти показали принципову можливість ведення процесу ЕШП з імпульсною подачею витратного електроду і можливість, завдяки цьому, циклічного змінення потужності переплаву. Проте, через інерційність процесу плавлення витратного електроду, оперативне імпульсне керування режимами живлення виявилось малоефективним. Таке керування може бути ефективним лише при переплаві електродів малого діаметру, наприклад, при електрошлаковому зварюванні або наплавленні електродним дбротом.

3.3 Вплив нестационарних режимів електричного живлення на формування поверхні і структуроутворення зливків ЕШП

Експериментальні дослідження проводили при переплаві витратних електродів діаметром 45...75 мм з титану марки Grade 4 у кристалізаторах діаметром 84, 110 мм і перерізом 80×80мм. В усіх випадках потужність процесу змінювали за рахунок періодичної зміни електричної напруги у вторинному ланцюгу джерела живлення. Швидкість подачі електроду під час імпульсів і пауз електричної напруги залишалась постійною. За результатами експериментів оцінювали стабільність електрошлакового процесу, формування бічної поверхні зливків і їх макроструктуру.

Основні параметри експериментальних плавок надані в таблиці 3.1.

Плавки № 510 і 513 проводили по схемі, наведеній на рис. 3.4 а, з періодичним підвищенням електричної напруги з 36 до 52 В. Тривалість імпульсів підвищення напруги становила 2 і 4 с, тривалість пауз – 15 с.

В обох випадках процес плавки проходив без порушення стабільності. Будь-які дефекти на поверхні зливків відсутні, якість їх формування можна оцінити як "відмінну", характерну для зливків ЕШП. При цьому, періодичне підвищення напруги не відобразилося помітним чином на формуванні бічної поверхні зливків.

Таблиця 3.1 – Режими експериментальних плавки з нестаціонарним електроживленням*

№ плавки	V _{ел} , м/ГОД	d, мм		t, с		U, В		I, А		Стабільність процесу ЕШП	Формування поверхні зливка	Характеристика макроструктури
		эл-да	зливка	імпульс	пауза	імпульс	пауза	імпульс	пауза			
513	3,5...4,5	45	84	2	15	52	36	3800...4500	3000...3300	стабільний	відмінна	стовбчаста, орієнтована
510	3,3...4,1	45	84	4	15	52	36	3800...4500	3000...3300	стабільний	відмінна	стовбчаста, орієнтована
308	2,2...2,6	45	84	6	3	25	0	2500...3200	0	відносно стабільний	незадовільна	не досліджували
825	3,0...3,5	48	84	7	1,4	28	4	3900...4100	400	стабільний	добра	дрібнозерниста, розорієнтована
826	3,0...3,7	48	84	2	0,5	28	0	4000...4150	0	стабільний	відмінна	дрібнозерниста, розорієнтована
831	3,2...3,9	48	□80×80	7	1,4	30	4	4500...5200	600	стабільний	задовільна	дрібнозерниста, змішана
309	1,5...2,0	75	110	3...7	1...5	28...36	0	5200...5800	0	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
310	1,4...1,8	75	110	5...7	5...7	34...36	0	6000...6500	0	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
311	1,4...1,8	75	110	2...5	4...7	34...36	0	6000...7000	0	відносно стабільний	добра	крупнозерниста, стовбчаста, орієнтована
313	1,5...1,8	75	110	2...5	2...5	34...36	0	5000...6000	0	відносно стабільний	добра	крупнозерниста, стовбчаста, орієнтована

*Флюс АН-Т4, Н_{шл.ванни}=30...40 мм

Макроструктура зливків виплавлених з циклічним підвищенням потужності наведена на рис. 3.10. За виключенням головної частини зливків, де спостерігається усадкова раковина, макроструктура металу щільна, без пор, включень, тріщин та інших дефектів металургійного походження.

В обох випадках структура складається, переважно, з витягнутих в напрямку тепловідведення, стовбчастих кристалів, які сходяться по вісі зливка під кутом $98...105^{\circ}$. Середній розмір таких кристалів складає $(14...25) \times (3...6)$ мм. В периферійних ділянках (біля бічної поверхні) є зони шириною 5...8 мм більш дрібних кристалів розміром $(1...2) \times (3...6)$ мм, сформованих під впливом водоохолоджуваних стінок кристалізатора. Помітної різниці в структуроутворенні зливків № 510 і 513 не виявлено.

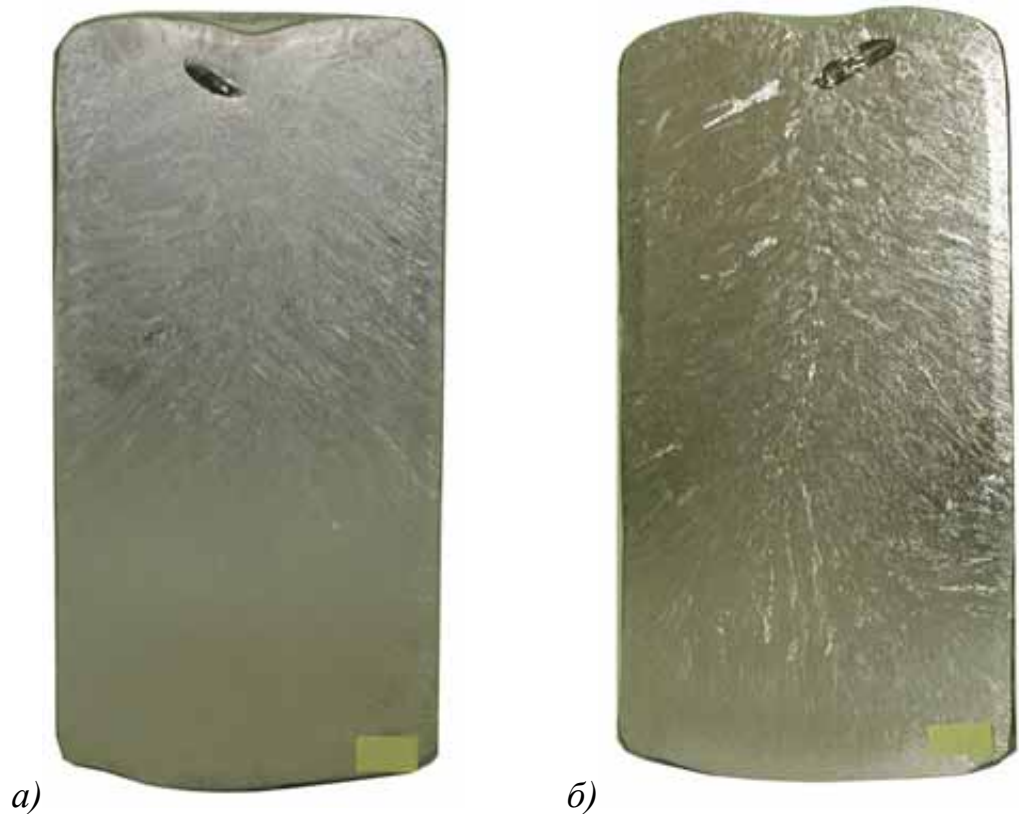


Рисунок 3.10 – Макроструктура титанових зливків, виплавлених з циклічним підвищенням потужності: *а* - плавка № 510, *б* - плавка № 513

Загалом, структура зливків № 510 і 513 є типовою для зливків ЕШП. Це свідчить про малу ефективність циклічного підвищення напруги на ванні (в досліджуваних діапазонах) для впливу на структуроутворення металу.

Вочевидь, викликаний такою нестаціонарністю режимів електричного живлення фізичний вплив на кристали, що ростуть, є недостатнім для помітної зміни характеру їх формування і морфології.

Наступні експерименти проводили по іншій схемі з періодичним зменшенням потужності процесу від робочих значень до нуля (плавки 308-311, 313, 826) або до 4 В (плавки 825, 831). В цих експериментах тривалості імпульсів потужності змінювали в межах $t_i = 2...7$ с, а тривалості пауз в межах $t_{п} = 0,5...7$ с (табл. 3.1). Плавки проводили при виплавці циліндричних зливків діаметром 84 і 110 мм а також зливків з квадратним поперечним перерізом 80×80 мм.

На рис. 3.11 *а, б* наведено зовнішній вигляд і бічну поверхню циліндричного і "квадратного" зливків, виплавлених при схожих режимах електричного живлення ($t_i = 7$ с, $t_{п} = 1,4$ с).



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд і бічна поверхня зливків титану, виплавлених з періодичним зменшенням потужності: *а* – плавка №825, *б* – плавка №831, *в* – плавка №826

В обох випадках зливки мають відносно добре сформовану бічну поверхню. На поверхні зливків спостерігаються незначні гофри, викликані імпульсним тепловкладенням. Механізм утворення таких гофр пов'язаний зі зменшенням теплового потоку під час паузи електроживлення і відповідним циклічним збільшенням товщини шлакового гарнісажу на поверхні зливка. Проте, глибина таких гофр становить в середньому 0,1...0,25 мм, що не погіршує помітно якість поверхні зливка. Зливки аналогічних розмірів, але виплавлені при тривалості паузи $t_{\text{п}} = 0,5$ с, гофр на своїй поверхні немає (рис. 3.11 в). Тобто короткотривале ($t_{\text{п}} = 0,5$ с) зменшення напруги на ванні ніяким чином не відображається на якості формування бічної поверхні зливка. Дані експерименти свідчать про те, що постійна часу гарнісажу для зливків даних розмірів вище ніж 0,5 с і становить приблизно 0,8...1,2 с. Паузи електроживлення, тривалість яких значно перевищує наведені значення призводять до формування грубих дефектів на поверхні зливка (табл. 3.1, плавка № 308).

Макроструктури поздовжнього перерізу зображених на рис. 3.11 зливків представлені на рис. 3.12. В усіх випадках метал характеризується щільною структурою, відсутністю шлакових включень, несплавлень, усадочної пористості та інших металургійних дефектів. Шари кристалізації або зони з відмінною травимістю металу, які можуть бути викликані паузами електроживлення, на макроструктурі зливків відсутні.

Периферійні ділянки зливків (біля бічної поверхні) мають дрібнозернисту глобулярну структуру, з середнім характерним розміром зерен 0,5...1,5 мм. Ширина цієї зони у зливка № 825 становить близько 13 мм, а у зливків №№ 826, 381 – 10...11 мм. У центральній частині зливків спостерігаються як глобулярні зерна, так і витягнуті в напрямку тепловідведення стовпчасті зерна. Середній їх розмір становить 1,87×8,5 мм (зливки № 825), 1,95×10,15 мм (зливки № 826) і 2,8×15,3 мм (зливки № 831).

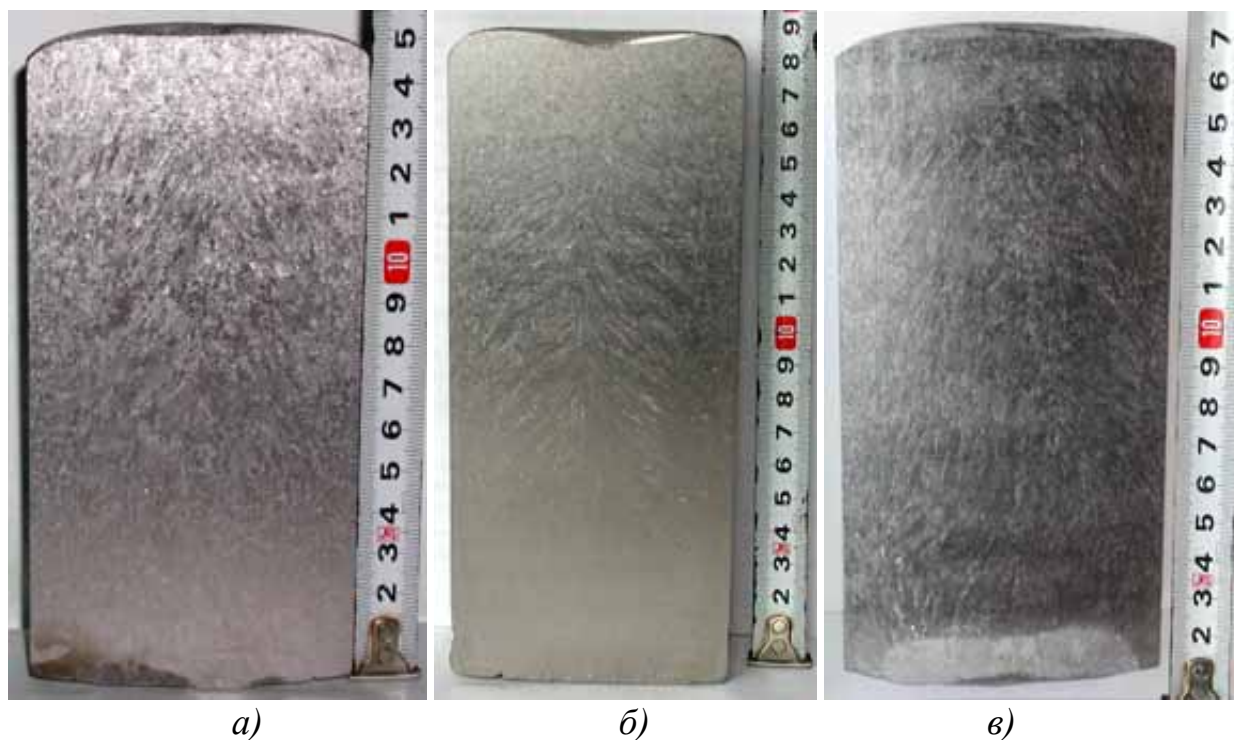


Рисунок 3.12 – Макроструктура титанових зливків, виплавлених з періодичним зменшенням потужності: а - плавка №825, б - №831, в - №826

Структуру зливків №№ 825 і 826 можна охарактеризувати як дрібнозернисту, розорієнтовану, з відсутністю зони "слабини" по осі зливків. Проте, у зливка №831, попри деяке подрібнення зерен, все ж таки спостерігається направленість структури з формуванням зони зустрічної кристалізації по осі зливка. Очевидно, це пов'язане з вищою на 6...9 % швидкістю переплаву і на 20 % потужністю процесу (під час пауз на 50 %), які були застосовані при виплавці даного зливка (табл. 3.1).

В цілому, аналіз макрошліфів зливків свідчить про подрібнення (зменшення в 1,7...3 рази розміру зерна) і гомогенізацію їх макроструктури, у порівнянні з металом аналогічного титанового зливка $\varnothing 84$ мм, виплавленого традиційним способом при стаціонарних режимах, для якого характерна яскраво виражена "ялинкова" структура з розмірами дендритів, співрозмірними з радіусом зливка (рис.3.13).



Рисунок 3.13 – Макроструктура титанового зливка \varnothing 84 мм, виплавленого традиційним ЕШП без зміни потужності

Очевидно, що зазначений ефект обумовлений рядом факторів, насамперед зміною механічного (гідродинамічного) стану ванни за рахунок пауз електроживлення внаслідок чого, при включенні і виключенні електричної напруги здійснюються гідродинамічні "удари" по зростаючим в двофазній зоні кристалітам. Іншими словами, імпульсне електроживлення викликає механічні коливання розплаву металеві ванни, які сприяють фрагментації (руйнуванню) дендритів. Цей ефект підсилюється циклічною зміною температурного стану ванни (температурного градієнта на фронті кристалізації) за рахунок пауз електроживлення.

Згадані вище ефекти були отримані при виплавці невеликих зливків діаметром 84 мм і перерізом 80×80 мм. Тому наступні плавки №№ 309-311, 313 проводили при виплавці зливків більшого діаметру – 110 мм (табл. 3.1). При цьому, при виплавці зливків №№ 309, 310 у витратні електроди була додана мідь (дискретно, в окремі ділянки по висоті електродів) для фіксації форми металеві ванни.

В усіх випадках процес плавки проходив стабільно, з формуванням зливків з бездефектною бічною поверхнею. При паузах електроживлення 1...3 с гофр на поверхні зливків практично не було. Це підтверджує, що постійна часу гарнісажу збільшується зі збільшенням діаметру зливка. При більш довгих паузах – 4...7 с спостерігались незначні гофри, глибиною не більше 0,2 мм, викликані порційним тепловкладенням.

Макрошліфи поздовжнього перерізу зливків наведені на рис. 3.14. На формування структури зливків №№ 309, 310 помітно вплинула модифікуюча дія міді. Тому розглядати характер структуроутворення і розміри зерен цих зливків з точки зору впливу на них нестационарних режимів живлення – некоректно. В той же час, поздовжні макрошліфи зливків №№ 309, 310 наочно ілюструють форму і глибину металевої ванни. Глибина ванни складе $0,5...0,6 \times D_{\text{зл}}$ що є характерним для зливків ЕШП. Більш глибока ванна зливка № 310 пояснюється більш високими (на 9...13 %) напругою і струмом переплаву, у порівнянні з плавкою № 309 (табл. 3.1). Очевидно, що нестационарне електроживлення змінює тепловкладення в шлакову ванну, і повинне впливати на параметри металевої ванни. Проте, в досліджуваному діапазоні параметрів живлення, помітного впливу на форму і глибину металевої ванни не виявлено. Це говорить про те, що суттєвого зменшення глибини металевої ванни можна досягти лише при більш тривалих паузах електричного живлення.

На рис. 3.14 *в,г* наведена макроструктура зливків №№ 311 і 313. В обох випадках вона складається з великих стовпчастих кристалів, орієнтованих в напрямку тепловідведення. Будь-яких ознак пошарової кристалізації та наслідків пауз електроживлення на макроструктурі зливків не виявлено. Середній розмір кристалів складає 6,8×34,6 мм (зливки № 311) і 6,9×31,4 мм (зливки № 313), тобто їх розміри мало відрізняються. Більшу різницю має кут, під яким кристали зустрічаються по осі зливка. Він становить 90° для зливка № 311, і 128° для зливка № 313. Збільшення кута зустрічі кристалів пов'язане з більшою швидкістю переплаву для зливка № 313 (см. табл. 3.1).

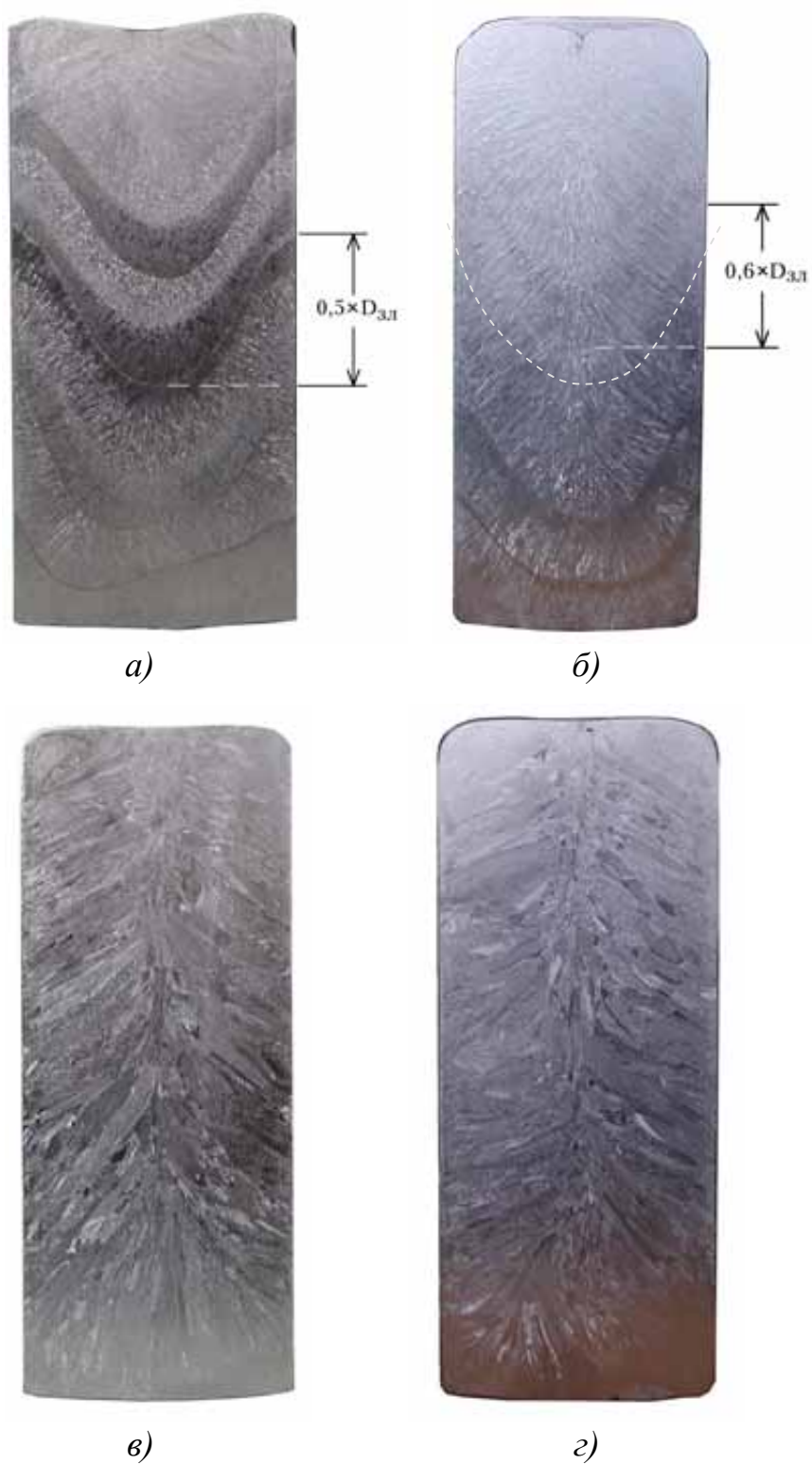


Рисунок 3.14 – Макрошліфи титанових зливків діаметром 110 мм, виплавлених з періодичним зменшенням потужності: а – плавка № 309, б – № 310, в – № 311, з – № 313

Загалом, аналіз макроструктури зливків №№ 311 і 313 вказує, що вона є типовою для зливків ЕШП (рис. 3.14 *в,г*). Тобто, позитивні ефекти подрібнення і розорієнтації структури металу, які були отримані за рахунок нестационарних режимів електричного живлення при виплавці зливків діаметром 84 мм, не були підтверджені при виплавці зливків більшого діаметру.

Це пов'язане з рядом факторів. Так збільшення перерізу зливка призводить до зменшення щільності струму, що проходить в металевій ванні і крізь фронт кристалізації. Відповідно зменшуються МГД ефекти від зміни електричних режимів процесу і силова дія потоків рідкого металу на кристали, що ростуть. Крім того, збільшення об'єму рідкої металевої ванни збільшує її теплову інерційність (збільшується постійна часу металевої ванни) і теплові ефекти від пауз електроживлення нівелюються.

Узагальнюючи результати подальших експериментів з нестационарним живленням для зливків різних діаметрів надані на рис. 3.15. Вони показують, що ефективність керування кристалізацією зливків при ЕШП шляхом нестационарного (імпульсного) електроживлення зменшується при збільшенні перерізу зливка. Якщо для зливків діаметром до 100 мм нестационарне живлення призводило до помітного (в 1,5...2 рази) зменшення довжини дендритів, то для зливків діаметром більше 120 мм, розмір дендритів практично не відрізнявся від традиційного ЕШП (рис. 3.15). Це добре узгоджується з характером зміни щільності струму в ванні при збільшенні діаметра електроду. Тобто подрібнення структури відбувалось коли щільність струму в розплаві становила 0,4 А/мм² і вище. При збільшенні діаметру зливка і зменшенні щільності струму до $\approx 0,3$ А/мм² подрібнення структури не спостерігалось (рис. 3.15).

Слід підкреслити, що ці результати стосується лише тих діапазонів нестационарного електроживлення, коли тривалість пауз значно (на порядок) менша ніж постійна часу металевої ванни. Інший випадок біде розглянуто в наступному розділі.

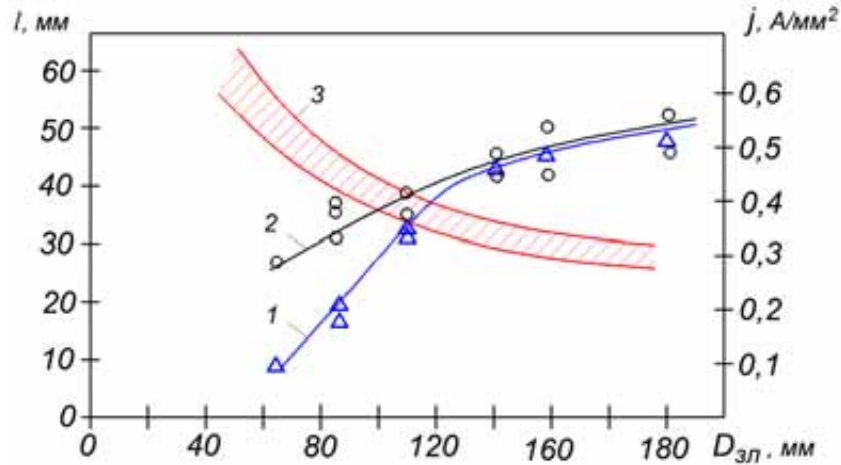


Рисунок 3.15 – Залежності середньої довжини кристалітів і щільності струму в ванні від діаметра зливка: 1 – довжина кристалітів при нестационарних режимах живлення; 2 – довжина кристалітів при традиційному ЕШП; 3 – щільність струму

В цілому, проведені експерименти показали можливість практичної реалізації процесу ЕШП з нестационарним живленням електричною енергією при збереженні стабільності електрошлакового процесу і з отриманням зливків з бездефектним формуванням бічної поверхні, щільною макроструктурою без металургійних дефектів, при зменшенні на 7...10% витрати електроенергії. При цьому, при виплавці зливків діаметром до 100 мм (коли щільність струму в розплаві становила 0,4 А/мм² і вище) був встановлений факт зменшення у 1,5...2 рази розміру зерен литого металу і гомогенізації його структури, у порівнянні з металом зливків традиційного ЕШП.

Висновки до розділу 3

1. Показано, що параметри нестационарного живлення при ЕШП визначаються ступенем інерційності теплових режимів витратного електроду, металеві ванни, шлакової ванни і гарнісажної кірки. При цьому, обмежуючим чинником при виборі режимів нестационарного живлення є

процес утворення гарнісажної кірки, який визначає якість формування бічної поверхні зливків і є більш чутливим до зміни режимів живлення електрошлакового процесу.

2. Модернізовано силовий трансформатор ТШП-10000-1 і механізм подачі витратного електроду установки для камерного ЕШП, що дозволило реалізовувати різні схеми імпульсного живлення процесу, з можливістю автоматичного регулювання частотних і амплітудних характеристик електричної напруги і швидкості подачі електроду в процесі плавки.

3. Визначено особливості зміни струму плавки електродів діаметром 84...120 мм при імпульсній зміні електричної напруги на ванні. Встановлено, що при імпульсному підвищенні напруги з 28...30 до 56...60 В збільшення і стабілізація струму відбуваються протягом 0,7...0,8 с, а при підвищенні напруги з 0...4 В до 30 В – протягом 2,5...3 с, тобто більш повільно. Також показано, що при імпульсному підвищенні напруги з 30 до 56...60 В з тривалістю імпульсів $t_i=2...3$ с, зростання струму відбувається не пропорційно підвищенню напруги на ванні, внаслідок часткового переходу електрошлакового процесу в дуговий.

4. На прикладі виплавки зливків титану марки Grade 4 діаметром 84...120 мм показано, що використання нестационарного (імпульсного) живлення дозволяє знизити на 7...10% питомі витрати електроенергії, у порівнянні з плавкою в стаціонарному режимі.

5. Експериментально показано, що через інерційність процесу плавлення витратного електроду оперативне керування потужністю переплаву, шляхом імпульсної подачі електроду в шлакову ванну, є малоефективним і може бути реалізоване лише при переплаві електродів малого діаметру (наприклад дроту).

6. Експериментально доведено можливість практичної реалізації процесу ЕШП з імпульсним живленням електричною енергією (за тривалості пауз менш ніж постійна часу гарнісажної кірки), при збереженні стабільності

електрошлакового процесу, з добрим формуванням бічної поверхні зливка, щільною макроструктурою, без металургійних дефектів.

7. Показано, що нестационарне живлення електричною енергією дає можливість керувати структурою отриманого металу. Встановлено можливість зменшення у 1,5...2 рази розміру зерен литого металу для злиwkів діаметром до 100 мм за щільністю струму у ванні $\geq 0,4$ А/мм². При цьому, виявлено, що при збільшенні перерізу зливка ефективність керування структуроутворенням металу, шляхом нестационарного електроживлення, зменшується.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕШП З ПОШАРОВИМ ФОРМУВАННЯМ ЗЛИВКА

У попередньому розділі були розглянуті можливості керування структуроутворенням металу зливків ЕШП шляхом нестационарних режимів електричного живлення, які не призводять до періодичності процесів плавлення і кристалізації металу.

В цьому розділі буде розглянутий другий, принципово відмінний процес, коли нестационарні режими електричного живлення і викликане ними порційне тепловнесення призводять до періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації металу, зумовлюючи, тим самим, пошарове формування зливка по його висоті.

4.1 ЕШП з пошаровим формуванням зливка

Як було зазначено у першому розділі, при класичній схемі ЕШП існує тісний зв'язок між плавленням витратного електроду і кристалізацією металу зливка. Внаслідок цього не завжди є можливість досягти бажану структуру металу, при збереженні якісного формування бічної поверхні зливка. Так, зменшення швидкості переплаву призводить до зменшення глибини металевої ванни і покращення внутрішніх характеристик (структури) металу, але водночас – до неприпустимого погіршення якості формування бічної поверхні зливка.

Дещо інша ситуація виникає при застосуванні порційного тепловнесення і пошарового формування зливка. Якщо зливки формувати окремими порціями, то можна досягти бажану структуру металу, без великих стовбчастих дендритів і зменшити імовірність утворення дефектів ліквідаційного характеру, при збереженні якісної поверхні зливка. На це, наприклад, вказують результати досліджень зливків, отриманих способом

порційної електрошлакової відливки, на бічній поверхні яких, лише в ділянках сплавлення порцій можуть утворюватись незначні кільцеві поглиблення [229-231].

У зв'язку з цим практичний інтерес представляє дослідження процесу ЕШП, який ведеться в імпульсному (періодичному) режимі, із забезпеченням пошарового формування зливка.

При класичній схемі ЕШП досягти періодичності процесів плавлення витратного електроду і кристалізації зливка можна в тому випадку, коли тепло, яке виділяється в період пауз електроживлення, недостатнє для плавлення металу, а тривалість цих пауз перевищує величину, що характеризує інерційність теплових процесів плавлення електроду.

Практично реалізувати процес ЕШП з пошаровим формуванням зливка можна наступним чином. Як відомо температуру шлакової ванни при ЕШП можна змінювати в широких межах шляхом зміни електричної напруги на ній. По суті, нижня границя температури шлакової ванни обмежена температурою твердіння флюсу, а верхня – температурою, при якій він починає закипати. Температура плавлення більшості флюсів для ЕШП сталей і сплавів на основі титану, нікелю, хрому, кобальту та ін. металів лежить в межах $1100...1400^{\circ}\text{C}$, тобто істотно нижче температури плавлення металу, який переплавляють [232-236]. Наприклад, температура плавлення сольових флюсів на основі CaF_2 для ЕШП титану становить $1200...1400^{\circ}\text{C}$, що на $270...470^{\circ}\text{C}$ менше ніж температура плавлення титану – 1670°C [237].

Це говорить про те, що в процесі ЕШП є можливість, знижуючи напругу на ванні нижче певного рівня, створити такі умови, при яких буде підтримуватись рідка, електропровідна шлакова ванна, а витратний електрод плавитися не буде. Якщо після цього знову збільшити напругу на ванні до робочих значень, то електрод знову почне плавитися і встановиться стаціонарний режим ЕШП. Отже, періодично змінюючи напругу на ванні і відповідним чином регулюючи швидкість подачі витратного електроду,

можна забезпечити періодичність плавлення електроду і пошарове формування металу зливка по його висоті.

На рис. 4.1 представлені умовні циклограми зміни в процесі ЕШП з пошаровим формуванням зливка керуючих параметрів – електричної напруги (U) та швидкості подачі електроду ($V_{ел}$), а також контрольованого параметра – струму плавки (I).

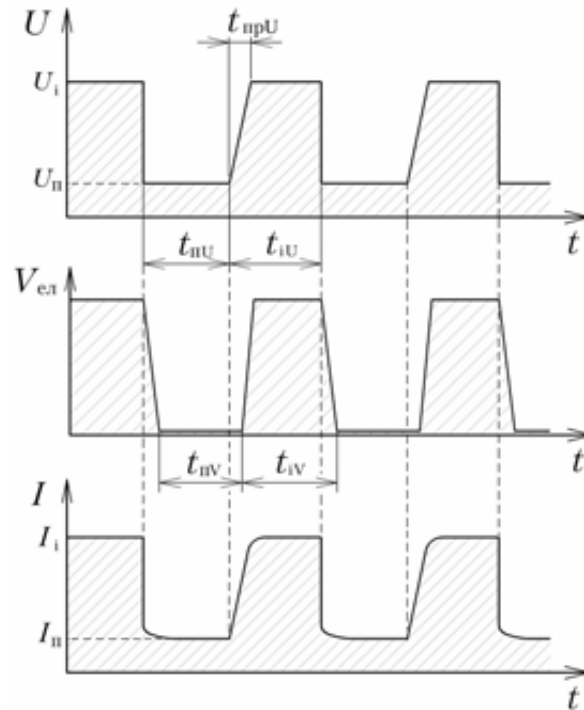


Рисунок 4.1 – Умовна циклограма зміни напруги (U), струму (I) і швидкості подачі електроду ($V_{ел}$) в процесі ЕШП з пошаровим формуванням зливка: t_{iU} , t_{piU} – тривалість імпульсів і пауз напруги; $t_{прU}$ – тривалість перехідного процесу зміни напруги; t_{iV} , t_{piV} – тривалість імпульсів і пауз подачі електроду; U_i , U_n – напруга під час імпульсів і пауз; I_i , I_n – струм під час імпульсів і пауз

Одним з основних параметрів процесу ЕШП з пошаровим формуванням є об'єм (висота) окремих порцій наплавленого металу. Цей параметр задається швидкістю плавлення електроду і тривалістю відповідних періодів (імпульсів) електричного живлення t_{iU} (рис. 4.1).

Іншим важливим параметром процесу є тривалість пауз плавлення витратного електроду, під час яких відбувається кристалізація раніше наплавленої порції металу. Цей параметр задається тривалістю періодів зниження напруги на ванні (t_{pU}) і відповідною величиною напруги (U_p), тривалістю перехідних періодів зміни напруги (t_{ppU}) а також тривалістю періодів припинення подачі витратного електроду (t_{pV}).

Важливою задачею при пошаровому формуванні зливка ЕШП є забезпечення надійного з'єднання окремих порцій металу, без будь-яких дефектів в зоні сплавлення. Властивості цієї зони в значній мірі визначаються температурними режимами шлакової ванни при паузах плавлення електроду, а також перехідними процесами в періоди між паузами і імпульсами плавлення. Правильний вибір характеру зміни напруги і швидкості подачі електроду в ці періоди забезпечує надійне сплавлення окремих шарів металу і відсутність грубих дефектів на поверхні зливка. При цьому слід враховувати, що при наплавленні чергової порції металу відбувається термоциклічний вплив на раніше наплавлені об'єми металу з їх частковим розплавленням і подальшою перекристалізацією.

В цілому, для забезпечення необхідних властивостей перехідної зони, необхідно, щоб в процесі порційного плавлення на поверхні зливка весь час залишався шар рідкого металу.

Слід зазначити, що наявність електричного струму, що протікає в шлаковій і металевій ваннах, в тому числі через двофазну зону і фронт кристалізації, в періоди пауз плавлення витратного електроду, є необхідною умовою реалізації процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Даний струм забезпечує підігрів шлакової ванни і границі поділу *шлакова ванна – металева ванна* і підтримує існування на поверхні зливка шару рідкого металу. В свою чергу це створює умови для формування бездефектних зон сплавлення окремих наплавлених шарів і якісної поверхні зливків.

При виборі об'єму окремих порцій наплавленого металу слід виходити з умов структуроутворення металу і техніко-економічних показників процесу

переплаву. При надмірно великому об'ємі окремих порцій металу характер структуроутворення в межах кожного наплавленого шару може погіршуватися з формуванням великих стовпчастих кристалів, орієнтованих в напрямку відводу тепла. У свою чергу зменшення об'єму окремих порцій металу нижче певного значення також недоцільне, тому що воно не призводить до помітного поліпшення якості металу, проте істотно знижує продуктивність процесу ЕШП. В цілому, висоту окремих порцій металу можна розглядати як функцію від діаметра зливка і марки сплаву, що переплавляють.

Очевидно, що визначення параметрів порційного формування зливка повинно ґрунтуватися на об'єктивних даних щодо динаміки зміни температури і об'єму рідкої металевої ванни в процесі ЕШП злиwkів конкретного складу і типорозміру.

4.2 Експериментальні дослідження температурних і геометричних параметрів металевої ванни

Як було показано вище, визначальне значення при виборі режимів пошарового формування зливка мають динамічні характеристики теплових параметрів металевої ванни.

Динаміку зміни температури і глибини рідкої металевої ванни досліджували експериментальним шляхом при ЕШП злиwkів діаметром 85...220 мм з вуглецевої сталі під флюсом АНФ-1. Використовували вуглецеву сталь з огляду на те, що отримані результати можна екстраполювати і на інші матеріали (прецизійні сплави, титанові сплави) враховуючи відповідні коефіцієнти температуропровідності конкретних матеріалів.

Експерименти проводили наступним чином. Після виплавки зливка висотою не менше ніж $1,5 \times d_{зл}$ відключали електричну напругу на ванні і витратний електрод виводили з шлакової ванни (піднімали вгору, щоб був вільний доступ до поверхні ванни). Водночас, в металеву ванну занурювали

гребінку з вольфрам-ренієвих термопар ВР 5/20 у захисних чохлах з карбонітриду бору BNC (рис. 4.2). Сигнали з термопар, через перетворювач з гальванічною ізоляцією PSA-01 подавали на АЦП і далі на персональний комп'ютер.

Глибину металевої ванни визначали шляхом періодичного занурення у розплав вольфрамових стрижнів до їх контакту з дном металевої ванни. Такий спосіб дозволяв визначити глибину металевої ванни разом з двофазною зоною.

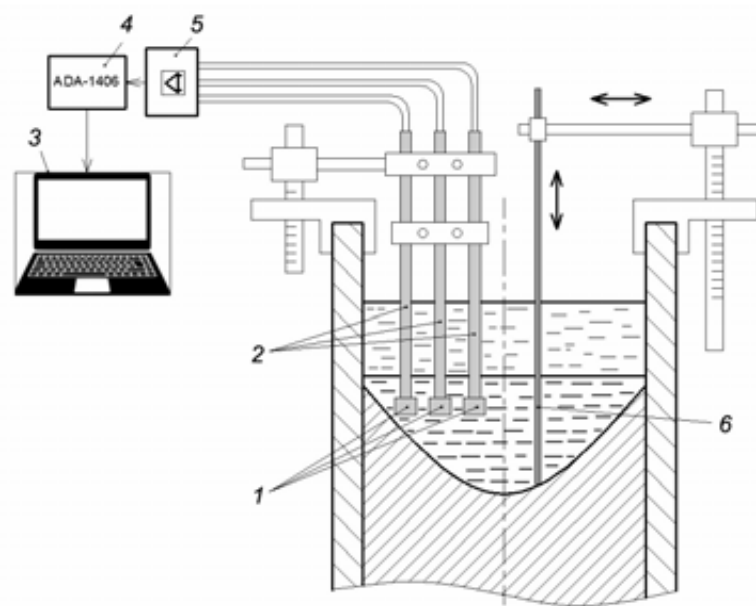


Рисунок 4.2 – Схема вимірювання температури і глибини металевої ванни: 1 – захисні чохла з карбонітриду бору; 2 – термопари в алуновій трубці; 3 – комп'ютер; 4 – аналого-цифровий перетворювач; 5 – перетворювач з гальванічною ізоляцією; 6 – вольфрамовий стрижень

В інших експериментах напругу на ванні не відключали, а зменшували до певного рівня, при якому плавлення електроду припинялося. Подачу електроду у шлакову ванну при цьому припиняли. Це робилося для визначення впливу "підігріву" шлакової ванни на динаміку зміни температури рідкої металевої ванни. В експериментах використовували витратні електроди змінного перерізу, які забезпечували вільний доступ до

поверхні шлакової ванни без їх видалення з ванни. В цих експериментах, для усунення впливу електричної напруги на ванні на величину електрорушійної сили термопар, напругу періодично відключали на короткий термін (до 1 с) і саме в ці періоди фіксували показники температури.

Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 4.3-4.7.

На рис. 4.3 наведені графіки зміни глибини металевої ванни при виплавці зливків різних діаметрів (85, 125 і 220 мм), після відключення напруги. Отримані дані свідчать, що термін повного твердіння металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85 мм складає біля 4 хв, діаметром 125 мм – 9 хв і діаметром 220 мм – 30...35 хв. При цьому, в перші періоди після відключення напруги твердіння ванни відбувається більш інтенсивно, ніж в заключні. Це пов'язане з умовами відведення тепла в стінку кристалізатора, коли в процесі твердіння ванни зменшується площа її контакту з водоохолоджуваною поверхнею кристалізатора, та утворюється зазор між стінкою кристалізатора та зливком. Так термін твердіння 50 % об'єму металевої ванни зливків вказаних діаметрів складає 1,8 , 2,5 і 8 хв, а 70 % об'єму ванни – 2,6 5,0 і 16 хв, відповідно.

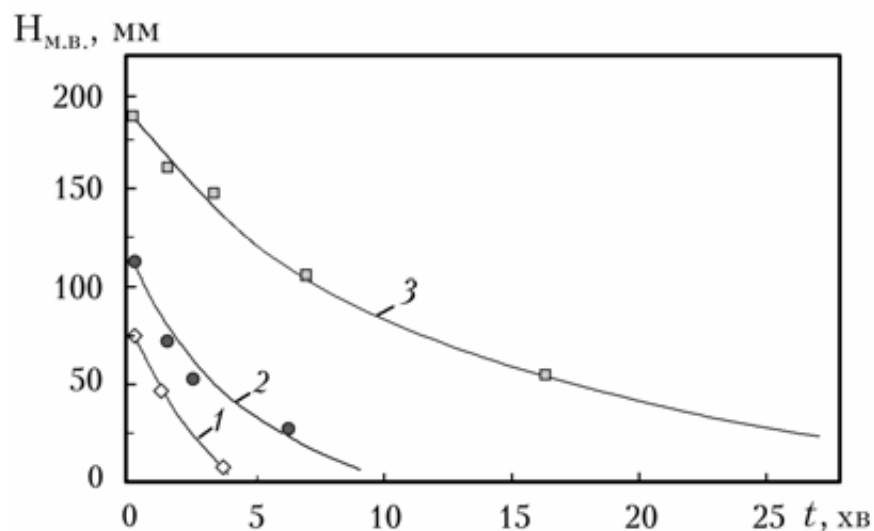


Рисунок 4.3 – Динаміка зміни глибини металевої ванни після відключення напруги при ЕШП зливків діаметром 85 мм (1), 125 мм (2), і 220 мм (3)

Вплив підігріву рідкого металу, шляхом неповного відключення напруги на електроді, на динаміку зміни глибини металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 125 мм наведено на рис. 4.4. Отримані результати вказують, що підтримання електричної напруги на електроді величиною 5 В збільшує термін твердіння металевої ванни в середньому на 25...30 %, а напруги величиною 10 В – на 45...50 %.

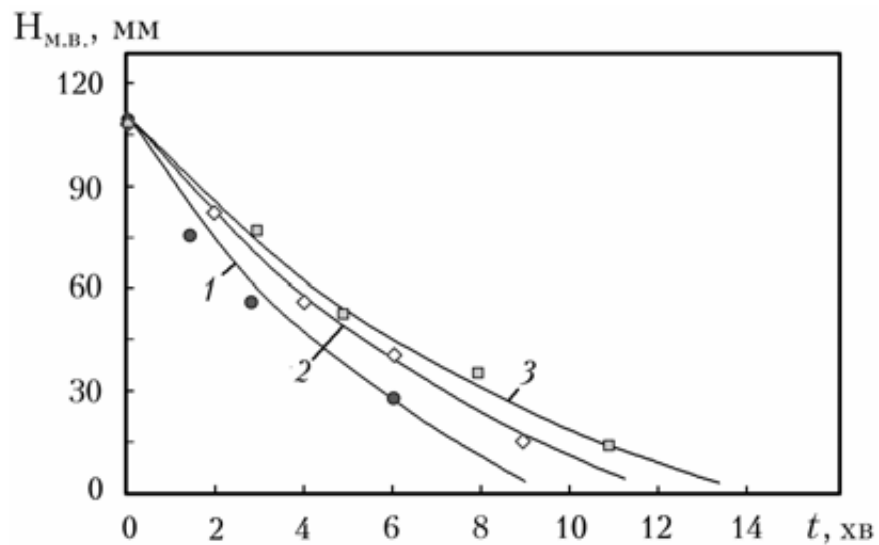


Рисунок 4.4 – Динаміка зміни глибини металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 125 мм після відключення напруги (1), після зниження напруги до 5 В (2), після зниження напруги до 10 В (3): $U_{пл} = 38$ В; $I_{пл} = 5200$ А

На рис. 4.5 наведені графіки зміни температури різних ділянок металевої ванни (а потім затверділого металу), при виплавці зливка діаметром 125 мм, після відключення напруги. Результати вимірювань показали, що різниця температур в центральній (на відстані від осі $0,25 \times R_{зл}$) і периферійній (на відстані від осі $0,75 \times R_{зл}$) зонах металевої ванни відносно невелика і становить біля $50...70^{\circ}\text{C}$. При цьому, криві зміни температури різних ділянок ванни схожі і повторюють одна одну з певним інтервалом температур. Загалом, перші 2...3 хвилини після відключення напруги відбувається інтенсивне охолодження металу зі швидкістю в середньому

160...180 град/хв, потім швидкість охолодження значно уповільнюється (рис. 4.5).

Відносно невисокий градієнт температур у ванні, отриманий в експериментах (50...70⁰С), можна пояснити невеликим розміром зливка, що виплавляли (Ø125 мм). Очевидно, що при ЕШП злиwkів промислових розмірів (Ø500 мм і більше) градієнт температур різних ділянок ванни (зливка) може бути помітно вищим.

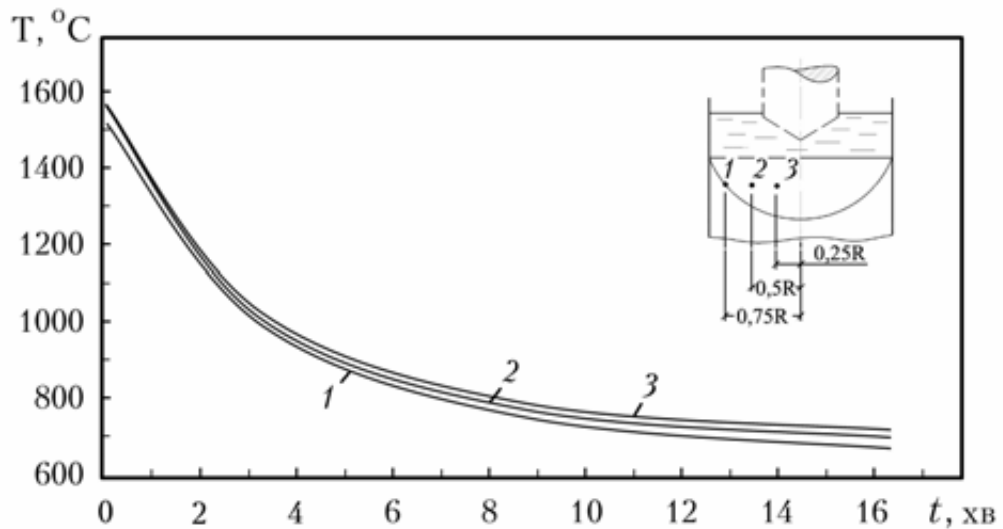


Рисунок 4.5 – Динаміка зміни температури металу при ЕШП зливка діаметром 125 мм після відключення напруги (1-3 місця виміру температури): $U_{\text{пл}} = 38 \text{ В}$; $I_{\text{пл}} = 4800 \text{ А}$

На рис. 4.6 представлені графіки зміни температури металу (на відстані від осі $0,5 \times R_{\text{зл}}$) у разі відключення напруги, а також при зниженні напруги на ванні до 5 і 10 В. З наведених графіків видно, що в останніх випадках швидкість охолодження металу помітно уповільнюється. Так, при повному відключенні напруги за перші 2 хв метал охолонув до 1220⁰С, в той час як при інших двох випадках – до 1280 і 1340⁰С, відповідно. Також, слід зауважити, що при зниженні напруги до 5 В температура металу протягом 12...14 хв зменшувалась, а потім стабілізувалася на рівні 730⁰С (тобто досягався тепловий баланс між кількістю тепла, що вводиться підігрівом шлакової ванни і відводиться в кристалізатор, електрод і атмосферу печі).

При зменшенні напруги до 10 В температура ванни стабілізувалася на рівні біля 820 °С (рис. 4.6).

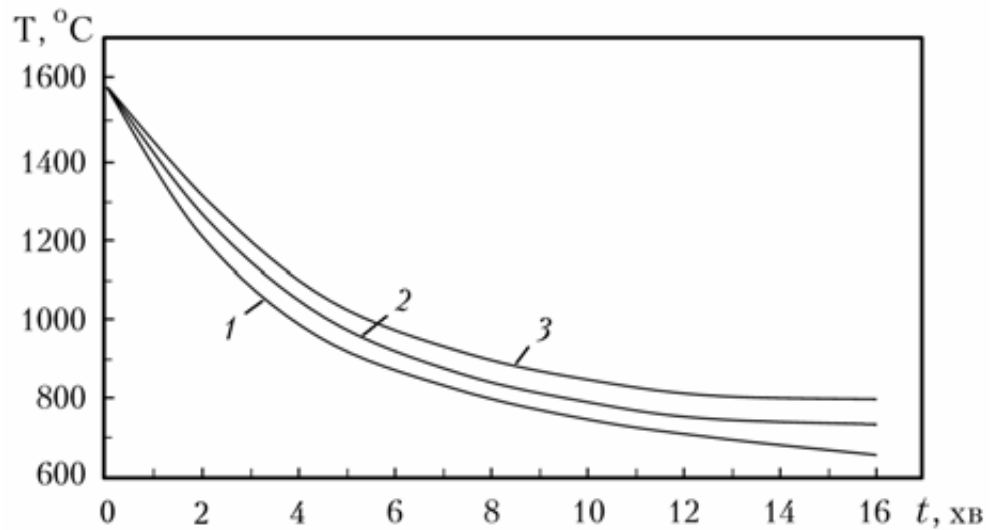


Рисунок 4.6 – Динаміка зміни температури металу при ЕШП зливків діаметром 125 мм після відключення напруги (1), після зниження напруги до 5 В (2), після зниження напруги до 10 В (3): $U_{\text{пл}} = 38$ В; $I_{\text{пл}} = 5200$ А (місце виміру температури – $0,5 \times R_{\text{зл}}$)

На рис. 4.7 наведені данні, щодо динаміки зміни температури ванни (а потім затверділого металу) після відключення напруги при ЕШП зливків різних діаметрів. Вони показують, що, наприклад, термін охолодження зливка діаметром 85 мм до температури 500 °С становить біля 6 хв, діаметром 125 мм – 22 хв, діаметром 220 мм – 60 хв.

Слід зауважити, що наведені вище експериментальні данні отримані в умовах охолодження зливків в водоохолоджуваних мідних глухонних кристалізаторах. Тобто вони сильно залежать від конструкції конкретного кристалізатора і інтенсивності його водяного охолодження.

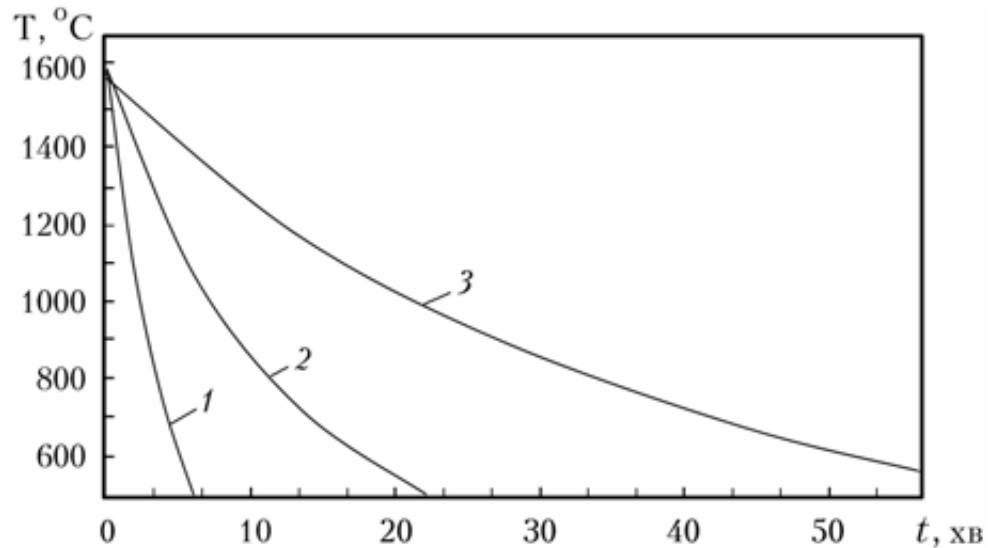


Рисунок 4.7 – Динаміка зміни температури ванни (металу) після відключення напруги при ЕШП зливків різних діаметрів: 1 – $d_{зл}=85$ мм, 2 – $d_{зл}=125$ мм, 3 – $d_{зл}=220$ мм (в усіх випадках місце виміру температури – $0,5 \times R_{зл}$)

Крім описаних вище експериментів з дослідження глибини і температури металеві ванни проводили експерименти з визначення форми металеві ванни при ЕШП зливків різних діаметрів. В цьому випадку, після відключення напруги на поверхню шлакової ванни подавали мідну крупку, що дозволяло фіксувати форму фронту кристалізації. З виплавлених зливків виготовляли поздовжні макрошліфи, на яких чітко відображалась форма металеві ванни.

Результати експериментів наведені на рис. 4.8. В усіх випадках ванни мали циліндричні і конічні частини. Коефіцієнт форми ванни $k_{ф.в.}$, який визначається відношенням глибини циліндричної частини до повної глибини ванни, в середньому становив $k_{ф.в.}=0,06...0,2$. При цьому глибина металеві ванни в проведених експериментах дорівнювала $0,8...0,85 \times d_{зл}$, що є типовим для зливків цих діаметрів. При збільшенні діаметра зливка цей показник може змінюватися.

Загалом отримані результати добре збігаються з результатами контактних вимірів з використанням вольфрамових стрижнів.

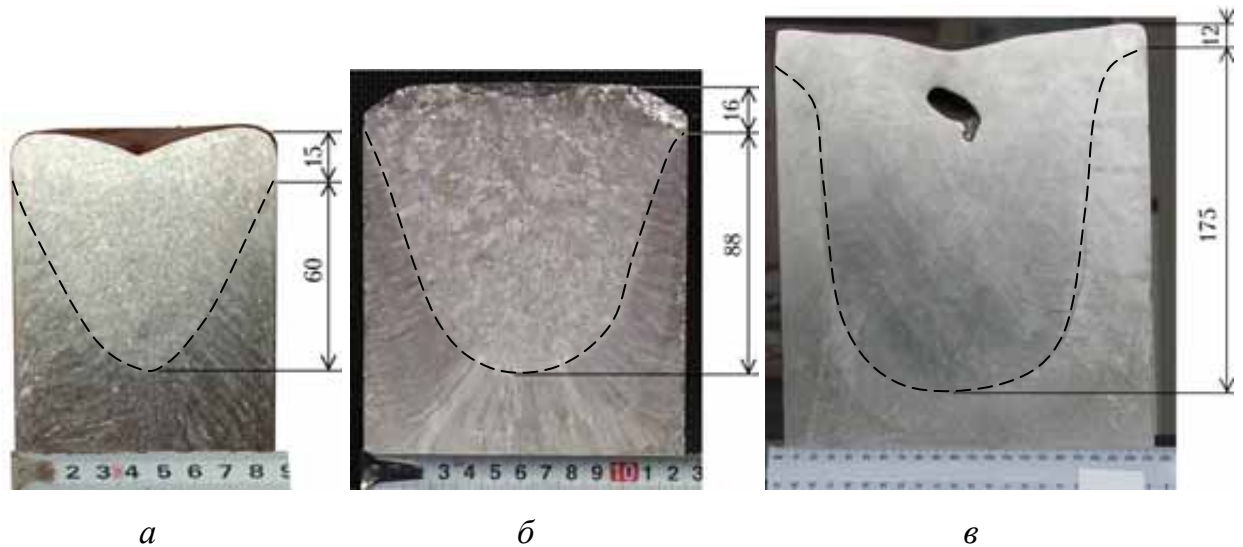


Рисунок 4.8 – Форма металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85 (а), 125 (б) і 220 мм (в)

Узагальнюючи результати експериментальних досліджень було запропоновано розрахункові залежності для визначення характеристик пошарового твердіння зливків ЕШП в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром до 220 мм:

- час повного твердіння металевої ванни в залежності від діаметра зливка, хв

$$\tau_{\text{п}} = (0,06 \dots 0,08) \cdot k_{\text{пд}} \cdot k_{\text{тфм}} \cdot d_{\text{зл}}^2,$$

де $d_{\text{зл}}$ – діаметр зливка у см, $k_{\text{пд}}$ – коефіцієнт, що враховує підігрів металу в разі неповного відключення напруги на ванні (при повному відключенні напруги $k_{\text{пд}}=1$), $k_{\text{тфм}} = \alpha_{\text{ст}} / \alpha_{\text{м}}$ ($\alpha_{\text{ст}}$ – коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі, $\alpha_{\text{м}}$ – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву);

- товщина шару металу, що закристалізувався, в залежності від часу, см

$$\delta = \frac{(2,5 \dots 4,5) k_{\text{пд}} \sqrt{\tau}}{k_{\text{тфм}}},$$

де τ – час твердіння у секундах;

- температура металу зливка (ділянка на відстані $0,5 \times d_{зл}$ від верхнього торця зливка і $0,25 \times d_{зл}$ від бічної поверхні) після відключення (зменшення) напруги, °С

$$T = T_B + \frac{(T_{MB} - T_B)k_{пд}k_{тфм}}{e^{k_{тп}\tau}},$$

де T_{MB} – температура металеві ванни, T_B – температура охолоджувальної води, τ – час охолодження у хвилинах, $k_{тп}$ – коефіцієнт теплопередачі, який для злиwkів діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0.19, 0.056 і 0.02, відповідно.

Наведені залежності необхідні для визначення параметрів пошарового формування зливка, таких як тривалість пауз плавлення витратного електроду $t_{пU}$ і величина напруги U_p (рис. 4.1), при ЕШП злиwkів різних діаметрів і складу.

4.3 Дослідження процесу структуроутворення металу при ЕШП з пошаровим формуванням зливка

Мета досліджень полягала у встановленні технологічних та металургійних особливостей процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка та визначенні закономірностей структуроутворення виплавленого металу.

Експериментальні дослідження проводили на установці, схема якої представлена рис. 4.9. Установка була дооснащена блоком керування подачею електроду (поз. 5 рис.4.9), що дозволило автоматично, по заданій програмі, змінювати швидкість подачі електроду синхронно зі зміною електричної напруги на ванні.

Плавки здійснювали в печі камерного типу в атмосфері аргону. Застосовували витратні електроди з прецизійного сплаву 29НК (Fe–29Ni–18Co) а також вуглецевої сталі, які переплавляли в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметрами 85, 125, 160 і 220 мм. При переплаві сплаву

29НК використовували сольовий, фторидно-хлоридний флюс, при переплавці сталі – флюс АНФ-6.

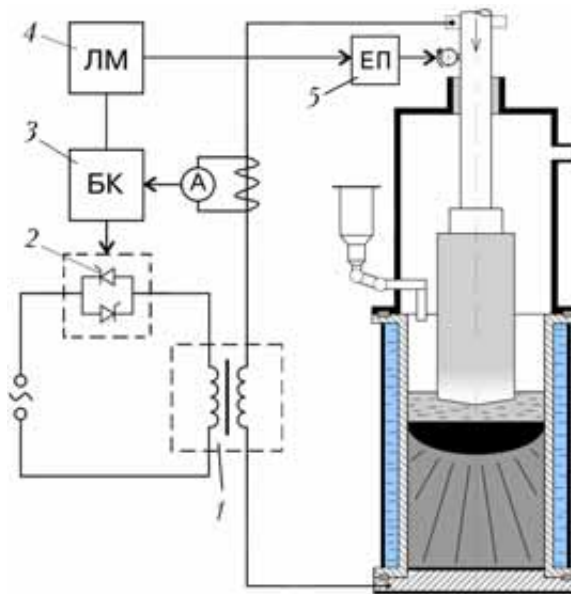


Рисунок 4.9 – Схема експериментальної установки для ЕШП з пошаровим формуванням зливка: 1 – силовий трансформатор ТШП-10000-1; 2 – блок тиристорів; 3 – блок керування тиристорами; 4 – програмуючий логічний модуль; 5 – блок керування подачею електроду

Плавки проводили відповідно до діаграми, представленої на рис. 4.1. Після наведення шлакової ванни та виходу на задані стаціонарні електричні режими включали апаратуру управління, яка змінювала, відповідно заздалегідь заданій програмі, напругу в процесі ЕШП. Після періоду плавлення електродом тривалістю t_{IU} та розплавлення порції металу заданого об'єму напруга на ванні знижувалась до значень, при яких плавлення електродного металу призупинялося (7...11 В). Одночасно плавно знижували і потім припиняли подачу витратного електроду. Шлакова ванна в цей період підтримувалась в рідкому, електропровідному стані за рахунок її підігріву електричним струмом, величина якого зменшувалась пропорційно зменшенню електричної напруги на ванні та збільшенню електричного опору міжелектродного проміжку (опір збільшувався через охолодження шлакового

розплаву). У цей період відбувалось твердіння раніше розплавленої порції металу. Після паузи плавлення електроду t_{pU} , яка в експериментах становила 180...600 с, електричну напругу на ванні знову збільшували до робочих значень (32...46 В), потім, через деякий проміжок часу, включали подачу електроду і повторювали описані вище цикли (рис. 4.1). Таким чином забезпечувалась періодичність процесів плавлення електроду та кристалізації металу по висоті зливка.

Зміну напруги в процесі плавки здійснювали автоматично, за рахунок програмованого логічного модуля та тиристорного регулятора, розташованого в первинному ланцюзі силового трансформатора (рис. 4.9). Зміну швидкості подачі витратного електроду виконували в автоматичному та ручному режимах.

Основні параметри експериментальних плавок ($d_{ел}$, U_i , I_i) обирали виходячи з загальноприйнятої практики для ЕШП зливків відповідного розміру. Характерні параметри процесу ЕШП з пошаровим формуванням (t_{iU} , $t_{пU}$, U_p , $I_{п}$) задавали виходячи з необхідності забезпечення періодичності процесів плавлення електроду та пошарового формування зливка. Висоту окремого наплавленого шару в експериментах змінювали в межах від 0,1 до 0,4 діаметра зливка. З виплавлених зливків виготовляли поздовжні (осьові) макрошлифи для аналізу особливостей структуроутворення металу. В наступних плавках режими процесу коригували з метою покращення якості формування поверхні зливка та усунення внутрішніх дефектів.

Режими ЕШП електродів зі сплаву 29НК з пошаровим формуванням зливка наведені в таблиці 4.1, характеристики макроструктури отриманих зливків – в таблиці 4.2. В таблицях, для порівняння, також наведено аналогічні параметри для зливка сплаву 29НК, виплавленого в тих самих умовах, але традиційним способом без пошарового формування (експ. № 905). Макроструктура цього зливка надана на рис. 4.10.

Таблиця 4.1 – Режими експериментальних плавок сплаву 29НК з пошаровим формуванням

Експ. №	$d_{\text{ел}}$, мм	$d_{\text{зл}}$, мм	t_{iU} , с	$t_{пU}$, с	$t_{прU}$, с	$V_{\text{ел}}$, м/год	U_i , В	$U_{п}$, В	I_i , А	$I_{п}$, А
905	50	85	-	-	-	3,3	38	-	3200...3500	-
920	50	85	60	180	-	3,3	38	7,5	3200...3500	300...500
924	50	85	33	180	-	3,5	38	7,5	3500...4000	300...500
932	80	125	70	300	-	2,5	37	9,0	4500...5500	850...1000

Таблиця 4.2 – Характеристики макроструктури зливків сплаву 29НК отриманих ЕШП з пошаровим формуванням

Експ. №	Відсоток площі кристалів в полі макрошліфа, %			Середній розмір кристалів (ширина × довжина), мм			Середня висота шару, мм	Наявність дефектів
	периферійні стовпчасті	центральні стовпчасті	рівновісні (розорієнтовані)	периферійні стовпчасті	центральні стовпчасті	рівновісні (розорієнтовані)		
905	78	12 (придонні)	10 (у голові зл.)	2,5 × 36,3	2,4 × 17,5	1,8 × 2,1	-	зона зустрічної кристаліз.
920	37	59	4	1,9 × 12,4	2,6 × 17,7	2,1 × 2,8	33	усадкові пори
924	33	40	27	1,7 × 8,5	1,5 × 7,9	0,5 × 0,6	20	ні
932	44	45	11	2,2 × 14,8	2,0 × 12,3	2,0 × 2,5	35	ні



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд (а) і макроструктура (б) зливка сплаву 29НК (плавка № 905), виплавленого без пошарового формування

Плавку № 920 проводили з тривалістю імпульсів t_{iU} і пауз $t_{пU}$ плавлення електроду 60 і 180 с, відповідно. Ці величини були обрані виходячи з висоти окремого наплавленого шару металу ≈ 35 мм ($0,4 \times d_{зл}$) та твердіння за час паузи плавлення електроду шару металу товщиною ≈ 25 мм, тобто 70% металеві ванни.

Процес плавки № 920 проходив стабільно (рис. 4.11). Виплавлений зливок мав добре формування бічної поверхні, на якій чітко визначались шість шарів кристалізації (рис. 4.12 а). Висота окремого наплавленого шару становила в середньому 33 мм. При переході від шару до шару на поверхні зливка мали місце незначні "гофри", глибина яких не перевищувала 1 мм.

Макроструктура зливка, за винятком його головної частини, щільна, без пор, шлакових включень, несплавлень та інших дефектів. Вона характеризується наявністю переважно стовпчастих кристалів, які в придонній та осьовій частинах зливка орієнтовані вертикально а біля бічної стінки – горизонтально (рис.4.12). Середній розмір кристалів в центральній зоні становив $2,6 \times 17,7$ мм, в периферійній – $1,9 \times 12,4$ мм (табл. 4.2).

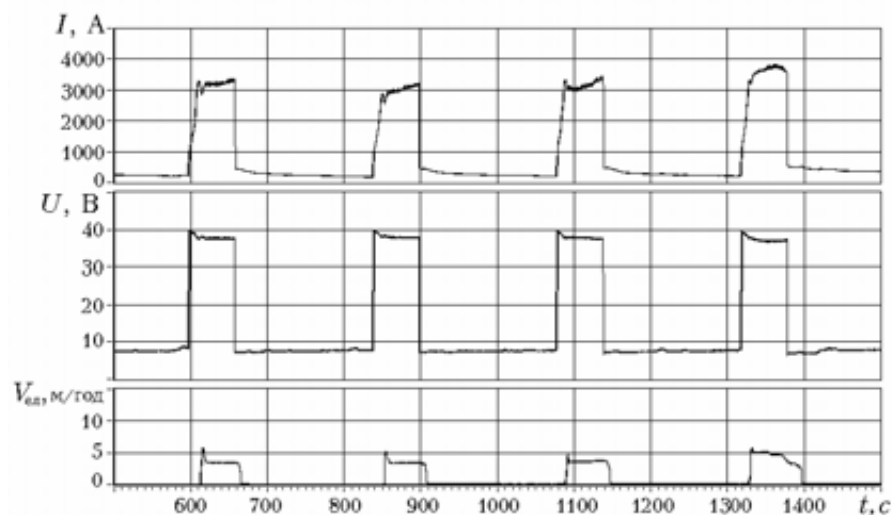


Рисунок 4.11 – Фрагмент реєстрограми режимів плавки № 920

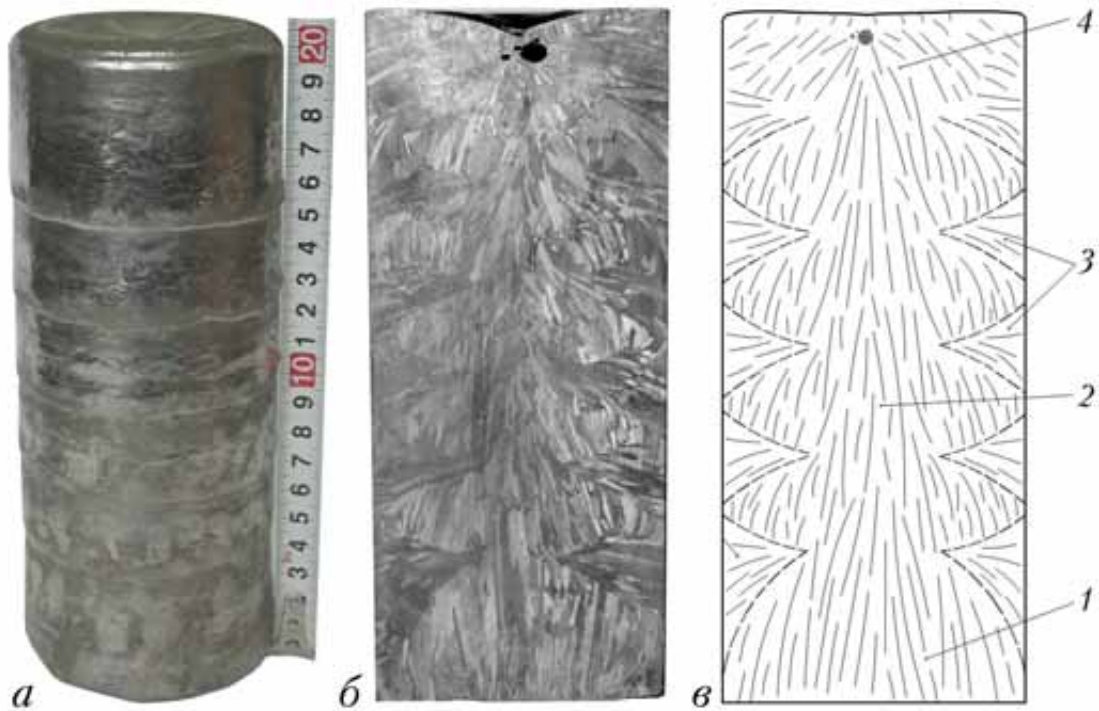


Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд (*a*), макроструктура (*б*) та схема кристалізації (*в*) зливка сплаву 29НК (плавка № 920): 1 – придонна зона вертикально орієнтованих кристалів, 2 – центральна (осьова) зона вертикально орієнтованих кристалів; 3 – зона горизонтально орієнтованих кристалітів біля бічної поверхні зливка; 4 – зона розорієнтованих кристалів у головній частині зливка

Ширина зони горизонтально орієнтованих кристалів циклічно змінюється по висоті зливка, що є характерною ознакою його порційного формування. Ця зона формується під час пауз електроживлення, в умовах інтенсивного охолодження металу стінками кристалізатора. Чітко виражених границь поділу між шарами кристалізації немає. Необхідно звернути увагу на відсутність зони слабину по осі зливка, яка характерна для аналогічних зливок традиційного ЕШП (рис. 4.10). Ділянка 4 у головній частині зливка характеризується наявністю усадкової раковини (на глибині до 15 мм), що свідчить про необхідність ретельного дотримання режимів її виведення на заключному етапі плавки.

Загалом, незважаючи на помітний вплив пошарового формування на кристалічну будову зливка, наявність великих стовбчастих кристалів з зоною

транскристалізації по осі зливка свідчить про необхідність подальшого коригування режимів його виплавки.

В експерименті № 924 тривалість періодів плавлення електроду була зменшена до 33 с, при паузах плавлення – 180 с (табл. 4.1). В цьому випадку висота окремих порцій наплавленого металу складала біля 20 мм ($0,24 \times d_{\text{зл}}$). Процес плавки проходив стабільно (рис. 4.13). Виплавлений зливоч мав бездефектне формування бічної поверхні з незначними "гофрами" у місцях переходу від шару до шару (рис. 4.14 а).

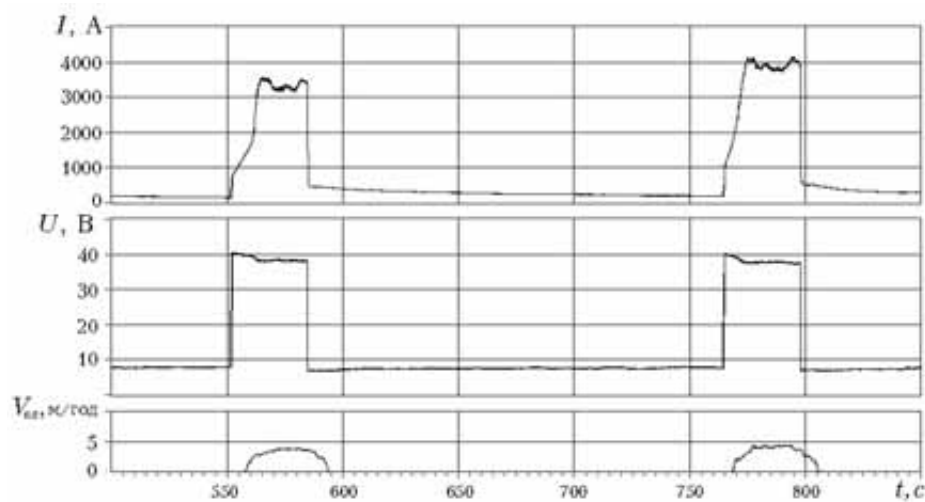


Рисунок 4.13 – Фрагмент регістрограми режимів плавки № 924

Макроструктура металу щільна, складається з різних зон, утворення яких обумовлено порційним плавленням та кристалізацією металу, з можливістю часткового розплавлення та перекристалізації окремих його об'ємів. По висоті зливка чітко помітні горизонтальні ділянки пошарового структуроутворення, які складаються із зон вертикально орієнтованих кристалів середнім розміром $1,5 \times 7,9$ мм (рис. 4.14 в, поз. 2), що чергуються з ділянками з дрібнозернистою рівноосною структурою (рис. 4.14 в, поз. 3). Товщина цих дрібнокристалічних шарів дещо збільшується по висоті зливка і стабілізується на висоті, що дорівнює його діаметру. Середній розмір зерен у

ділянках з дрібнозернистою структурою становить $0,5 \times 0,6$ мм. Відсоток площі цих ділянок в полі макрошліфа складає 27 % (табл. 4.2).



Рисунок 4.14 – Зовнішній вигляд (а), макроструктура (б) та схема кристалізації (в) зливка сплаву 29НК (плавка № 924): 1 – придонна зона вертикально орієнтованих кристалів, 2 – зони вертикально орієнтованих кристалів у центральній частині зливка; 3 – зони з дрібнозернистою рівноосною структурою; 4 – зона горизонтально орієнтованих кристалітів біля бічної поверхні зливка; 5 – зона розорієнтованих кристалів у головній частині зливка

Дисперсність структури ділянок стовпчастих кристалів 2 (рис. 4.14 в), за винятком придонної зони 1, вище, ніж у зливку № 920. Так середній розмір стовпчастих кристалів зливка № 924 становив $1,5 \times 7,9$ мм, проте як у зливка № 920 він був $2,6 \times 17,7$ мм (табл. 4.2).

У бічних поверхнях зливка сформована зона 4 з горизонтальною орієнтацією кристалів, ширина та дисперсність якої мало змінюються по висоті зливка. Головна частина зливка 5 характеризується розорієнтованою структурою без усадкової пористості.

В цілому, середній розмір кристалів зливка № 924 у 5 разів менший, ніж у зливка № 905, отриманого за традиційною технологією ЕШП (табл. 4.2).

Наступний експеримент № 932 був проведений при виплавці зливка більшого діаметру – 125 мм. В цьому випадку тривалість імпульсів і пауз плавлення електроду становила 70 і 300 с, відповідно (табл. 4.1). Передбачалося, за такими режимами висота наплавленого шару буде складати 30...35 мм ($0,24...0,28 \times d_{зл}$), а під час паузи затвердіє біля 75% об'єму металеві ванни.

Фрагмент реєстрограми процесу виплавки зливка № 932 представлено на рис. 4.15. Процес плавки проходив без порушень стабільності. Загальна кількість циклів плавлення становила – 5 циклів, середня висота окремого наплавленого шару – 35 мм.

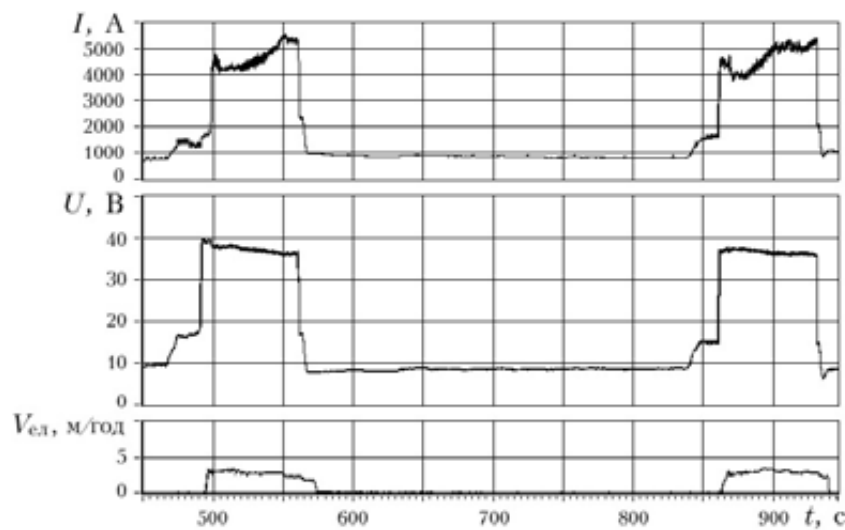


Рисунок 4.15 – Фрагмент реєстрограми режимів плавки № 932

Виплавлений зливоч сформований добре, глибина характерних звужень на його поверхні не перевищує 2 мм (рис. 4.16 а). Макроструктура металу щільна, якихось дефектів у полі макрошліфа не виявлено (рис. 4.16 б). У центральній частині зливка кристали зорієнтовані переважно вертикально, біля бічної поверхні – до центру зливка (під кутом $25...30^{\circ}$ до горизонталі).

Середній розмір стовпчастих кристалів у центральній частині зливка становить $2,0 \times 12,3$ мм, що менше, ніж у зливків традиційного ЕШП (табл. 4.2). При цьому проростання кристалів від шару до шару не спостерігається.

Межі окремих шарів кристалізації виявляються чітко (на рис. 4.16 б показані умовно у вигляді чорних пунктирних ліній 3). При цьому, слід відзначити відсутність дефектів (мікропор і шлакових включень) по зонах сплавлення.

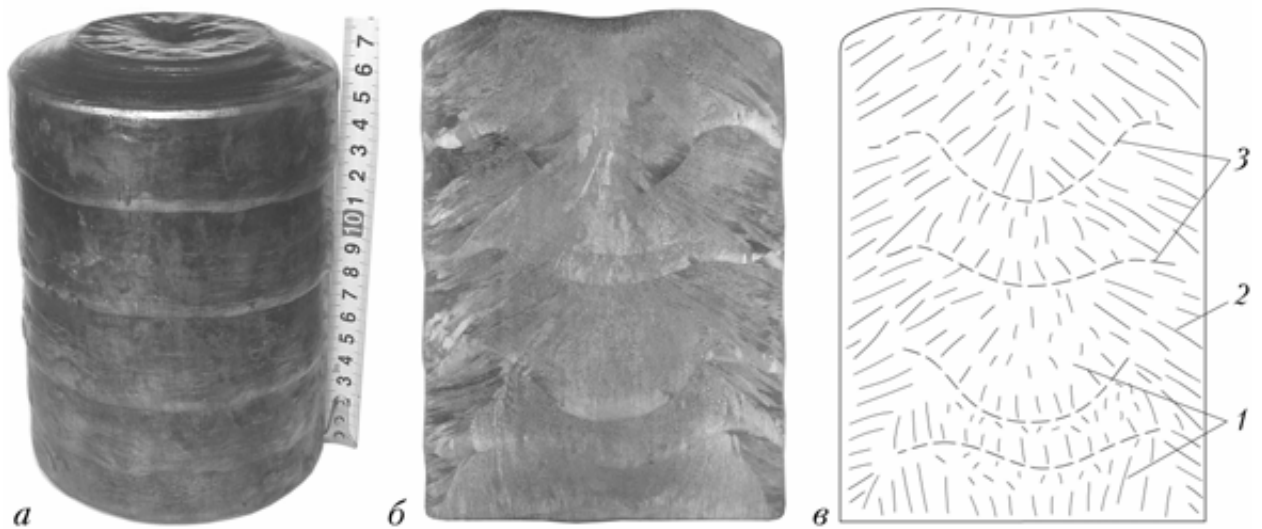


Рисунок 4.16 – Зовнішній вигляд (а), макроструктура (б) та схема кристалізації (в) зливка сплаву 29НК (плавка № 932): 1 – зони вертикально орієнтованих кристалів; 2 – зона горизонтально орієнтованих кристалів; 3 – лінії сплавлення

Таким чином проведені експерименти показали можливість практичної реалізації процесу ЕШП з пошаровим формуванням та отриманням зливків зі щільною макроструктурою без металургійних дефектів. При цьому, була показана можливість керування структуроутворенням металу і встановлений позитивний вплив, який полягає у подрібненні кристалічної будови зливка.

У зв'язку з цим подальші дослідження проводили при виплавці зливків більших діаметрів – 160...220 мм. Режимы плавки наведені в таблиці 4.3, характеристики макроструктури отриманих зливків – в таблиці 4.4.

Таблиця 4.3 – Режими експериментальних плавок з пошаровим формуванням зливків діаметром 160...220 мм

Експ. №	Сплав	$d_{\text{ел}}$	$d_{\text{зл}}$	t_{iU}	t_{pU}	t_{npU}	U_i	$U_{п}$	I_i	$I_{п}$
		мм	мм	с	с	с	В	В	А	А
926	S235JR	120	160	90	360	0	38...40	7...8	5800...6000	400...600
927	S235JR	150	220	180	600	0	32...38	8...9	6000...7700	500...900
929	S235JR	150	220	240	600	0	42...45	8...10	6000...7700	800...1100
939	C22E	140	220	200	440	60	41...44	9...11	7500...8500	1000...1200
940	C22E	140	220	120	260	50	44...46	9...11	6500...7400	1000...1200

Таблиця 4.4 – Характеристики макроструктури зливків діаметром 160...220 мм, отриманих ЕШП з пошаровим формуванням

Експ. №	Відсоток площі кристалів в полі макрошліфа, %			Середній розмір кристалів (ширина × довжина), мм			Середня висота шару, мм	Наявність дефектів
	периферійні стовпчасті	центральні стовпчасті	рівновісні (розорієнтовані)	периферійні стовпчасті	центральні стовпчасті	рівновісні (розорієнтовані)		
926	27	66	7	4,0 × 18,0	3,6 × 16,5	2,0 × 2,0	20	Ні
927	13	84	3	3,2 × 13,5	3,2 × 14,7	2,4 × 2,4	24	Так
929	18	49	33	3,6 × 16,2	3,8 × 17,8	2,5 × 4,0	50	Так
939	21	42	37	4,6 × 22,0	3,8 × 18,0	4,0 × 6,0	55	Ні
940	27	52	21	4,5 × 20,0	3,5 × 13,8	3,5 × 5,0	30	Ні

Експеримент № 926 проводили при переплаві електрода діаметром 120 мм в кристалізаторі діаметром 160 мм (лінійний коефіцієнт заповнення кристалізатора 0,75). Тривалість імпульсів і пауз плавлення електроду становила 90 і 360 с, відповідно. Підвищення напруги після пауз здійснювали різко ($t_{npU}=0$).

Загальний вигляд зливка свідчить, що електрошлаковий процес проходив стабільно (рис. 4. 17 а). Формування бічної поверхні по всій висоті без каверн, несплавлень, тріщин та інших дефектів металургійного характеру.

Чітко видно 11 шарів кристалізації, при цьому перехід від шару до шару плавний, глибина відповідних гофр не перевищує 1 мм.

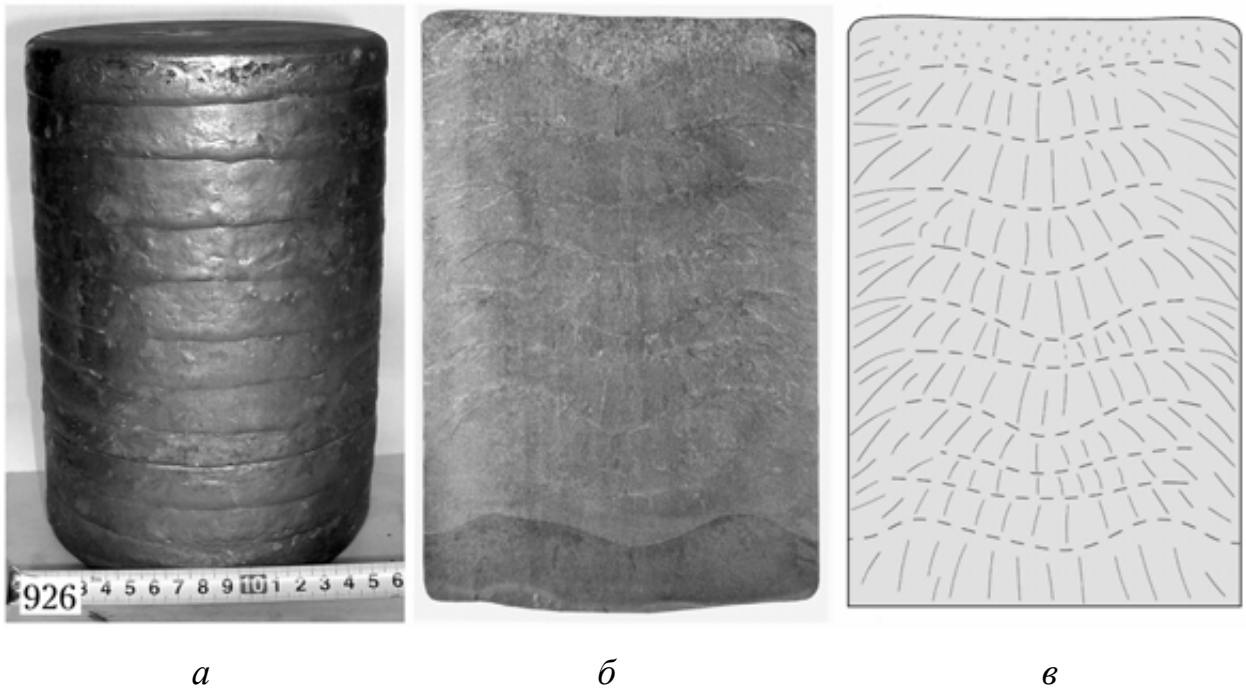


Рисунок 4.17 – Зовнішній вигляд (*a*), макроструктура (*б*) та схема кристалізації (*в*) зливка № 926

Макроструктура зливка щільна, без пор, шлакових включень, несплавлень та інших дефектів (рис. 4.17 *б*). Вона характеризується наявністю шарів кристалізації з вираженою зоною сплавлення, яка після травлення шліфу проявляється світлішим кольором. Межі поділу шарів мають відносно плоску форму з прогином по висі зливка. Дефектів на межах поділу окремих шарів не виявлено.

Висота шарів кристалізації становить 15...25 мм. Тобто, глибина ванни рідкого металу в процесі плавки не перевищувала 25 мм, що становить $0,15 \times d_{\text{зд}}$. Таку незначну глибину ванни складно отримати при традиційному ЕШП. Очевидно, що зменшення об'єму металу, який одночасно перебуває в рідкому стані, має сприяти зменшенню негативних ліквідаційних процесів.

Шари кристалізації характеризуються наявністю невеликих стовпчастих кристалів, орієнтованих переважно вертикально

(перпендикулярно до межі розділу). Довжина кристалів обмежується висотою шару, тобто не перевищує 15...25 мм. У переважній більшості кристали не проростають крізь межі поділу наплавлених шарів.

У бічній поверхні зливка кристали орієнтовані переважно горизонтально, завдяки тепловідводу до стінок кристалізатора. Головна частина зливка характеризується дрібнозернистою структурою із середнім розміром зерен 2,0×2,0 мм.

Важливим завданням при пошаровому формуванні зливок ЕШП є забезпечення необхідних властивостей металу у зонах сплавлення окремих шарів. У зв'язку з цим, для оцінки механічних властивостей металу по зоні сплавлення, проводили випробування на розтяг та ударну в'язкість (КСУ). Зразки вирізали як уздовж, так і поперек шарів кристалізації (рис. 4.18). Причому зразки для випробувань на ударну в'язкість (КСУ) вирізали таким чином, щоб U-подібний надріз приходився на лінію сплавлення (рис. 4.19).

Результати випробувань представлені у таблиці 4.5.

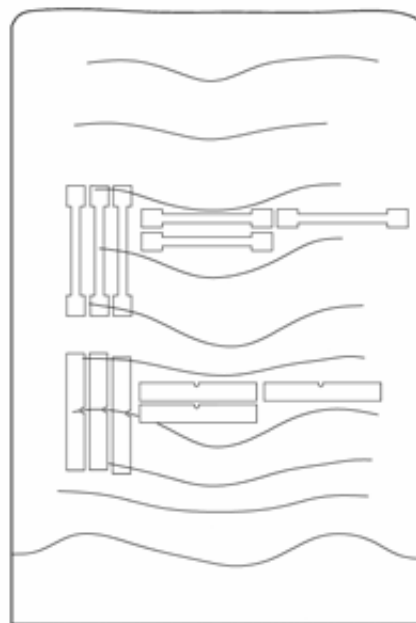


Рисунок 4.18 – Схема вирізки зразків для механічних випробувань (зливок № 926)

Таблиця 4.5. – Результати механічних випробувань металу зливка № 926 на розтяг і ударну в'язкість

Орієнтація зразків (рис.4.18)	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²
Поперек шарів кристалізації (зона сплавлення шарів)	242,8	450,9	24,0	55,8	132,0
	254,1	452,8	24,7	53,5	133,5
	254,9	449,2	19,0	40,6	76,7
<i>Середнє значення</i>	<i>250,6</i>	<i>451,0</i>	<i>22,6</i>	<i>50,0</i>	<i>114,1</i>
Вздовж шарів кристалізації (основний метал)	243,7	449,3	26,7	46,4	117,5
	246,3	450,9	24,0	43,7	80,1
	249,7	444,0	22,3	46,2	132,6
<i>Середнє значення</i>	<i>246,6</i>	<i>448,1</i>	<i>24,3</i>	<i>45,4</i>	<i>110,1</i>

Аналіз отриманих результатів свідчить, що характеристики міцності і пластичності при випробуваннях на розтяг і ударну в'язкість мало відрізняються для зразків відібраних як поперек, так і вздовж шарів кристалізації. Це свідчить про надійне з'єднання шарів кристалізації між собою і що механічні характеристики зон сплавлення не поступаються основному металу.

В цілому, розорієнтованість структури металу, відсутність великих стовпчастих дендритів направлених перпендикулярно вісі зливка, відсутність зони "слабини", плоский фронт кристалізації, невеликий об'єм металеві ванни, рівнозначність механічних характеристик вздовж і поперек шарів кристалізації - все це свідчить про ефективність використання пошарового формування зливка для керування структуроутворенням електрошлакового металу.

Подальші експерименти були спрямовані на вивчення особливостей пошарового структуроутворення металу для злиwkів діаметром 220 мм. Слід наголосити, що такі розміри зливка для широкої номенклатури сплавів (прецизійні сплави, функціональні сплави та ін.) вже вважаються промисловими.

Експерименти № 927, 929 проводили при переплаві електродів $\varnothing 150$ мм в кристалізаторі $\varnothing 220$ мм (лінійний коефіцієнт заповнення кристалізатора 0,68). Тривалість імпульсів плавлення електрода під час плавки № 927 становила $t_{iU}=180$ с, при плавці № 929 – $t_{iU}=240$ с. Тривалість пауз плавлення електрода в обох випадках була $t_{пU} = 600$ с. Підвищення напруги після пауз здійснювали різко ($t_{пU}=0$). Середня висота наплавленого шару металу в експерименті № 927 становила 24 мм, в експерименті № 929 – 50 мм (табл. 4.3).

В обох випадках процеси плавки проходили стабільно. На поверхні зливків чітко визначаються шари кристалізації, обумовлені дискретним тепловкладенням. На зливку № 927 переходи від шару до шару характеризуються гофрами, глибина яких становить 2...5 мм (рис. 4.19 *a*). Очевидно, наявність таких грубих гофр пов'язана з недостатньою температурою підігріву шлакової ванни під час пауз плавлення електрода. На зливку № 929 глибина таких гофр менша і становить 1...2 мм (рис. 4.20 *a*), що досягнуто збільшенням на 40% потужності підігріву шлакової ванни в періоди пауз плавлення електрода (табл. 4.3).

Аналіз макроструктури зливків № 927, 929 підтверджує значний вплив пошарового формування на кристалізаційну структуру металу. По висоті зливків чітко простежуються горизонтальні ділянки пошарового структуроутворення, що складаються з відносно невеликих вертикально орієнтованих кристалів середнім розміром $3,2 \times 14,7$ мм у зливка № 927, і $3,8 \times 17,8$ мм – у зливка № 929 (табл. 4.4).

У зливку № 929 ділянки вертикально орієнтованих кристалів чергуються з ділянками з дрібнозернистою рівноосною структурою, відсоток якої в полі макрошліфа складає 33%. Периферійні зони біля бічної поверхні характеризуються зростанням кристалів у горизонтальному напрямку або під кутом $50...70^{\circ}$ до вісі зливка.

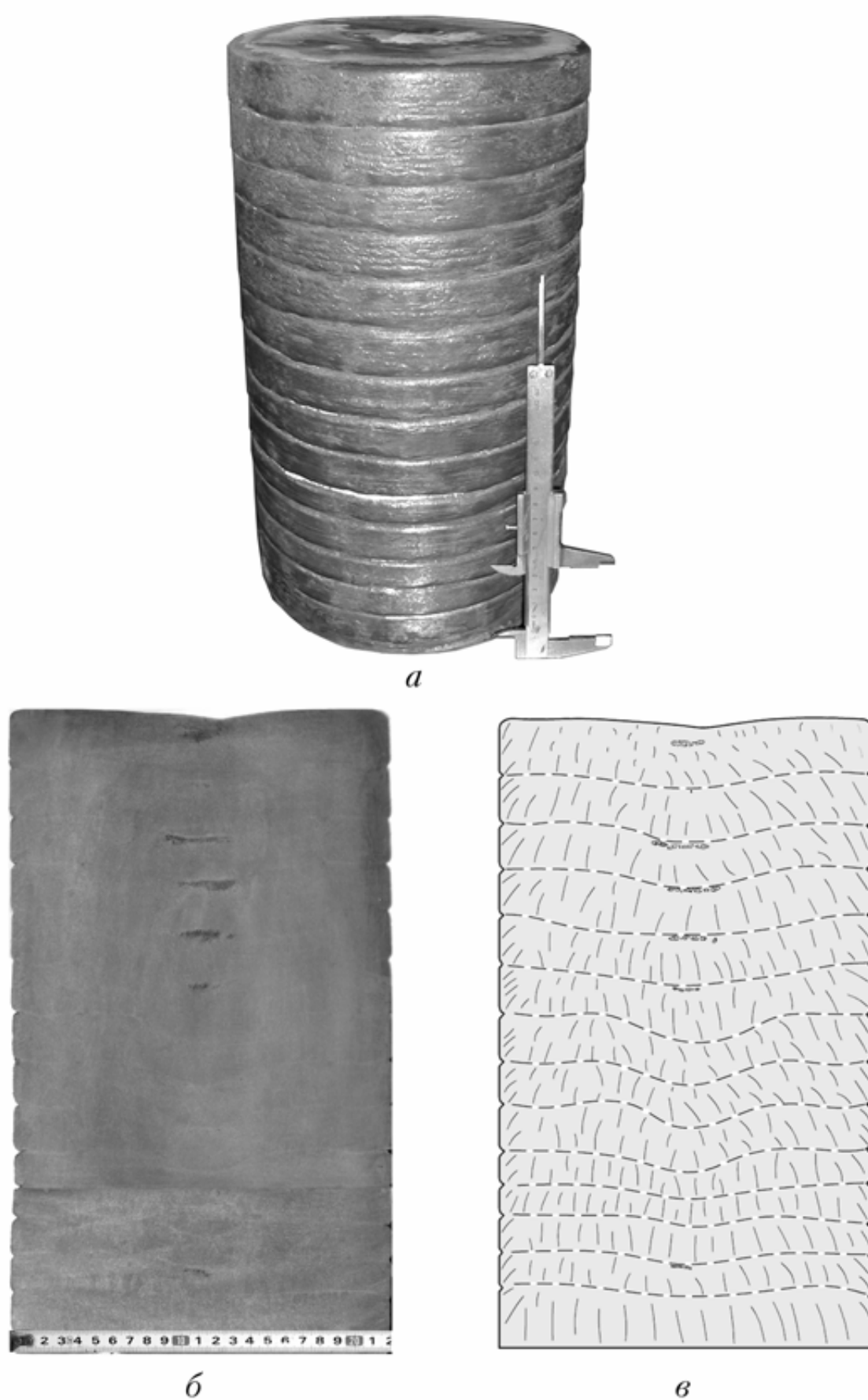


Рисунок 4.19 – Зовнішній вигляд (*a*), макроструктура (*б*) та схема кристалізації (*в*) зливка № 927



Рисунок 4.20 – Зовнішній вигляд (а), макроструктура (б) та схема кристалізації (в) зливка № 929

У центральній частині зливків № 927, 929 по границям поділу окремих шарів металу було виявлено дефекти у вигляді мікропористості (рис.4.19-20 б,в). Дефекти розташовувалися безпосередньо під поверхнями сплавлення шарів, які на поздовжніх шліфах виявлялися у вигляді світлих горизонтальних смужок. Очевидно, що утворення дефектів пов'язане з умовами твердіння металу під час пауз плавлення електрода і наступним наплавленням чергового шару металу. Ми вважаємо, що утворення дефектів викликане процесами усадки окремих шарів металу, коли під час пауз електроживлення, через низьку температуру підігріву шлакової ванни, на поверхні металевої ванни утворюється скоринка твердого металу і кристалізація відбувається у замкнутому об'ємі без підживлення рідким металом.

Для усунення дефектів по границям поділу окремих шарів було запропоновано вжити ряд заходів, а саме:

- зменшити тривалість пауз плавлення електрода $t_{\text{пУ}}$;
- підвищити температуру "підігріву" шлакової ванни в періоди, коли електрод не плавиться (збільшити напругу $U_{\text{п}}$ та струм $I_{\text{п}}$);
- напругу після паузи плавлення електрода підвищувати не різко а плавно.

З урахуванням цих пропозицій було проведено експерименти № 939, 940, при яких напругу $U_{\text{п}}$ було підвищено до 9...11 В, струм $I_{\text{п}}$ – до 1000...1200 А (табл. 4.4). При цьому, переходи між паузами та імпульсами плавлення електрода здійснювали поступово, шляхом плавного, протягом 50...60 с, підвищення електричної напруги на ванні та плавного підвищення швидкості подачі електрода. За рахунок цього струм плавки підвищувався також плавно (рис. 4.21).

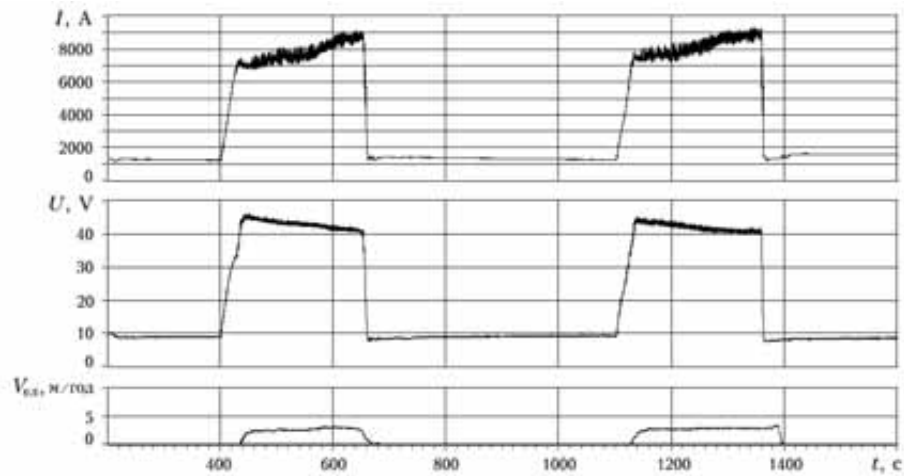


Рисунок 4.21 – Фрагмент реєстрограми режимів плавки № 939

Зовнішній вигляд, макроструктура та схема кристалізації виплавлених зливків наведені на рис. 4.22-4.23.

Виплавлені зливки мають хорошу якість формування бічної поверхні (рис. 4.21 а-4.23 а). Глибина гофр по діаметру зливків, спричинених їх пошаровим формуванням, не перевищувала 1...2 мм.

Аналіз макроструктури поздовжнього перерізу зливків свідчить про відсутність дефектів металургійного характеру. Структура зливків щільна, без пор, включень та інших дефектів. Вона характеризується наявністю шарів кристалізації. Середня висота окремого шару в зливку № 939 становить 55 мм, у зливку № 940 – 30 мм.

Зони переходу від шару до шару проявляються на макрошліфах у вигляді світлих прошарків (смужок) та мають "розмитий" характер без різкої межі. Ширина таких зон становить в середньому 3...5 мм. У зливку № 939 зони поділу шарів характеризуються помітним прогином його вісі, в зливку № 940 мають відносно плоску форму. Необхідно підкреслити, що в обох випадках дефекти по зонах сплавлення відсутні. Тобто, вжиті заходи дали позитивний результат.

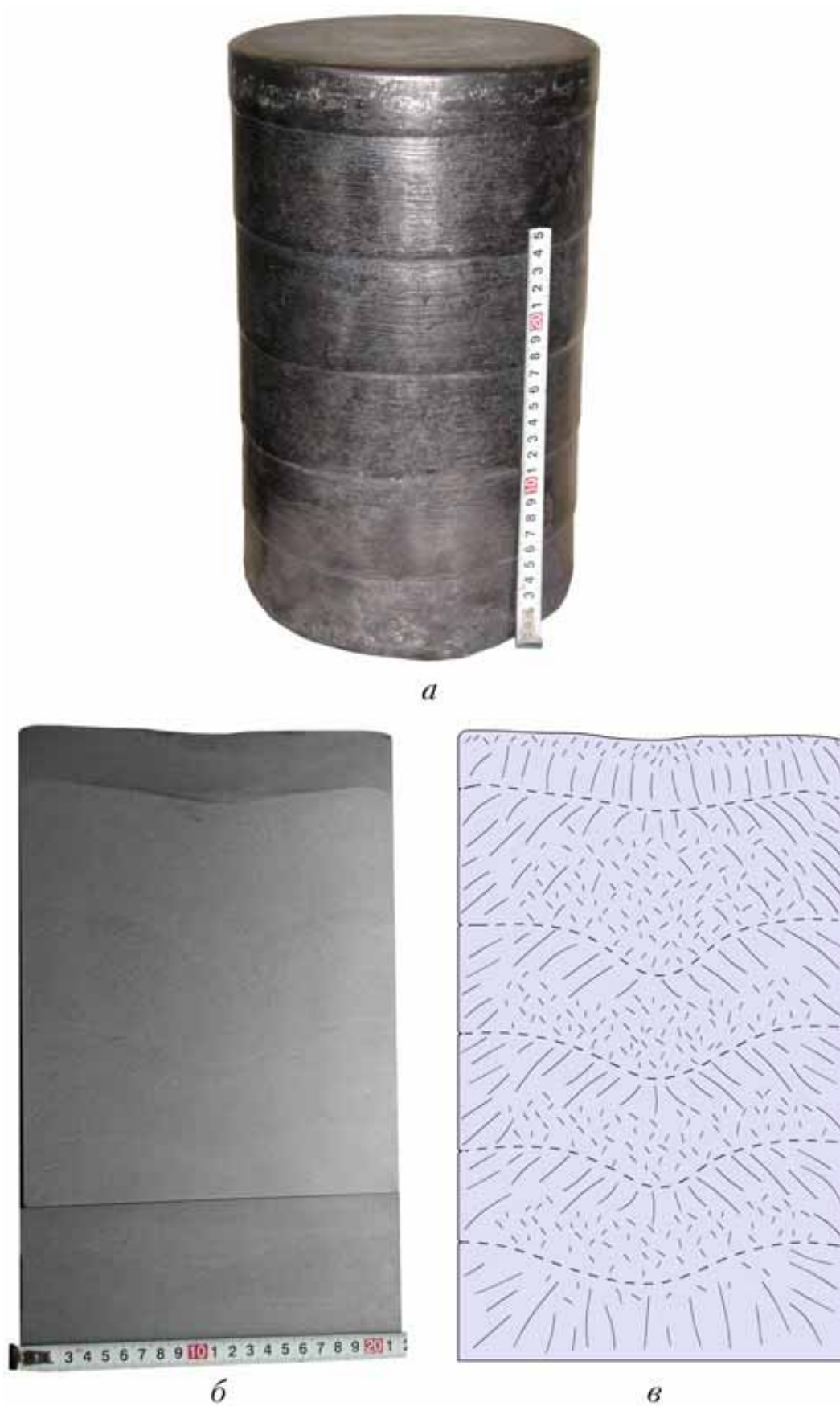


Рисунок 4.22 – Зовнішній вигляд (а), макроструктура (б) та схема кристалізації (в) зливка № 939

*a**б**в*

Рисунок 4.23 – Зовнішній вигляд (*a*), макроструктура (*б*) та схема кристалізації (*в*) зливка № 940

Макроструктура металу зливоків № 939, 940 змішана, складається як із стовпчастих кристалів, орієнтованих нормально до границь поділу шарів, так і з невеликих, розорієнтованих кристалів. Площі відповідних структурних зон та середні розміри їх зерен наведено у табл. 4.4.

В обох випадках стовпчасті кристали локалізовані в окремих шарах кристалізації, тобто вони не проходять крізь границі поділу. При цьому, спостерігається усунення орієнтованого зростання великих стовпчастих кристалів із зоною їх зустрічної кристалізації по вісі зливка, що має місце при традиційному ЕШП. В цілому, дисперсність структури зливка № 940 вища, ніж зливка № 939 що пов'язане з меншою висотою наплавлених шарів металу (табл. 4.4).

Загалом, аналіз макроструктури отриманих зливоків вказує, що середній розмір кристалів збільшується при збільшенні висоти наплавленого шару, але ніколи не перевищує його (рис. 4.24).

Також слід підкреслити можливість суттєвого зменшення глибини металевої ванни шляхом пошарового формування зливоків ЕШП. Так, наприклад, в експерименті № 940 глибина металевої ванни складала в середньому $0,13 \times d_{\text{зл}}$. Таку неглибоку ванну практично неможливо досягти при класичному ЕШП.

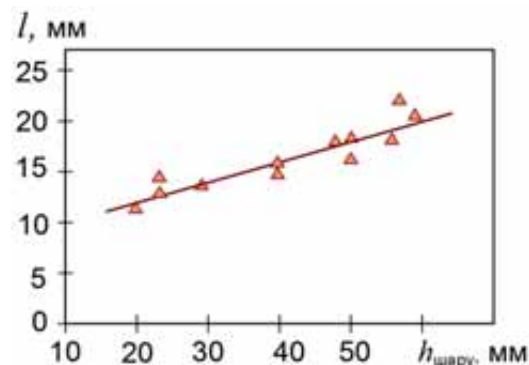


Рисунок 4.24 – Залежність середнього характерного розміру зерна l від висоти наплавленого шару $h_{\text{шару}}$ (для зливоків $\varnothing 220$ мм)

Таким чином, проведені експерименти довели можливість практичної реалізації процесу ЕШП з пошаровим формуванням зливка. Показано широкі можливості управління структуроутворенням металу зливоків за рахунок ведення процесу в нестационарному режимі, що забезпечує періодичне, порційне плавлення металу та його пошарове твердіння по висоті зливка.

Аналіз структури виплавлених зливоків виявив ряд позитивних ефектів. При вірно обраних режимах зливки мають щільну структуру, без пористості та неметалевих включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по вісі зливка. При цьому, "проростання" кристалів від шару до шару немає, тобто максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару. Дисперсність структури зливоків пошарового формування значно вище, ніж у аналогічних зливоків традиційного ЕШП. Водночас, вибір раціональних режимів електричного живлення під час імпульсів та пауз плавлення металу дозволяє зберегти стабільність електрошлакового процесу та високу якість формування бічної поверхні зливка.

Проведені експерименти дозволили розробити ряд рекомендацій щодо режимів пошарового формування зливоків ЕШП (рис. 4.25).

При виборі об'єму окремих порцій наплавленого металу слід виходити з умов структуроутворення металу і техніко-економічних показників процесу переплаву. При висоті наплавленого шару $h_{ш}$ менш ніж $0,1 \times d_{зл}$ погіршується формування бічної поверхні з можливістю утворення дефектів на периферії зливка. При $h_{ш}$ більше за $0,5 \times d_{зл}$ погіршується характер структуроутворення металу з формуванням великих стовпчастих кристалів, орієнтованих в напрямку тепловідведення (рис. 4.25). Виходячи з цього, висоту окремих порцій наплавленого металу доцільно обирати в межах:

$$h_{ш} = (0,1 \dots 0,5) \times d_{зл}.$$

Звідси розраховується тривалість імпульсів плавлення металу:

$$t_{iU} = (h_{ш}/V_{ел}) \times (d_{ел}/d_{зл})^2.$$

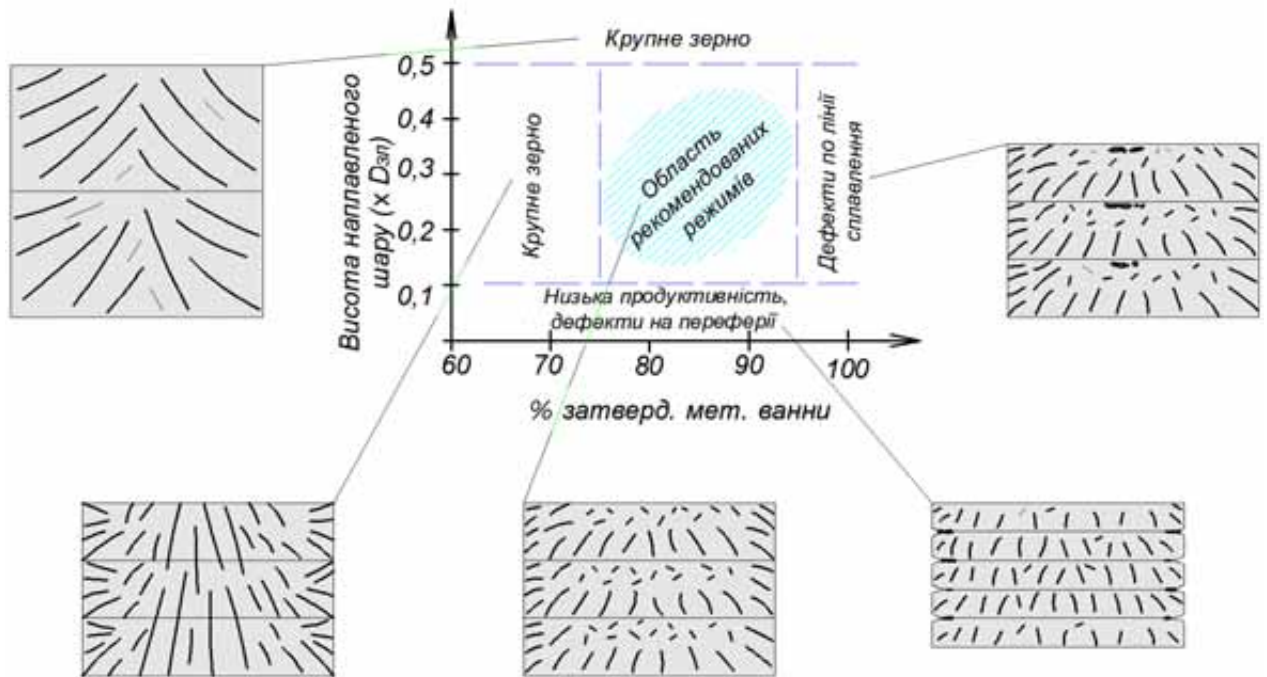


Рисунок 4.25 – Область рекомендованих режимів і характерні схеми кристалізації при ЕШП з пошаровим формуванням зливка

Для забезпечення відсутності дефектів у перехідних зонах необхідно, щоб в процесі порційного плавлення на поверхні зливка весь час залишався шар рідкого металу. Тобто, під час пауз плавлення електроду тверділо не більше певного обсягу рідкої металевої ванни. На основі експериментальних даних і досвіду застосування процесу пошарового формування зливоків діаметром 85...220 мм можна рекомендувати, щоб під час пауз тверділо 75...95% обсягу рідкої металевої ванни. За меншого об'єму затверділого металу зменшується ефективність подрібнення структури зливка з збереженням транскристалізації по висі зливка (рис. 4.25). При більшому – можливе утворення дефектів по лінії сплавлення окремих шарів.

Вказаний діапазон затверділого металу досягається вибором параметрів $t_{пU}$, $U_{п}$, $I_{п}$. Величина $U_{п}$ обирається виходячи зі складу сплаву, що переплавляють і марки флюсу. Вона має бути такою, щоб температура шлакової ванни була менше за температуру плавлення металу проте забезпечувала стабільність електрошлакового процесу і бездефектне

формування поверхні зливка. При переплаві титанових сплавів під фторидно-хлоридними флюсами рекомендована величина $U_{\text{п}}$ становить 10...13 В, при переплаві сталі – 8...11 В. Подальший перехід від пауз плавлення к періодам плавлення має відбуватися за заданою програмою з плавним підвищенням потужності і швидкості подачі електроду.

Також, важливо, щоб під час пауз плавлення металу через границю поділу *рідкий шлак - рідкий метал* завжди протікав електричний струм $I_{\text{п}}$. Даний струм забезпечує підігрів цієї границі поділу а також існування на поверхні зливка шару рідкого металу. Його величина визначається величиною $U_{\text{п}}$ і електричним опором міжелектродного проміжку. Останній залежить від складу флюсу, глибини шлакової ванни, величин $d_{\text{ел}}$, $d_{\text{зл}}$.

В цілому ефективність пошарового формування металу і вибір відповідних режимів переплаву залежать від хімічного складу сплаву, розмірів зливка і умов його охолодження.

Висновки до розділу 4

1. Експериментальним шляхом отримані дані щодо динаміки зміни температурних і глибини металевої ванни при ЕШП зливків діаметром 85...220 мм в умовах зменшення або відключення електричної напруги на витратному електроді. На основі експериментальних даних запропоновані залежності для визначення характеристик пошарового твердіння зливків ЕШП в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром до 220 мм:

- час повного твердіння металевої ванни (хв) $\tau_{\text{п}}=(0,06...0,08)\cdot k_{\text{пд}}\cdot k_{\text{тфм}}\cdot d_{\text{зл}}^2$, де $d_{\text{зл}}$ – діаметр зливка (см), $k_{\text{пд}}$ – коефіцієнт підігріву металу при неповному відключенні напруги, $k_{\text{тфм}}=\alpha_{\text{ст}}/\alpha_{\text{м}}$ ($\alpha_{\text{ст}}$ – коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі, $\alpha_{\text{м}}$ – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву);

- товщина затверділого шару металу (см) $\delta=(2,5...4,5)\cdot k_{\text{пд}}\cdot \sqrt{\tau}/k_{\text{тфм}}$, де τ – час твердіння (сек);

- температура металу на відстані $0,5 \times d_{зл}$ від верхнього торця зливка і $0,25 \times d_{зл}$ від бічної поверхні, після відключення напруги ($^{\circ}\text{C}$)
 $T = T_{\text{в}} + (T_{\text{мв}} - T_{\text{в}}) \cdot k_{\text{пд}} \cdot k_{\text{тфм}} \cdot e^{-k_{\text{тп}} \tau}$, де $T_{\text{мв}}$ – температура металеві ванни, $T_{\text{в}}$ – температура охолоджуючої води, τ – час охолодження (хв), $k_{\text{тп}}$ – коефіцієнт теплопередачі, який для злиwkів діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0.19, 0.056 і 0.02 відповідно.

2. Експериментально доведена можливість і ефективність керування структуроутворенням металу шляхом порційного тепловнесення в процесі ЕШП із забезпеченням періодичності процесів плавлення і кристалізації окремих об'ємів металу і пошарового формування зливка. Для реалізації пошарового формування періоди плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, коли електрод не подається і не плавиться, але в шлаковій ванні підтримується електричний струм і заданий тепловий режим. При цьому, вибір раціональних режимів електричного живлення під час імпульсів та пауз плавлення металу дозволяє зберегти стабільність електрошлакового процесу та бездефектне формування бічної поверхні зливка.

3. Визначальними параметрами процесу пошарового формування є тривалість імпульсів та пауз плавлення електроду, об'єм окремого шару наплавленого металу, електричні режими підігріву шлакової ванни під час пауз плавлення електроду та характер їх зміни при переході від паузи до імпульсу плавлення електроду. Ці характеристики необхідно вибирати виходячи з розмірів злиwkів, властивостей матеріалу, що виплавляється, умов охолодження рідкої металеві ванни. Доцільно, висоту окремих порцій наплавленого металу вибирати в межах $(0,1 \dots 0,5) \times d_{зл}$, а тривалість пауз плавлення електроду розраховувати виходячи з умов твердіння за цей час 75...95 % об'єму рідкої металеві ванни.

4. Показано, що злиwки, отримані способом пошарового формування мають щільну структуру, без пористості та шлакових включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони

зустрічної кристалізації по вісі зливка. При цьому, максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару а дисперсність структури вище ніж у аналогічних зливків традиційного ЕШП. При правильно обраних режимах пошарового формування дефекти по зонах сплавлення відсутні, а механічні властивості вздовж і поперек шарів кристалізації рівнозначні.

5. Показано, що пошарове формування зливків ЕШП дозволяє суттєво зменшити глибину (до $0,13...0,25 \times d_{зл}$) і об'єм рідкої металевої ванни і отримати плоский фронт кристалізації.

РОЗДІЛ 5

КЕРУВАННЯ КРИСТАЛІЗАЦІЄЮ МЕТАЛУ ПРИ ЕШП ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РОЗРЯДІВ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

В попередньому розділі було розглянуто спосіб управління процесом кристалізації металу при ЕШП, що базується на зменшенні об'єму рідкої металевої ванни шляхом пошарового формування зливка.

В цьому розділі буде розглянуто принципово інший підхід, оснований на фізичному впливі на гідродинамічний стан металевої ванни за допомогою зовнішніх імпульсних електричних та електромагнітних впливів.

5.1 Аналіз можливостей використання імпульсних електромагнітних впливів в електрошлакових процесах

Про можливість і ефективність керування МГД процесами в металургійному розплаві електрошлакової печі за допомогою зовнішніх електромагнітних впливів відомо давно [146-149, 164, 238-240]. Свого часу для керування процесом ЕШП пропонувалось використовувати поперечні магнітні поля, які створювались полюсами електромагнітів розташованими з протилежних боків кристалізатора [241-242]. Це вимагало використання громіздких електромагнітних систем, що склалися з магнітопроводів на яких розташовували багатовиткові мідні котушки (рис.5.1). В свою чергу, це обумовлювало велику масу і габарити таких магнітних контурів, що погіршувало технологічність їх практичного використання.

Більш ефективним виявилось використання при ЕШП поздовжніх магнітних полів, які створюються соленоїдом, що охоплює кристалізатор [243-244]. Це дозволило відмовитись від громіздких металевих магнітопроводів. Однак, при традиційному живленні таких соленоїдів постійним струмом їх доводиться виготовляти також багатовитковими і багат шаровими з примусовим водяним охолодженням обмоток (рис. 5.2). Із

збільшенням діаметра кристалізатора доводиться істотно збільшувати кількість ампер-витків і габарити соленоїдів, при зменшенні ефективності керування кристалізацією.

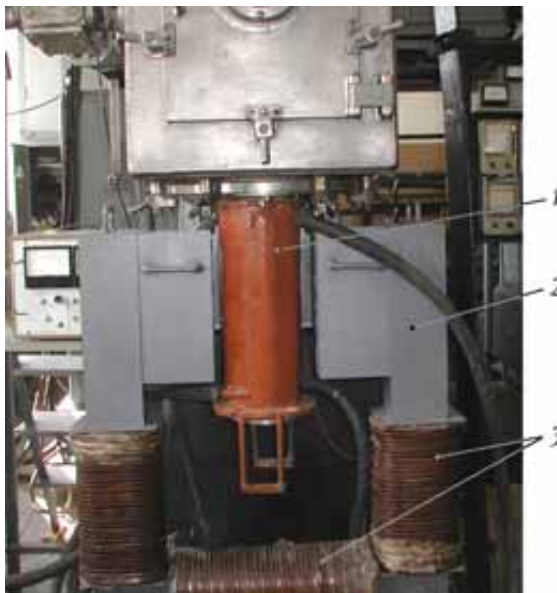


Рисунок 5.1 – Електромагнітна система для ЕШП в поперечному магнітному полі: 1 – кристалізатор; 2 – магнітопровід електромагнітної системи; 3 – обмотки електромагнітної системи



Рисунок 5.2 – Електромагнітна система для ЕШП в поздовжньому магнітному полі: 1 – кристалізатор; 2 – водоохолоджувані обмотки електромагнітної системи

Наступним кроком в пошуках шляхів інтенсифікації електромагнітного впливу на процес ЕШП було використання імпульсних поздовжніх магнітних полів [151, 187, 245]. Це дозволило використовувати більш компактні соленоїди з меншим перерізом обмоток при більшій ефективності впливу на кристалізацію зливків.

Незважаючи на покращення масогабаритних характеристик електромагнітних систем і зменшення витрат електроенергії, застосування традиційних випрямлячів електричного струму для живлення соленоїдів не дозволяє в повній мірі використовувати потенціал електромагнітного впливу на електрошлаковий процес. Насамперед, це пов'язано зі складністю забезпечення необхідних значень магнітної індукції в зоні плавки при збільшенні діаметра кристалізатора, що обумовлено неприйнятними масогабаритними показниками магнітних контурів, необхідних для її отримання.

З огляду на це, перспективним напрямком подальшої інтенсифікації імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес є використання таких джерел електричного заряду як ємнісні накопичувачі електричної енергії (конденсатори) [152]. Батареї конденсаторів, при відносно малих габаритах, дозволяють практично миттєво, у соті частки секунди, виділяти суттєву електричну енергію та формувати потужні імпульси струму у розрядному контурі.

Використання конденсаторів для живлення обмоток електромагнітної системи (соленоїда, що охоплює кристалізатор) дає можливість при їх відносно малих габаритах формувати імпульси електричного струму в десятки кілоампер, які, у свою чергу, створюють в зоні плавки потужні імпульси магнітного поля. Враховуючи, що тривалість таких імпульсів невелика (десятки мілісекунд), це дає змогу використовувати для їх створення компактні соленоїди з відносно невеликим перерізом обмоток. Крім того, їх можна робити рухомими, що також дозволить зменшити масу і габарити цього устрою (рис.5.3).

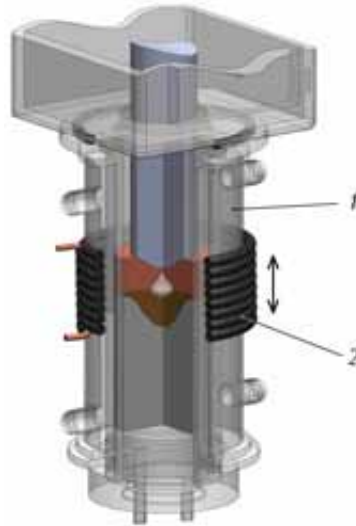


Рисунок 5.3 – Схема ЕШП в поздовжньому магнітному полі з рухомою електромагнітною системою: 1 – кристалізатор; 2 – обмотки електромагнітної системи

Принцип дії поздовжнього магнітного поля на процес ЕШП полягає в наступному. Лінії електричного струму при ЕШП витратного електроду в мідному кристалізаторі не є прямолінійними (рис.5.4). Вони викривляються за рахунок різної електропровідності середовищ (електрод, шлак, рідкий метал, твердий метал), викривлення поверхонь їх поділу, різниці їх геометричних параметрів [43]. Внаслідок цього електричний струм в шлаковій і металевій ваннах, у циліндричній системі координат (z, r, φ) (рис. 5.4) має складові $(I_z, I_r, 0)$. Магнітне поле, в цьому випадку, має складові $(B_z, 0, B_\varphi)$, де B_φ - власне магнітне поле струму плавки, а B_z - магнітне поле струму соленоїда. Тоді електромагнітна сила $\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}$, що утворюється в струмонесучих розплавах шлаку і металу матиме складові $\vec{F}_e = (I_r B_\varphi, -I_z B_\varphi, -I_r B_z)$.

Враховуючи, що в разі використання зовнішнього магнітного поля воно значно потужніше власного магнітного поля струму плавки, тобто $B_z \gg B_\varphi$, останнім можна знехтувати. Тоді електромагнітна сила матиме складові $\vec{F}_e = (0, 0, -I_r B_z)$. З цього випливає, що зовнішнє поздовжнє магнітне

поле при взаємодії з радіальною складовою струму плавки створює азимутальну електромагнітну силу, що обертає розплав навколо осі симетрії. При цьому, напрямок азимутального обертання розплаву залежить від знака зовнішнього магнітного поля. Тобто, змінюючи напрямок струму в обмотках соленоїда, можна здійснювати реверсування руху розплаву, або утворювати його вібрації.

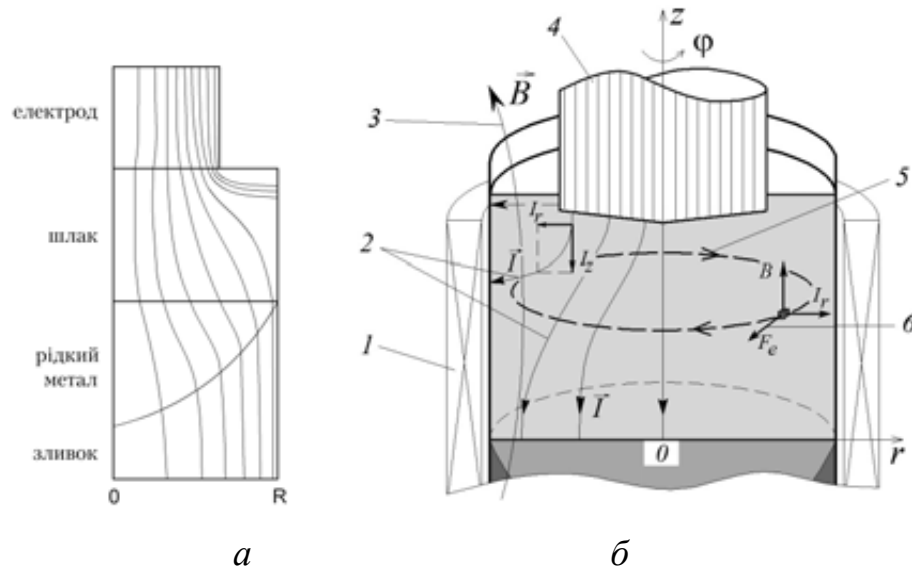


Рисунок 5.4 – Лінії електричного струму (а) і механізм утворення електровихрових течій розплаву (б) при ЕШП в поздовжньому магнітному полі: 1 – соленоїд; 2 – лінії електричного струму; 3 – силові лінії магнітного поля; 4 – електрод; 5 – азимутальне обертання розплаву (електровихрові течії); 6 – електромагнітна сила

Слід зазначити, що вищесказане справедливе як для шлакової, так і для металевої ванн. Однак, інтенсивність азимутального обертання рідкого металу буде меншою, ніж шлаку, що пов'язано з характером розподілу струму в розплаві (I_r шлак $>$ I_r метал) та теплофізичними характеристиками металу та шлаку.

Таким чином, зовнішнє поздовжнє магнітне поле дозволяє здійснювати безконтактний силовий вплив на металургійний розплав, впливаючи тим

самим на умови плавлення і кристалізації металу і досягаючи необхідних металургійних ефектів.

Збільшення ефективності електромагнітного впливу на ЕШП безпосередньо пов'язане зі збільшенням електромагнітної сили $\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}$. На цьому шляху є декілька варіантів: збільшення струму плавки \vec{I} ; збільшення індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} ; зміна орієнтації векторів \vec{I} і \vec{B} таким чином, щоб кут їх перетину наближався до 90° .

З огляду на це застосування розрядів конденсаторів відкриває можливості їх використання як для формування потужних імпульсів зовнішнього магнітного поля \vec{B} (за рахунок розрядів на обмотку соленоїда), так і імпульсів струму плавки \vec{I} (шляхом розрядів, безпосередньо, на металургійний розплав).

На рис. 5.5 наведені варіанти застосування розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії для імпульсного електромагнітного впливу на процес ЕШП:

- вплив імпульсним поздовжнім магнітним полем, створеним розрядами конденсаторів на обмотки соленоїда, що охоплює кристалізатор (рис. 5.5 а);

- періодичні розряди конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну і фронт кристалізації зливка (ділянка ланцюга *електрод - шлакова та металева ванни - піддон*) (рис. 5.5 б);

- комбінована дія імпульсним магнітним та електричним полями за допомогою одночасних розрядів конденсаторів на соленоїд та металургійну ванну (рис. 5.5 в).

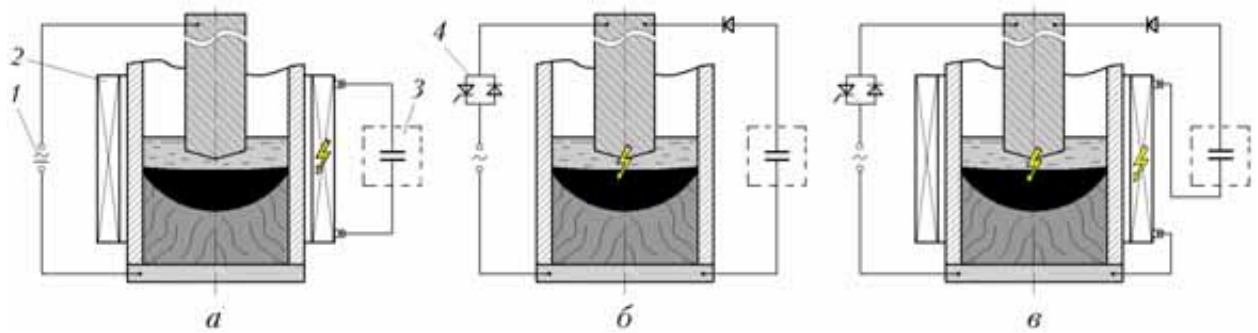


Рисунок 5.5 – Схеми впливу на процес ЕШП з використанням розрядів конденсаторів на соленоїд (*a*), на металургійну ванну (*б*), та одночасних розрядів на соленоїд і металургійну ванну (*в*): 1 – джерело живлення печі ЕШП; 2 – соленоїд; 3 – джерело генерування електричних розрядів; 4 – тиристорний ключ

Механізм впливу на кристалізацію металу при схемі, наданій на рис. 5.5 *a*, заснований, як зазначалось вище, на магнітогідродинамічних ефектах у розплавах шлакової та металеві ванн при впливі зовнішнім поздовжнім магнітним полем. Слід зазначити, що в разі застосування змінного струму плавки і при тривалості розрядного імпульсу більш ніж пів періоду струму плавки, напрямок дії електромагнітної сили протягом дії імпульсу магнітного поля буде змінюватись на протилежний з частотою струму плавки (рис. 5.6). В свою чергу це буде створювати вібрації металургійної ванни.

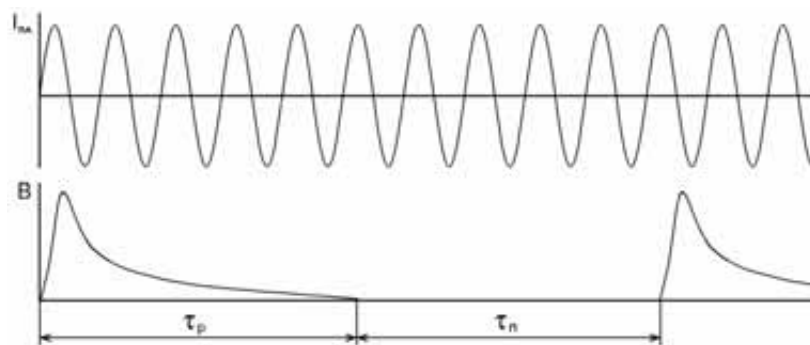


Рисунок 5.6 – Принциповий характер пульсацій змінного струму плавки $I_{пл}$ і магнітного поля B , створеного електричними розрядами (τ_p - тривалість розряду; τ_n - тривалість паузи)

Схема впливу на електрошлаковий процес шляхом розрядів конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну (рис. 5.5 б) може бути перспективною, бо дозволяє взагалі позбутися необхідності використання зовнішнього магнітного контуру (соленоїда). Накладання потужних розрядних імпульсів електричного струму на робочий струм плавки спрямоване на формування гідродинамічних "ударів" по фронту кристалізації зливка і утворення механічних коливань ванни, що має сприяти подрібненню дендритів, які зростають, і підвищенню структурної однорідності металу. Механізм утворення таких "ударів" пояснюється рис. 5.7. Взаємодія струму плавки з власним магнітним полем призводить до утворення в струмонесучих розплавах шлакової і металевій ванні електромагнітної сили \vec{F}_e . Внаслідок викривлення ліній електричного струму сила \vec{F}_e розподілена таким чином, що утворює потоки розплавів спрямовані униз по вісі ванни. Періодичні розряди конденсаторів призводять до збільшення струму плавки і відповідного збільшення сили \vec{F}_e яка створює гідродинамічні "удари" по фронту кристалізації.

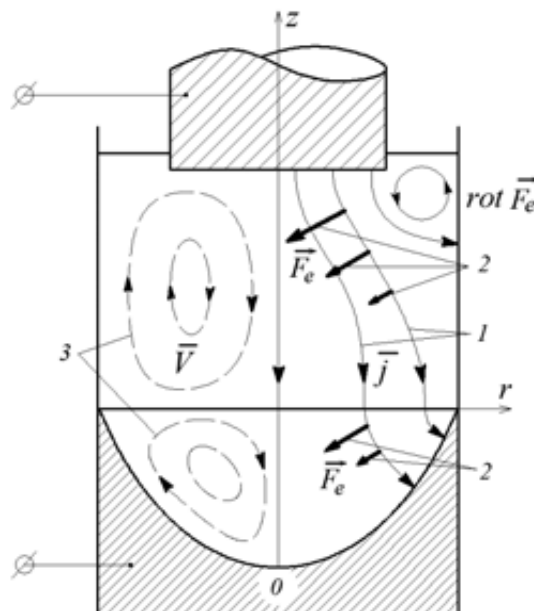


Рисунок 5.7 – Механізм утворення течій розплаву внаслідок взаємодії струму плавки з власним магнітним полем: 1 – лінії електричного струму; 2 – розподіл електромагнітної сили \vec{F}_e ; 3 – характері руху розплаву

Крім того, періодичні розряди конденсаторів на металургійну ванну мають сприяти збільшенню частоти відриву крапель електродного металу через стискання і руйнування струмонесучої перемички внаслідок пінч-ефекту (рис. 5.8).

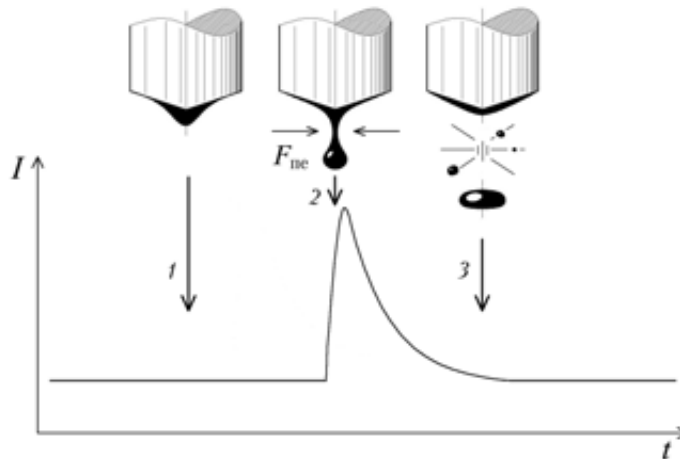


Рисунок 5.8 – Пінч-ефект при накладенні розрядних імпульсів електричного струму на металургійну ванну: 1 – формування краплі на оплавленому торці витратного електрода; 2 – стискання перемички внаслідок пінч-ефекту; 3 – руйнування перемички і відрив краплі

Використання комбінованого методу (рис. 5.5 в) націлене на підвищення ефективності МГД впливу на ванну. Так, періодичні електричні розряди на металургійну ванну, які діють синхронно з імпульсами струму в соленоїді, призводять до періодичного збільшення струму \vec{I} в металургійному розплаві і, відповідно, до збільшення електромагнітної сили $\vec{F}_e = \vec{I} \times \vec{B}$, що діє на розплав. Це збільшує гідродинамічні ефекти в ванні і силовий вплив на фронт кристалізації зливка.

В наступних розділах будуть розглянуті особливості використання імпульсних електромагнітних впливів при ЕШП, створених розрядами конденсаторів.

5.2 Створення експериментальної бази для проведення досліджень з впливу розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії на процес ЕШП

Проведення досліджень з використанням енергії електромагнітних розрядів при ЕШП потребувало розробки відповідного експериментального обладнання, зокрема джерела генерації таких розрядів, магнітних контурів (соленоїдів), пристроїв для розрядів безпосередньо на зону плавки. Необхідно було провести випробування обладнання та дослідити основні параметри імпульсної електромагнітної дії на процес плавки.

5.2.1 Розроблення експериментального джерела живлення для імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес із застосуванням ємнісних накопичувачів електричної енергії

5.2.1.1 Аналіз схем реалізації імпульсного електромагнітного впливу з використанням розрядів конденсаторів

Насамперед необхідно було провести аналіз можливих схем реалізації імпульсного електромагнітного впливу на ЕШП з використанням розрядів конденсаторів.

Використання розрядів конденсаторів на магнітний контур дозволяє реалізувати різні схеми імпульсної електромагнітної дії на електрошлаковий процес. Зокрема, це можуть бути затухаючі знакозмінні розрядні імпульси струму в магнітному контурі, односпрямовані імпульси струму (без коливань), розрядні імпульси протилежного знаку, тощо. Нижче будуть розглянуті згадані варіанти електромагнітної дії і електричні схеми пристроїв для їх реалізації.

На рис. 5.9. *a* наведена найпростіша схема зарядно-розрядного пристрою, яка дозволяє реалізовувати затухаючі розрядні імпульси струму в магнітному контурі, які не змінюють свій напрямок (рис. 5.9 *б*). Це схема з мостовим випрямлячем і розрядом на соленоїд із зворотним діодом. Керуючи кутом відпирання тиристорів VD1,VD3 можна регулювати швидкість і

напругу заряду конденсаторного блоку $C1$. Перевага цієї схеми - її простота і висока швидкість заряду конденсаторів (у порівнянні з однонапівперіодною схемою заряду). Недолік - можливість створення тільки односпрямованих імпульсів струму в магнітному контурі (без коливань).

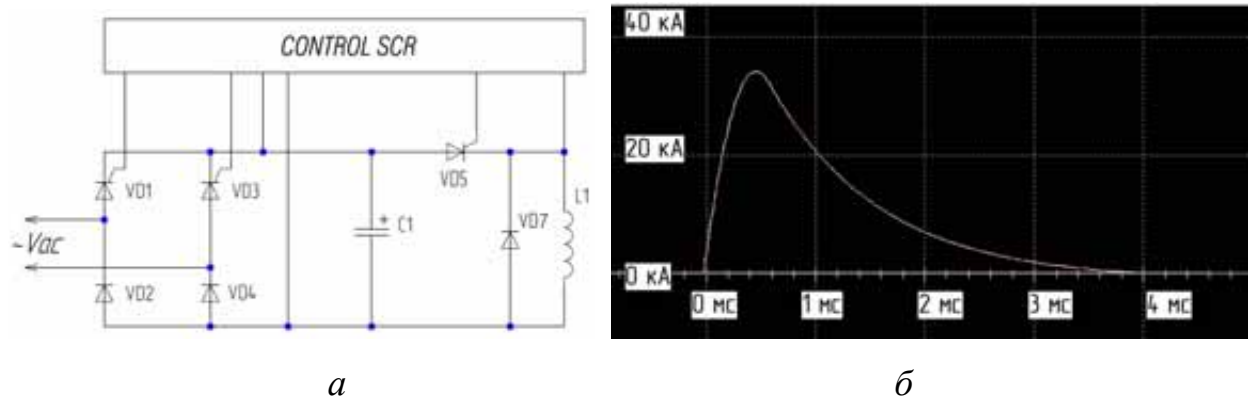


Рисунок 5.9 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з зворотним діодом (а) і розрахункова осцилограма струму (б) при $C1=72000$ мкФ, $L1=1,7$ мкГн, $R_{\text{конд}}=0,65$ мОм, $R_{\text{солен.}}=0,3$ мОм, $R_{\text{ланцюг}}=1$ мОм, $U_{\text{зар.}}=240$ В: VD1, VD3 – зарядні тиристри; VD5 – розрядний тиристор; C1 – конденсаторний блок; L1 - навантаження (соленоїд кристалізатора)

На рис. 5.10. наведена схема зарядно-розрядного пристрою з двонапівперіодним накопиченням електричних зарядів двома блоками конденсаторів і розрядом на соленоїд із зворотними діодами. Ця схема дає можливість реалізовувати як послідовні розряди двох блоків конденсаторів на магнітний контур, так і одночасні. В останньому випадку енергія окремого розряду збільшується в два рази (якщо $C1=C2$).

Схема на рис. 5.10, як і схема зображена на рис. 5.9 а, дозволяє створювати лише односпрямовані імпульси струму в магнітному контурі. При застосуванні таких розрядів на соленоїд кристалізатора в металургійному розплаві створюється електромагнітна сила \vec{F}_e одного напрямку (при застосуванні постійного струму плавки). При змінному струмі плавки сила \vec{F}_e також або діє в одному напрямку (якщо тривалість

розрядного імпульсу менше ніж півперіоду струму плавки), або значно переважає силу протилежного напрямку, яка утворюється при зміні полярності струму плавки.

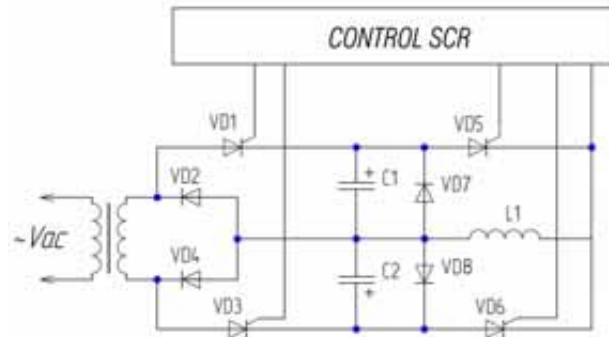


Рисунок 5.10 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з двонапівперіодним накопиченням електричних зарядів двома блоками конденсаторів і розрядом на соленоїд із зворотними діодами: $VD1$, $VD3$ – зарядні тиристри; $VD5$, $VD6$ – розрядний тиристор; $C1$, $C2$ – конденсаторні блоки; $L1$ - навантаження (соленоїд кристалізатора)

Проте, для впливу на кристалізацію металу при ЕШП, певний інтерес може представляти створення послідовної знакозмінної силової дії на розплав. Для формування знакозмінних коливань струму в магнітному контурі (соленоїді) можна використовувати простіший LC контур. В цьому випадку конденсатори повинні допускати перезарядку зворотної полярності, тобто бути неполярними (біполярними). Відповідна, принципова схема пристрою представлена на рис. 5.11 а, а розрахункова осцилограма струму – на рис. 5.11 б. В цьому разі в магнітному контурі створюються затухаючі знакозмінні імпульси струму, причому пікові значення перших протилежних імпульсів можуть бути співставними (порівнянними) (рис. 5.11 б). Недоліком цієї схеми є необхідність застосування неполярних конденсаторів.

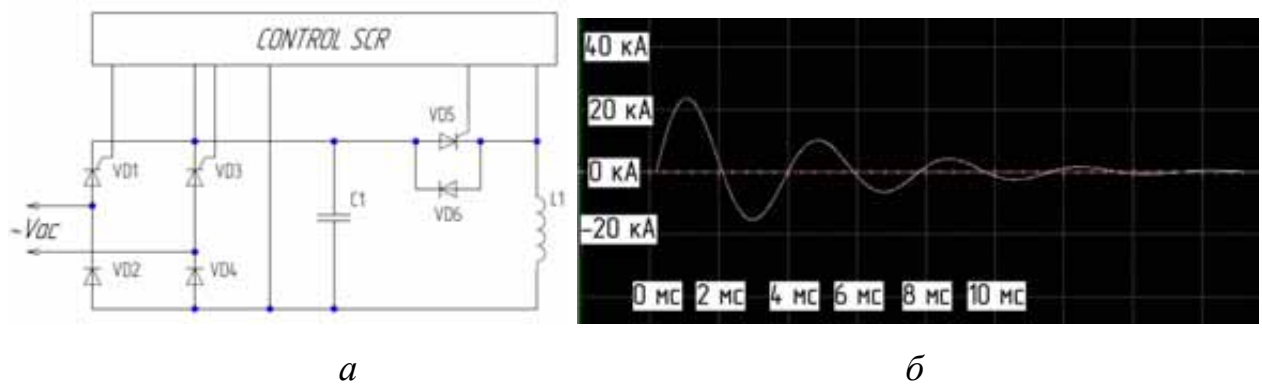


Рисунок 5.11 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з резонансним контуром і неполярним конденсатором (а) і розрахункова осцилограма струму (б) при $C1=72000$ мкФ, $L1=5$ мкГн, $R_{\text{конд}}=0,65$ мОм, $R_{\text{солен.}}=0,3$ мОм, $R_{\text{ланцюг}}=1$ мОм, $U_{\text{зар.}}=240$ В: VD1, VD3 – зарядні тиристри; VD5 – розрядний тиристр; C1 – конденсаторний блок; L1 - навантаження (соленоїд кристалізатора)

На рис. 5.12 а представлена схема, яка дозволяє створювати знакозмінні коливання струму із застосуванням двох блоків більш доступних і розповсюджених полярних конденсаторів. В даному випадку від джерела живлення заряджається блок конденсаторів C1 (тиристорами VD1, VD3 можна регулювати швидкість і напругу заряду) і перший розрядний імпульс створюється блоком конденсаторів C1. Блок C2 заряджається за рахунок ЕРС самоіндукції контуру і при подальшому розряді створює імпульс струму в соленоїді протилежного напрямку (рис. 5.12 б). Недолік цієї схеми полягає в застосуванні двох батарей конденсаторів однакової ємності. При цьому, блок конденсаторів C2 є пасивним, і у випадку малої індуктивності соленоїда він може заряджатися не на повну ємність.

Схеми, наведені на рис. 5.11 і 5.12, дозволяють створювати затухаючі знакозмінні коливання струму. Частота цих коливань залежить від ємності конденсаторів і індуктивності розрядного контуру, і змінювати (регулювати) її в процесі плавки неможливо (не змінюючи C і L). Також не можна створювати знакозмінні імпульси струму з паузами між ними. Все це

зменшує можливості керування параметрами імпульсної електромагнітної дії на електрошлаковий процес.

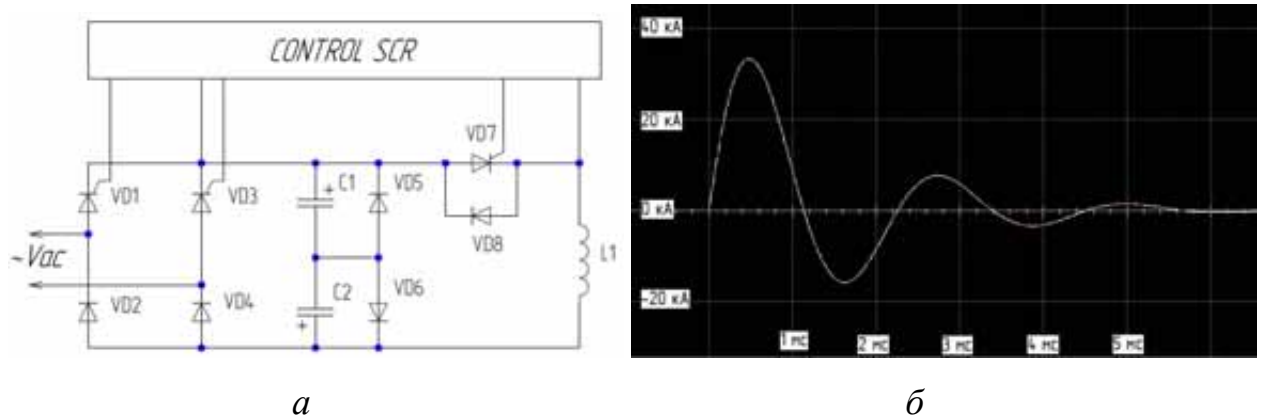


Рисунок 5.12 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з резонансним контуром і двома блоками конденсаторів (а) і розрахункова осцилограма струму (б) при $C1=C2=72000$ мкФ, $L1=1,7$ мкГн, $R_{\text{конд}}=0,65$ мОм, $R_{\text{солен.}}=0,3$ мОм, $R_{\text{ланцюг}}=1$ мОм, $U_{\text{зар.}}=240$ В: VD1, VD3 – зарядні тиристори; VD5, VD6 – розрядні тиристори; C1, C2 – конденсаторні блоки; L1 - навантаження (соленоїд кристалізатора)

Цих недоліків позбавлена схема, наведена на рис. 5.13 а. В цьому випадку в магнітному контурі створюються не резонансні коливання струму, а розрядні імпульси протилежних знаків від двох блоків конденсаторів, які розряджаються по черзі (рис. 5.13 б). Регулюючи кут відкриття тиристорів VD1, VD2 можна незалежно регулювати напругу заряду блоків конденсаторів C1 і C2 і, відповідно, величину імпульсу струму (прямого і зворотного). За рахунок включення тиристорів VD3, VD6 можна регулювати частоту розрядів (тривалість пауз між ними). Недоліком даної схеми є більш тривалий час заряду конденсаторів, порівняно зі схемою з мостовим випрямлячем.

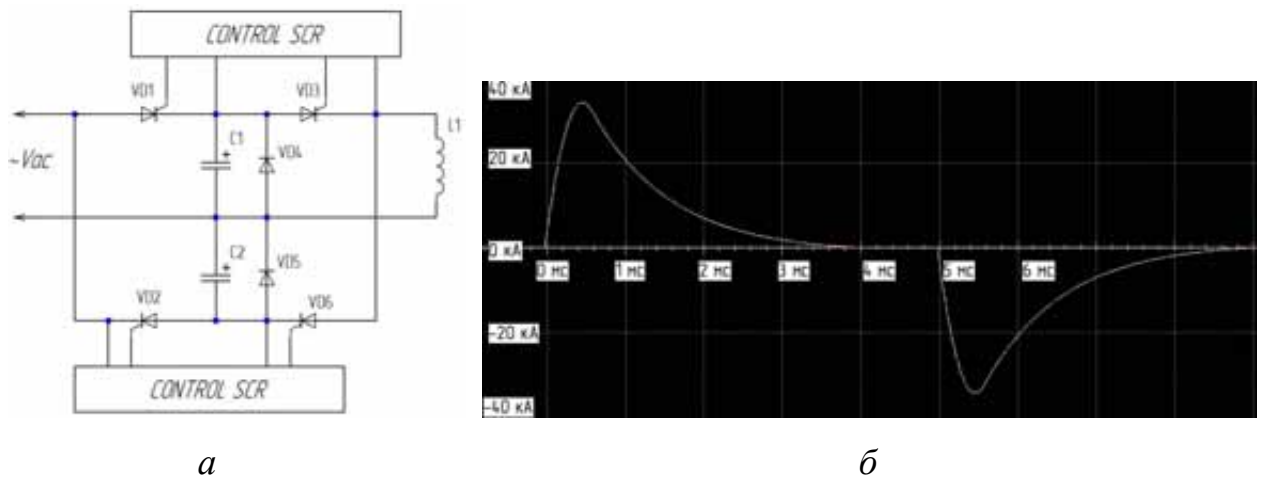


Рисунок 5.13 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з однополуперіодним випрямленням і двома блоками конденсаторів (а) і розрахункова осцилограма струму (б) при $C1=C2=72000$ мкФ, $L1=1,7$ мкГн, $R_{\text{конд}}=0,65$ мОм, $R_{\text{солен.}}=0,3$ мОм, $R_{\text{ланцюг}}=1$ мОм, $U_{\text{зар.}}=240$ В: VD1, VD3 – зарядні тиристори; VD5, VD6 – розрядні тиристори; C1, C2 – конденсаторні блоки; L1 - навантаження (соленоїд кристалізатора)

Більш високу швидкість заряду конденсаторів і, відповідно, більш високу частоту розрядів, забезпечує схема, наведена на рис. 5.14. Вона передбачає наявність у живильного трансформатора VT1 двох вторинних обмоток, або наявність двох окремих трансформаторів. Керуючи кутом відмикання тиристорів VD1, VD3 і VD7, VD9 можна регулювати швидкість і напругу заряду конденсаторів C1 і C2, відповідно. По черзі включаючи тиристори VD6, VD12 можна створювати імпульси струму в котушці L1 протилежних напрямків. Недолік схеми, необхідність трансформатора з двома обмотками (або двох трансформаторів).

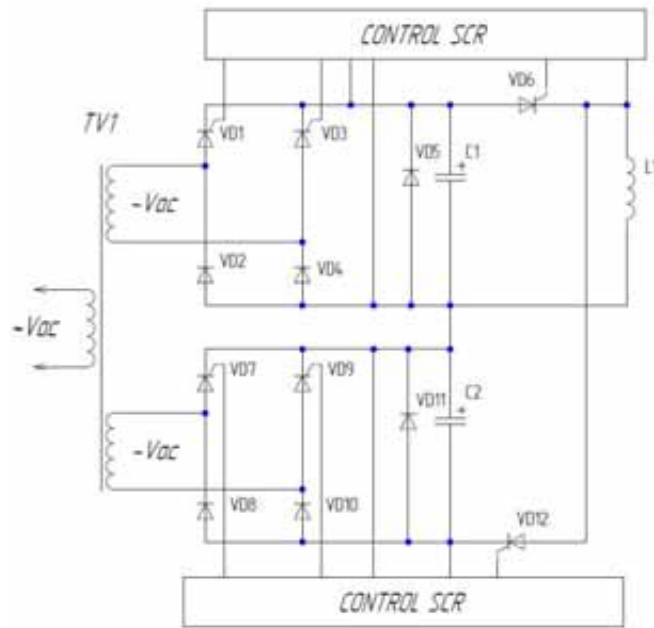


Рисунок 5.14 – Принципова електрична схема зарядно-розрядного пристрою з мостовим випрямленням і розряду на соленоїд із зворотним діодом з використанням двох обмоток живильного трансформатора:

VD1, VD3, VD7, VD9 – зарядні тиристори; VD6, VD12 – розрядні тиристори; C1, C2 – конденсаторні блоки; L1 - навантаження (соленоїд кристалізатора)

Аналіз наведених вище схем реалізації імпульсних електромагнітних впливів при ЕШП показав, що всі вони мають певні переваги і недоліки. На даному етапі досліджень нема підстав вважати, що створення знакозмінних затухаючих розрядних імпульсів струму у магнітному контурі (соленоїді) буде мати переваги при впливі на кристалізацію зливків ЕШП. Щодо створення таких коливань при розрядах конденсаторів безпосередньо на зону плавки, то, вочевидь, воно є проблематичним через низьку індуктивність такого розрядного контуру.

Враховуючи наведене, в якості базової схеми для створення джерела живлення для імпульсного електромагнітного впливу на електрошлаковий процес була вибрана схема, наведена на рис. 5.10. Вона дозволяє регулювати напругу заряду конденсаторів, частоту їх розрядів, реалізовувати як послідовні розряди двох блоків конденсаторів, так і одночасні, додатково

регулюючи тим самим енергію розрядів. При цьому, є можливість заряду конденсаторів як безпосередньо від силового ланцюга, так і додаткового джерела живлення.

5.2.1.2 Розроблення пристрою для створення розрядних імпульсів струму для впливу на процес ЕШП

При створенні джерела генерації розрядних імпульсів принциповим завданням було визначення основних характеристик конденсаторного блоку.

Важливими характеристиками конденсаторів, що визначають ефективність їх використання для створення потужних електричних розрядів, є ємність і робоча напруга. Величина пікового струму в розрядному контурі визначається, насамперед, напругою заряду конденсатора та електричним опором контуру, а тривалість імпульсу - опором контуру та ємністю конденсаторної батареї. Відповідно для збільшення пікового струму потрібно збільшувати напругу заряду конденсаторів, а для збільшення тривалості та енергії імпульсу – їх ємність та напругу.

Сьогодні промисловість виробляє широку номенклатуру конденсаторів ємністю до кількох десятків фарад та робочою напругою від кількох вольт до десятків кіловольт. Використання високовольтних конденсаторів в умовах металургійного виробництва пов'язане з серйозними труднощами, які зумовлені необхідністю забезпечення високого рівня електричної ізоляції елементів ланцюга та технікою безпеки. Через це, практичне їх використання в умовах ЕШП є проблематичним.

Сучасні суперконденсатори характеризуються величезною ємністю, проте мають невелику робочу напругу (кілька В). Це не дозволяє їх використовувати для формування потужних електричних розрядів та управління кристалізацією при ЕШП.

Аналіз електричних характеристик соленоїдів, що використовуються при ЕШП, і опору металургійної ванни показує, що з метою створення керуючих електричних розрядів і магнітних полів найбільш ефективно

використання конденсаторів з робочою напругою 150...350 В. Така величина напруги достатня для формування потужних пікових струмів у розрядному контурі та не вимагає застосування складних заходів для електричної ізоляції елементів контуру.

Іншими параметрами, які визначають ефективність імпульсного електромагнітного впливу при ЕШП, є величини пікових струмів в розрядному контурі, енергія електричних зарядів, частоти їх дії. Вибір цих параметрів потребує розрахунків в кожному конкретному випадку з урахуванням електричних параметрів плавки, розмірів кристалізатору і соленоїду, електричного опору розрядного контуру. Загалом, попередній аналіз показує, що величина розрядного струму може становити до 20 кА, енергія розряду до 6000 Дж, частота - до 5 Гц.

З урахуванням наведених вище положень і попередніх експериментів було підготовлено технічне завдання на розробку джерела для генерування електричних розрядів з метою створення імпульсних електромагнітних впливів при ЕШП. Нижче наведені основні положення технічного завдання.

Призначення. Джерело застосовується для живлення магнітних контурів при ЕШП, з метою створення імпульсних магнітних полів для керування процесами кристалізації і гомогенізації металу зливків.

Принципи дії. Принцип роботи джерела базується на накопиченні електричних зарядів потрібної величини з послідуочим їх розрядом на магнітний контур (соленоїд або металургійну ванну).

Технічні характеристики і основні параметри.

- Електрична ємність блоку конденсаторів до 0,13 Ф;
- Енергія розряду до 6000 Дж, з можливістю плавного регулювання.
- Напруга заряду конденсаторів до 310 В, з можливістю плавного регулювання.
- Діапазон частоти розрядів 1 - 10 Гц, з можливістю плавного регулювання.

- Джерело повинно мати можливість генерації серій розрядів, які чергуються з паузами. Діапазон регулювання тривалості серії розрядів і пауз між ними 1 - 99 с

- Необхідно передбачити автоматичний захист зарядно-розрядних контурів від коротких замкнень при роботі електричних ключів у режимі "заряд-розряд".

- Електричні ключі для керування розрядними струмами повинні забезпечувати критичну швидкість струму у відкритому стані не менше 150 А/мкс.

- Ударний струм у відкритому стані при максимально допустимій температурі експлуатації ключа не менше 20 кА.

- З'єднання контактів в електричних контурах джерела не повинні призводити до утворення іскрових розрядів в місцях з'єднання.

- Забезпечувана величина пікових струмів при розряді на імпеданс порядку 0,03 Ом не менше 10 кА.

- Джерело повинно мати можливість синхронізації пікових струмів розрядів з амплітудними значеннями струму джерела живлення електрошлакового процесу змінним струмом.

На основі наведеного вище технічного завдання було розроблено і виготовлено пристрій для генерування електричних розрядів з використанням ємнісних накопичувачів електричної енергії. Принципова електрична схема пристрою наведена на рис. 5.10.

В якості тиристорних ключів для управління розрядами конденсаторів обрані силові тиристири T253-1250-12, що забезпечують ударний струм у відкритому стані близько 28 кА, при критичній швидкості наростання 200 А/мкс. З урахуванням можливості одночасного розряду двоконтурного накопичувача допустима величина ударного струму може досягати 56 кА.

В якості конденсаторів для блоків С1 і С2 були обрані електролітичні конденсатори серії В43458 (Epcos) ємністю $C_R=1500$ мкФ і номінальною напругою $U_R=365$ В (рис. 5.15 а). Загальна ємність конденсаторних батарей

становить $0,072 \text{ Ф}$, що дозволяє накопичувати енергію заряду до 4800 Дж. Для керування зарядом і розрядом конденсаторів було розроблено і виготовлено відповідний блок (рис. 5.15 б). Блок керування дозволяє змінювати напругу заряду конденсаторів в межах 60...310 В і здійснювати розряди з частотою до 0,5...10 Гц. При цьому, є можливість здійснювати електричні розряди в постійному режимі (з заданою частотою), або періодично, окремими серіями, які чергуються з паузами.



a



б

Рисунок 5.15 – Загальний вигляд блоків конденсаторів (*a*) і блоку керування генератором імпульсів електричних розрядів (*б*)

Випробовування розробленого генератора імпульсів проводили при розрядах на лабораторні соленоїди, основні параметри яких надані на

рис. 5.16. Напруга заряду конденсаторів становила 170 и 240 В. Експерименти проводили із розрядами як одного блоку конденсаторів (0,036 Ф), так і з одночасним розрядом двох блоків конденсаторів (0,072 Ф). Частоту розрядів змінювали у діапазоні від 1 до 5 Гц. Для вимірювання характеристик заряду і розряду використовували сигнал із шунту ШСМ (3000А-75 мВ), який подавали на перетворювач із гальванічною ізоляцією (0...600 мВ/0...10 В), далі на АЦП (350 кГц), та реєстрували за допомогою програми PowerGraph.

Соленоїд №1



$S_{\text{шини}}=2,5 \times 25$ мм, $d_{\text{вн}} = 46$ мм,
 $d_{\text{нар}} = 80$ мм, $h = 25$ мм, $n = 4$ витка

Соленоїд №2



$S_{\text{шини}}=6 \times 15$ мм, $d_{\text{вн}} = 32$ мм,
 $d_{\text{нар}} = 62$ мм, $h = 60$ мм, $n = 7$ витков

Рисунок 5.16 – Загальний вигляд і основні параметри лабораторних соленоїдів

Результати експериментів представлені у табл. 5.1 та на рис. 5.17-5.19. Отримані дані свідчать, що за 0,05 с конденсатори заряджаються на 67 %, за 0,1 с на 80 %, за 0,2 с на 88 %, а повний заряд конденсаторів здійснюється приблизно за 0,5 с. З цього випливає, що максимальна частота розрядів (яка включає цикл заряду і розряду конденсаторів) не може перевищувати 5...10 Гц. При частоті розрядів вище 10 Гц конденсатори будуть заряджатися менш ніж на 65 %, тобто пристрій буде працювати менш ефективно.

Таблиця 5.1 – Піковий струм і тривалість розрядних імпульсів

Соле-ноїд	Параметр	Ємність конденсаторних батарей 0,036 Ф		Ємність конденсаторних батарей 0,072 Ф	
		$U_{\text{заряду}}, 172 \text{ В}$	$U_{\text{заряду}}, 240 \text{ В}$	$U_{\text{заряду}}, 172 \text{ В}$	$U_{\text{заряду}}, 240 \text{ В}$
№1	Піковий струм, А	12500	18200	15350	22600
	Тривалість імпульсу, мс	4.7	5.2	5.8	6.4
№2	Піковий струм, А	12000	17800	14850	21900
	Тривалість імпульсу, мс	5.0	5.4	6.1	6.9

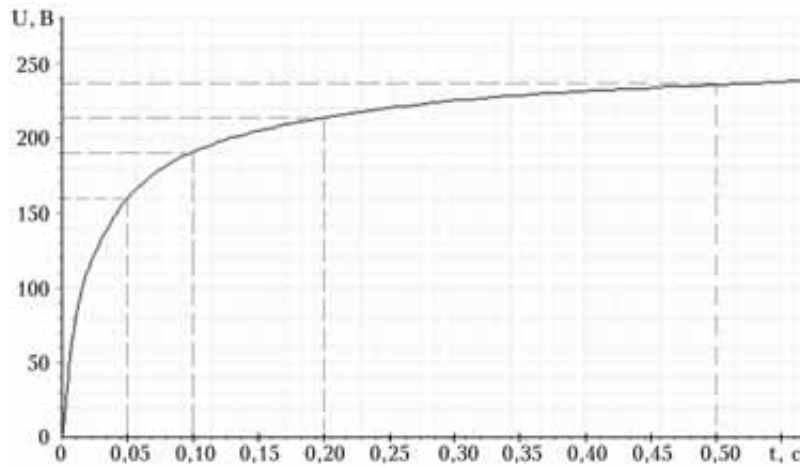


Рисунок 5.17 – Зміна напруги під час зарядження конденсаторів

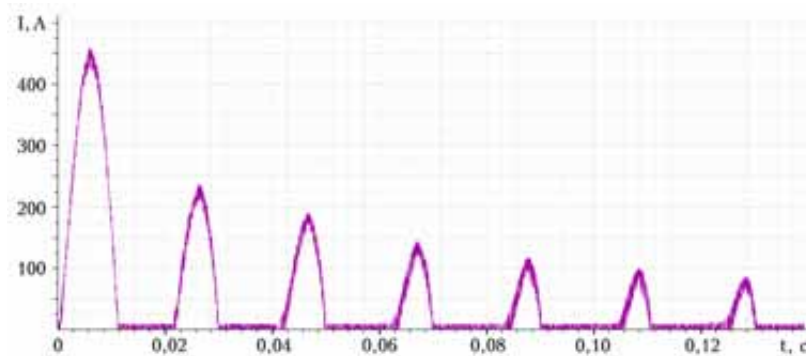


Рисунок 5.18 – Струм зарядження конденсаторів (один контур)

Максимальний піковий струм розряду в експериментах становив 22,6 кА при тривалості імпульсу 6,4 мс (рис. 5.19 д). Зниження напруги заряду з 240 до 172 В призвело до пропорційного зниження пікового струму (з 22,6 до 15,35 кА). Зниження ємності конденсаторних батарей вдвічі (з

0,072 до 0,036 Ф) призвело до зниження як пікових струмів, так і тривалості розрядних імпульсів в середньому в 1,23 рази.

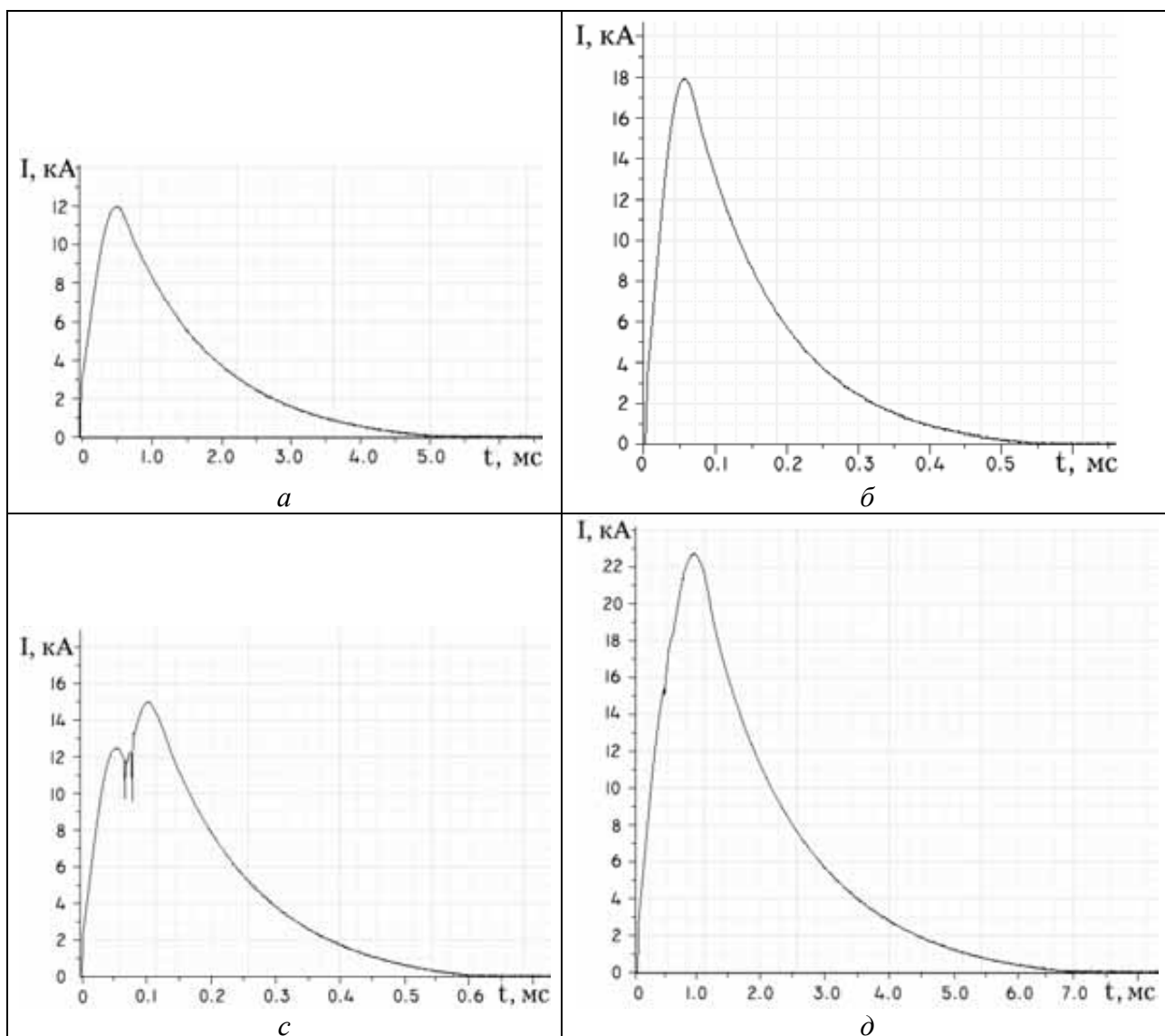


Рисунок 5.19 – Струм розряду конденсаторів: *a* – $U=172$ В, $C=0,036$ Ф, сол. №2; *б* – $U=240$ В, $C=0,036$ Ф, сол. №1; *с* – $U=172$ В, $C=0,072$ Ф, сол. №1; *д* – $U=240$ В, $C=0,072$ Ф, сол. №1

Загалом, проведені експерименти показали працездатність розробленого обладнання і його спроможність створювати потужні імпульси струму в розрядному контурі. При цьому, слід зауважити, що розряди на соленоїд викликають сильні механічні вібрації (удари), викликані взаємодією струмів у витках соленоїда, що може призводити до його руйнування. Тому

конструкція таких соленоїдів повинна забезпечувати надійну фіксацію витків соленоїду.

5.2.2 Розроблення магнітного контуру для імпульсного впливу на процес ЕШП

Застосування імпульсних електромагнітних впливів потребувало розробки і удосконалення не тільки джерела генерування електричних розрядів, але і відповідних магнітних контурів для створення імпульсних полів.

Важливим завданням при створенні магнітних контурів для імпульсної дії (в разі використання електричних розрядів) є забезпечення їх мінімально можливого повного електричного контуру. Це необхідно для одержання максимальних пікових струмів і формування потужних магнітних полів.

Раніше, для створення постійних магнітних полів використовували соленоїди з багатовитковими водохлоджуваними обмотками. Такі соленоїди мають великий електричний опір і, через водяне охолодження обмоток - великі габарити. Тому вони мало підходять для використання в якості контуру для розрядів конденсаторів.

Більш ефективним може бути використання соленоїду Біттера (рис. 5.20). Такий соленоїд складеться з струмопровідних мідних дисків, які чергуються з діелектричними прокладками. В мідних дисках виконані радіальні розрізи а самі диски складені в циліндричний соленоїд таким чином, щоб забезпечити проходження струму по спіралі (рис. 5.20 *a*). Диски стягнуті між собою шпильками, їх охолодження здійснюється через наскрізні отвори по яких прокачується рідина. Такий соленоїд має високу щільність обмотки і дозволяє створювати потужні стаціонарні магнітні поля. Через достатньо високу кількість витків такі соленоїди, зазвичай, не використовують для створення надпотужних імпульсних магнітних полів створених розрядом високовольтних конденсаторів. Проте, в наших умовах, при відносно невеликих розрядних струмах, він є дуже ефективним.

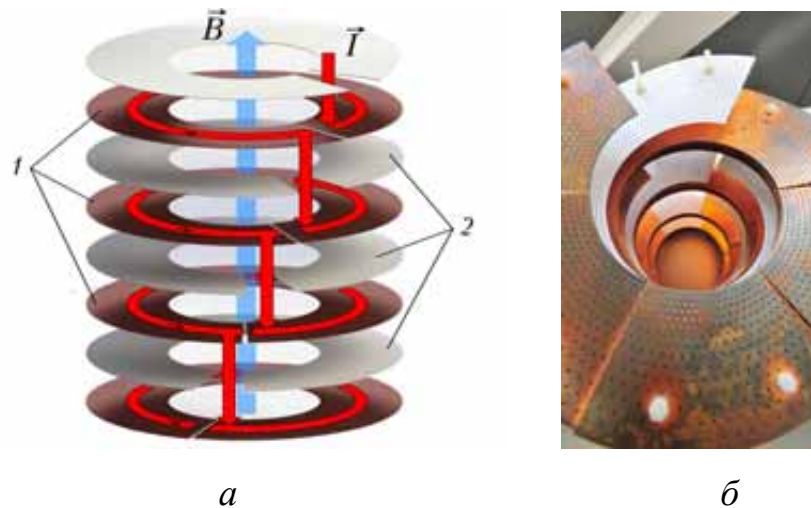


Рисунок 5.20 – Принципова схема (а) і зовнішній вигляд (б) соленоїду Біттера: 1 – струмопровідні диски; 2 – електроізолюючі прокладки

Недоліком соленоїду Біттера є складність його виготовлення в лабораторних умовах. Тому, для створення магнітного контуру була використана схема з дисковими обмотками, яку використовують для силових трансформаторів. Створення магнітних контурів на цій основі дає змогу отримувати мінімальний електричний опір, що необхідно для одержання максимальних пікових струмів.

Принципова схема соленоїда з дисковими обмотками надана на рис. 5.21 а. Згідно цієї схеми був виготовлений магнітний контур кристалізатора з внутрішнім перерізом 80×80мм (рис. 5.21 б). Він складається із шести дискових обмоток з можливістю застосування різних варіантів послідовно-паралельного їх підключення. Загальна кількість витків становить 63, вони виготовлені з мідної шини перерізом 3×25 мм, в ізоляції з ПВХ трубки. Застосування різних варіантів підключення обмоток розширює можливості регулювання пікових струмів розрядів не тільки за рахунок відповідного джерела генерації електричних розрядів, а і за рахунок оптимізації параметрів магнітного контуру.

Слід підкреслити необхідність жорсткої фіксації витків соленоїду (наприклад, шляхом армування епоксидним компаундом) для запобігання його руйнування при періодичній дії розрядних імпульсів струму.

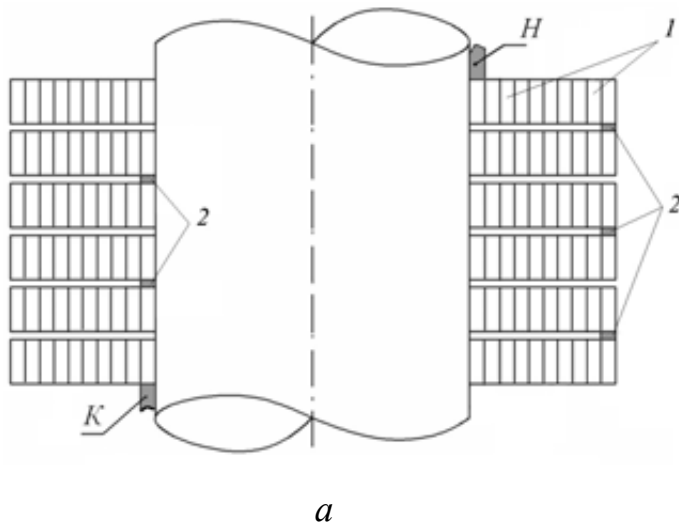


Рисунок 5. 21 – Принципова схема (а) і зовнішній вигляд (б) соленоїду з дисковими обмотками: *H*, *K* – початок та кінець обмотки; *1* – витки соленоїда; *2* – контакти перемички

З використанням розробленого джерела електричних розрядів і магнітного контуру були проведені експерименти з дослідження основних параметрів розрядних імпульсів струму. Експерименти проводили при різній кількості витків магнітного контуру. Напруга заряду конденсаторів становила 225...230 В, величина енергії електричних зарядів - 1770...1850 Дж.

Результати досліджень наведені в табл. 5.2 і на рис. 5.22-5.23. Вони свідчать, що при напрузі заряду 230 В максимальна величина пікового струму в магнітному контурі з 10 витків становить 8150 А. Такий струм створює по вісі соленоїду магнітне поле індукцією до 0,6 Тл. При збільшенні кількості витків соленоїду з 10 до 63 витків величина пікового струму зменшується з 8150 до 2200 А. При цьому, величина розряду, яка дорівнює площі імпульсу струму на рис. 5.22, спочатку також збільшується з 42 до 62 А \times с, а потім, при кількості витків 53...63, стабілізується на рівні 64 А \times с (табл. 5.2). Величина індукції магнітного поля, при цьому, становить 0,16...0,18 Тл.

Отримані дані дозволяють оптимізувати кількість витків магнітного контуру. Для даного кристалізатора вона становить 50...60 витків (5-6

дискових обмоток). При меншій кількості витків, незважаючи на суттєве збільшення пікових струмів, величина розряду зменшується. В той же час, збільшення кількості витків більше 53 також не призводить до збільшення величини розряду окремого імпульсу, проте габарити магнітного контуру зростають.

Таблиця 5.2 – Результати вимірів основних характеристик розряду при різній кількості витків магнітного контуру

Кількість витків магнітного контуру	Піковий струм, А	Індукція магнітного поля*, Тл	Кількість ампер витків	Тривалість розряду, с	Величина розряду, Ахс
10	5350	0,60	81500	0,0155	42
20	4000	0,39	107000	0,03	50
30	2920	0,29	120000	0,04	57
43	2500	0,21	125560	0,066	62
53	2350	0,18	132500	0,078	64
63	2200	0,16	138600	0,091	64

* Розрахункове значення по вісі кристалізатора

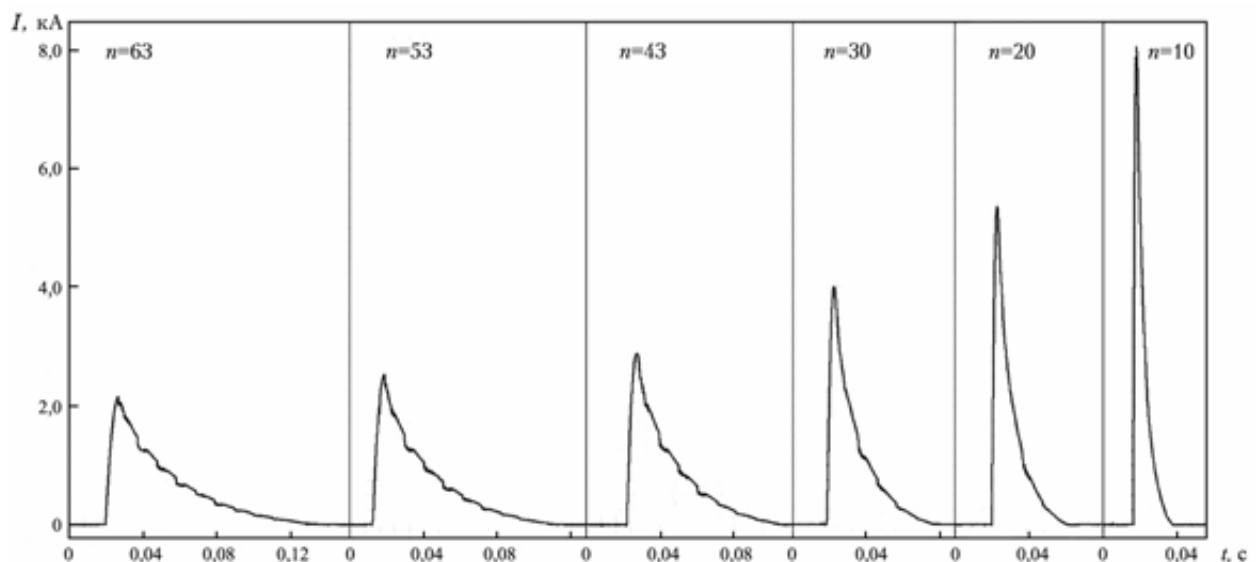


Рисунок 5. 22 – Експериментальні залежності розрядних струмів від часу розряду, при різній кількості витків n магнітного контуру (напруга заряду 225...230 В)

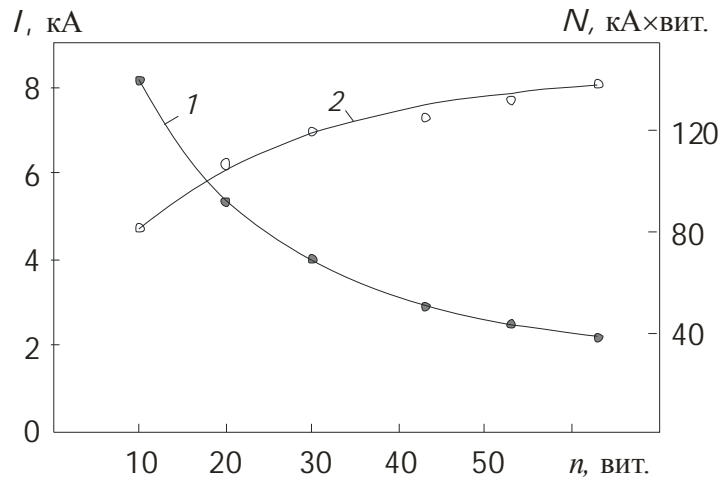


Рисунок 5. 23 – Експериментальні залежності пікових струмів (I) та значень ампер- витків (N) від кількості витків магнітного контуру

5.2.3 Розроблення експериментального обладнання для імпульсної дії електричних розрядів на металургійну ванну

Як зазначалось вище, одним із можливих варіантів використання імпульсних впливів при ЕШП є періодичні розряди конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну. Такий вплив спрямований на формування гідродинамічних "ударів" по фронту кристалізації зливка, що має сприяти подрібненню кристалічної структури металу.

Для реалізації такої схеми необхідно запобігти негативному впливу електричних розрядів на джерело живлення електрошлакового процесу (пічний трансформатор).

В разі використання змінного струму плавки це можна досягти за допомогою захисного керованого вентиля, включеного у вторинний ланцюг пічного трансформатора. Такий вентиль має бути синхронізований з розрядним контуром і включатися в момент дії розрядів конденсаторів. В цьому випадку процес плавки здійснюється на змінному струмі, а в момент дії електричного розряду струм плавки частково випрямляється.

На рис. 5.24 наведено інший варіант реалізації схеми з електричними розрядами на зону плавки. Завдяки тому, що вторинний ланцюг пічного трансформатора ТШП-10000 має дві обмотки з середньою точкою, є

можливість здійснення випрямлення струму за допомогою двох діодних блоків. В цьому випадку розряди конденсаторів не чинять негативний вплив на пічний трансформатор.

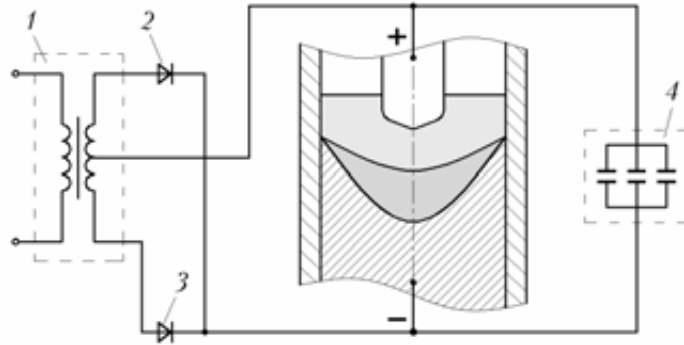


Рисунок 5.24 – Принципова схема ЕШП випрямленим струмом з використанням електричних розрядів безпосередньо на зону плавки: 1 – пічний трансформатор ТШП-10000 з середньою точкою вторинної обмотки; 2, 3 – водоохолоджувані діодні блоки; 4 – генератор електричних розрядів

Відповідно запропонованій на рис. 5.24 схемі було створене обладнання для здійснення процесу ЕШП на постійному струмі з розрядами конденсаторів на металургійну ванну. Воно складається з двох водоохолоджуваних діодних блоків включених у вторинний ланцюг трансформатора ТШП-10000.

На рис. 5.25 наведено загальний вигляд діодних блоків. Вони складаються з силових випрямляючих діодів таблеткової конструкції Д143-1000-24. Діодні блоки розраховані на робочу напругу до 2400 В (для запобігання негативної дії розрядних імпульсів) та забезпечують роботу трансформатора ТШП-10000 на повну потужність.

Створене експериментальне обладнання дозволяє досліджувати процес ЕШП на постійному струмі величиною до 10 кА, а також проводити експерименти з використанням різних схем дії електричних розрядів.



Рисунок 5. 25 – Зовнішній вигляд водоохолоджуваних діодних блоків для плавки постійним струмом з використанням трансформатора ТШП-10000

Таким чином, поставлене завдання створення експериментального обладнання для проведення досліджень з використанням енергії електромагнітних розрядів в електрошлакових процесах, досягнуте. Зокрема, створено джерело генерації електричних розрядів, магнітні контури у вигляді соленоїдів, пристрій для ведення процесу ЕШП на постійному струмі. Розроблене обладнання дозволяє проводити дослідження з використанням розрядів на зовнішній магнітний контур, безпосередньо на зону плавки, а також з сумісною дією розрядів на зону плавки і зовнішній магнітний контур.

5.3 Дослідження технологічних і металургійних особливостей застосування електричних розрядів при ЕШП

5.3.1 Дослідження ефективності дії на кристалізацію металу електричних розрядів на металургійну ванну

Перші дві плавки проводили при переплаві сталевих електродів $\varnothing 36$ мм в кристалізаторі $\varnothing 65$ мм. Їх метою було визначення принципової можливості ведення процесу ЕШП з розрядами конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну. В цьому випадку матеріал електрода не мав принципового значення. Посліуючі експерименти проводили при переплаві електродів із технічного титану ВТ1-0 $\varnothing 45...50$ мм в кристалізаторі з поперечним перерізом 80×80 мм, для визначення особливостей структуроутворення металу зливків.

Для живлення установки використовували постійний струм зворотної полярності. Розряди конденсаторів здійснювали як безперервно, із заданою частотою, так і окремими серіями із 3...7 імпульсів, які чергувались з паузами тривалістю 5...7 с. В деяких експериментах, для додаткового впливу на кристалізацію металу використовували імпульсне живлення електрошлакового процесу (плавки № 844, 852). Параметри плавки і режими впливу електричними розрядами наведені в табл. 5.3. Зовнішній вигляд та типові макроструктури виплавлених зливок представлені на рис. 5.26.

Важливим результатом проведених досліджень слід вважати експериментально доведену можливість практичної реалізації процесу ЕШП з розрядами конденсаторів безпосередньо на металургійну ванну. Максимальний піковий струм розряду в експериментах становив біля 12 кА, а частота – 0,9...3,0 Гц. В усіх експериментах такі розряди не призводили до критичних порушень стабільності електрошлакового процесу.

В більшості випадків виплавлені зливки мали бездефектне формування бічної поверхні. Погіршення якості поверхні зливка №852 пов'язане з режимами імпульсного електроживлення процесу, а не з впливом розрядів конденсаторів.

В усіх експериментах макроструктура металу зливок була щільною, без пор, включень, тріщин та інших дефектів металургійного походження (рис 5.26). В зливках № 841, 843, 844, виплавлених з частотою розрядних імпульсів 0,9-1 Гц, спостерігалось часткове витончення макроструктури порівняно з металом, виплавленим без електромагнітного впливу. Середній розмір зерен становив 1,7×11,6 мм (зливки № 841), 1,6×10,3 мм (зливки № 843) і 1,6×8,5 мм (зливки № 844), проте, стовпчаста структура збереглася, що свідчить про недостатній вплив на ванну та фронт кристалізації металу.

Також слід додати, що позитивного впливу на структуру металу серій розрядів, які чергуються з паузами (плавка № 841), у порівнянні з безперервною їх дією (плавка № 843), виявлено не було. Однак, об'єктивна оцінка ефективності таких впливів потребує проведення окремих досліджень.

Таблиця 5.3 – Режими експериментальних плавок з розрядами конденсаторів на металургійну ванну*

№ плав-ки	Плавка						Розряди				Стабільність процесу ЕШП	Формування поверхні зливка	Характеристика макроструктури
	Матеріал	Переріз кр-ра, мм	Режим живлення	$V_{ел}$, м/год	U, В	I, А	Режим дії розрядів	Частота розрядів, Гц	Напруга заряду, В	Піковий струм розряду, А			
758	Сталь 30	Ø65	стаціонарний	4,9	29	1200	серії по 3 розряди з паузою 5 с	2,5	180	4500	стабільний	добра	не досліджували
759	Сталь 30	Ø65	стаціонарний	5,0	28	1400	серії по 8 розрядів з паузою 5 с	2,5	180	4500	стабільний	добра	не досліджували
841	BT1-0	□80×80	стаціонарний	4,0	27	2600	серії по 4 розряди з паузою 7 с	0,9	200	12000	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
843	BT1-0	□80×80	стаціонарний	3,8	27	2800	безперервно	0,9	200	12000	стабільний	добра	змішана, стовбчаста + розорієнтована
844	BT1-0	□80×80	імпульсний ($t_i = 8,2$ с, $t_n = 1,4$ с)	3,8	26/0	3000/0	безперервно	1,0	200	11500	стабільний	добра	змішана, стовбчаста + дрібнозерниста
852	BT1-0	□80×80	імпульсний ($t_i = 8,2$ с, $t_n = 5,2$ с)	3,8	26/0	3200/0	безперервно	1,0	200	11500	стабільний	задовільна	дрібнозерниста
902	BT1-0	□80×80	стаціонарний	3,0	28	2700	безперервно	3,0	200	6400	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована

* $H_{шл. ванни} = 30$ мм



Рисунок 5.26 – Зовнішній вигляд та макроструктура титанових зливків, виплавлених з розрядами конденсаторів на ванну (цифрами вказані номери плавок)

Збільшення частоти розрядів до 3 Гц (плавка № 902) навпаки призвело до зменшення ефективності подрібнення структури. Зливки № 902 мав традиційну крупнозернисту структуру з стовбчастими зернами середнім розміром $3,3 \times 22,5$ мм, орієнтованими в напрямку тепловідведення (рис. 5.26). Це можна пояснити тим, що збільшення частоти розрядів потребувало зменшити час зарядження конденсаторів до 0,17 с. В свою чергу, це призвело до неповного зарядження конденсаторних блоків і зменшення струму і енергії розрядів, внаслідок чого ефективність подрібнення структури зменшилась. Це підтверджує аналіз впливу розрядного струму на характерний розмір зерна (довжину), який показує збільшення цього розміру при зменшенні струму розрядів (рис. 5.27).

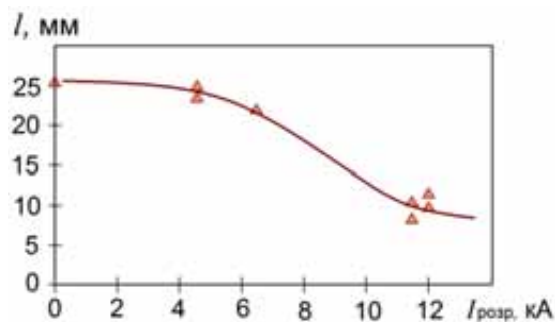


Рисунок 5.27 – Вплив розрядного струму на характерний розмір зерна (для злиwkів 80×80 мм)

Найкращий результат з гомогенізації та подрібнення структури металу був отриманий при сумісному впливі постійно діючих розрядів, в поєднанні з порційним імпульсним тепловнесенням в процесі плавки. В цьому випадку макроструктура металу зливка була однорідною, дрібнозернистою, з середнім розміром зерен $1,2 \times 1,9$ мм (рис. 5.27, плавка № 852). Але пов'язувати такий ефект тільки з дією розрядів некоректно, так як аналогічний вплив при стаціонарних режимах електричного живлення (плавка №843) не призвів до такого подрібнення структури металу. Тобто

використання лише одного із зазначених вище методів впливу (імпульсне електроживлення, або розряди на зону плавки) не дозволило отримати бажані результати подрібнення та гомогенізації структури зливка.

Підсумовуючи результати експериментів можна зробити висновок, що розряди конденсаторів на металургійну ванну є перспективним інструментом впливу на умови кристалізації зливків ЕШП. Безперечною перевагою даного способу впливу є відсутність необхідності використання додаткових пристроїв для створення магнітних полів (соленоїдів). Проте, в досліджуваному діапазоні електричних розрядів їх вплив виявився недостатнім для бажаного подрібнення і гомогенізації структури зливків ЕШП. Це спонукало подальші дослідження різних схем впливу електричних розрядів на кристалізацію металу при ЕШП, зокрема при використанні розрядів на зовнішній магнітний контур.

5.3.2 Дослідження процесу ЕШП під впливом імпульсних магнітних полів, створених розрядами конденсаторів на зовнішній магнітний контур

Як було зазначено вище, одним з варіантів імпульсного впливу на процес ЕШП є дія поздовжнім магнітним полем, створеним розрядами конденсаторів на обмотки соленоїда, який охоплює кристалізатор (рис. 5.5 *a*). Метою робіт було дослідити вплив таких магнітних полів на технологічні і металургійні особливості процесу ЕШП, електричні режими плавки і структуроутворення металу виплавлених зливків.

Експериментальні дослідження проводили при переплаві витратних електродів діаметром 35...80 мм в циліндричних кристалізаторах діаметром 65, 85 і 125 мм і прямокутному кристалізаторі перерізом 80×80 мм. Матеріалом електродів були титанові сплави ВТ1-0, ОТ4, ВТ6, прецизійний сплав 29НК, які переплавляли під флюсами АН-Т4 і АНФ-1. Використовували як змінний, так і постійний струм плавки (прямої і зворотної полярності). Розряди конденсаторів здійснювали як безперервно, із

заданою частотою, так і окремими серіями з 3...6 імпульсів, які чергувалися з паузами тривалістю 5...8 с. Енергія W окремих розрядів змінювалась в діапазоні 518...3460 Дж. В деяких експериментах, для додаткового впливу на кристалізацію металу, використовували імпульсне живлення електрошлакового процесу (плавки № 836, 837, 838).

Основні технологічні параметри дослідних плавок надані в табл. 5.4.

Нижче буде розглянутий вплив імпульсних магнітних полів на електричні режими ЕШП і особливості формування структури виплавлених зливків.

5.3.2.1 Вплив імпульсного магнітного поля на режими ЕШП

Аналіз реєстрограм параметрів процесу ЕШП показав суттєвий вплив імпульсного магнітного поля, створеного розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, на електричні режими процесу плавки. Цей вплив проявляється у закономірному періодичному падінні струму плавки під дією імпульсів магнітного поля, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу (рис. 5.28). Падіння струму відбувається дуже швидко, протягом 0,1...0,2 с. Потім, під час пауз дії магнітного поля, струм плавки відновлюється до початкового рівня. На зміні електричної напруги на ванні це практично не позначається, через жорстку вольт-амперну характеристику джерела живлення печі ЕШП.

Величина падіння струму плавки залежить від багатьох факторів і може сягати до 70 % від його початкового рівня (рис. 5.28 б). Аналіз реєстрограм струму вказує, що його падіння залежить від діаметру (перерізу) кристалізатора, величини індукції магнітного поля (визначається силою струму розрядного імпульсу в соленоїді), частоти розрядів, тривалості серії розрядів і пауз між ними.

Таблиця 5.4 – Режими експериментальних плавок з розрядами конденсаторів на соленоїд

№ плавки	Плавка					Розряди				Стабільність процесу ЕШП	Формування поверхні зливка	Характеристика макроструктури
	Діаметр (переріз) крис-ра, мм	Рід струму, полярність	$V_{ел}$, м/год	U, В	I, А	Режим дії розрядів	Частота розрядів, Гц	Напруга заряду, В	Енергія окремого розряду, Дж			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
743	65	змінний	3,1	30	2700	серії по 3 розряди з паузою 6 с	3	120	518	стабільний	відмінна	не досліджували
744	65	змінний	3,0	30	2700	серії по 3 розряди з паузою 6 с	3	180	1166	стабільний	добра	не досліджували
745	65	змінний	4,8	30	3000	серії по 3 розряди з паузою 6 с	3	180	1166	стабільний	добра	змішана, стовбчаста + розорієнтована
749	65	змінний	5,0	30	3500	серії по 9 розрядів з паузою 8 с	3	180	1166	стабільний	добра	дрібнозерниста
750	65	змінний	2,9	30	2400	серії по 4 розряди з паузою 6 с	4	180	1166	стабільний	добра	не досліджували
751	65	змінний	5,1	30	3000	серії по 4 розряди з паузою 6 с	4	180	1166	відносно стабільний	задовільна	не досліджували
771	65	постійний	2,7	28	2400	серії по 7 розрядів з паузою 6 с	2,18	180	1166	відносно стабільний	незадовільна	не досліджували
775	125	змінний	4,0	35	5200	серії по 7 розрядів з паузою 6 с	2,18	180	1166	стабільний	добра	не досліджували

продовження табл. 5.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
798	80×80	змінний	3,9	28	4200	серії по 3 розряди з паузою 7 с	1,25	200	1440	стабільний	добра	не досліджували
800	80×80	змінний	11,0	30	2800	безперервно	1,25	215	1664	стабільний	незадовільна	стовбчаста, орієнтована
801	80×80	змінний	11,5	29	3000	серії по 6 розрядів з паузою 6 с	1,43	215	1664	стабільний	незадовільна	стовбчаста, орієнтована
805	80×80	змінний	5,0	27	6000	серії по 5 розрядів з паузою 5 с	0,6	220	1742	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
806	80×80	змінний	5,1	28	4800	серії по 5 розрядів з паузою 7 с	2,5	220	1742	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
810	80×80	змінний	4,9	27	5600	серії по 5 розрядів з паузою 7 с	0,6	300	3240	стабільний	добра	не досліджували
811	80×80	змінний	4,9	27	5000	серії по 5 розрядів з паузою 7 с	0,6	300	3240	стабільний	добра	змішана, стовбчаста + дрібнозерниста
812	80×80	змінний	5,0	28	5000	серії по 5 розрядів з паузою 7 с	0,6	300	3240	стабільний	добра	не досліджували
813	80×80	постійний (зворотна)	5,0	27	3500	одиначні	-	220	1742	стабільний	добра	не досліджували
814	80×80	постійний (пряма)	3,9	27	3200	одиначні	-	220	1742	відносно стабільний	добра	не досліджували
818	80×80	постійний (зворотна)	3,9	32	3200	серії по 3 розряди з паузою 7 с	1,0	300	3240	відносно стабільний	задовільна	змішана, стовбчаста + дрібнозерниста

продовження табл. 5.4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
830	80×80	змінний	5,0	32	4800	серії по 5 розрядів з паузою 7 с	0,8	310	3460	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
836	80×80	змінний, імпульсний ($t_i = 8,0$ с, $t_n = 1,4$ с)	2,9	28/ 4	4300/ 500	серії по 3 розряди з паузою 6 с	0,8	310	3460	не стабільний	задовільна	не досліджували
837	80×80	змінний, імпульсний ($t_i = 8,0$ с, $t_n = 1,4$ с)	3,8	28/ 4	4600/ 500	серії по 3 розряди з паузою 6 с	0,8	310	3460	стабільний	добра	стовбчаста, орієнтована
838	85	змінний, імпульсний ($t_i = 8,0$ с, $t_n = 1,4$ с)	3,6	28/4	4500/ 500	серії по 3 розряди з паузою 6 с	0,8	310	3460	стабільний	добра	змішана, стовбчаста + дрібнозерниста

На рис. 5.28 наведені реєстрограми плавки, проведених при однаковій енергії і частоті розрядів, але при різній їх кількості в серії. В першому випадку вплив здійснювали серіями імпульсів загальною тривалістю 1 с (по 3 розряди в серії) (рис. 5.28 *а*), в другому - серіями імпульсів загальною тривалістю 3 с (по 9 розрядів) (рис. 5.28 *б*). В обох випадках тривалість пауз між серіями розрядів складала 6 с.

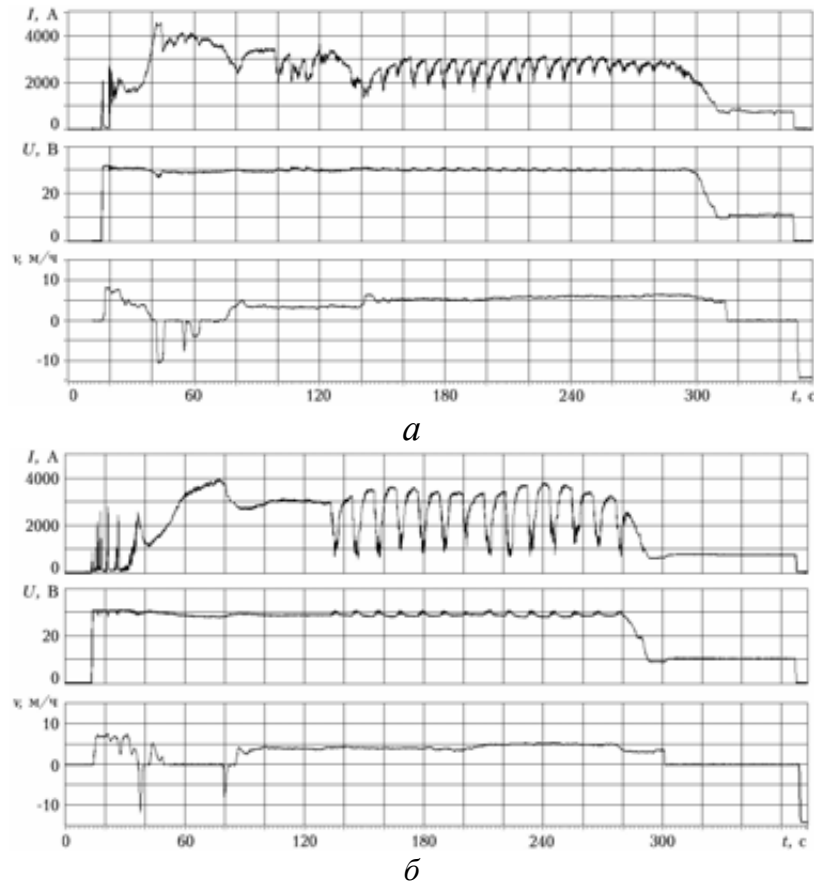


Рисунок 5.28 – Реєстрограми процесів плавки № 745 (*а*) і № 749 (*б*) з використанням електричних розрядів на магнітний контур (частота розрядів в серії 3 Гц)

Як видно з реєстрограми величина падіння струму в першому випадку становила в середньому 28 %, в другому - 71 %. При цьому, в обох випадках, внаслідок високої частоти розрядів (3 Гц), струм плавки після кожного окремого імпульсу магнітного поля не встигав відновлюватися. Він відновлювався лише під час пауз між серіями розрядів.

При меншій частоті розрядів спостерігалася дещо інша ситуація. В цьому випадку, на реєстрограмах струму плавки чітко помітні періодичні падіння струму, які відповідають кожному окремому розрядному імпульсу в магнітному контурі (рис. 5.29). При цьому, при частоті розрядів 2,5 і 2,15 Гц

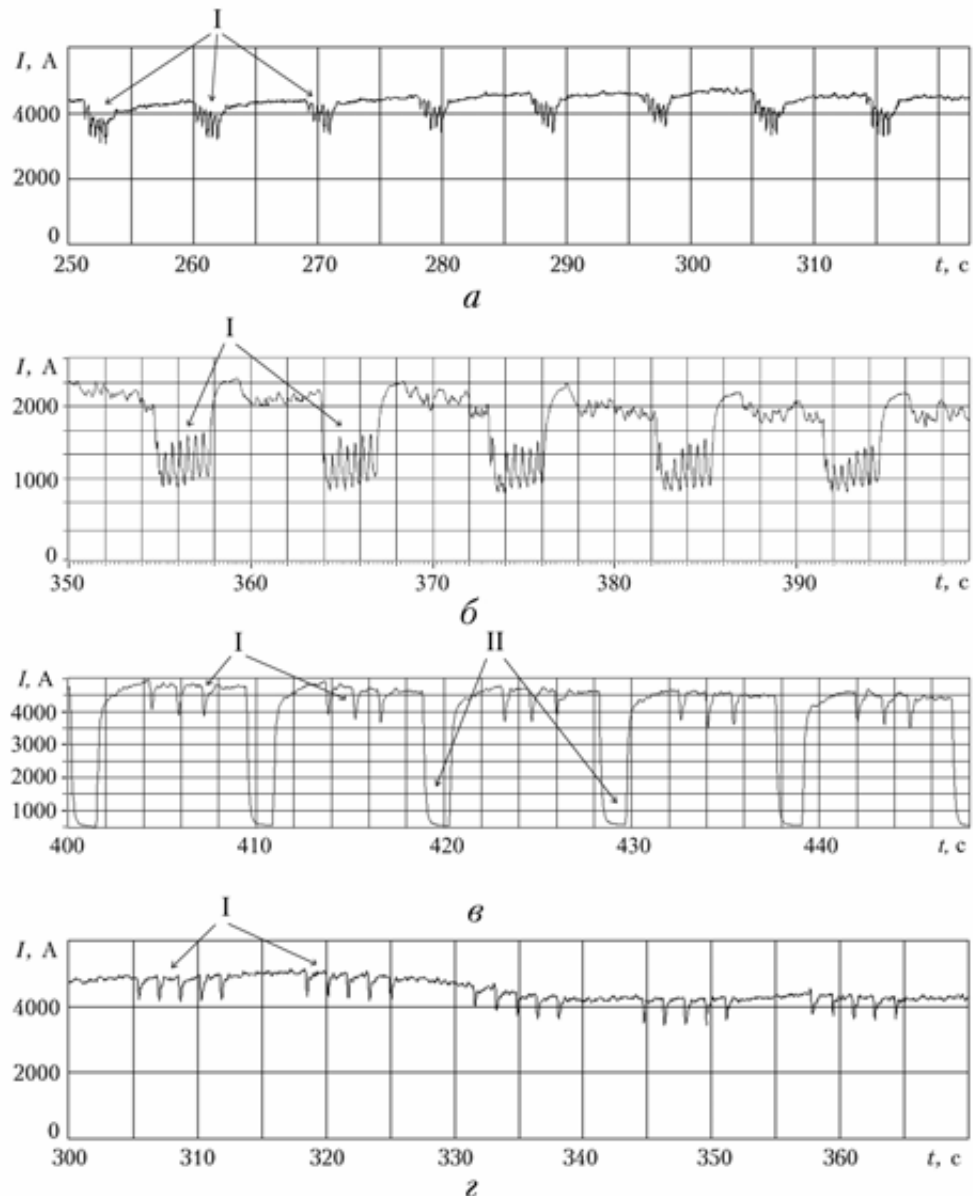


Рисунок 5.29 – Характер зміни струму плавки при дії серіями розрядів на зовнішній магнітний контур при різній частоті розрядів в серії: *a* – 2,5 Гц (плавка № 806); *б* – 2,18 Гц (плавка № 771); *в* – 0,8 Гц (плавка № 837); *г* – 0,6 Гц (плавка № 805): I – падіння струму під дією імпульсів магнітного поля; II – падіння струму за рахунок імпульсного електроживлення

струм плавки, після кожного окремого імпульсу магнітного поля, встигав відновитися лише частково (рис. 5.29 *а, б*), а при 0,8 і 0,6 Гц - відновлювався повністю (рис. 5.29 *в, г*). З цих результатів можна зробити висновок, що для даних розмірів зливків, час відновлення струму після імпульсу магнітного поля складає приблизно 0,6...0,8 с. При застосуванні імпульсного магнітного поля з частотою вище 3 Гц струм плавки після кожного окремого імпульсу магнітного поля не відновлюється, і характер дії такого поля на електричні режими ЕШП аналогічний дії постійного (безперервного) магнітного поля.

Важливим питанням є встановлення механізмів впливу імпульсного магнітного поля на струм плавки при ЕШП. Задля цього був проведений експеримент, який полягав в наступному. Витратний електрод діаметром 70 мм був закріплений в печі ЕШП і опущений до піддону кристалізатора, з забезпеченням надійного еклетичного контакту. Шляхом подачі напруги від пічного трансформатора з тиристорним регулятором, крізь електрод пропускали електричний струм силою 2500 А. Потім здійснювали розряди конденсаторів на соленоїд кристалізатора. Енергія окремого розряду складала 1400...2500 Дж, частота 0,5...3 Гц. При цьому, за допомогою трансформатора струму 5000/5А, АЦП з гальванічною ізоляцією і програмного забезпечення LabVIEW, фіксували струм в витратному електроді.

В результаті експерименту було показано, що жодного впливу на електричний струм у витратному електроді імпульси магнітного поля не чинять. Це дає підстави стверджувати, що механізми зменшення струму під впливом імпульсів магнітного поля обумовлені виключно магнітогідродинамічними процесами, які відбуваються в розплавах шлакової і металевої ванн.

Зрозуміло, що зменшення струму плавки пов'язане зі збільшенням електричного опору міжелектродного проміжку (ділянки *витратний електрод - шлакова ванна - металева ванна*). В свою чергу, збільшення електричного опору міжелектродного проміжку може бути викликане

зменшенням площі контакту витратного електроду зі шлаком та збільшенням міжелектродного проміжку (відстань від торця електроду до дзеркала металевої ванни).

Як було показано вище (у розділі II) поздовжнє магнітне поле призводить до утворення в шлаковій і металевій ваннах обертання розплавів навколо вісі симетрії (рис. 5.4 б). В свою чергу, за рахунок дії відцентрових сил це зумовлює деформацію вільної поверхні шлакової ванни (рис. 5.30). Це було показано як шляхом фізичного моделювання так і спостереженням за поверхнею шлакової ванни при натурному ЕШП. Внаслідок цього зменшується глибина занурення електроду у шлакову ванну і площа його контакту S зі шлаком (рис. 5.30). Через це збільшується електроопір ділянки *електрод - шлакова ванна*.

До цього механізму слід додати механізм зменшення струму плавки за рахунок відриву крапель електродного металу під дією імпульсів магнітного поля. Відрив крапель і зменшення шару рідкого металу на торці витратного електроду сприяє збільшенню міжелектродної відстані $h_{\text{ме}}$ і, відповідно, електричного опору ділянки *електрод - металева ванна* (рис. 5.30).

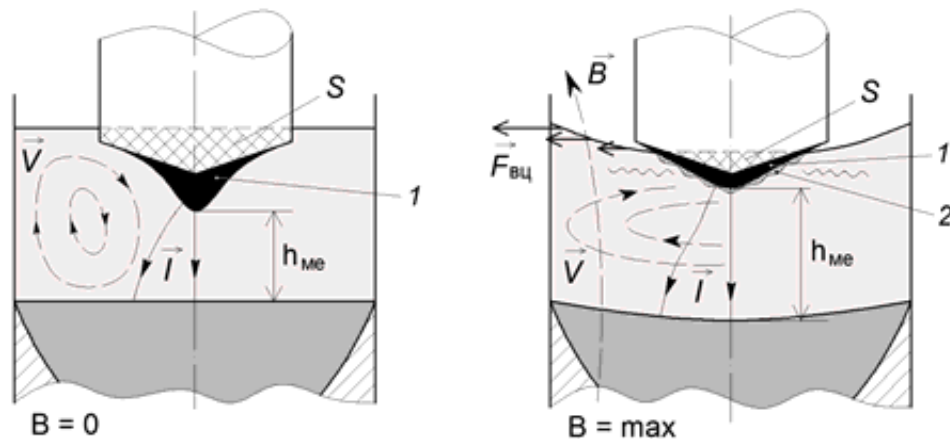


Рисунок 5.30 – Щодо механізмів зменшення струму плавки під впливом імпульсного поздовжнього магнітного поля: $F_{\text{вц}}$ – відцентрова сила; S – площа контакту електроду зі шлаком; $h_{\text{ме}}$ – міжелектродна відстань; I – лінії електричного струму; V – характер обертання шлаку; B – індукція поздовжнього магнітного поля; 1 – шар рідкого металу на торці електроду; 2 – нещільності, викликані вібрацією і кавітаційними процесами

Крім того, у разі створення вібрації електрода на поверхні поділу *електрод - шлак* утворюються нещільності (кавітаційні явища), що в свою чергу, погіршує електричний контакт. Все це сприяє збільшенню електричного опору міжелектродного проміжку і, відповідно, зменшенню струму плавки.

Таким чином, експериментально показано, що імпульсне магнітне поле, яке створюється розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до циклічних коливань струму плавки, і, відповідно – до порційно-дискретного тепловнесення в процесі ЕШП. Реєстрограми струму плавки, отримані при використанні електричних розрядів на магнітний контур (рис. 5.28), дуже схожі з реєстрограмами, отриманими при ЕШП з імпульсним електроживленням (рис. 4.7). Тобто імпульсні магнітні поля, аналогічно з нестаціонарними режимами електроживлення за допомогою пічного трансформатора, дозволяють впливати на струм плавки і тепловиділення в шлаковій ванні. Це створює додаткові можливості для керування процесом ЕШП за допомогою імпульсних магнітних полів.

На закінчення слід додати, що незважаючи на значні коливання струму плавки під впливом імпульсного магнітного поля, в переважній більшості випадків процес ЕШП проходив без порушення стабільності (табл. 5.4).

5.3.2.2 Вплив імпульсного магнітного поля на структуроутворення зливків ЕШП

На рис. 5.31 наведені зовнішній вигляд і характерні макроструктури зливків ВТ1-0 діаметром 65 мм, виплавлених під впливом магнітного поля, створеного розрядами конденсаторів на зовнішній магнітний контур (соленоїд кристалізатора). Зливки мають високу якість формування бічної поверхні, з незначними характерними гофрами.

Структура металу зливків щільна, внутрішні дефекти відсутні. Зливоч № 745 характеризується змішаною структурою з великими стовбчастими кристалітами, орієнтованими переважно вертикально, а також більш

дисперсними розорієнтованими кристалами (рис. 5.31). При цьому, довжина стовбчастих кристалітів сягала до 35 мм. Загалом, аналіз структури зливка № 745 свідчить про недостатній МГД вплив на рідкометалеву ванну задля бажаного подрібнення структури металу.



Рисунок 5.31 – Зовнішній вигляд та макроструктура титанових зливків \varnothing 65 мм, виплавлених з використанням розрядів конденсаторів на зовнішній магнітний контур (цифрами вказані номери плавок)

Інша картина спостерігається для зливка № 749. Він був виплавлений при аналогічних режимах як зливки № 745, але при більшій кількості розрядів в серії - 9 розрядів (табл. 5.4). В цьому випадку структура металу однорідна, дрібнозерниста, з середнім розміром зерен $2,0 \times 4,1$ мм, що в середньому у 5,5 разів менше, ніж у аналогічного зливка традиційного ЕШП (рис. 5.31). Це говорить про помітний вплив імпульсного магнітного поля, створеного розрядами конденсаторів, на характер структуроутворення зливка. Проте, ці результати були досягнуті при виплавці злиwkів невеликого діаметру - 65 мм (переріз $S_{\text{зл}} = 3300 \text{ мм}^2$). Тому подальші дослідження проводили для злиwkів вдвічі більшого перерізу ($S_{\text{зл}} = 6400 \text{ мм}^2$).

На рис. 5.32 наведені зовнішній вигляд і макроструктури титанових злиwkів перерізом 80×80 мм, виплавлених під впливом магнітного поля, створеного розрядами конденсаторів на магнітний контур. Відповідні режими плавок і параметри електричних розрядів надані в табл. 5.4.

В більшості випадків виплавлені зливки мали добру якість формування бічної поверхні, без грубих дефектів. Задовільна якість поверхні зливка № 818, вочевидь, пов'язана із застосуванням для живлення процесу постійного струму зворотної полярності, що в комплексі з дією імпульсів магнітного поля призвело до погіршення стабільності електрошлакового процесу і якості формування зливка.

Макроструктура металу виплавлених злиwkів в усіх експериментах була щільною, без пор, включень, тріщин та інших дефектів металургійного походження (рис 5.32).

В зливках № 805-806, виплавлених з енергією розрядних імпульсів 1742 Дж, ефект МГД впливу на макроструктуру металу малопомітний. Збереглася стовбчаста, орієнтована ("ялинкова") структура злиwkів, характерна для металу ЕШП. Середній розмір зерен становив $2,0 \times 14,2$ мм.

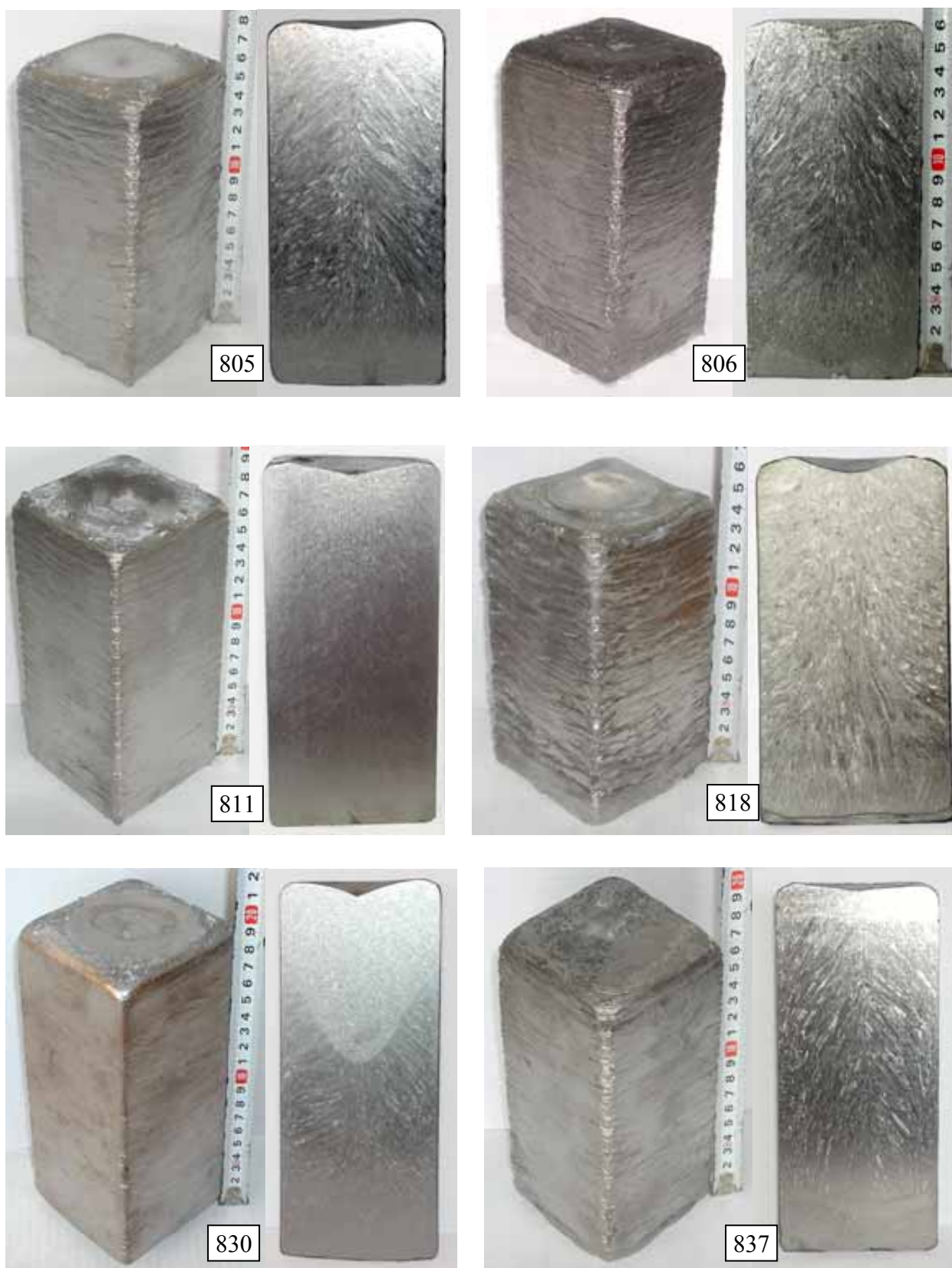


Рисунок 5.32 – Зовнішній вигляд та макроструктура титанових зливків перерізом 80×80 мм, виплавлених з використанням розрядів конденсаторів на зовнішній магнітний контур (цифри вказані номери плавки)

При більш високій енергії електричних розрядів - 3240 і 3460 Дж (зливки № 811, 818, 830) спостерігалось часткове витончення макроструктури металу (рис. 5.33). В цьому випадку середній розмір зерен становив 1,6×8,4 мм (зливки № 811), 1,7×11,2 мм (зливки № 818) і 1,7×10,4 мм (зливки № 830). Причому, більш дисперсна структура спостерігалася в зливку № 811, виплавленому при меншій частоті розрядів 0,6 Гц.

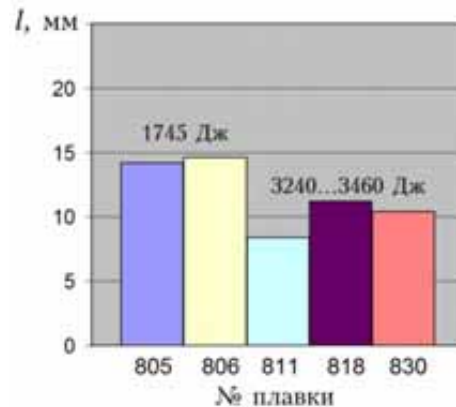


Рисунок 5.33 – Середній характерний розмір зерна в різних експериментах

Загалом, аналіз макроструктури виплавлених зливок показує, що ефективність подрібнення і гомогенізації структури металу, за рахунок електричних розрядів на зовнішній магнітний контур, погіршується при збільшенні перерізу зливка. Для зливок перерізом 6400 мм² кращі результати подрібнення структури отримані при застосуванні серій електричних розрядів з енергією окремого розряду ≥ 3240 Дж, кількості розрядів в серії ≥ 5 і частоті їх дії 0,6 Гц. Проте, і за такими режимами електромагнітного впливу зберігається стовпчаста, орієнтована структура зливка, а результати подрібнення кристалітів є нестабільними.

Таким чином, незважаючи на встановлену можливість керування структуроутворенням зливок ЕШП за допомогою розрядів конденсаторів на зовнішній магнітний контур, їх вплив виявився недостатньо ефективним і нестабільним для подрібнення литої структури зливок. Це говорить як про необхідність подальшої оптимізації режимів імпульсної електромагнітної дії

на процес ЕШП, так і про необхідність застосування додаткових механізмів впливу на структуроутворення зливків.

5.3.3 Дослідження сумісної дії електричних розрядів на зовнішній магнітний контур і металургійну ванну

Одним з шляхів підвищення ефективності електромагнітного впливу на кристалізацію зливків ЕШП є використання одночасних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і на металургійну ванну (рис. 5.5 в). В цьому випадку поєднуються механізми впливу на кристалізацію металу імпульсними магнітними полями і електричними розрядами. При цьому, розряди на металургійну ванну, які діють синхронно з імпульсами струму в соленоїді, призводять до періодичного збільшення електромагнітної сили \vec{F}_e , яка діє на розплав, що, в свою чергу, збільшує гідродинамічні ефекти в ванні і силовий вплив на фронт кристалізації зливка.

Експеримент проводили при переплаві електродів із технічного титану ВТ1-0 діаметром 50 мм в кристалізаторі поперечним перерізом 80×80 мм². Використовували постійний струм плавки зворотної полярності. Розряди конденсаторів здійснювали після наведення шлакової ванни в безперервному режимі. Магнітний контур був включений послідовно в електричне коло металургійної ванни (рис. 5.5 в), за рахунок чого здійснювали одночасні розряди на соленоїд і ванну.

Основні параметри плавки і режими впливу електричними розрядами наведені в табл. 5.5. Зовнішній вигляд та макроструктура виплавленого зливка представлені на рис. 5.34.

Процес плавки проходив стабільно. Викидів шлаку та інших порушень стабільності не спостерігалось. На поверхні виплавленого зливка є гофри глибиною до 0,8 мм, проте в глибину зливка вони не розповсюджуються (рис. 5.34 а). Формування гофр на поверхні зливка слід пов'язувати, в першу чергу, з параметрами живлення електрошлакового процесу. Механізм їх утворення пов'язаний зі збільшенням швидкості охолодження металу під час паузи

електроживлення і відповідною циклічною зміною товщини шлакового гарнісажу на поверхні зливка, особливо в кутах прямокутного зливка. Щодо електричних розрядів, то вони в меншій мірі сприяють погіршенню якості бічної поверхні зливка. Загалом, формування поверхні зливка можна вважати добрим.

Таблиця 5.5 – Режими експериментальної плавки з розрядами конденсаторів на зовнішній магнітний контур і металургійну ванну

№ плавки	Плавка			Розряди			Стабільність процесу ЕШП	Формування поверхні зливка	Макроструктура	
	Режим живлення	$V_{\text{ель}}$, м/год	U, В	I, А	Частота розрядів, Гц	Напруга заряду, В				Піковий струм розряду, А
894	імпульсний ($t_i = 7,2$ с, $t_n = 1,6$ с)	3,7	26/0	3000/0	3,0	230	2050	стабільний	добре	дрібнозерниста



Рисунок 5.34 – Зовнішній вигляд (а) та макроструктура (б) титанового зливка № 894

Аналіз поздовжнього перерізу виплавленого зливка вказує на значний вплив імпульсних електромагнітних дій на структуроутворення металу. Макроструктура зливка докорінним чином відрізняється від традиційної структури литого металу ЕШП. Її дрібнозернистість і однорідність є кращими за весь період досліджень з використанням різноманітних варіантів електромагнітного впливу. По всьому перерізу зливка структура складається з дрібних, рівноосних зерен середнім розміром 0,2...1,0 мм, що наближає її до структури деформованого металу (рис. 5.34 б). Повністю відсутні великі стовбчасті кристаліти, різнорідні структурні зони по висоті і радіусу зливка та дефекти металургійного характеру.

Про високу хімічну і структурну однорідність виплавленого зливка також свідчать результати досліджень розподілення твердості по поздовжньому (осьовому) перерізу (рис. 5.35). Вимірювання твердості НВ проводили із інтервалом точок 10×10 мм по висоті і діаметру зливка.

Результати досліджень показують, що за виключенням кореневої частини зливка твердість НВ розподілена рівномірно. Її відхилення не перевищує 3%, що свідчить про високий рівень однорідності литого металу. Підвищення твердості у кореневій частині зливка пов'язане з підвищеним вмістом домішок в даній зоні, що є типовим для більшості "зливкових" технологій (ЕШП, ВДП, ПДП та ін.).

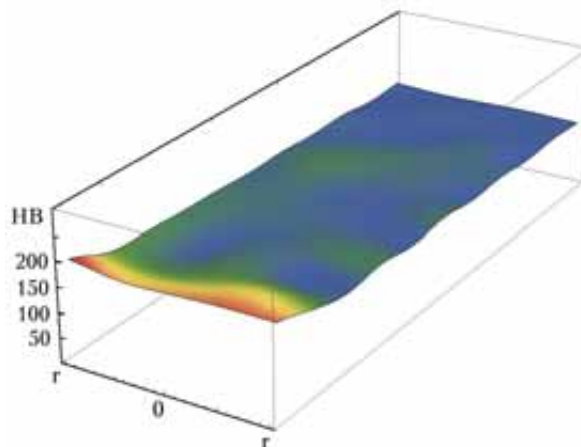


Рисунок 5.35 – Розподіл твердості НВ в осьовому перерізі титанового зливка № 894

Подальші експерименти при виплавці зливків більшого діаметру також підтвердили ефективність застосування одночасних розрядів конденсаторів на магнітний контур і металургійну ванну для подрібнення литої структури зливка. Зокрема, дрібнозерниста однорідна структура була отримана при виплавці титанових зливків діаметром 140 мм під впливом розрядів конденсаторів з частотою 0,6...2,0 Гц і піковим струмом 3500...3700 А (енергія розрядів становила 4200...4800 Дж) (рис. 5.36).

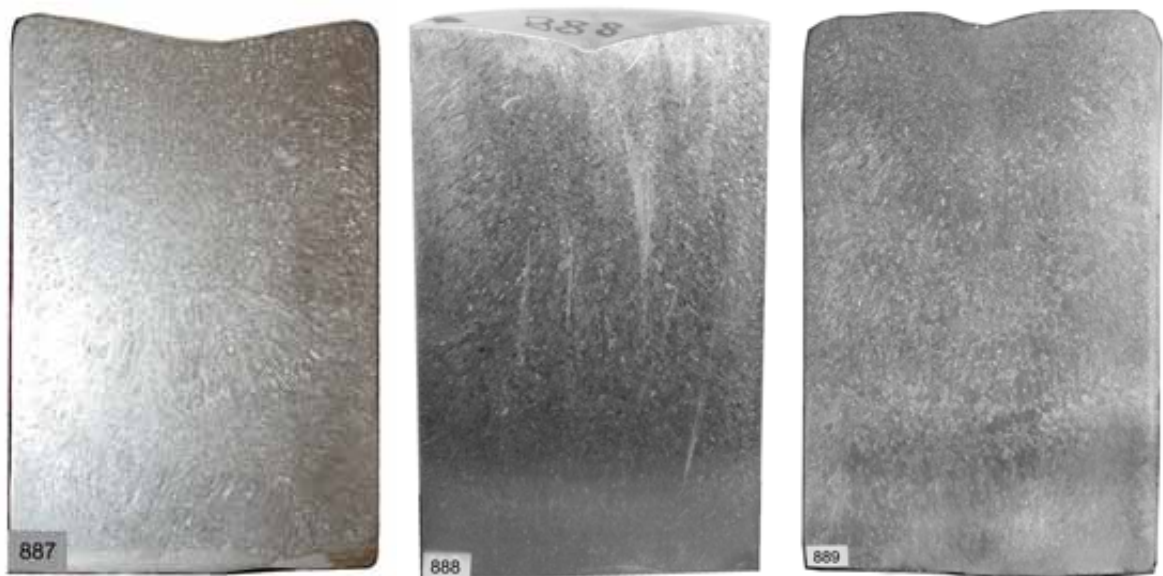


Рисунок 5.36 – Макроструктура титанових зливків $\varnothing 140$ мм, виплавлених з застосуванням розрядів на магнітний контур і металургійну ванну

Загалом, аналіз отриманих експериментальних даних вказує, що при збільшенні діаметру (перерізу) зливка енергія розрядів, яка необхідна для подрібнення структури зливків збільшується в квадратичній залежності (рис. 5.37). Незмінною, в певних межах, залишається питома енергія розрядів (енергія поділена на площу поперечного перерізу зливка), яка становить в середньому $0,3...0,4$ Дж/мм², при частоті розрядів 0,6...3 Гц.

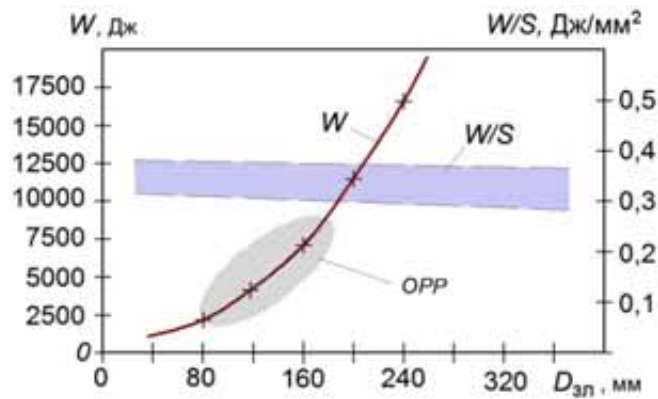


Рисунок 5.37 – Енергія розрядів W і питома енергія W/S , необхідні для подрібнення структури зливків різних діаметрів (OPP – область рекомендованих режимів)

Важливим питанням є визначення механізмів, які призводять до подрібнення литої структури металу. Очевидно, що вони пов'язані з силовою дією магнітного поля на рідку металеву ванну. Як було описано у підрозділі 5.1, поздовжнє магнітне поле призводить до утворення азимутальних електровихрових течій у ванні, інтенсивність яких перевищує теплові конвективні потоки при традиційному ЕШП. Таки потоки рідини біля гілок зростаючих дендритів можуть призводити до їх руйнування або, що більш імовірно, до їх часткового розчинення/оплавлення (рис. 5.38). Відокремлені фрагменти кристалів стають зародками для формування нових кристалів. Навіть, якщо фрагменти повністю розплавляються у рідині, вони являють собою готові концентраційні неоднорідності які полегшують утворення нових кристалів, що призводить до суттєвого диспергування литої структури металу.

Слід відмітити, що електромагнітна сила F_e діє як на рідкий метал, так і безпосередньо на кристали, що ростуть в двофазній зоні і крізь які тече електричний струм (рис. 5.38). При імпульсній дії магнітного поля, що має місце при розрядах конденсаторів на магнітний контур, сила F_e утворюється практично миттєво (протягом мілісекунд), створюючи тим самим "удари" на гілки зростаючих дендритів. При періодичній дії розрядів утворюються

вібрації, які при достатній їх частоті і амплітуді можуть безпосередньо руйнувати гілки дендритів.

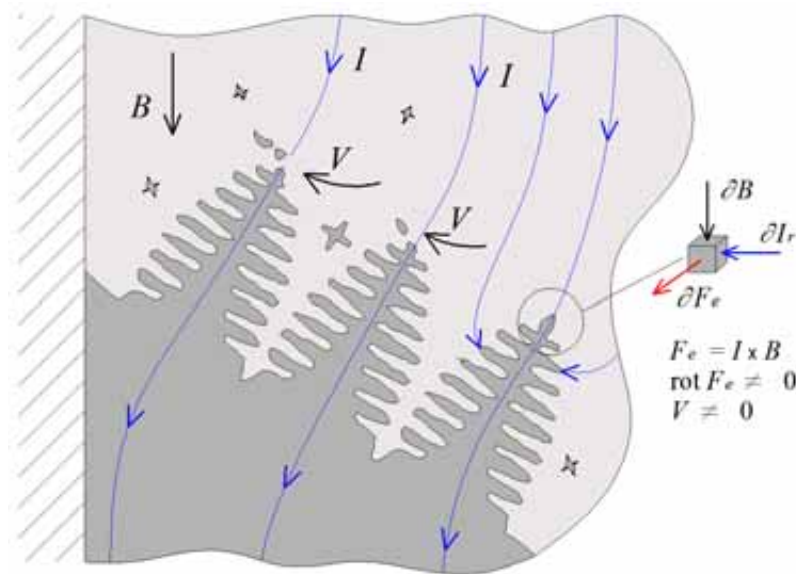


Рисунок 5.38 – Щодо механізмів подрібнення структури металу під дією імпульсних електромагнітних впливів: I – лінії електричного струму; B – напрямок дії магнітного поля; V – рух розплаву

Таким чином, один з механізмів подрібнення структури зливок пов'язаний з руйнуванням/розчиненням/розплавленням дендритних гілок, фрагменти яких разносяться перед фронтом кристалізації і стають центрами формування нових кристалів.

На нашу думку цей механізм також підсилюється більш інтенсивним винесенням з междіндритної рідини різного роду активних домішок і концентраційних неоднорідностей, які стають зародками нових кристалів, а також більш сприятливими умовами для формування нових центрів кристалізації внаслідок інтенсифікації гідродинамічних процесів в металевій ванні.

Певний вплив на умови кристалізації також має зміна, під дією розрядів конденсаторів, характеру крапельного перенесення металу, внаслідок чого зменшується розмір краплин і розосереджуються місця їх потрапляння на поверхню металевій ванни.

Щодо порівняння сумісних розрядів на металургійну ванну і соленоїд кристалізатора з окремими їх діями, то ефективність сумісних розрядів пояснюється збільшенням значення електромагнітної сили F_e , через періодичне збільшення сили струму в металургійному розплаві.

Таким чином, експериментальна оцінка різних варіантів електромагнітного впливу з використанням розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії показала, що одним із кращих варіантів є поєднання розрядів на металургійну ванну і одночасних розрядів на соленоїд зовнішнього магнітного контуру. Такий метод впливу забезпечує подрібнення і гомогенізацію литої структури металу, наближаючи її до структури деформованого металу. При цьому, використання лише одного із зазначених вище методів впливу (імпульсне електроживлення, розряди на металургійну ванну або на соленоїд) є менш ефективним щодо подрібнення та гомогенізації структури зливка.

Висновки до розділу 5

1. Показано, що перспективним інструментом впливу на кристалізацію металу зливоків ЕШП є розрядні імпульси, створені ємнісними накопичувачами електричної енергії (конденсаторами). При цьому, розряди конденсаторів можна використовувати як для живлення обмоток електромагнітної системи і створення імпульсних магнітних полів, так і для безпосередньої дії на металургійну ванну. В першому випадку механізм впливу на кристалізацію металу заснований на магнітогідродинамічних ефектах у розплавах шлакової та металевий ванн при впливі зовнішнім магнітним полем, в другому - на формуванні гідродинамічних "ударів" по фронту кристалізації зливка і утворенню механічних коливань у ванні.

2. Створено експериментальне обладнання для проведення досліджень з використанням енергії електромагнітних розрядів в електрошлакових процесах. Зокрема, розроблено і виготовлено:

- пристрій для генерування електричних розрядів з величиною струму до 28 (56) кА, енергію розряду до 4800 Дж і частотою 0,5...10 Гц, з можливістю плавного регулювання вказаних параметрів;

- магнітні контури у вигляді соленоїдів кристалізаторів \varnothing 65, 85, 125, 140 мм і 80×80 мм;

- пристрій до силового трансформатора ТШП-10000-1 для ведення процесу ЕШП на постійному струмі величиною до 10 кА.

Обладнання дозволяє проводити дослідження з використанням розрядів конденсаторів на зовнішній магнітний контур, безпосередньо на металургійну ванну, а також з сумісною дією розрядів на металургійну ванну і зовнішній магнітний контур.

3. Експериментально показана можливість практичної реалізації процесу ЕШП з розрядами конденсаторів на металургійну ванну при збереженні стабільності електрошлакового процесу і формуванні зливка з щільною макроструктурою без металургійних дефектів. Показана перспективність застосування даного методу впливу на структуроутворення злиwkів, перевага якого полягає у відсутності необхідності використання додаткових пристроїв для створення магнітних полів.

4. Встановлено, що імпульсне магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до циклічних коливань струму плавки. Ці коливання проявляються у періодичному падінні струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля і його відновленні під час пауз. Механізми зменшення струму плавки пов'язаний з МГД ефектами в металургійній ванні, внаслідок чого зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

5. Показана можливість керування структуроутворенням злиwkів ЕШП з використанням розрядів конденсаторів на соленоїд кристалізатора. Проте, такий метод впливу є недостатньо ефективним і нестабільним для

подрібнення литої структури зливків і його ефективність погіршується при збільшенні перерізу зливка.

6. Експериментальна оцінка різних варіантів електромагнітного впливу з використанням розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії показала, що найбільш ефективним методом є застосування одночасних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і на металургійну ванну, з питомою енергією розрядів $0,3...0,4$ Дж/мм² і частотою $0,6...3$ Гц.. Такий метод впливу повністю усуває формування стовбчастої орієнтованої структури металу, забезпечує її подрібнення і гомогенізацію, наближаючи до структури деформованого металу.

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕШП У ВАКУУМІ

У попередніх розділах були розглянуті методи керування електрошлаковим процесом з використанням нестационарних режимів електричного живлення та зовнішніх електромагнітних впливів. В цьому розділі буде розглянуто можливості впливу на властивості металу за рахунок такого параметру електрошлакового процесу, як тиск в робочій зоні печі ЕШП, зокрема – реалізації переплаву в умовах вакууму.

6.1 Тиск у плавильному просторі, як параметр управління електрошлаковим процесом

Незважаючи на те, що одна з перших печей ЕШП була камерного типу, згодом електрошлаковий переплав розвивався переважно як відкритий процес, коли плавлення та твердіння металу здійснюються на повітрі, при атмосферному тиску [246]. У зв'язку з цим, тиск у плавильному просторі, у тому числі рівень вакууму, як параметр управління електрошлаковим процесом практично не розглядався.

Сьогодні, номенклатура матеріалів, що переплавляються способом ЕШП, змінилася у бік складнолегованих сплавів, у тому числі таких, до складу яких входять легуючі елементи, які при нагріві легко окислюються – Ti, Cr, Ni, Zr та ін. Переплав таких матеріалів вимагає вживання спеціальних заходів для запобігання їх взаємодії з атмосферою повітря [22, 246].

Використовують два варіанти організації газового захисту плавильного простору. Перший варіант, найбільш поширений, полягає у використанні захисного кожуха, який дозволяє подавати в зону плавки інертний газ і вести процес в інертній атмосфері. При цьому, тиск у плавильному просторі дорівнює атмосферному або трохи перевищує його.

Другий варіант пов'язаний з використанням повністю герметичних, камерних печей, що дозволяє проводити процес плавки в контрольованій атмосфері в умовах підвищеного тиску або вакууму.

До печей другого типу належать печі, спеціально спроектовані для ведення процесу при надлишковому тиску. Вони призначені для виплавки високоазотистих сталей і забезпечують роботу при тиску до 70 ат (7,0 МПа), що дозволяє отримувати сталі з вмістом азоту, що істотно перевищує рівноважний [50, 247-248]. Також є відомості, що використання ЕШП під тиском, порівняно з традиційним ЕШП, забезпечує щільніший за структурою злиток, менш розвинену дендритну структуру та зменшення випаровування компонентів сплаву [249].

Попри такі данні, аналіз літературних відомостей показує, що ЕШП при надлишковому тиску має досить вузьку сферу застосування, яка обмежується виплавою високоазотистих сталей. Більш перспективним процесом, з точки зору керування властивостями металу, що виплавляють, є ЕШП в умовах вакууму.

Сьогодні, обробка рідкої сталі вакуумом широко використовується для зменшення вмісту в металі шкідливих газових домішок ([O], [N], [H]), неметалевих включень, розкислення і рафінування металів [250-253]. Тому ЕШП у вакуумі теж має сприяти дегазації металу і покращенню його фізико-хімічних властивостей.

Щодо досліджень процесу ЕШП у вакуумі, то таких публікацій значно менше. В інформаційному буклеті компанії ALD, провідного постачальника обладнання та технологій у сфері вакуумної металургії, є інформація про печі ЕШП для плавки в умовах вакууму [254]. Зазначається, ЕШП у вакуумі поєднує переваги процесів ЕШП та ВДП, зокрема: вирішується проблема окислення розплаву, створюються можливості для видалення водню та азоту, знижується небезпека виникнення сегрегаційних дефектів (так званих "білих плям"). Вказується, що цей процес може бути використаний для переплаву суперсплавів та титану. Однак відомості про технічні характеристики печей, діапазон припустимого вакууму, а також практичне їх застосування відсутні.

У публікації [46] представлені результати досліджень впливу складу шлаку і рівня вакууму на хімічний і газовий склад конструкційної сталі

21CrMoV5-7. Метою цієї роботи була оцінка можливості застосування різних шлакових систем для ЕШП за умов вакууму. При цьому, експериментальні дослідження автори проводили в істотно відмінних від електрошлакового переплаву умовах. Зокрема, електрошлаковий процес імітували шляхом переплаву металу в тиглі з діоксиду цирконію у індукційній вакуумній печі з подачею шлаку на поверхню розплавленого металу. Щойно шлак повністю розплавлявся, починали знижувати тиск у печі до того часу, поки не починалось кипіння шлаку. Досліджували чотири склади шлаку (два оксидні та два фторидно-оксидні) та три діапазони тисків – 70, 20 та 0,5 кПа. Встановлено, що для всіх складів шлаку кипіння починалося при досягненні тиску 0,5 кПа. Також виявлено значне зниження вмісту кисню у сталі порівняно з вихідним металом. При цьому, залежність кінцевого вмісту кисню від тиску спостерігалася лише при плавленні під оксидними шлаками. Експерименти за умов натурального ЕШП автори не проводили.

У роботі [255] вивчали випаровування фтору із шлаків системи $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$, призначених для вакуумного ЕШП. Експерименти проводили з використанням методу термогравіметричного аналізу, заснованого на реєстрації зміни маси зразка залежно від його температури. Досліджували 5 складів шлаків. Зразки шлаку масою 30 мг нагрівали від кімнатної температури до $1400\text{ }^\circ\text{C}$ у платиновому тиглі діаметром 6,7 мм, висотою 4 мм та витримували протягом 30 хвилин. Експерименти проводили у атмосфері аргону. Аналізували хімічні склади шлаків до та після експериментів, а також склад відкладень, що конденсуються на стінках кришки. Показано, що в процесі нагрівання флюсу відбувається інтенсивне випаровування фтору. При цьому, основним летючим продуктом є AlF_3 , який має високу пружність пари. На підставі проведених експериментів, для вакуумного ЕШП рекомендований флюс $30\text{ CaF}_2\text{-}33,9\text{ CaO}\text{-}36,1\text{ Al}_2\text{O}_3$ (мас.%), який з досліджуваних флюсів показав найнижчу електропровідність, низьку швидкість випаровування та найбільшу сульфідну ємність. Загалом

зазначається, що інтенсивне випаровування фтору є основною проблемою реалізації процесу ЕШП у вакуумі.

У роботах [256-258] вивчали вплив вакууму на ступінь рафінування та мікроструктуру сталевих зливок ЕШП. Дослідження проводили шляхом чисельного моделювання та натурних експериментів. Останні виконували при переплаві сталевих електродів діаметром 120 мм у кристалізаторі діаметром 200 мм під флюсом $42,9 \text{ CaF}_2 - 28,8 \text{ CaO} - 27,1 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,4 \text{ SiO}_2 - 0,5 \text{ FeO} - 0,3 \text{ C}$ (мас.%). Для зменшення ефекту випаровування фтору зі шлаку тиск у камері печі підтримували на рівні не нижче 20 кПа [256].

Встановлено, що порівняно зі сталями, які переплавляли в атмосфері повітря та аргону, сталь, яку переплавляли у вакуумі, мала більш високу чистоту за вмістом кисню, алюмінію, сірки та неметалевих включень. Зниження вмісту кисню автори пов'язують із розкисненням сталі вуглецем з утворенням газу CO, яке в умовах вакууму починається вже при 1635°C і відбувається інтенсивніше, а також зі зниженням повторного окиснення сталі. Нижчий вміст алюмінію, на думку авторів, обумовлений зниженням активності Al_2O_3 у розплавленому шлаку, викликаним випаровуванням фтору. У свою чергу, зниження вмісту у сталі алюмінію сприяє зменшенню кількості і розмірів включень Al_2O_3 . Також зазначається, що в умовах вакууму досягається висока швидкість десульфурації, оскільки вміст кисню є найменшим, а виділення CO, який утворюється в результаті розкиснення сталі, прискорює масоперенос.

Крім цього, автори зафіксували ефект подрібнення мікроструктури зливка, обробленого вакуумним ЕШП. Так, відстань між гілками дендритів другого порядку в зливку вакуумного ЕШП склала 72 мкм, а в аналогічному зливку, отриманому в атмосфері аргону - 104 мкм. Такий ефект автори пояснюють більш рівномірним розподілом температури у ванні розплавленого шлаку, вирівнюванням фронту кристалізації та збільшенням локальної швидкості твердіння, викликаними інтенсифікацією гідродинамічних потоків шлаку в результаті випаровування фторидів та

виділення СО. Також відзначається зменшення загальної площі та розмірів первинних карбідів. В результаті вище зазначених ефектів сталь, оброблена вакуумним ЕШП, має більш високі механічні властивості при випробуваннях на розтяг.

Загалом, у роботах [255-258] практично немає інформації про технологічні особливості процесу ЕШП у вакуумі, діапазони допустимих тисків при використанні різних флюсів, впливі вакууму на стабільність процесу та режими переплаву. Наголошується лише на тому, що для забезпечення стабільності розплавленого шлаку рівень тиску рекомендується підтримувати не нижче 10 кПа [258].

Аналізуючи наявні відомості та власний досвід камерного ЕШП можна зробити висновок, що ЕШП у вакуумі є перспективним процесом, який дозволяє впливати не лише на хімічний склад металу, що виплавляють, але і на структуру металу і його механічні властивості.

При цьому, основною проблемою реалізації процесу ЕШП у вакуумі є закипання шлаку, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. Закипання шлаку і викликана цим явищем нестабільність не дозволяють вести процес ЕШП у вакуумі при тисках, які використовують, наприклад, при вакуумно-дуговому переплаві, коли тиск у печі підтримують на рівні $<0,0013$ кПа ($<1,3$ Па), або, тим більше, при тисках, що використовуються в процесі електронно-променевої плавки. Тому рівень мінімально допустимого тиску в процесі ЕШП набагато вищий і обмежується так званим низьким вакуумом (від 1×10^5 до $3,3 \times 10^3$ Па).

Очевидно, що рівень допустимого при ЕШП вакууму залежить від складу флюсу, що використовується. При цьому, висока летючість хлоридних і фторидних сполук дає підставу вважати, що зі збільшенням їх вмісту у флюсі рівень мінімально допустимого тиску буде підвищуватися. Тобто, сольові флюси (на основі фторидів та хлоридів) меншою мірою підходять для вакуумного ЕШП ніж фторидно-оксидні або чисто оксидні флюси.

Вакуумний ЕШП є дуже цікавим процесом стосовно до виплавки високореакційних металів, зокрема сплавів на основі титану. Це пов'язано з потенційною можливістю дегазації титану в процесі переплаву, насамперед видалення водню, який підвищує крихкість металу. Така можливість обумовлена тим, що розчинність водню в титані має зворотній характер і цей газ можна видалити майже повністю (тисячні долі відсотка) відпалом або переплавом в умовах вакууму.

Відомо, що при ЕШП титану (як і при електрошлаковому зварюванні титану) використання флюсів, що містять оксиди, неприпустимо [269]. Для цих цілей використовуються сольові флюси на основі фторидів та хлоридів лужних та лужноземельних металів. Враховуючи високу пружність пари таких сполук постає питання можливості реалізації вакуумного ЕШП з використанням зазначених флюсів і діапазонів допустимих тисків, які не призводять до дестабілізації електрошлакового процесу. Також важливим є дослідження впливу тиску інертного середовища (або рівня вакууму) в печі ЕШП на газовий склад титану і особливості його структуроутворення.

6.2 Дослідження технологічних особливостей і допустимих тисків процесу ЕШП в вакуумі

Мета досліджень полягала у вивченні технологічних особливостей процесу ЕШП у вакуумі та визначенні діапазону тисків, допустимих при використанні фторидно-оксидних та сольових флюсів.

Схема експериментальної установки для ЕШП у вакуумі наведена на рис. 6.1. Дослідні плавки проводили в електрошлаковій печі камерного типу при переплаві сталевих і титанових витратних електродів діаметром 36...54 мм у мідних водоохолоджуваних кристалізаторах з внутрішніми діаметрами 65 та 85 мм.

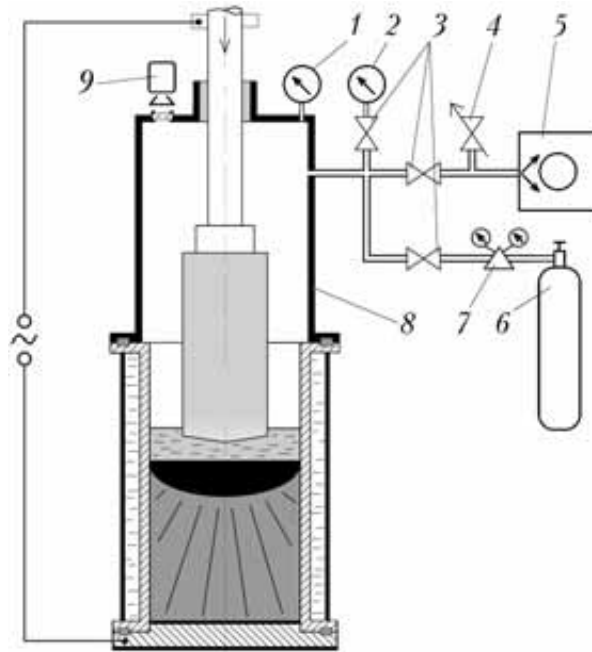


Рисунок 6.1 – Схема експериментальної установки для ЕШП у вакуумі:
 1 – мановакуумметр; 2 – вакуумметр іонізаційний; 3 – вакуумні вентилі; 4 –
 натікач; 5 – вакуумний насос; 6 – балон з аргоном; 7 – газовий редуктор з
 ротаметром; 8 – камера печі; 9 – пристрій відеоспостереження

Експерименти проводили в такий спосіб. Після монтажу електрода та засипки флюсу піч герметизували, відкачували повітря і потім у плавильний простір подавали аргон до атмосферного тиску. Електрошлаковий процес розпочинали шляхом твердого старту. Після наведення шлакової ванни і виходу на режими плавки включали вакуумний насос і плавно знижували тиск в камері печі. Після досягнення критичного мінімального тиску, при якому струм плавки дестабілізувався, порушувалася стабільність електрошлакового процесу і флюс починав закипати – вакуумну систему відключали а в камеру печі подавали аргон. За рахунок підвищення тиску в плавильному просторі електрошлаковий процес стабілізувався і експеримент продовжували далі. При цьому, змінювали електричну напругу на ванні та повторювали описаний вище цикл зниження тиску, але вже за іншої потужності переплаву. Напругу в процесі плавки змінювали в межах 20...40 В, а струм плавки, за рахунок зміни швидкості подачі електрода, підтримували

на рівні 1300...1700 А, при виплавці зливків діаметром 65 мм, і 2500...2800 А – зливків діаметром 85 мм. Експериментальні плавки проводили з використанням флюсів АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 (за ГОСТ 30756-2001) і флюсів АН-Т2, АН-Т4, виготовлених шляхом змішування вихідних компонентів кваліфікації "Ч" (табл.6.1).

Таблиця 6.1 – Хімічний склад досліджуваних флюсів

Марка флюсу	Масова частка компоненту, %					
	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	SrCl ₂
АНФ-1	>90	≤3	≤5	≤2,5	-	-
АНФ-6	Основа	25-31	≤8	≤2,5	-	-
АНФ-28	41-49	≤5	26-32	20-24	≤5	-
АН-Т2	100	-	-	-	-	-
АН-Т4	85	-	-	-	-	15

Проведені експерименти показали, що ступінь розрідження в плавильному просторі помітно впливає на електричні режими плавки і стабільність електрошлакового процесу (рис. 6.2). Для всіх досліджуваних флюсів існував мінімальний тиск, нижче за який порушувалася стабільність електрошлакового процесу і флюс закипав. Причому рівень цього тиску залежав як від складу флюсу, так і від електричних режимів, що визначають потужність ЕШП. Чим вище була потужність переплаву, тим при вищому тиску закипав флюс (рис. 6.3).

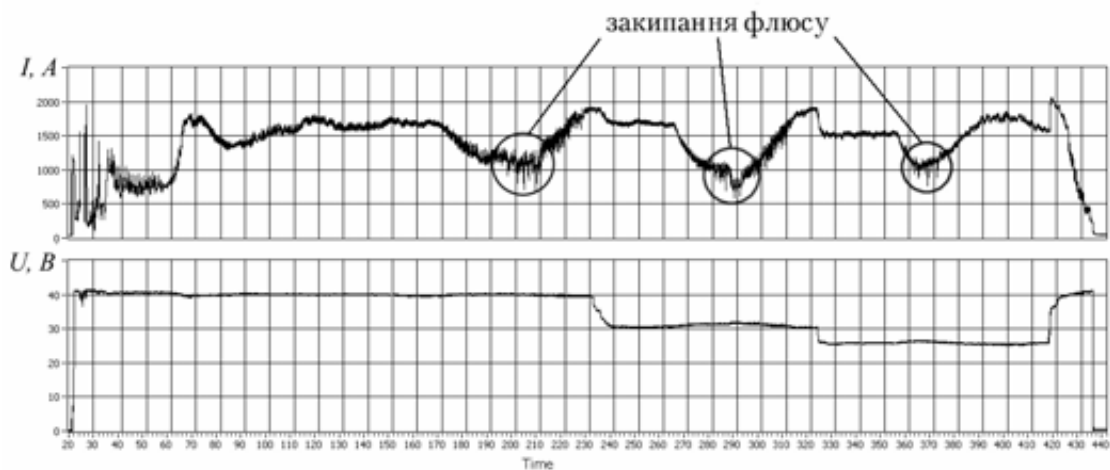


Рисунок 6.2 – Реєстрограми струму і напруги процесу ЕШП у вакуумі ($d_{\text{ел}}=40$ мм, $d_{\text{кр}}=65$ мм, флюс – АНФ-6)

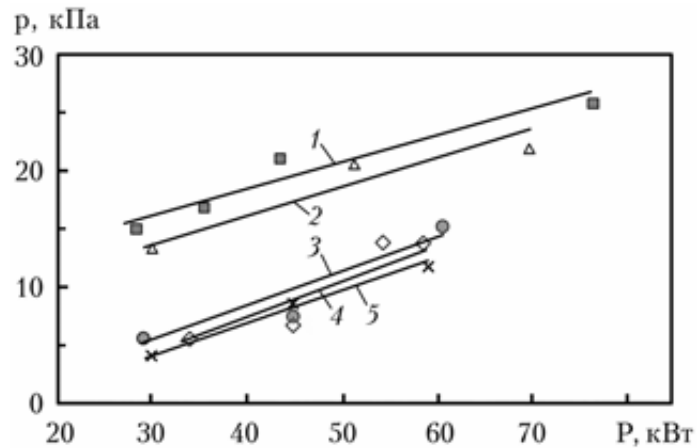


Рисунок 6.3 – Вплив потужності процесу ЕШП на тиск закипання різних флюсів: 1 – АН-Т4; 2 – АН-Т2; 3 – АНФ-28; 4 – АНФ-1; 5 – АНФ-6

У всіх випадках зниження тиску в камері печі, в діапазоні від атмосферного (101 кПа) до 40 кПа, не чинило помітного впливу на стабільність електрошлакового процесу. При цьому, відзначалося деяке зниження струму плавки, в середньому на 5...25 %. Подальше зниження тиску (менше за 30...25 кПа) призводило до поступової дестабілізації струму плавки, що виявлялося у збільшенні амплітуди його коливань. Візуальне спостереження за поверхнею шлакової ванни показувало, що її гідродинамічна активність збільшувалася, швидкість потоків шлаку підвищувалася, а коливання поверхні ставали більш інтенсивними. Потім, досягши критичного мінімального тиску, рівень шлаку підвищувався (ванна немов би збільшувалася в об'ємі), з'являлися викиди шлаку та шлак починав закипати. Струм плавки при цьому ставав нестабільним і процес, у такому режимі, продовжувати було неможливо (рис. 6.2).

Наступне цілеспрямоване зниження електричної напруги на ванні та збільшення (за рахунок подачі аргону) тиску в камері печі дозволяли знову стабілізувати електрошлаковий процес. При подальшому проведенні експерименту з нижчою електричною напругою на ванні і відповідно нижчою потужністю переплаву, описана вище картина повторювалася, але

закипання флюсу відбувалося вже при нижчих значеннях тиску в плавильному просторі.

Момент закипання флюсу та дестабілізації струму плавки відбивався на поверхні зливка у вигляді характерних перетискань (гофр) (рис. 6.4). При використанні флюсу АНФ-1 такі дефекти були виражені в більшій мірі (рис. 6.4 а), ніж при плавці під флюсом АНФ-6 (рис. 6.4 б), що пов'язане з більшою в'язкістю і ширшим температурним інтервалом твердіння останнього.



Рисунок 6.4 – Гофри на поверхні злитків ЕШП, спричинені закипанням флюсу та падінням струму плавки: *а* – флюс АНФ-1; *б* – флюс АНФ-6

Для кожного досліджуваного флюсу рівень критичного тиску, при якому закипала ванна, відрізнявся. Для сольових флюсів він був найбільшим і становив близько 15...26 кПа для АН-Т4 та 12...22 кПа для АН-Т2. Використання фторидно-оксидних флюсів АНФ-1, АНФ-6 та АНФ-28 дозволило вести процес ЕШП при нижчих значеннях тиску в плавильному просторі. Цей тиск для даних флюсів був близьким і, в залежності від потужності процесу, становив 3...15 кПа (рис. 6.3). При цьому, характерною

особливістю використання флюсу АНФ-28 в умовах вакууму була періодична поява дугових розрядів, частота яких збільшувалася зі збільшенням ступеня розрядження в плавильному просторі. При використанні інших флюсів дугові розряди не спостерігали. Очевидно це пов'язане з наявністю у флюсі компонентів (CaO , SiO_2) з низьким потенціалом іонізації, які стабілізують горіння дуги.

Залежність тиску, при якому флюс закипає, від потужності процесу ЕШП пояснюється наступним. Як відомо процес кипіння (інтенсивного пароутворення) залежить від тиску та температури. Зі зростанням тиску температура кипіння збільшується, і зі зниженням – зменшується. У свою чергу температура шлакової ванни при ЕШП має пряму залежність від потужності, яка вкладається. Чим вище остання, тим вище температура шлакової ванни. Таким чином, при зниженні потужності ЕШП знижується температура шлакової ванни і, відповідно, її закипання відбувається при нижчому тиску.

На рис. 6.5 наведені фрагменти шлакової кірки, відібрані після ЕШП у умовах вакууму. Незважаючи на те, що після закінчення процесу плавки та відключення електричної напруги, процес кипіння шлаку поступово припиняється, у шлаковій кірці спостерігається велика кількість пор різних розмірів, що свідчить про інтенсивні процеси кипіння і газовиділення у шлаковій ванні.

Таким чином, проведені дослідження показали можливість ведення процесу ЕШП у вакуумі з використанням фторидно-оксидних та сольових флюсів. Необхідно підкреслити, що отримані діапазони допустимих тисків є граничними, нижче за які порушується стабільність електрошлакового процесу. Тому при виборі режимів ЕШП у вакуумі для гарантованого забезпечення стабільності процесу слід орієнтуватися на більш високі значення тиску, орієнтовно ≥ 30 кПа для сольових флюсів та ≥ 20 кПа для фторидно-оксидних.

Також необхідно враховувати, що описані вище експерименти були проведені при виплавці зливків невеликих розмірів – діаметром 65 та 85 мм. Можна припустити, що при ЕШП зливків промислових розмірів рівень допустимих тисків може відрізнятись від отриманих у цій роботі у бік нижчих значень. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням діаметра зливка, що виплавляється, щільність струму на торці витратного електрода і в шлаковій ванні зменшується. Відповідно, локальний перегрів приелектродних ділянок буде меншим, що дозволить вести процес ЕШП при нижчих значеннях тиску у плавильному просторі.

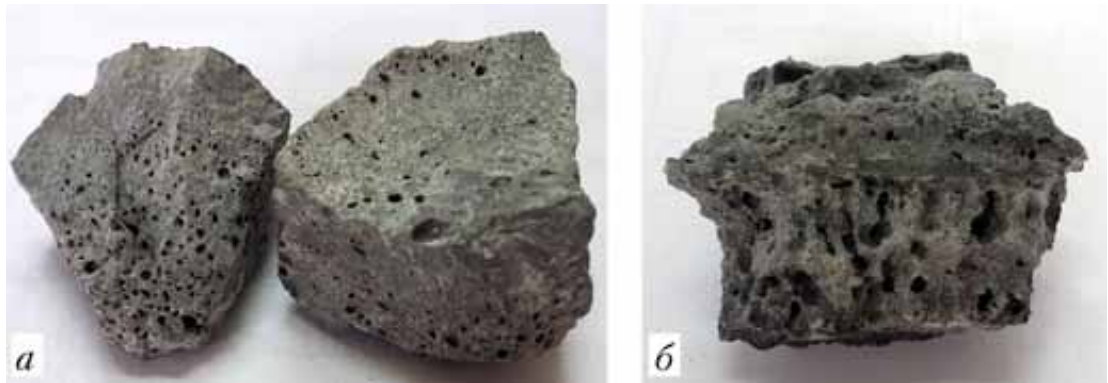


Рисунок 6.5 – Фрагменти шлакової кірки після ЕШП в умовах вакууму: *a* – АНФ-28; *б* – АН-Т4

Таким чином, проведені експерименти довели можливість проведення процесу ЕШП у вакуумі з використанням фторидно-оксидних і сольових флюсів та дозволили для них визначити допустимий рівень тисків, при яких не порушується стабільність електрошлакового процесу внаслідок закипання шлакової ванни. Подальші роботи будуть спрямовані на дослідження впливу вакууму на газовий склад сплавів та особливості їх структуроутворення.

6.3 Вплив тиску на газовий склад і структуру металу ЕШП

6.3.1 ЕШП титану

Через високу хімічну активність титану перепплав сплавів на його основі має відбуватися виключно в камерних печах в захисній інертній атмосфері [79]. Зазвичай, при ЕШП титану плавильний простір попередньо вакуумують, а потім заповнюють інертним газом (аргоном). Процес плавки проводять при надлишковому тиску аргону (120...140 кПа), що запобігає натіканню повітря в разі утворення нещільностей в вузлах печі. При цьому, процес плавки можна здійснювати як в застійній атмосфері аргону, так і в проточній.

Така схема забезпечує надійний захист розплавленого металу і розігрітого до високих температур витратного електроду від взаємодії з зовнішньою атмосферою а також перешкоджає випаровуванню легуючих компонентів з високою пружністю пари [61]. Проте, вона має і певні недоліки, у порівнянні з плавкою в умах вакууму.

Відомо, що водень має зворотну розчинність у титані. Через це, при перепплаві титану в вакуумі відбувається його рафінування від водню. Це має місце, наприклад, при ВДП і ЕПП титанових сплавів [73, 259]. При перепплаві титану при надлишковому тиску видалення водню відбувається значно меншою мірою або взагалі не відбувається. Крім того, при перепплаві титану в умовах надлишкового тиску створюються несприятливі умови для видалення вологи, яка може бути адсорбована губчастим титаном витратного електроду та залишками солей на внутрішній поверхні камери печі і т.д.

З огляду на вищезазначене певний інтерес представляє дослідження впливу тиску в плавильному просторі на процес ЕШП титану, в тому числі розрядженого тиску (вакууму). ЕШП в вакуумі може поєднати переваги процесів ЕШП і ВДП, зокрема забезпечити високу якість поверхні зливка, щільну однорідну структуру металу, надійний газовий захист і рафінування від водню.

Завданням дослідження було вивчення технологічних особливостей процесу ЕШП титану в умовах пониженого тиску, визначенні впливу тиску на газовий склад і особливості структуроутворення металу зливків.

Експериментальні дослідження проводили на установці для камерного ЕШП високореакційних матеріалів, яке дозволяє здійснювати процес переплаву як в умовах надлишкового тиску до 500 кПа, так і в умовах вакууму. Схема установки для проведення експериментів наведена на рис.6.1.

Дослідні плавки проводили при переплаві пресованих витратних електродів діаметром 50 і 75 мм під флюсом АН-Т4, у мідних водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром 85 і 105 мм. Використовували електроди двох типів: пресовані з губчастого титану ТГ-110 (під титан ВТ1-0); пресовані з губчастого титану ТГ-130 і лігатури К-5-1 (під сплав ВТ22). Перед плавкою плавильний простір вакуумували до тиску 2,6 Па (2×10^{-2} мм. рт. ст.), потім заповнювали аргоном. Експерименти проводили при різних значеннях тиску аргону, який змінювали в межах від 20 кПа до 300 кПа. По результатах плавки досліджували газовий склад і особливості структуроутворення металу зливків.

Результати експериментів представлені в табл. 6.2 і на рис.6.6-6.9.



Рисунок 6.6 – Зливки титану ВТ1-0, виплавлені при тиску 25 кПа (а) і 160 кПа (б)

В усьому досліджуваному діапазоні тисків процес ЕШП проходив стабільно. Це збігається з результатами досліджень, представлених в попередньому підрозділі, якими були встановлені припустимі діапазони тиску при застосуванні флюсу АН-Т4.

Формування поверхні усіх зливок було бездефектним. Для порівняння на рис. 6.6 показані зливки ВТ1-0, отримані при тиску 25 і 160 кПа. При тиску 25 кПа, тобто в умовах вакууму, бічна поверхня виявилась більш шорсткою (рис.6.6 а), ніж при надлишковому тиску (рис.6.6 б). Проте, в обох випадках поверхневих дефектів не виявлено.

Результати газового аналізу металу виплавлених зливок надані в табл. 6.2 і на рис. 6.7-6.8. Аналіз отриманих даних про вміст в металі кисню і азоту показує, що нема чіткої закономірності щодо впливу тиску на вміст вказаних елементів в металі зливок. В зливках титану ВТ1-0 спостерігалось незначне збільшення вмісту кисню і азоту в металі, виплавленому в умовах розрядженого тиску (25 кПа), у порівнянні з металом, отриманим при надлишковому тиску (160 кПа) (рис. 6.7 а, б). Проте, різниця вмісту елементів знаходиться в межах похибки вимірювань, що не дає підстави стверджувати про якусь закономірність.

Таблиця 6.2 – Газовий склад титанових зливок, отриманих ЕШП при різному тиску в плавильному просторі

Сплав	Тиск Ar, кПа	Вміст, мас. %		
		[O]	[N]	[H]
ВТ1-0	25	0,074	0,0060	0,0034
	160	0,070	0,0056	0,0052
ВТ22	25	0,13	0,015	0,0052
	50	0,14	0,027	0,0053
	75	0,09	0,022	0,0065
	100	0,14	0,020	0,0076
	150	0,14	0,025	0,0068
	200	0,14	0,027	0,0064
	250	0,13	0,014	0,0070
	300	0,13	0,015	0,0064

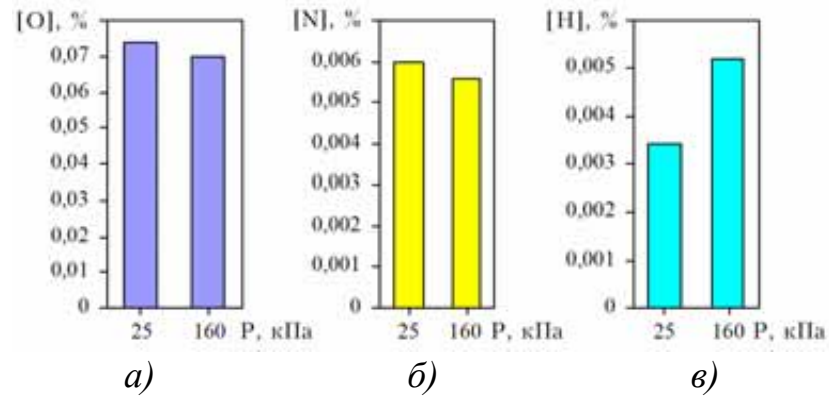


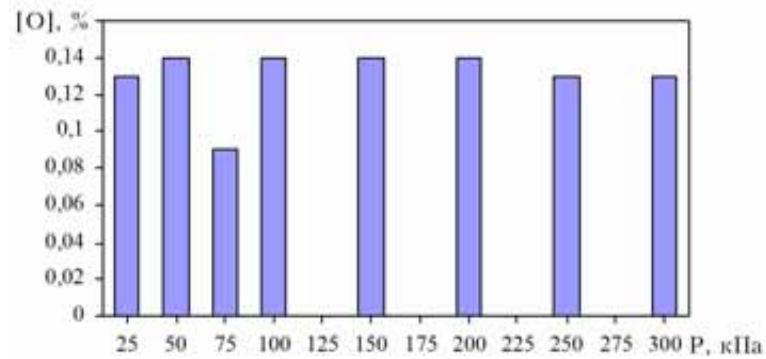
Рисунок 6.7 – Вміст кисню (а), азоту (б) і водню (в) в зливках титану BT1-0, в залежності від тиску в плавильному просторі печі ЕШП

Аналогічна ситуація мала місце і в зливках сплаву BT22. В даному випадку, в залежності від тиску в плавильному просторі, вміст кисню і азоту коливався в межах 0,09...0,14 і 0,014...0,027 % відповідно, без виявленої закономірності (рис. 6.8 а, б). Очевидно, такі результати пов'язані з різними випадковими чинниками, які вплинули на отримані данні (похибки вимірювань, неможливість підтримувати абсолютно однакові умови для різних плавок і т.і.). Це говорить про необхідність подальшого статистичного доповнення отриманих результатів. Тим не менше, можна стверджувати, що у досліджуваному діапазоні рівень тиску в плавильному просторі мало впливає на вміст кисню і азоту в титанових зливках.

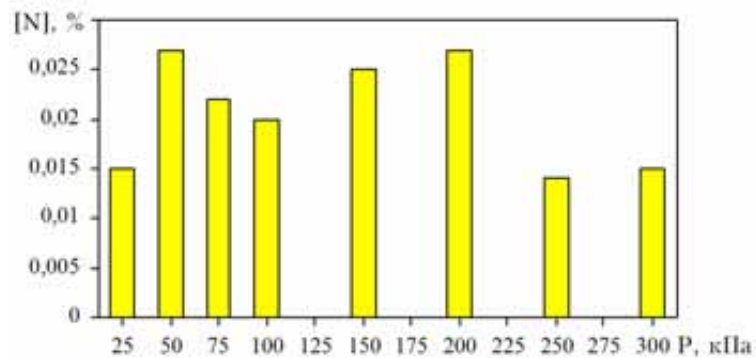
Щодо вмісту водню, то в даному випадку, як і для злиwkів технічного титану BT1-0, так і для злиwkів титанового сплаву BT22 була встановлена певна закономірність. Вона виявляється в зменшенні наявності водню при веденні процесу ЕШП в умовах вакууму (рис. 6.7 в, 6.8 в). В першому випадку (для злиwkів BT1-0) зменшення тиску в плавильному просторі з 160 до 25 кПа призвело до зменшення вмісту водню в металі з 0,0052 до 0,0034 мас. %, тобто на 35 %.

Для злиwkів сплаву BT22 мала місце схожа ситуація. Зменшення тиску в діапазоні з 300 до 100 кПа (діапазон надлишкового тиску) мало впливало на вміст водню (рис. 6.8 в). Його коливання знаходилося в межах похибки

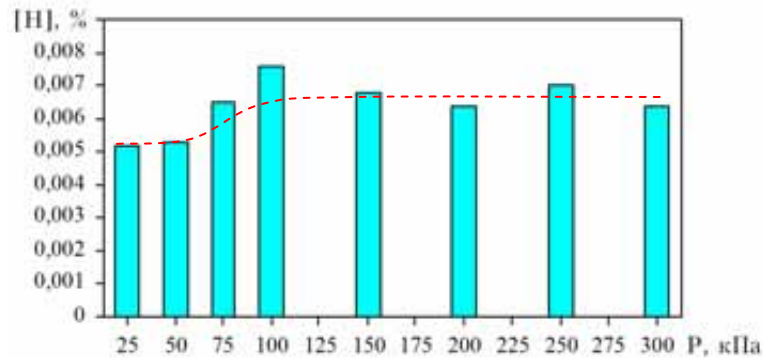
вимірювань. При подальшому зменшенні тиску нижче атмосферного (до 25 кПа) відбувалось закономірне зменшення вмісту водню в металі зливків до 0,0052 мас. %. (приблизно на 20 %).



а)



б)



в)

Рисунок 6.8 – Вміст кисню (а), азоту (б) і водню (в) в зливках сплаву BT22, в залежності від тиску в плавильному просторі печі ЕШП

Таким чином, отримані дані дають підстави стверджувати про можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа).

На рис. 6.9 наведено макроструктури поперечного перерізу зливоків титану VT1-0, отриманих ЕШП при тиску інертного газу в плавильному просторі 25 кПа і 160 кПа. В обох випадках структура металу щільна, без пор і інших внутрішніх дефектів. Середній розмір зерен в зливку, виплавленому при 25 кПа, становив $3,1 \times 1,7$ мм, при 160 кПа – $2,3 \times 1,2$ мм. Тобто, зливков, виплавлений в умовах вакууму, мав більш крупнозернисту структуру ніж зливков, виплавлений при надлишковому тиску. З одного боку це збігається з даними, наведеними в роботі [260], де зазначається, що зливки ЕШП під тиском мають менш розвинену дендритну структуру, у порівнянні з зливками традиційного ЕШП. З другого – суперечить даним роботи [256], де відмічено подрібнення структури зливоків ЕШП, виплавлених в умовах вакууму.

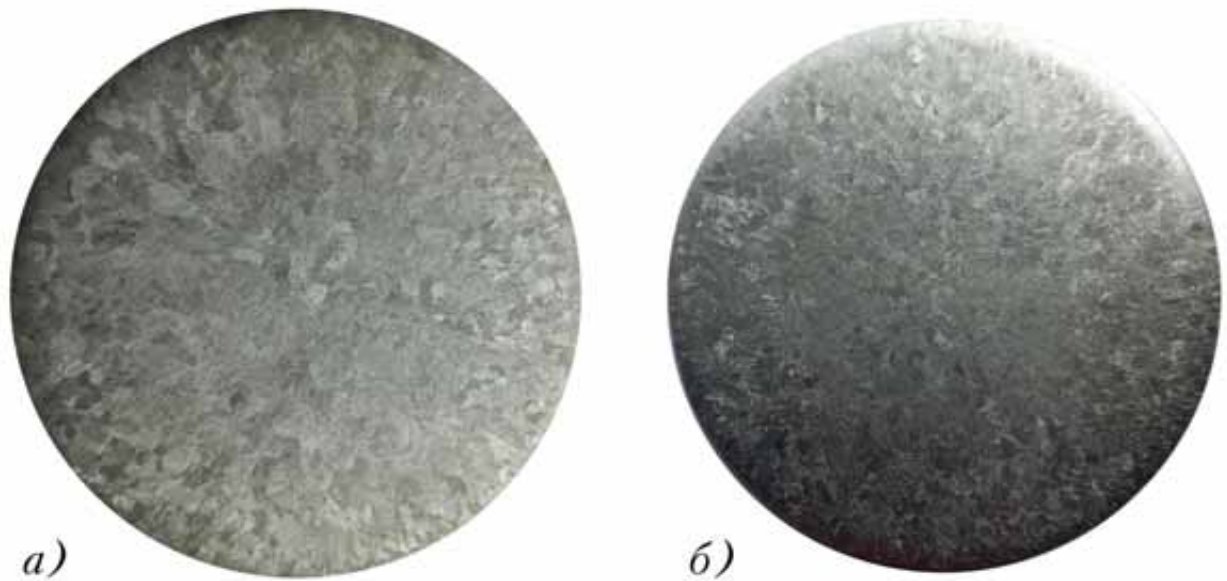


Рисунок 6.9 – Макроструктура поперечного перерізу титанових зливоків, отриманих ЕШП при тиску інертного газу 25 кПа (а) і 160 кПа (б)

Вплив тиску на характер структуроутворення металу зливоків можна пояснити через його вплив на режими ЕШП. Так, у попередньому підрозділі було показано, що зменшення тиску в плавильному просторі (нижче атмосферного) призводить до зниження струму плавки. В свою чергу, це призводить до зменшення тепловиділення в шлаковій ванні (якщо примусово

не збільшувати струм за рахунок швидкості подачі електроду), що впливає на характер структуроутворення металу, локальну швидкість твердіння і розмір зерна литого металу.

6.3.2 ЕШП феротитану

Одною з ефективних сфер застосування камерного ЕШП є переплав відходів титану у вигляді стружки з отриманням високовідсоткового феротитану марки *FeT70* [261]. Суть способу полягає в переплаві витратних електродів, які виготовляють шляхом пресування титанової стружки в сталеву трубку обичайку. Враховуючи високу хімічну активність титану, переплав здійснюють в камерній печі в захисній інертній атмосфері.

Феротитан *FeT70* (так званої "вакуумної" якості) сьогодні користується найбільшим попитом на ринку через мінімальну кількість сторонніх домішок. При цьому, 70 % феротитан є евтектичним сплавом, який в системі Fe - Ti має найменшу температуру плавлення, в результаті чого він добре розчиняється і засвоюється в розплаві сталі.

ГОСТ 4761-91 (ISO 5454:1980), який регламентує хімічний склад феротитану *FeT70*, не регулює наявність в металі газів: кисню, азоту, водню. Проте, як показала практика, ці гази є шкідливими домішками, які погіршують властивості феротитану (погіршується засвоєння титану у розплаві сталі).

Враховуючи те, що титанова стружка може бути забруднена різними техногенними домішками (вологою, мастильно охолоджувальною рідиною та інш.), було запропоновано її електрошлаковий переплав здійснювати в умовах вакууму. Передбачається, що це створить сприятливі умови для видалення вологи і атмосферних газів в процесі ЕШП і дозволить зменшити їх наявність в феротитані, отриманому з вторинної сировини.

Завданням робіт було дослідити вплив розрідженого тиску при ЕШП феротитану на його газовий склад.

Експерименти проводили при переплаві витратних електродів, які виготовляли шляхом пресування титанової стружки марки Grade 4 в сталеву (Ст3) трубу діаметром 48 мм з товщиною стінки 1,5 мм (рис. 6.10). Розрахунковий склад титанового і сталевого компонентів в витратному електроді становив - 70 до 30. Плавки здійснювали шляхом камерного ЕШП при підвищеному тиску інертного газу в плавильному просторі (130 кПа), а також в умовах вакууму (20 кПа). Шлакову ванну наводили шляхом "твердого" старту, застосовували флюс АН-Т4.



а



б



в

Рисунок 6.10 – Зовнішній вигляд витратних електродів (а), торця електроду після пресування (б) і переплаву (в)

В обох випадках процес ЕШП проходив відносно стабільно. Мали місце коливання струму плавки, проте викидів шлаку, дугових розрядів та інших порушень стабільності електрошлакового процесу не було. Очевидно, що коливання струму плавки викликані особливостями плавлення електроду, пресованого зі стружки, зокрема - недостатньою щільністю і рівномірністю

спресованої шихти. Щодо впливу рівня тиску аргону в плавильному просторі на характер плавлення витратного електроду та режими електрошлакового процесу, то помітного ефекту в досліджуваному діапазоні тисків (20 і 130 кПа) виявлено не було.

Зовнішній вигляд виплавлених зливок і отриманого з них феротитану (подрібненого на шоківій дробарці) наведені на рис. 6.11. В обох випадках шлак легко відокремився від металу. Отриманий феротитан має світло-сріблястий колір, без ознак окислення. Метал зламів, як за кольором, так і за структурою – однорідний. Шлакові включення та інші сторонні включення відсутні.



a)



б)

Рисунок 6.11 – Зливки і подрібнений феротитан, отримані ЕШП вторинної сировини при різних значеннях тиску в плавильному просторі: *a* – 20 кПа; *б* – 130 кПа

Результати хімічного аналізу виплавленого феротитану представлені в табл. 6.3. Наведені дані свідчать, що за вмістом основних елементів (Fe, Ti), а також домішок (Al, Si, Mn) виплавлений феротитан відповідає вимогам ДСТУ 4761-91 (ISO 5454:1980) щодо хімічного складу феротитану марки *FeT70*.

Результати газового аналізу показали більш низький вміст атмосферних газів в металі, отриманому при пониженому тиску в плавильному просторі (табл. 6.3). Очевидно, що мова не йде про видалення з титану кисню та азоту, які були розчинені в ньому. Зменшення вмісту газів пов'язане, в першу чергу, з видаленням в процесі вакуумного ЕШП з пресованого витратного електроду і плавильного простору вологи та інших домішок (змащувально-охолоджувальної рідини), які були фізично адсорбовані поверхнею титанової стружки.

Таблиця 6.3 – Результати хімічного аналізу феротитану, виплавленого із вторинної сировини при різних значеннях тиску в плавильному просторі печі ЕШП

Тиск Ar в плавильному просторі, кПа	Вміст, % (мас.)							
	Ti	Fe	Al	Si	Mn	O	N	H
20	67,5	31,6	0,20	0,12	0,15	0,21	0,02	0,009
130	67,3	31,2	0,23	0,13	0,08	0,25	0,03	0,012

Таким чином, проведені дослідження показали ефективність і перспективність застосування вакуумного ЕШП для дегазації металу (видалення адсорбованої вологи і газів) при переплаві вторинної сировини, зокрема, титанової стружки в процесі виплавки високовідсоткового феротитану *FeT70*.

6.4 Дегазація електроду, спресованого з губчастого титану, в процесі вакуумування камерної печі ЕШП

Як було показано в попередніх підрозділах, дегазація металу (зокрема титану) в процесі переплаву, тобто при високих температурах і наявності рідкої фази, доволі складний процес. Це пов'язане з тим, що процеси окислення (взаємодії з воднем, азотом тощо) і дегазації титану йдуть паралельно і напрямок реакцій залежить від багатьох факторів. Якщо створяться умови для окислення титану, то потім видалити кисень в процесі переплаву буде вже практично неможливо. Тому були розглянуті інші можливості і технологічні заходи для зменшення вмісту у титані шкідливих газів.

Як відомо, вихідною сировиною для металургійного отримання титанових зливків є губчастий титан [262]. З нього, переважно методом пресування, виготовляють електроди, які потім переплавляють в зливки (при ВДП, ЕШП) [150, 241, 262-263]. Титан губчастий одержують шляхом магнієтермічного відновлення тетрахлориду титану [262, 264]. Отриману у процесі відновлення пористу масу титану очищають від парів магнію та солей хлору за допомогою тривалої вакуумної сепарації при температурах 850...1020⁰С [265]. В результаті одержують губчастий титан із мінімальним вмістом шкідливих домішок (атмосферних газів) [266].

Однак, у процесі наступних операцій дроблення губки, її транспортування, виготовлення витратних електродів, при тривалому зберіганні (особливо при порушенні відповідних правил) і т.д. можлива адсорбція розвиненою поверхнею губчастого титану (та залишками солей хлору, які присутні на ній) атмосферних газів (вологи).

В процесі подальшого металургійного переділу волога випаровується і її компоненти можуть вступати в реакцію з розігрітим до температур вище 400...450⁰С титаном витратного електроду, що призведе до підвищеного вмісту в металі атмосферних газів.

Слід зазначити, що адсорбовані поверхнею губки (пресованого електроду) атмосферні гази не розчинені в титані і їх можна видалити шляхом вакуумної сепарації. Однак, така операція вимагає застосування спеціального обладнання та значно ускладнює і здорожує технологічний цикл виплавки зливків. Тому було запропоновано дегазацію спресованого з губчастого титану витратного електроду здійснювати безпосередньо в камері печі ЕШП на етапі вакуумування плавильного простору.

Запропонована наступна схема. Після монтажу електроду в печі, забезпечення його електричного контакту з піддоном, засипки флюсу і герметизації печі включають вакуумну систему. Потім на електрод і піддон подають електричну напругу, що забезпечує нагрівання електроду струмом, що проходить. За рахунок нагрівання електроду в умовах вакууму відбувається випаровування вологи, яка була фізично адсорбована поверхнею титанової губки. При цьому, електричні режими нагріву підбирають такими, щоб не призводити до розплавлення флюсу та оплавлення торця електроду.

Суттєва перевага запропонованої схеми дегазації електроду полягає в тому, що вона не вимагає використання додаткового обладнання та не призводить до збільшення тривалості технологічного циклу виплавки зливків (так як дана операція відбувається в процесі відкачування повітря з камери печі).

Для оцінки ефективності та розробки режимів дегазації титанового електроду було проведено експерименти, схема яких надана на рис. 6.12. Використовували електроди діаметром 75 мм та довжиною 600 мм, пресовані з губчастого титану ТГ-130, який тривалий час (більше 5 років) зберігався на відкритому повітрі (у відкритій ємності) (рис. 6.13).

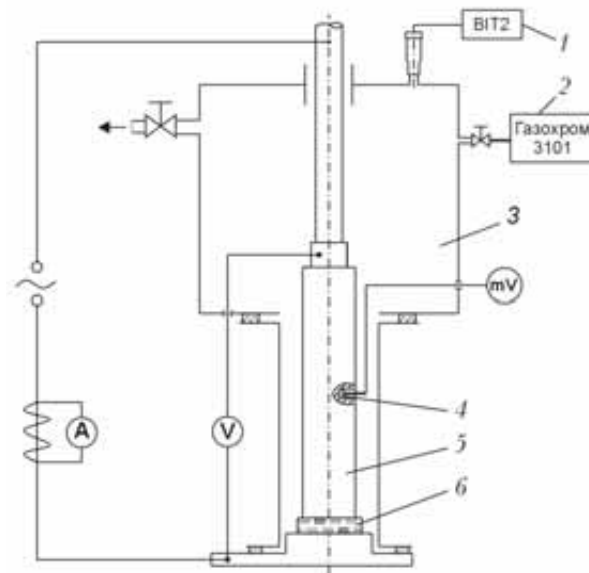


Рисунок 6.12 – Схема проведення експериментів: 1 – вакуумметр; 2 – хроматограф, 3 – камера печі; 4 – термопара; 5 – витратний електрод; 6 – струмонесуча прокладка



Рисунок 6.13 – Спресований з губчастого титану витратний електрод діаметром 75 мм

Нагрівання електроду здійснювали шляхом пропускання електричного струму від пічного трансформатора ТШП-10000-1, оснащеного блоком плавного регулювання електричної напруги. Температуру електроду контролювали за допомогою термопари ХА(К), розташованої в тілі електроду на відстані 25 мм від його поверхні. Тиск у камері печі визначали вакуумметром "ВІТ 2". Вміст водню в атмосфері печі аналізували хроматографом "Газохром 3101".

Для визначення режимів нагрівання електроду досліджували залежність його температури від сили електричного струму і тривалості нагрівання. В результаті проведених вимірювань (рис.6.14) було розроблено електричні режими нагріву електроду для його дегазації. Виходили з необхідності швидкого нагріву електроду до температури $450\text{...}500^{\circ}\text{C}$ і підтримки її на даному рівні протягом усього періоду дегазації. При цьому враховували, що температура електроду не повинна перевищувати 500°C , за якої можливі небажані процеси розчинення титаном залишкових атмосферних газів.

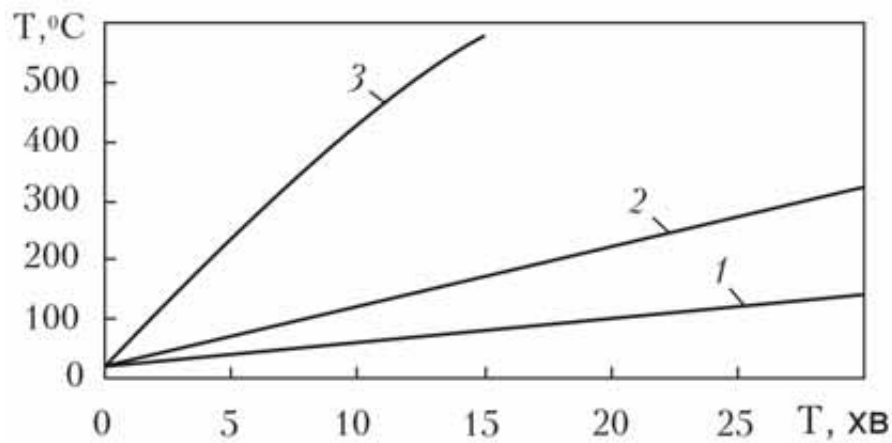


Рисунок 6.14 – Температура електроду в залежності від тривалості нагріву для різних значень сили струму в ньому: 1 – 1000 А, 2 – 1500 А; 3 – 2500 А

Схема нагріву електроду полягає у подачі на його торці напруги величиною $2,2\text{...}2,6$ В, що забезпечує струм в електроді $2250\text{...}2500$ А, і подальше зниження струму до 1000 А за заданою програмою, шляхом плавного зниження напруги джерела живлення .

В іншій серії експериментів досліджували зміну тиску в камері печі при нагріванні електроду, що опосередковано характеризує процеси дегазації титану. Експерименти проводили в такий спосіб. Після монтажу електроду та герметизації печі включали вакуумну систему. Після досягнення вакууму на

рівні 4×10^{-2} мм.рт.ст. здійснювали нагрівання електроду до $400 \dots 450^{\circ}\text{C}$, при цьому фіксували зміну тиску в плавильному просторі.

Експерименти показали, що впродовж перших 5 хвилин після включення напруги та пропускання в електроді електричного струму тиск у печі починає різко зростати, що свідчить про інтенсивну дегазацію електроду (рис.6.15). Потім, через 10 хв, за рахунок роботи вакуумного насосу тиск починає поступово знижуватись і через 20...30 хвилин стабілізується на рівні, трохи нижче вихідного.

При повторному нагріванні електроду, після незначного підвищення, тиск печі відновлювався до вихідного рівня вже через 5 хв (рис.6.15, поз.2). Це свідчить про те, що адсорбована волога з електроду вже була видалена і процес дегазації завершений.

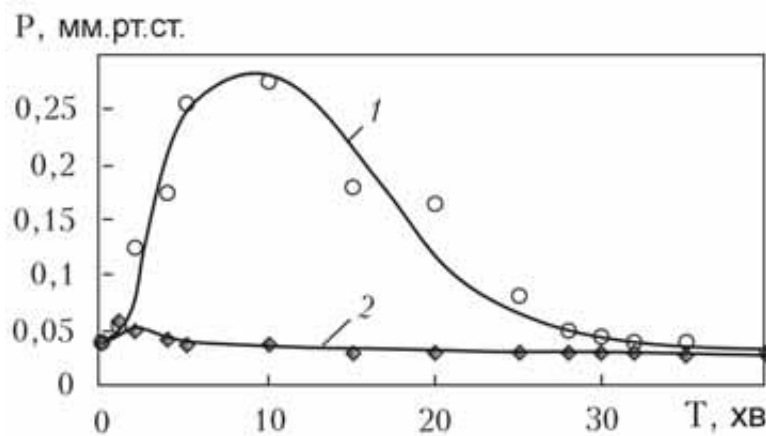


Рисунок 6.15 – Зміна тиску в камері печі при першому (1) та повторному (2) нагріві електроду

В останній серії експериментів досліджували зміну вмісту водню в атмосфері печі при нагріві електроду. Для цього, після герметизації та вакуумування печі плавильний простір заповнювали аргоном. Потім здійснювали нагрів електроду і періодично робили відбір проб для хроматографічного аналізу вмісту водню в атмосфері печі. Згодом експеримент повторювали з використанням вже "просушеного" електроду.

Результати експериментів наведено на рис. 6.16-6.17. Вони показують, що через 5 хвилин після початку експерименту, при нагріві електроду електричним струмом вище 200°C , вміст водню в атмосфері печі різко зростає до 0,7...0,9 об.% (рис.6.17). Це свідчить про випаровування адсорбованої вологи з поверхні електроду, а також його внутрішнього об'єму внаслідок наявності в ньому несутільності. Надалі, вміст водню в атмосфері печі трохи знижувався, що ймовірно пов'язане зі зворотними процесами взаємодії титану з воднем. В реальних умовах волога, що випарувалася, видаляється з плавильного простору вакуумною системою.

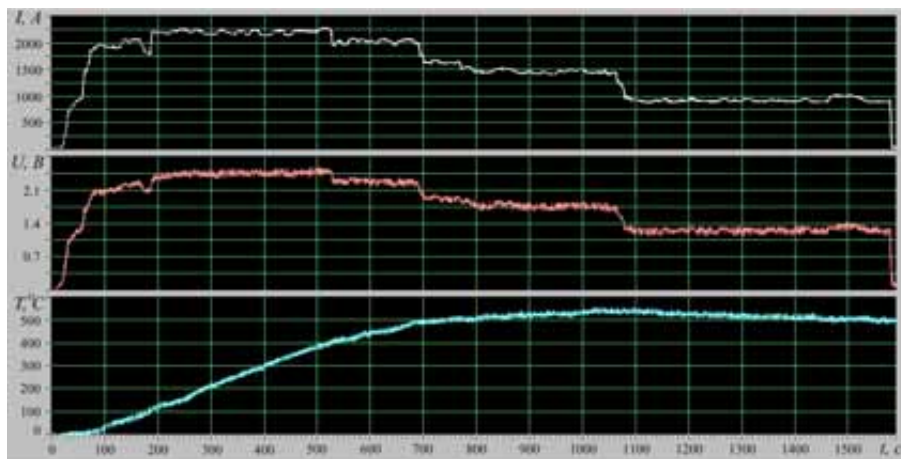


Рисунок 6.16 – Режим нагрівання електроду електричним струмом

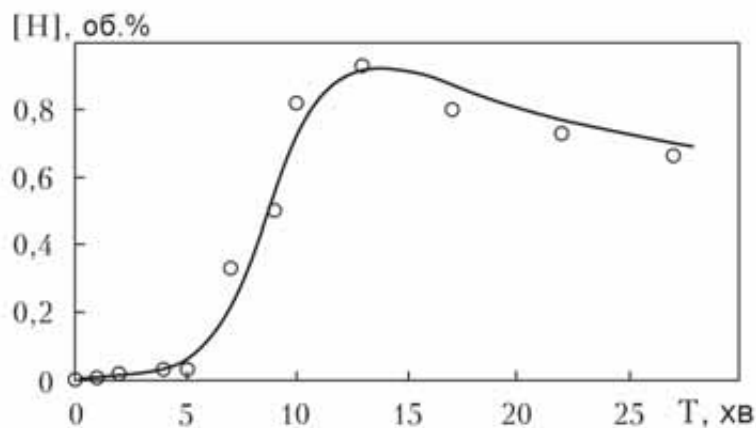


Рисунок 6.17 – Динаміка зміни вмісту водню в атмосфері печі при нагріві електроду

При проведенні повторного експерименту водню в атмосфері печі не було виявлено, що підтверджує видалення адсорбованої вологи при першому нагріві електроду.

Після проведення зазначених вище експериментів частина електродів була переплавлена в титанові зливки діаметром 100 мм. Незважаючи на використання для виплавки зливок низькосортної титанової губки ТГ-130 і тривалі (більше 5 років) її зберігання на відкритому повітрі, вміст атмосферних газів у металі становив [O] – 0,08...0,17%; [N] - 0,016...0,025%; [H] – 0,006...0,008 %, що відповідає вимогам стандарту на технічний титан ВТ1-0.

Таким чином, проведені експерименти показали ефективність видалення з спресованого з губчастого титану електроду адсорбованої вологи шляхом його нагрівання електричним струмом, при вакуумуванні печі ЕШП. Запропонована схема дегазації електроду не вимагає використання додаткового обладнання та не збільшує тривалість технологічного циклу виплавки титанових зливок. Таку операцію доцільно проводити для електродів, виготовлених з неякісної губки або електродів, які тривалий час зберігалися на відкритому повітрі.

Висновки до розділу 6

1. Показано можливість проведення процесу ЕШП в умовах вакууму, з використанням фторидно-оксидних та сольових флюсів. При цьому, основною проблемою реалізації процесу ЕШП у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів, яке призводить до порушення стабільності електрошлакового процесу. Через це, для кожного складу флюсу є мінімальний тиск, нижче за який ведення процесу ЕШП унеможливується.

2. Встановлено, що зниження тиску в камері печі нижче атмосферного до 40 кПа спричиняє зниження струму плавки на 5...25 %. Подальше

зниження тиску призводить до збільшення гідродинамічної активності шлакової ванни і дестабілізації струму плавки. При досягненні критичного мінімального тиску рівень шлаку підвищується, починаються викиди шлаку і стабільність електрошлакового процесу порушується.

3. Встановлено, що рівень критичного тиску, при якому відбувається закипання шлакової ванни, для сольових флюсів типу АН-Т2 та АН-Т4 становить 12...22 та 15...26 кПа, відповідно, а для фторидно-оксидних флюсів АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 він нижчий і становить біля 3...15 кПа.

4. Встановлено, що тиск закипання флюсу при ЕШП залежить як від складу флюсу, так і від електричних режимів, які визначають теплову потужність процесу. Чим вище потужність, тим при більш високому тиску відбувається закипання флюсу.

5. Досліджено вплив тиску в плавильному просторі в діапазоні 20...300 кПа, на газовий склад металу зливків. Встановлена можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа). При цьому, у досліджуваному діапазоні не виявлено закономірного впливу тиску в плавильному просторі на вміст [O] і [N] в титанових зливках.

6. Встановлено факт збільшення середнього розміру зерен зливку титану ВТ1-0, виплавленого в умовах пониженого тиску – 25 кПа, у порівнянні зі зливком, отриманим при тиску 160 кПа, який становив $3,1 \times 1,7$ мм і $2,3 \times 1,2$ мм, відповідно. Збільшення розміру зерен може бути пояснене через вплив вакууму на електричні режими ЕШП, який полягає в зменшенні струму плавки і теплової потужності процесу, що, в свою чергу, призводить до зменшення локальної швидкості твердіння.

7. Експериментально підтверджено ефективність застосування вакуумного ЕШП для дегазації металу при переробці відходів у вигляді титанової стружки в процесі виплавки високовідсоткового феротитану $FeT70$.

8. Розроблена схема дегазації витратного електроду спресованого з губчастого титану в процесі вакуумування камерної печі ЕШП. Показана

ефективність видалення з електроду адсорбованої вологи шляхом його нагрівання електричним струмом, при вакуумуванні печі. Запропонована схема дегазації електроду не вимагає використання додаткового обладнання та не збільшує тривалість технологічного циклу виплавки титанових зливків.

РОЗДІЛ 7

ЗАСТОСУВАННЯ КАМЕРНОГО ЕШП В ПРОЦЕСАХ ВИПЛАВКИ ВИСОКОРЕАКЦІЙНИХ І ПРЕЦИЗІЙНИХ СПЛАВІВ

7.1 ЕШП титанових сплавів

Однією з ефективних сфер застосування технології ЕШП в контрольованій атмосфері є виплавка зливків титанових сплавів. Цьому сприяє той факт, що в даному випадку ЕШП застосовується не як додатковий рафінуючий переплав, а як процес виплавки зливків з первинної некомпактної сировини, якою є титан губчастий і легуючі компоненти.

Серед переваг ЕШП, які зумовлюють ефективність його використання для отримання титанових сплавів, також можна виділити гнучкість технологічних параметрів плавки, високу якість поверхні зливків, можливість отримання зливків складної форми, відсутність неконтрольованого випаровування компонентів сплаву. Також, необхідно підкреслити ефективність використання при ЕШП електромагнітних методів впливу на кристалізацію металу, які сприяють підвищенню хімічної та структурної однорідності сплавів (як це було показано в попередніх розділах).

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було розроблено технологію і обладнання для ЕШП титанових сплавів в камерній печі з електромагнітним впливом на металургійну ванну. Схема відповідної установки наведена на рис. 7.1, її технічні характеристики в табл. 7.1, а зовнішній вигляд на рис. 7.2. Установка оснащена вакуумною камерою, вакуумним насосом, системою подачі в плавильний простір інертного газу, електромагнітною системою з джерелом живлення, відповідною апаратурою керування і контрольно-вимірювальною апаратурою. Кріплення змінних кристалізаторів і піддонів, переміщення штоку механізму подавання витратного електроду здійснюються через вакуумно-щільні з'єднання, що дає можливість вести процес ЕШП як в контрольованій інертній атмосфері при надлишковому

тиску, так і в умовах вакууму. Електромагнітна система дозволяє створювати в робочій зоні постійне або імпульсне магнітне поле індукцією до 0,5 Тл. Також є можливість здійснювати електричні розряди безпосередньо на металургійну ванну. Реконструйоване джерело живлення дозволяє вести процес ЕШП на змінному або постійному струмі, а також з нестационарними режимами електричного живлення. Апаратура керування, разом з джерелом живлення і механізмом подавання витратного електроду, дозволяють реалізувати процес ЕШП з пошаровим формуванням зливка.

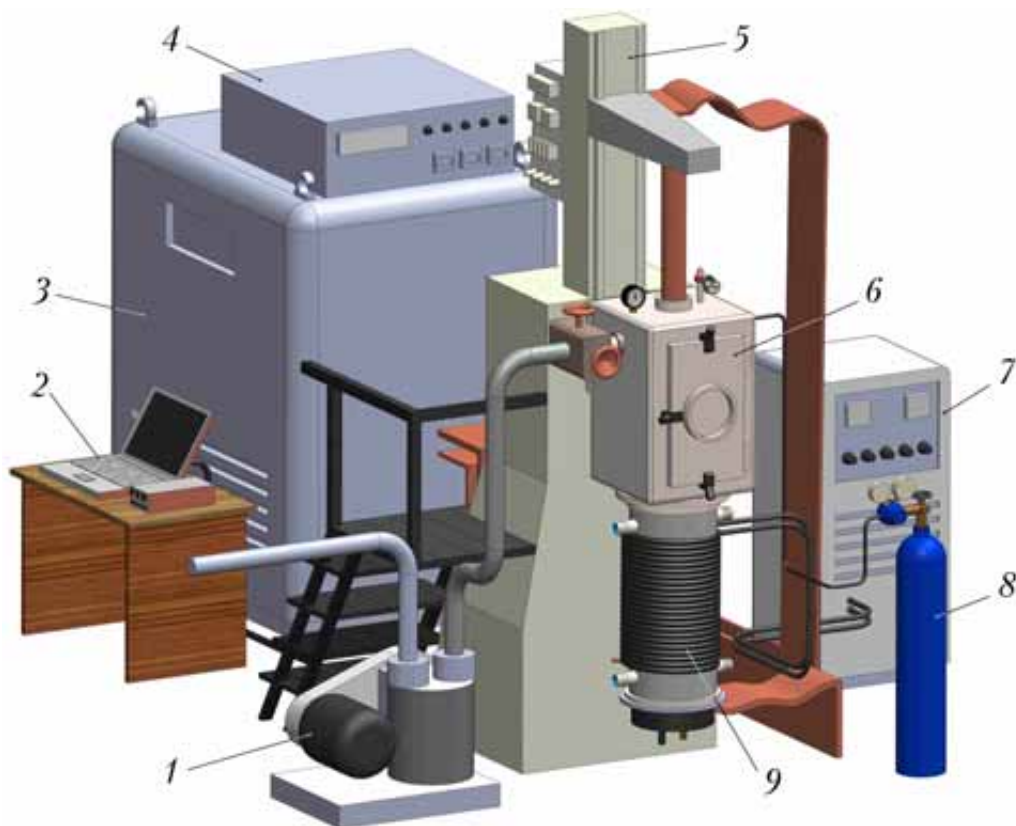


Рисунок 7.1 – Установа для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів: 1 – вакуумний насос; 2 – контрольно-вимірювальна апаратура; 3 – джерело живлення установки; 4 – шафа керування; 5 – колона; 6 – вакуумна камера; 7 – джерело живлення електромагнітної системи; 8 – балон з інертним газом; 9 – кристалізатор з соленоїдом

Таблиця 7.1 – Технічні характеристики установки для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів

Параметр	Величина
Потужність, кВт	724
Максимальна сила струму переплаву, А	
- змінного	10 000
- постійного	8 000
Робоча напруга, В	0...72
Регулювання напруги	плавне, під навантаженням
Мінімальний залишковий тиск в камері, Па	1,06
Робочий тиск в камері при плавці, кПа	20...300
Індукція зовнішнього поля в зоні плавки, Тл	до 0,5
Максимальний піковий струм в розрядному контурі системи електромагнітного впливу, кА	до 28
Продуктивність установки, кг/годину	до 150
Діаметр зливка, мм	50...260
Максимальна довжина зливку, мм	900
Маса зливку, кг	до 200
Діаметр витратного електроду, мм	20...200
Довжина витратного електроду, мм	до 1500
Габаритні розміри установки, мм довжина × ширина × висота	4300 × 2800 × 3800

ЕШП можна використовувати як рафінуючий переплав титанових зливків, отриманих іншими металургійними методами, наприклад, індукційною або гарнісажною плавками. Однак практичний інтерес представляє отримання зливків титанових сплавів з вихідної шихти – титану губчастого і легуючих компонентів. У цьому випадку шихту необхідно компактувати для отримання витратних електродів. Задля цього була розроблена схема, режими і оснастка для пресування витратних електродів для ЕШП титанових сплавів. Цей метод полягає в напівбезперервному, порційному пресуванні шихти на гідравлічному пресі крізь конусну прохідну прес-форму (рис. 7.3). Даний метод забезпечує високу продуктивність пресування, можливість отримання електродів необхідної довжини, не

забруднює метал атмосферними газами і, що дуже важливо, забезпечує рівномірне розподілення легуючих компонентів по висоті електрода, що, у свою чергу, є запорукою отримання однорідних за хімічним складом зливків.

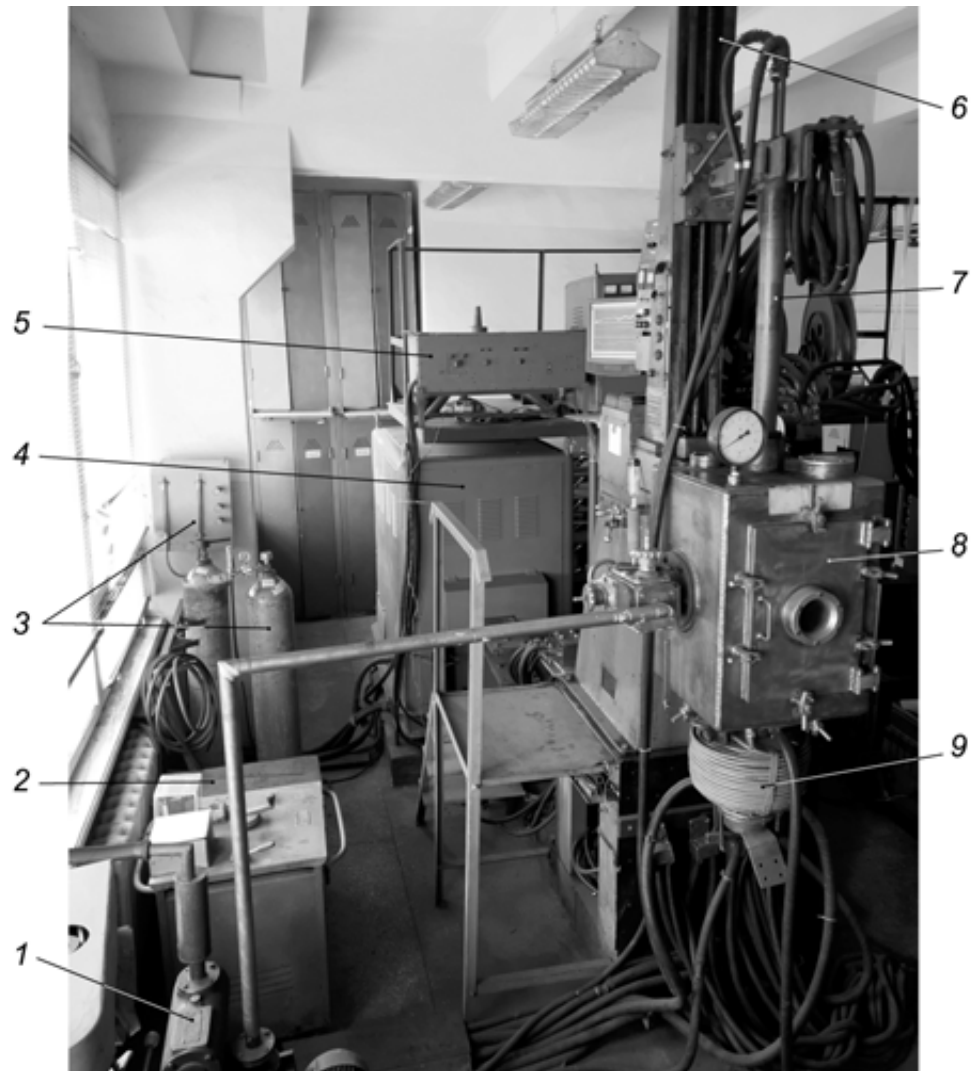


Рисунок 7.2 – Зовнішній вигляд установки для камерного ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів: 1 – вакуумна система; 2 – джерело живлення електромагнітної системи; 3 – система подачі аргону; 4 – джерело живлення установки; 5 – шафа керування; 6 – колона; 7 – водоохолоджуваний шток; 8 – камера печі; 9 – соленоїд кристалізатора

Монтаж електрода в установці ЕШП здійснюється за допомогою інвентарної головки, яка приварюється до торця електрода. Задля цього було розроблено метод контактного приварювання інвентарної головки, з використанням стандартного електрошлакового обладнання безпосередньо в

камері електрошлакової печі [267] (рис. 7.4 *a*). Сутність методу полягає в попередньому контактному нагріві зварюваних поверхонь електричним струмом, оплавленні поверхонь електричною дугою і подальшій осадці. Зазначені процеси здійснюються у вакуумі, що виключає насичення металу зварного з'єднання та нагрітих ділянок електроду атмосферними газами.

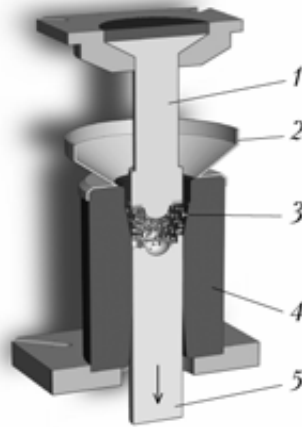
*a)**б)*

Рисунок 7.3 – Схема пресування (*a*) і зовнішній вигляд витратних електродів діаметром 35...100 мм (*б*) для ЕШП титанових сплавів: 1 – пуансон; 2 – приймальна воронка; 3 – шихта; 4 – прес форма; 5 – електрод

Розроблений метод забезпечує співвісність кріплення електроду в кристалізаторі та дозволяє отримувати зварне з'єднання, що витримує механічні та електричні навантаження в процесі ЕШП (рис. 7.4 *б*). Важлива перевага запропонованого методу полягає у відсутності необхідності використання додаткового обладнання та оснащення, внаслідок чого знижується трудомісткість і витрати на виготовлення витратних електродів і техніко-економічні показники отримання зливків в цілому.

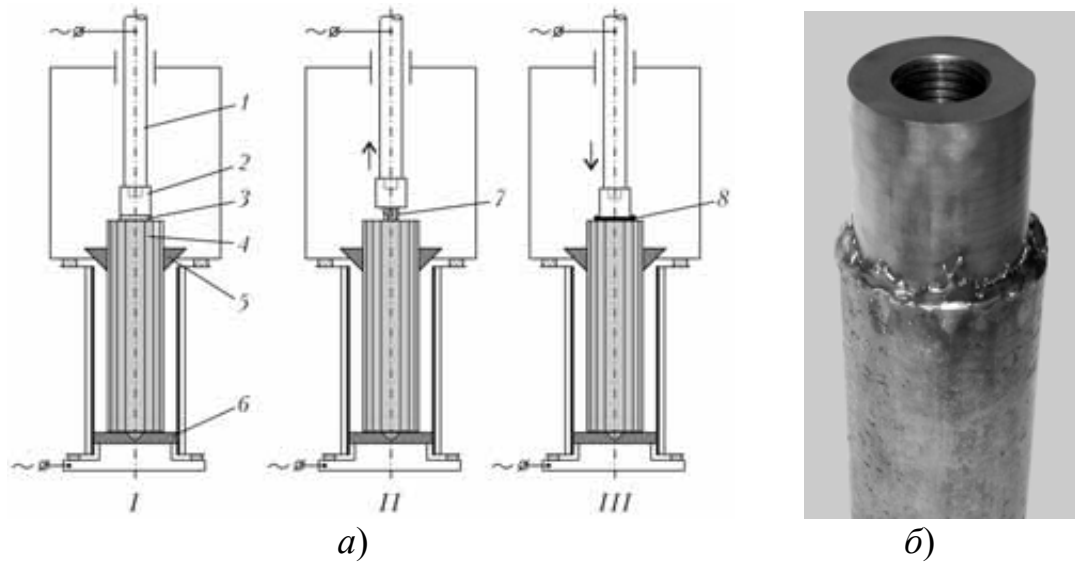


Рисунок 7.4 – Схема приварювання інвентарної головки до витратного електроду (а) і вигляд зварного з'єднання (б) (I – нагрівання електричним струмом поверхонь, що з'єднуються; II – оплавлення поверхонь електричною дугою; III – осадка): 1 – шток вертикального переміщення електроду; 2 – інвентарна головка; 3 - струмопровідний прошарок; 4 - витратний електрод; 5, 6 – центруючі втулки; 7 – електрична дуга; 8 – зварне з'єднання

В якості флюсів при ЕШП титанових сплавів використовують сольові флюси на основі CaF_2 [43, 233, 268-270]. Рекомендовано використання флюсів АНТ-2, АНТ-4, АНТ-6, АНТ-12. Для зниження електропровідності флюсу та підвищення техніко-економічних показників процесу (зменшення витрат електроенергії), розроблено низку флюсів для ЕШП титану систем $\text{CaF}_2\text{-}8\text{...}30 \text{ SrCl}_2\text{-}2\text{...}5 \text{ Na}_3\text{AlF}_6$; $\text{CaF}_2\text{-}3\text{...}44 \text{ MeCl}_2\text{-}0,5\text{...}3 \text{ MgTiF}_6$, де MeCl_2 – хлорид лужноземельного металу [237, 271-272]. Використання цих флюсів при виплавці титанових сплавів забезпечує стабільний електрошлаковий процес, хороше формування поверхні зливка, при зниженні на 15...20% питомої витрати електроенергії (порівняно з ЕШП під флюсом на основі 100% CaF_2) [237].

В залежності від складу і призначення сплаву переплавл витратних титанових електродів здійснюють в атмосфері інертного газу або в умовах

вакууму. В обох випадках плавильний простір попередньо вакуумують до тиску не вище $1...5 \times 10^{-2}$, потім заповнюють інертним газом. В разі необхідності, у процесі вакуумування печі ЕШП здійснюють дегазацію губчастого електроду шляхом його нагріву електричним струмом, як це було показано в розділі 6.

Наведення шлакової ванни здійснюється шляхом "твердого" старту. Для цього розроблена відповідна техніка і режими старту електрошлакового процесу з використанням конусних наконечників і "затравок" з пресованого губчастого титану.

В процесі переплаву електродів, для підвищення однорідності титанових сплавів, використовують електромагнітний вплив на процес кристалізації металу. Для цього використовують соленоїд, розміщений на зовнішній поверхні кристалізатора, живлення якого здійснюється в імпульсному режимі, у тому числі і за рахунок розрядів конденсаторів. Задля цього розроблено відповідне джерело живлення і апаратура керування. Крім того, розроблена установка для ЕШП дозволяє здійснювати живлення електрошлакового процесу в імпульсному режимі, з пошаровим формуванням зливка.

Вказані засоби впливу на процеси структуроутворення металу ЕШП дозволяють отримувати зливки титанових сплавів з високою хімічною і структурною однорідністю. При цьому, при виплавці технічного титану та низьколегованих сплавів придатний метал отримують вже після першого переплаву. При виплавці складнолегованих сплавів рекомендовано застосовувати подвійний переплав.

На рис 7.5 наведена типова макроструктура зливка діаметром 220 мм, отриманого ЕШП з електромагнітним впливом (на прикладі титанового сплаву Ti-10-2-3). Структура металу щільна і однорідна, спостерігаються лише незначні відмінності у формуванні структури окремих частин зливка. У донній частині та біля бічної поверхні зливка зерна витягнуті у напрямку тепловідведення, у центральній частині – однорідні за розміром. Розмір зерен

литого металу становить від 1 до 6 мм, що для зливків даного розміру є високим показником дисперсності. Слід підкреслити, що при виплавці зливків меншого розміру ($\varnothing 80 \dots 140$ мм) структура зливків ще більш дрібнозерниста і наближається до структури деформованого металу.

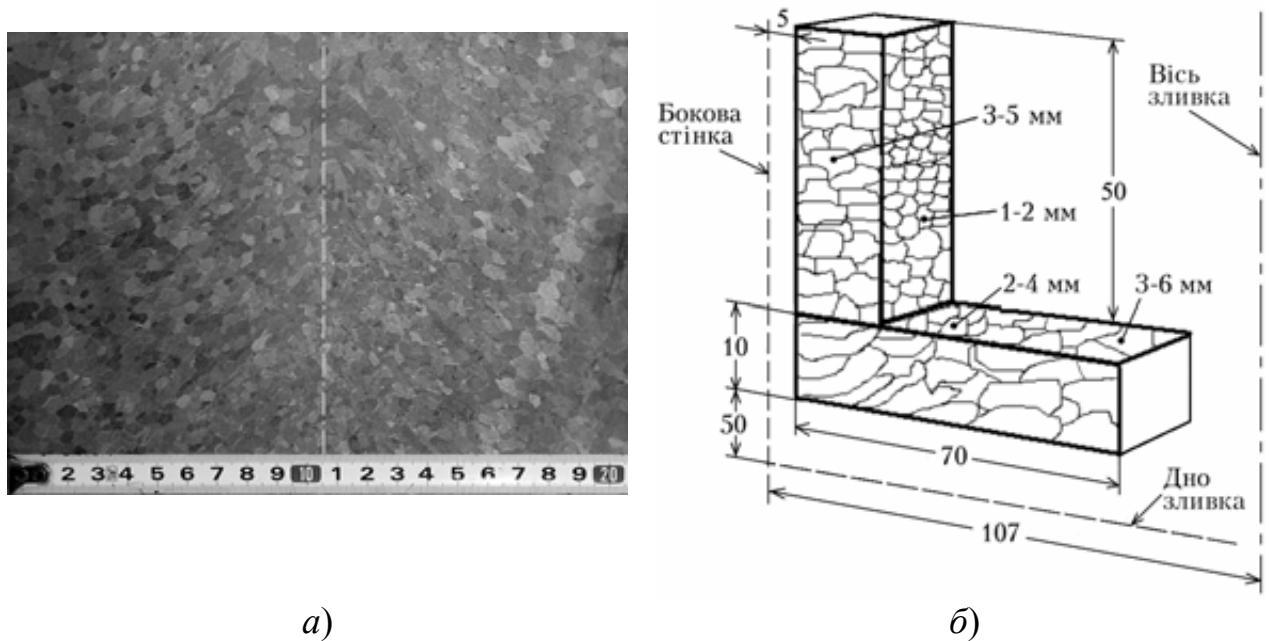


Рисунок 7.5 – Макроструктура поздовжнього перерізу зливка сплаву Ti-10-2-3 діаметром 220 мм (а) і схема литої структури зливка (б)

Важливою перевагою ЕШП титану є можливість отримання зливків різного поперечного перерізу – циліндричних, прямокутних, порожнистих. Останні використовуються як заготовки для виробництва безшовних холодно- і гарячекатаних труб, і структурний фактор для них є дуже важливим. В разі крупнозернистої структури порожнистого зливка значно ускладнюється, або взагалі унеможливується, його деформація.

Технологія камерного ЕШП з електромагнітним впливом дозволяє отримувати порожнисті титанові зливки з якісно сформованою поверхнею і щільною, однорідною структурою, без великих стовбчастих кристалів (рис. 7.6). Схема електромагнітного впливу в цьому випадку аналогічна тій, що застосовується при виплавці циліндричних зливків, а саме – імпульсний вплив поздовжнім магнітним полем [273].



Рисунок 7.6 – Зовнішній вигляд (а) і макроструктура (б) порожнистого титанового зливка ЕШП

Розроблена технологія камерного ЕШП з електромагнітним впливом була випробувана при виплавці широкої номенклатури титанових сплавів, від технічного титану VT1-0 до високоміцних $\alpha+\beta$ -титанових сплавів, псевдо β -сплавів, інтерметалідних сплавів системи γ -TiAl, Ti_2AlNb та ін. [10, 61-63, 150, 274-276]. Дослідження показали відсутність в металі ЕШП дефектів металургійного походження, високий рівень хімічної і структурної однорідності зливків, відповідність газового складу сплавів вимогам нормативних документів. Типові механічні характеристики отриманих титанових сплавів наведені в табл. 7.2. Порівняно з металом, отриманим традиційним способом, при порівняної міцності вони відрізняються більш високими показниками пластичності і ударної в'язкості.

Таблиця 7.2 – Типові механічні характеристики титанових сплавів технології ЕШП

Сплав	Стан	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
BT1-0	литий	440	360	28,0	57,0	185,0
OT4	пруток катаний і термооброблений	730	610	14,5	33,0	50,0
BT6	литий	940	890	9,3	24,0	48,0
	пруток катаний і термооброблений	1020	920	11,0	38,0	43,0
BT22	литий	970	940	8,5	21,7	33,0
	пруток катаний і термооброблений	1300	1210	12,0	31,0	34,0
Ti-10-2-3	литий	980	920	6,7	12,4	30,0
	деформований і термооброблений	1210	1120	13,0	36,5	45,0
TC6	пруток катаний і термооброблений	1350	1180	12,0	25,0	28,2
Ti-48Al-2Cr-2Nb (ат. %), T _{исп} =700 ⁰ C	литий	470	520	3,7	8,3	-

Результатами проведених досліджень і розробок стали практичні роботи по виплавці (а також електрошлаковому зварюванню [269]), з використанням створених технологій і обладнання, зливок титанових сплавів різної номенклатури і розмірів (рис.7.7). Зливки були поставлені замовникам для подальшої обробки і виготовлення з них деталей. Згідно їх даних, отриманий метал не має дефектів металургійного походження і повністю відповідає Технічному завданню на його виготовлення (додаток А).



Рисунок 7.7 – Зливки титанових сплавів технології ЕШП (сплави Ti-Fe-Si, Ti-6-4, BT22, Ti-Fe-Si-W, Ti-10-2-3)

7.2 ЕШП нікеліду титану

Характеристики, вимоги до виробництва і особливості застосування нікеліду титану (нітінолу) були надані в розділі 1. Було показано, що це сплав еквіатомного складу 50Ti-50Ni ат.% (45Ti-55Ni мас.%), який має ефект пам'яті форми і до якого пред'являються високі вимоги щодо точності хімічної складу і однорідності.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблена технологія ЕШП нікеліду титану в камерній печі з електромагнітним впливом.

Вихідними матеріалами для виплавки злиwkів TiNi є титан губчастий і нікель (рис. 7.8 а). Рекомендовано використовувати титан губчастий марок ТГ90...110 і нікель первинний Н-0. Останній виробляється (у тому числі) у

вигляді гранул діаметром 8...15 мм, використання яких є доцільним з точки зору забезпечення рівномірного шихтування витратного електроду для переплаву. Дозволяється також використовувати нікель марок Н-1, НПО, НП1.

З зазначених вище шихтових матеріалів виготовляють витратні електроди (рис. 7.8 б). Для цього розроблено схему і відповідну оснастку для пресування електродів крізь конусну прохідну прес-форму (рис. 7.3).

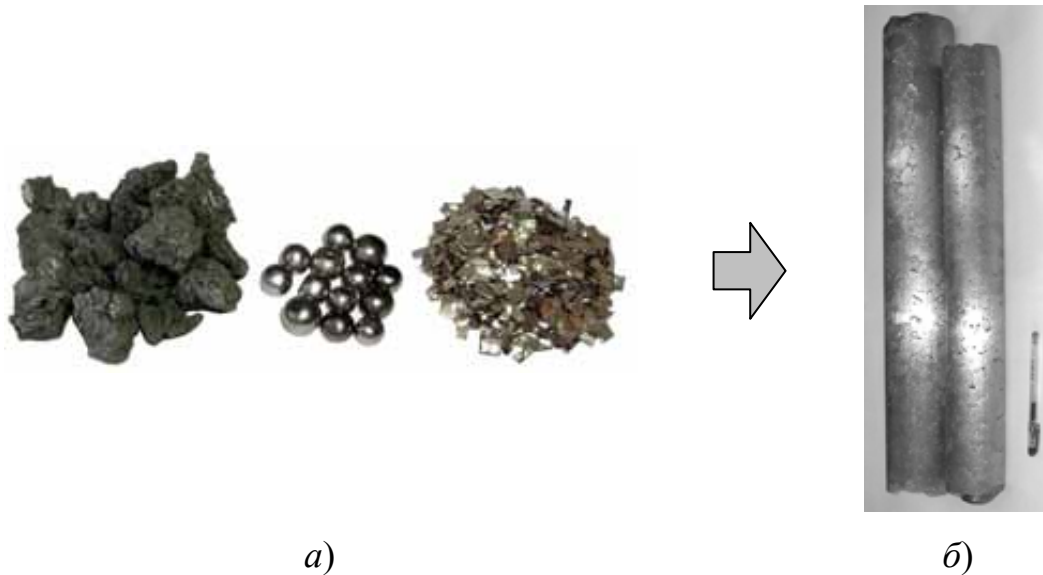


Рисунок 7.8 – Шихтові матеріали (а) і витратні електроди (б) для ЕШП нікеліду титану

Також, в якості альтернативного варіанту розроблена схема пресування електродів у трубну обичайку (рис. 7.9). В якості обичайки використовують трубу з технічного титану ВТ1-0. В цьому випадку трубна обичайка дозволяє суттєво зменшити питомі зусилля пресування при забезпеченні необхідної міцності і електропровідності витратних електродів, що забезпечує їх надійне використання в процесі ЕШП.

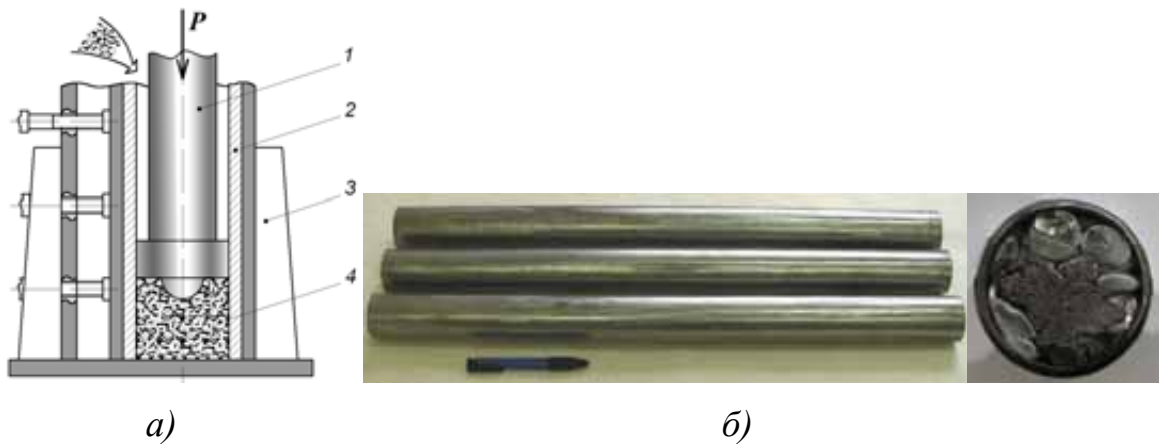


Рисунок 7.9 – Схема пресування витратних електродів в трубну обичайку (а) і вигляд витратних електродів (б): 1 – пуансон; 2 – титанова труба; 3 – монтажний стіл; 4 – спресована шихта

Переплав витратних електродів здійснюють в печі ЕШП камерного типу в контрольованій атмосфері інертного газу, із застосуванням мідних водоохолоджуваних кристалізаторів. Це зводить до мінімуму взаємодію металу з атмосферними газами і матеріалом формуючого устрою.

В якості флюсів для ЕШП нікеліду титану рекомендовано флюси типу АНТ-2 і АНТ-4 фракції 3...5 мм. Флюс має бути виготовлений з компонентів кваліфікації не нижче "Ч". Безпосередньо перед плавкою флюс необхідно прожарювати при $T=450^{\circ}\text{C}$, протягом не менш ніж 1,5 год.

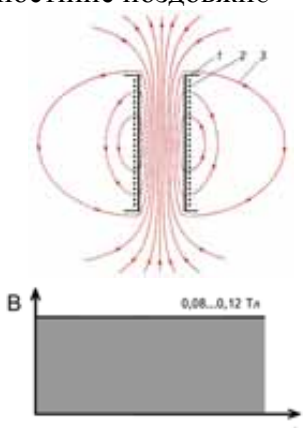
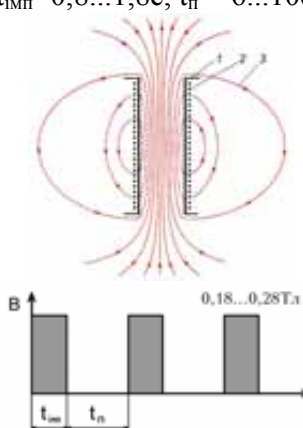
Поверхня плавильного простору (вакуумної камери, кристалізатора, піддона) перед плавкою має бути очищена від флюсу, конденсату, пилу та ін. забруднень. Рівень вакууму в камері печі перед подаванням аргону рекомендується не нижче 5×10^{-2} мм.рт.ст. Тиск Ar в процесі плавки підтримують на рівні 120...150 кПа. Також дозволяється ведення процесу при розрядженому тиску Ar на рівні 30...50 кПа. Бажано використовувати аргон високої чистоти (ВЧ). Використання аргону I-го сорту теж допустимо, проте він повинен відповідати стандарту.

Для виплавки зливків з вихідної некомпактної шихти застосовується двократний переплав. На першому етапі переплаву використовують пресовані електроди, на другому – зливки першого переплаву. При другому

переплаві зливок першого переплаву перевертають таким чином, щоб спочатку плавилась його головна частина, а наприкінці – коренева.

Процес переплаву проводять у відповідності з розробленими режимами для даного розміру зливка. Рекомендовані режими ЕШП зливок діаметром 65...140 мм наведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Рекомендовані режими ЕШП зливок TiNi діаметром 65...140 мм

Пере- плав	Тип ел-да	Діаметр, мм		H _{шл. в.} , мм	U _{пл.} , В	I _{пл.} , А	Параметри електромагнітного впливу	
		ел-да	зливка				вид магнітного поля	B, Тл
І-й	пресо- ваний	38	65	30...35	30...34	1400	постійне поздовжнє 	0,08...0,12
		50	85	35...40	30...34	2200		
		75	105	35...40	30...34	4500		
ІІ-й	литий	65	85	35...40	35...40	4000	імпульсне поздовжнє, t _{імп} =0,8...1,8с, t _п = 6...10с 	0,18...0,28
		85	120	40...45	38...42	5300		
		105	140	40...45	38...42	7400		

При першому переплаві основне завдання електромагнітного впливу полягає в інтенсифікації перемішування металевої ванни задля досягнення хімічної однорідності зливка. Для цього застосовують поздовжнє поле, яке зумовлює об'ємне перемішування розплаву. При виплавці зливка другого

переплаву важливим завданням електромагнітного впливу, окрім гомогенізації хімічного складу, є подрібнення литої структури металу. Це досягається за рахунок застосування імпульсного магнітного поля, створеного періодичним пропусканням електричного струму в соленоїді, що охоплює кристалізатор (розрядами конденсаторів). Це дозволяє отримувати зливки TiNi з високою хімічною однорідністю і щільною, дрібнозернистою структурою.

Характерний зовнішній вигляд злиwkів сплаву Ti-55Ni (мас.%) електрошлакової виплавки наведений на рис. 7.10. Зливки як першого, так і другого переplавів мають гладку, сріблясту поверхню, без дефектів і окислених ділянок.



Рисунок 7.10 – Зливки TiNi технології ЕШП: зліва направо – $\varnothing 64$, $\varnothing 84$ мм (I-й переplав), $\varnothing 105$, $\varnothing 120$, $\square 80 \times 80$ мм (II-й переplав)

Типова макроструктура зливка Ti-55Ni (мас.%) другого переplаву наведена на рис. 7.11. Структура металу щільна, без пор, тріщин, шлакових включень та інших металургійних дефектів. Усадкова раковина в головній частині зливка відсутня. Макроструктура гомогенна і дрібнозерниста, без наявності характерної стовбчастої "ялинкової" структури. За виключенням придонної частини зливка і ділянок біля бічної поверхні структура складається з рівноосних (глобулярних) зерен середнім розміром $2,5 \times 2,5$ мм. По всій висоті зливка відсутня класична "зона слабини".



Рисунок 7.11 – Типова макроструктура зливка Ti-55Ni (мас.%) діаметром 105 мм другого переплаву

Результати хімічного аналізу металу зливка TiNi другого переплаву наведені в табл. 7.4. Як видно з отриманих даних, вміст компонентів сплаву, а також газовий склад металу цілком задовольняють вимогам відповідного ТУ на сплав ТН1. При цьому, максимальне відхилення вмісту Ti і Ni в об'ємі зливка складає 0,18 і 0,24 %, відповідно (що порівняно з точністю вимірів). Якихось ознак зональної ліквіації не виявлено. Все це свідчить про високий рівень хімічної однорідності металу. Наявність в сплаві алюмінію, вочевидь, пов'язана з його наявністю в титанових трубах, які використовували при пресуванні витратних електродів.

Слід підкреслити, що вміст домішок в металі злиwkів, в тому числі газів, безпосередньо пов'язаний з якістю вихідних шихтових компонентів. При виплавці злиwkів ЕШП використовували нікель НП1, губку ТГ110 та титанову трубу ВТ1 (в разі пресування електродів в трубку обичайку). Вочевидь, що при використанні більш якісних шихтових матеріалів, наприклад нікелю Н-0 і губки ТГ90 (або йодидного титану), склад

виплавлених зливків TiNi буде характеризуватися ще меншим вмістом домішок і атмосферних газів.

Таблиця 7.4 – Хімічний склад зливка Ti-55Ni (мас.%) технології ЕШП з електромагнітним впливом (II-й перепплав)

Місце аналізу		Вміст, мас. %								
		Ti	Ni	Al	Fe	Si	Cu	O	N	H
зливок верх	Центр	44,68	54,72	0,12	0,035	0,020	0,032	не визначали		
	1/2R	44,75	54,67	0,14	0,024	0,015	0,030			
	Край	44,78	54,54	0,14	0,042	0,028	0,030			
зливок середина	Центр	44,80	54,64	0,14	0,032	0,032	0,056	0,09	0,016	0,002
	1/2R	44,80	54,53	0,12	0,030	0,050	0,028			
	Край	44,62	54,78	0,12	0,030	0,032	0,040			
зливок низ	Центр	44,63	54,78	0,12	0,067	0,026	0,046	не визначали		
	1/2R	44,70	54,72	0,12	0,100	0,040	0,052			
	Край	44,65	54,78	0,12	0,095	0,035	0,030			
ТН1 (ТУ 1-809-394-84)		осно- ва	53,5- 56,5	не регл.	≤0,3	≤0,15	не регл.	≤0,2	≤0,05	≤0,013

Нікелід титану у литому стані практично не використовується. Для виготовлення переважної більшості виробів з нікеліду титану використовують напівфабрикати у вигляді пластин, фольги або дроту. Тому важливим завданням була оцінка здатності литих зливків нікеліду титану технології ЕШП до пластичної деформації і розробка відповідних режимів для отримання напівфабрикатів, у вигляді пластин товщиною 0,5...4 мм і дроту діаметром 0,4...1,2 мм. Саме з таких напівфабрикатів виготовляється переважна більшість виробів для медицини і приладобудування.

Литий стан сплавів на основі нікеліду титану характеризується дендритною структурою В2-фази (фаза з ОЦК структурою) і частинками типу Ti₂Ni (фаза з ГЦК структурою), що розташовуються по границям зерен [90, 277-278]. Ці частинки мають значну твердість і обумовлюють крихкість

матеріалу при деформації і можливість його руйнування по границям зерен. Підвищення пластичності матеріалу шляхом збільшення температури деформації проблематично внаслідок небезпеки розплавлення перитектичних кристалів Ti_2Ni . В роботі [277] наголошується, що після нагрівання зливок $TiNi$ до температур $1000\div 1020^\circ C$ в структурі матеріалу з'являються пори по границях В2-зерен, як результат газовиділення внаслідок розплавлення частинок Ti_2Ni . В свою чергу, це призводить до руйнування зливка в процесі деформації при цих температурах.

Згідно рекомендацій, наведених в роботах [90, 277-278], на перших етапах деформацію нікеліду титану здійснюють при більш високих температурах ($950-1000^\circ C$), за «м'якими» схемами. На другому етапі отримують напівфабрикати необхідної геометрії. Ця деформація може здійснюватись при більш низьких температурах ($600-800^\circ C$) і більш «жорсткими» схемами.

Виходячи з цього, і на основі власних експериментальних досліджень була розроблена схема деформації зливок нікеліду титану технології ЕШП [279]. Схема включає наступні етапи:

1. Герметизація зливка в конверті з нержавіючої сталі.
2. Відпал зливка при $T=650\text{...}700^\circ C$, протягом 1 години.
3. Осадка зливка на гідравлічному пресі, при $T=890\text{...}910^\circ C$ з $\varepsilon \approx 15\text{...}20\%$.
4. Прокатування осаджених поковок при $T=850\text{...}870^\circ C$ з обтисненням $1\text{...}3$ мм ($\varepsilon \approx 5\text{...}8\%$) за один прохід, з отриманням пластин необхідної товщини ($\delta=0,5\text{...}15$ мм).

Для подальшого отримання дроту, з прокатаних пластин виготовляють циліндричні заготовки $\varnothing 10\text{...}15$ мм, які обробляють за наступною схемою.

1. Прокатка заготовок $\varnothing 10\text{...}15$ мм при кімнатній температурі, на калібрувальних вальцях двохвалкового прокатного стану, з обтисненням $\varepsilon \approx 10\text{...}15\%$ за прохід, з отриманням дроту $\varnothing 1,0\text{...}1,5$ мм. При прокатці здійснюють проміжні відпали у прохідній печі при температурі $560\text{...}580^\circ C$

без витримки, з охолодженням на повітрі. Сумарна деформація між відпалами від 40%, на перших етапах прокатки, і до 75% на останніх етапах обробки.

2. Волочіння дроту $\varnothing 1,0...1,5$ мм при кімнатній температурі до необхідних діаметрів $0,3...0,8$ мм.

Розроблені режими деформації дозволили отримати зі злиwkів сплаву Ti-55Ni (мас.%) технології ЕШП пластини товщиною $0,5...15$ мм і дріт діаметром $0,3...1,2$ мм, без поверхневих дефектів у вигляді тріщин, розшарувань та ін. (рис. 7.12). Оптична металографія також показала відсутність внутрішніх дефектів (рис. 7.13).

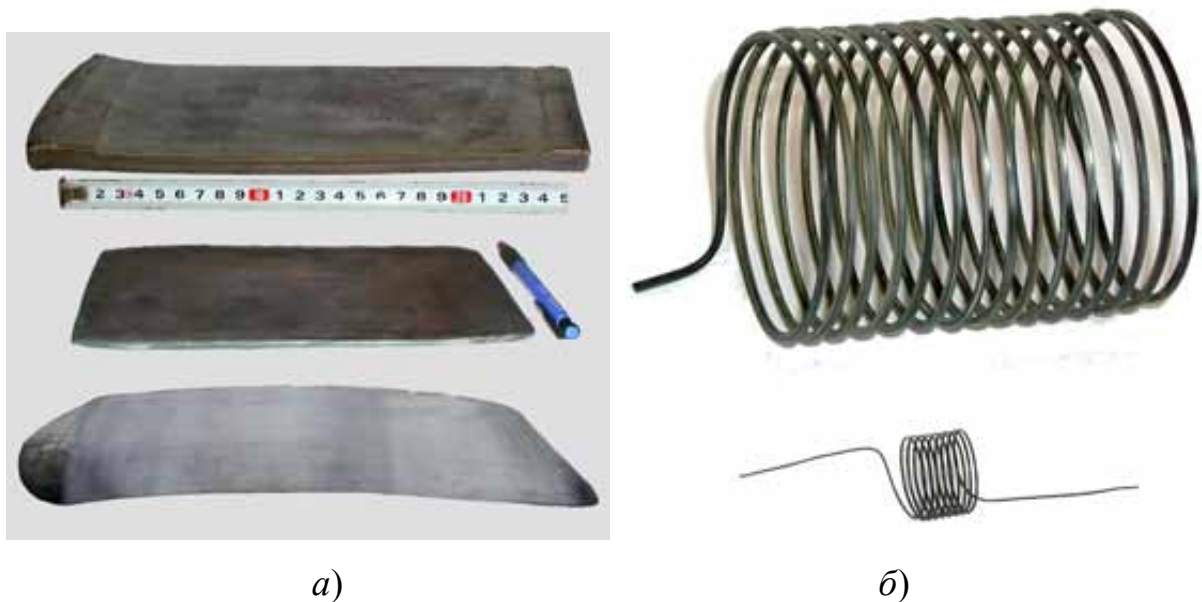
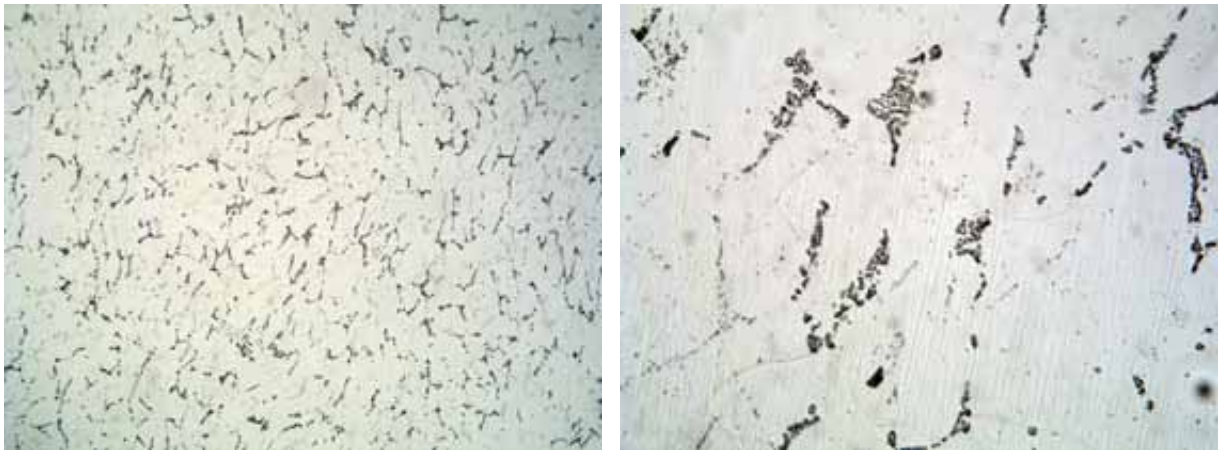


Рисунок 7.12 – Пластини товщиною 14, 5 та 0,8 мм (а) і дріт перерізом $1,2 \times 1,2$ мм і діаметром 0,4 мм (б) сплаву Ti-55Ni (мас.%), отримані з металу ЕШП

Типова мікроструктура металу в стані після термодформаційної обробки являє собою зерна В2-фази, по границям яких розташовуються частки Ti_2Ni ($Ti_2Ni_4O_x$). Об'ємна доля таких часток складає біля 5...8 %. Структура металу дрібнодисперсна, що викликано великим ступенем

деформації. Зерна мають глобулярну форму (на фото виявляються погано), їх характерний розмір в середньому складає 5...8 мкм (рис. 7.13).



a)

б)

Рисунок 7.13 –Мікроструктура сплаву Ti-55Ni (мас.%) після деформації і термообробки: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 500$

Слід наголосити, що факт отримання тонких бездефектних пластин і проволоч сплаву Ti-55Ni (мас.%) наочно демонструє високу металургійну якість і технологічну пластичність металу технології ЕШП.

Дослідження функціональних властивостей дроту TiNi, виготовленого з металу технології ЕШП, показали яскраво виражений ефект пам'яті форми. Дилатометричні дослідження дроту при нагріві і охолодженні, з використанням вакуумного кварцового дилатометра з індукційним датчиком переміщень, дозволили встановити характерні точки прямого і зворотного мартенситних перетворень, які становлять $M_n=55^{\circ}\text{C}$, $A_n=85^{\circ}\text{C}$. Ці дані добре корелюються з літературними даними для сплаву цього хімічного складу.

Таким чином, проведені дослідження показали ефективність розробленої технології камерного ЕШП з електромагнітним впливом, для отримання зливоків нікеліду титану з ефектом пам'яті форми.

7.3 ЕШП прецизійних сплавів

Як було зазначено в першому розділі процеси виплавки прецизійних сплавів повинні забезпечувати їх точний хімічний склад, однорідність, чистоту від шкідливих домішок та включень, заданий структурний стан. Традиційна схема ЕШП у відкритих печах не завжди гарантує отримання металу, який би відповідав цим вимогам. Тому, для отримання таких сплавів пропонується застосовувати переплав у камерній печі з додатковим електромагнітним впливом на металургійну ванну задля забезпечення гомогенності металу. Схема електромагнітного впливу (або іншого способу) визначається окремо, у кожному конкретному випадку, виходячи зі складу і типорозмірів зливків, які виплавляють.

Слід зазначити, що сьогодні в Україні немає власного промислового виробництва прецизійних сплавів. Тому переробка (рециклінг) таких сплавів є актуальним завданням і становить великий практичний інтерес. При отриманні прецизійних сплавів із вторинної сировини необхідність забезпечення заданих характеристик сплавів стає ще гострішою.

Сьогодні в Україні попитом користуються прецизійні сплави з заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, серед яких найбільш поширеним є сплав 29НК (ковар). Також, у промисловості широко використовуються магнітно-м'які прецизійні сплави типу пермалой (46Н, 50Н, 79НМ), пермендюр (49КФ) та ін., що мають високу магнітну проникність і високу індукцію насичення. Незважаючи на різне призначення цих сплавів особливості їх металургійного виробництва багато в чому схожі.

З огляду на зазначене вище, та через конкретні замовлення українських підприємств були розроблені схема та режими ЕШП відходів прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ (табл. 1.3).

Схема переробки відходів включає підготовку шихтових матеріалів, виготовлення з них витратних електродів і їх ЕШП в інертному середовищі, з електромагнітним впливом на металургійну ванну.

Попередній етап підготовки матеріалів до переплаву полягає у їх сортуванні, абразивній зачистці (якщо необхідно і можливо), знежиренні, промиванні і просушуванні у печі при $T=300^{\circ}\text{C}$.

У разі застосування некомпактних відходів (стружка, дріб та ін.) витратні електроди виготовляють шляхом їх пресування в обичайку зі сплаву, аналогічного тому, що переплавляють. При застосуванні компактних відходів (некондиційна стрічка, листовий обріз, обріз циліндричних поволок та ін.), витратні електроди формують за допомогою ТІГ зварювання (рис. 7.14)

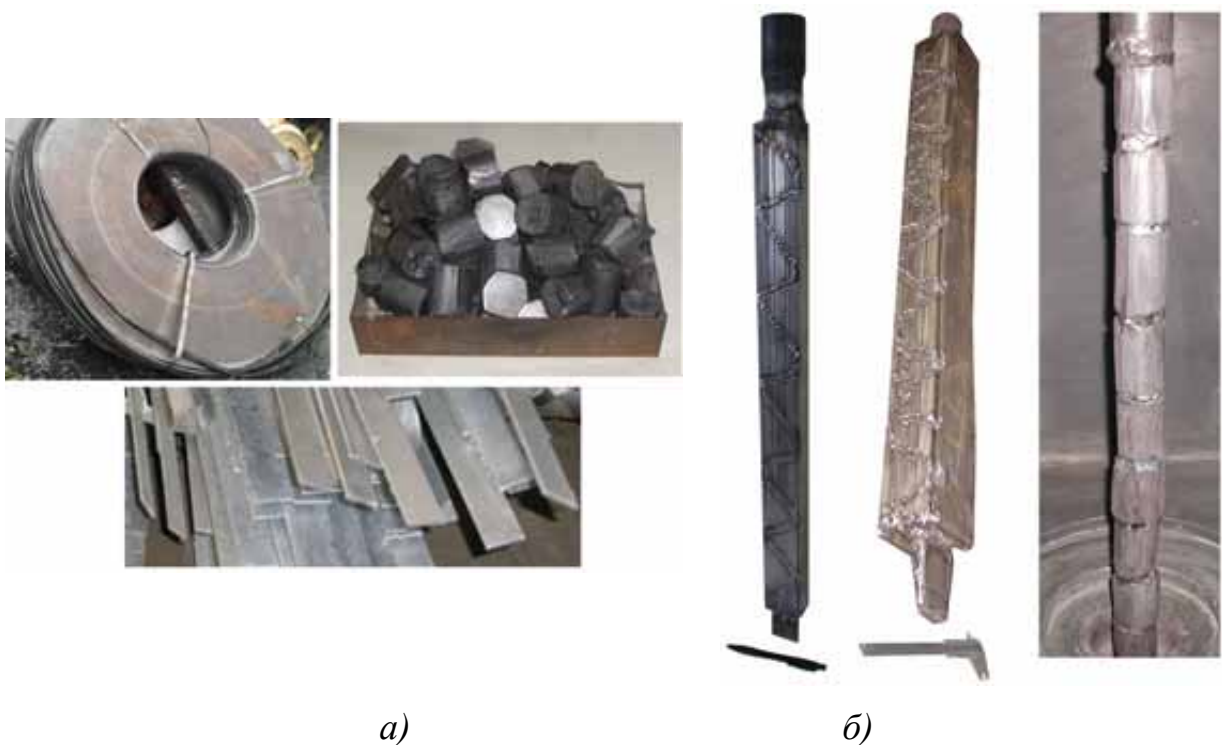


Рисунок 7.14 – Відходи прецизійних сплавів (а) і сформовані з них витратні електроди для ЕШП (б)

ЕШП електродів здійснюється в атмосфері аргону, з попереднім вакуумуванням плавильного простору до 5×10^{-2} мм.рт.ст. Рекомендовано застосовувати флюси типу ESR 2027, ESR 2060, ESR 2065, ESR 2015 ELH, 2029 ELH [232] а також сольові флюси типу АН-Т4.

Для забезпечення інтенсивного перемішування рідкої металевої ванни і гомогенізації хімічного складу сплаву, рекомендовано використовувати

вплив імпульсним поздовжнім магнітним полем. Типові режими виплавки зливків діаметром 84 і 140 мм наведені в табл. 7.5.

Таблиця 7.5 – Режими ЕШП прецизійних сплавів

Сплав	Переріз эл-да, мм	Діаметр кр-ра, мм	U, В	I, А	V _{ел-да} , м/год	B, Тл
29НК	35×40	84	35	3000...3500	5,0	0,12
29НК	Ø45	84	35	2000...4000	5,2	0,10
29НК	80×75	140	33	5800...6500	2,7	0,16
50Н	83×73	140	32	5800...6000	2,6	0,16
46Н	40×40	84	35	3800...4000	5,2	0,12
49КФ	Ø38...55	84	30	2600...3000	4,0	0,12

При використанні достатньо монолітних і однорідних витратних електродів процес їх переплаву проходить стабільно, без значних коливань струму плавки. В цьому випадку достатньо одного переплаву для отримання однорідних зливків. У разі застосування неоднорідних по висоті електродів, для забезпечення стабільних режимів ЕШП та гомогенності складу і структури зливка, рекомендовано використовувати повторний переплав.

Розроблені схема і режими ЕШП відходів дозволяють отримувати зливки сплавів 29НК, 50Н і 46Н з високою якістю формування бічної поверхні (рис. 7.15) і щільною макроструктурою, без пор, шлакових включень і інших дефектів. Мікроструктура литого металу також характеризується відсутністю дефектів металургійного характеру (рис. 7.16 а, б).

Результати хімічного аналізу складу металу зливків ЕШП надані в табл. 7.6. Наведені дані свідчать, що склад прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, виплавлених шляхом однократного переплаву відходів, цілком відповідає вимогам стандарту. При цьому, метал зливків характеризується високою хімічною однорідністю.



Рисунок 7.15 – Зливки прецизійних сплавів, отримані ЕШП відходів: *a* – 29НК; *б* – 50Н; *в* – 46Н; *г* – 49НФ

Таблиця 7.6 – Хімічний склад прецизійних сплавів, отриманих ЕШП відходів

Сплав	Місце аналізу		Вміст, % (мас)						
			Si	Mn	Cu	Ni	Co	Cr	Fe
29НК	Низ	Центр	-	0,22	0,18	28,9	17,2	0,04	53,4
		Край	-	0,20	0,20	29,2	17,0	0,04	53,2
	Середина	Центр	-	0,20	0,16	29,4	16,9	0,03	53,2
		Край	-	0,20	0,16	29,5	16,9	0,04	53,14
	Верх	Центр	-	0,20	0,18	29,16	17,04	0,038	53,3
	Середнє значення	-	0,20	0,18	29,16	17,04	0,038	53,3	
ДСТУ 10994-74			≤0,3	≤0,4	≤0,2	28,5-29,5	17,0-18,0	≤0,1	решта
50Н	Низ	Центр	0,14	0,4	0,18	49,8	-	-	49,1
		Край	0,15	0,4	0,14	49,5	-	-	49,4
	Середина	Центр	0,14	0,46	0,16	49,9	-	-	48,8
		Край	0,14	0,46	0,16	49,6	-	-	49,2
	Верх	Центр	0,16	0,4	0,18	49,5	-	-	49,3
		Край	0,16	0,4	0,14	49,5	-	-	49,4
Середнє значення	-	0,15	0,42	0,16	49,63	-	-	49,2	
ДСТУ 10994-74			≤0,3	0,3-0,6	≤0,2	49,0-50,5	-	-	решта
46Н	Низ	Центр	-	0,22	0,15	45,8	-	-	53,5
		Край	-	0,2	0,15	45,6	-	-	54
	Середина	Центр	-	0,22	0,15	45,9	-	-	53,7
		Край	-	0,2	0,18	45,8	-	-	53,6
	Верх	Центр	-	0,18	0,16	45,9	-	-	53,6
		Край	-	0,18	0,16	45,8	-	-	53,8
Середнє значення	-	0,20	0,16	45,8	-	-	53,7		
ДСТУ 10994-74			≤0,3	≤0,4	≤0,2	45,5-46,5	-	-	решта

Зливки ЕШП піддавали гарячій прокатці на пруток при температурі 1000...1150 °С зі зміною осі деформації при кожному проході. Ступінь деформації за один прохід становила 4...7 %, при загальному ступені деформації до 70 %. Мікроструктура деформованого сплаву 29НК наведена на рис. 7.16 *в, г*. Мікроструктура металу однорідна, складається переважно з рівноосних зерен з характерним розміром 40...70 мкм. Тріщин, мікропор та інших дефектів в деформованому металі не виявлено.

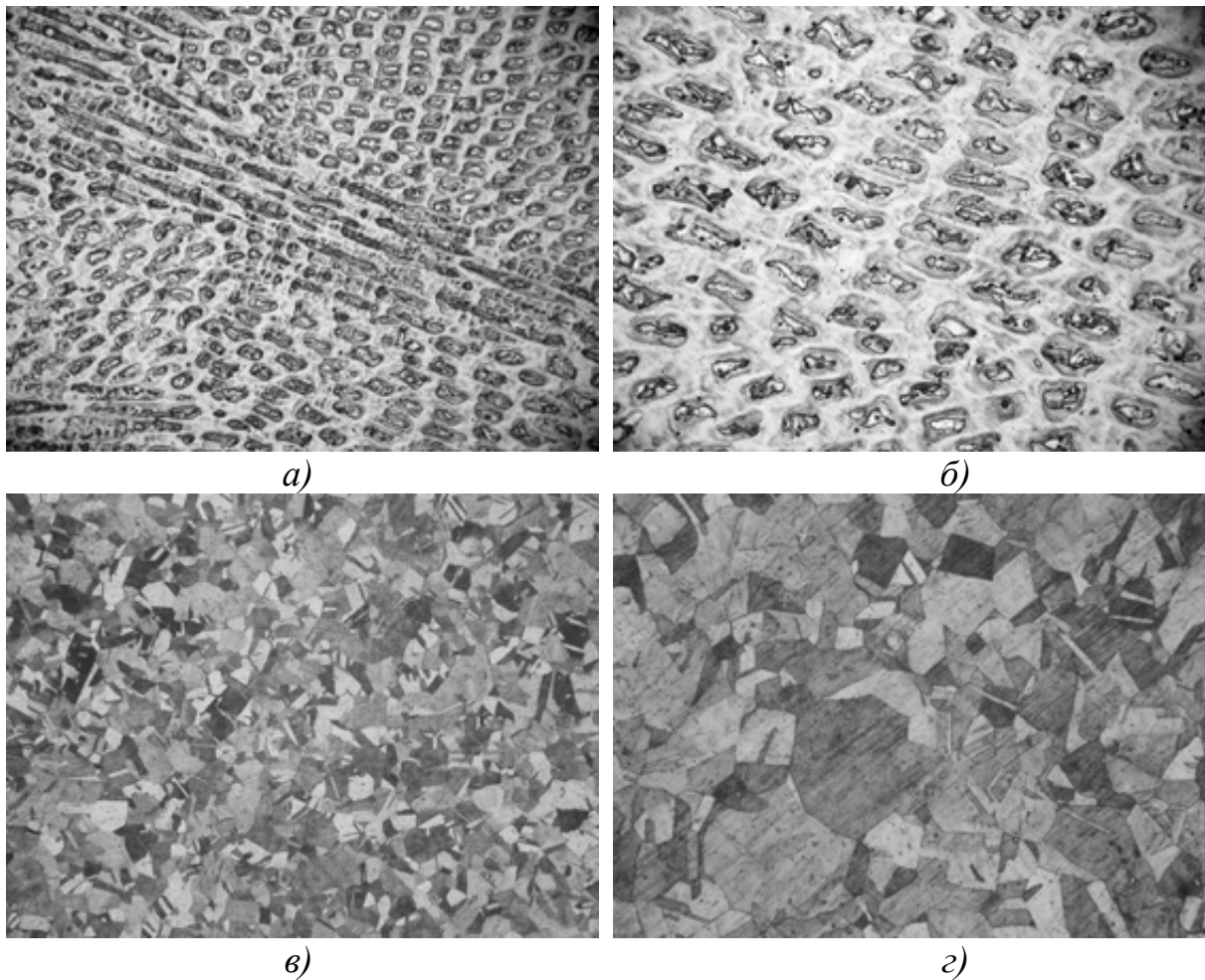


Рисунок 7.16 – Мікроструктура сплаву 29НК у литому стані (*а, б*) та після гарячої деформації (*в, г*): *а, в* - $\times 50$; *б, г* - $\times 125$

Проведені дослідження започаткували виконання низки промислових замовлень по переробці відходів прецизійних сплавів. Зазвичай переділ включав виготовлення витратних електродів, одноразовий їх переплав, гарячу прокатку зливків з подальшим відпалом і обробку на токарному

верстаті з отриманням чистових прутків (рис. 7.17). Подальше виготовлення з даного металу конкретних виробів та оцінка їх характеристик показали, що прецизійні сплави технології камерного ЕШП з електромагнітним впливом задовольняють технічним умовам їх експлуатації і забезпечують необхідні службові характеристики металу (додаток Б).



Рисунок 7.17 – Зливки прецизійного сплаву 29НК технології ЕШП та виготовлені з них поковки та прутки

7.4 ЕШП хрому

Металевий хром отримують алюмінотермічним методом (позапічним чи в електропечах) або з допомогою електролізу [99]. В разі необхідності металургійного переділу хрому, через його високу хімічну активність, переплав слід здійснювати в камерних печах в захисній інертній атмосфері. Складність переплаву хрому також обумовлена високою температурою його плавлення і високою пружністю пару.

Необхідність металургійного переділу хрому виникає при потребі в зливках заданих розмірів і геометрії, або при переробці відходів хрому. Одним з ефективних способів такого переділу є ЕШП в камерних печах з електромагнітним впливом.

Зокрема, одним із практичних завдань була розробка способу переробки відпрацьованих катодів з хрому з метою отримання циліндричних злиwkів діаметром 70...90 мм. Ці зливки призначені для подальшого їх

використання, для нанесення покриттів на поверхню виробів спеціального призначення.

Зовнішній вигляд відпрацьованих катодів наведено на рис. 7.18 *а*. Вони являють собою порожнисті циліндричні вироби із зовнішнім діаметром 55...60 мм, довжиною 180...220 мм і товщиною стінки 8...20 мм.

Розроблений спосіб електрошлакового переплаву відпрацьованих катодів передбачає виготовлення з них, способом ТІГ зварювання, витратних електродів (рис. 7.18 *б*). Досвід застосування таких електродів показав, що вони витримують електричні, теплові і механічні навантаження в процесі ЕШП.

*а)**б)*

Рисунок 7.18 – Відпрацьовані катоди з хрому (*а*) і виготовлений з них витратний електрод (*б*) для ЕШП

Переплав електродів здійснюють в камерній печі ЕШП в атмосфері аргону під тиском 120...140 кПа, із застосуванням твердого (холодного) старту. Рекомендовано використання флюсів АНФ-6, ESR 2029 ELH, ESR 3002 ELH, ESR 2015 ELH, ESR 2063 [232]. Параметри переплаву катодів надані в табл. 7.7.

Таблиця 7.7 – Рекомендовані параметри ЕШП відпрацьованих катодів з хрому

Флюс	Діаметр, мм		Тиск в камері печі, кПа	U, В	I, А	Електромагнітний вплив	
	ел-да	кр-ра				B, Тл	t _i /t _п
АНФ-6, ESR 2029 ELH	55...60	84	120...140	38...40	1800...2000	0,12	2/6

Характерний зовнішній вигляд зливка хрому, отриманого ЕШП відпрацьованих катодів, і його поперечний переріз наведено на рис. 7.19. Поверхневі і внутрішні дефекти металургійного характеру в металі відсутні.

Електронно-мікроскопічні дослідження металу зливка також не виявили внутрішніх дефектів (рис. 7.20).

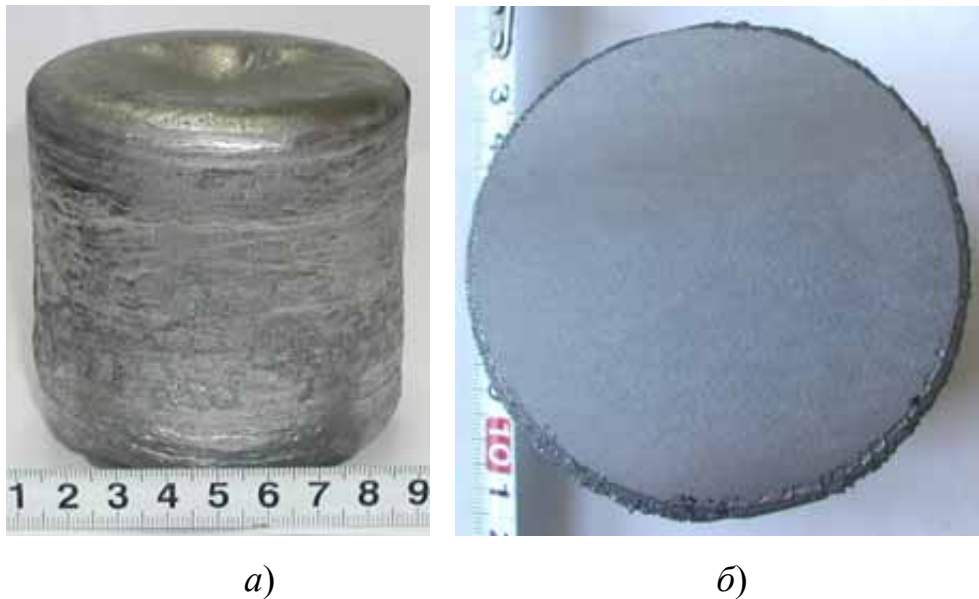


Рисунок 7.19 – Зливок хрому діаметром 84 мм, отриманий ЕШП відпрацьованих катодів (а) і його поперечний переріз (б)

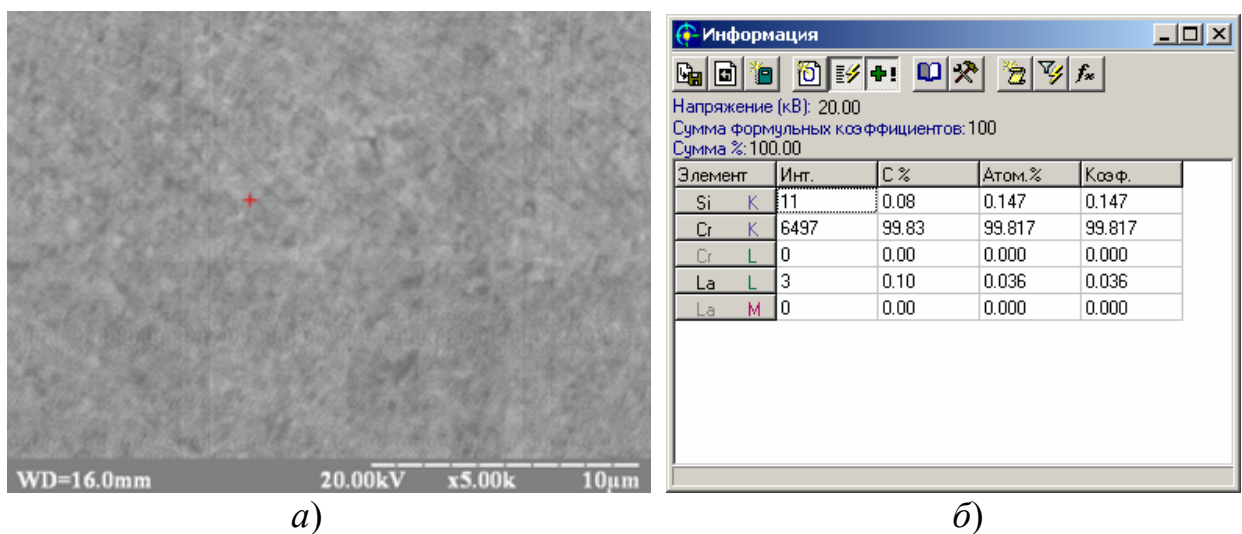


Рисунок 7.20 – Мікроструктура хрому ЕШП (а) і його локальний хімічний склад (б)

Загальний хімічний склад металу, встановлений за результатами рентгенофлуоресцентного аналізу, наведено в табл. 7.8, газовий склад – в табл. 7.9.

Аналіз отриманих даних свідчить, що за хімічним складом метал ЕШП цілком відповідає хрому металевому марки Х99Н1, згідно ДСТУ 5905-2004. Підвищений вміст в металі зливка $W=0,33\%$ (ДСТУ він не регламентується) викликаний, ймовірно, підвищеним вмістом W в заготовках, які переплавляли.

Таблиця 7.8 – Хімічний склад хрому ЕШП

Елемент	Cr	Mn	Fe	Al	Si	W	Co	Cu	Zn	Sn
Масова доля, %	99,3	0,065	0,083	0,14	0,077	0,33	<100 ppm	<100 ppm	<100 ppm	<100 ppm
ДСТУ 5905-2004	$\geq 99,0$	-	<0,5	<0,5	<0,2	-	-	<0,005	<0,005	<0,004

Таблиця 7.9 – Вміст газів в хромі ЕШП

Елемент	O	N	H
Масова доля, %	0,121	0,0066	0,0016
ДСТУ 5905-2004	-	<0,01	-

Таким чином, проведені роботи показали можливість і ефективність застосування камерного ЕШП для переробки відпрацьованих катодів з хрому, з отриманням бездефектних зливок хімічний склад яких відповідає хрому металевому марки Х99Н1.

Результатом цих робіт стала розробка карти технологічного процесу рециклінгу відпрацьованих катодів Cr в камерній печі ЕШП [261].

Висновки до розділу 7

1. Створена дослідно-промислова установка для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів з електромагнітним впливом на

металургійну ванну. Установа дозволяє вести переппав витратних електродів в контрольованій інертній атмосфері при надлишковому тиску, або в умовах вакууму, із живленням процесу змінним, постійним, або імпульсним електричним струмом. Задля гомогенізації хімічного складу і структури металу зливка застосовується вплив на рідку металеву ванну за допомогою магнітних полів або електричних розрядів. Апаратура керування разом з джерелом живлення і механізмом подавання витратного електроду дозволяють реалізувати процес ЕШП, з пошаровим формуванням зливка.

2. Розроблено технологічний процес ЕШП зливіків титанових сплавів включаючи процес виготовлення витратних електродів з вихідної некомпактної шихти. Технологія була випробувана при виплавці широкої номенклатури титанових сплавів і типорозмірів зливіків, в тому числі циліндричних, прямокутних і порожнистих. Показана відсутність в металі зливіків дефектів металургійного походження, високий рівень його хімічної і структурної однорідності, відповідність газового складу вимогам нормативних документів.

3. Розроблено технологію ЕШП сплавів з ефектом пам'яті форми системи Ti-Ni, під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Запропоновані режими деформації зливіків нікеліду титану, отримані напівфабрикати у вигляді пластин товщиною 0,5...15 мм і дроту діаметром 0,3...1,2 мм. Дослідження макро- і мікроструктури литого і деформованого сплаву Ti-50Ni (ат. %) вказує на відсутність в ньому мікропор, тріщин та інших дефектів металургійного походження.

4. Показано, що метал зливіків сплаву ТН1 технології ЕШП по хімічному складу відповідає вимогам технічних умов на даний сплав (ТУ І-809-394-84). При цьому, максимальне відхилення вмісту титану та нікелю по перерізу зливка не перевищує 0,24 %, що свідчить про високу хімічну однорідність металу.

5. Розроблено технологічну схему та режими електрошлакового переппаву відходів прецизійних сплавів 29НК, 50Н, 46Н, 49НФ із

застосуванням імпульсного електромагнітного впливу на кристалізацію металу. Виплавлені дослідні та промислові партії зливків діаметром 80...140 мм, розроблено режими їх термомеханічної обробки, отримано напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 38...45 мм. Встановлено, що одноразовий ЕШП з електромагнітним впливом дозволяє переробляти відходи прецизійних сплавів з отриманням металу, що задовольняє за хімічним складом і структурою вимоги нормативних документів.

6. Розроблено технологічний процес переплаву відпрацьованих катодів з хрому у камерній печі ЕШП. Отримано дослідні зразки зливків хрому. Показано, що за хімічним складом метал зливків відповідає вимогам стандарту ДСТУ 5905-2004 "Хром металевий" – до хрому марки Х99Н1. При цьому, метал зливків характеризуються щільною структурою і відсутністю дефектів металургійного походження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовані і експериментально досліджені нові методи вирішення фундаментальної проблеми керування процесами структуроутворення металу зливоків ЕШП. Вони базуються на застосуванні нестационарних режимів електричного живлення, із зменшенням об'єму металевої ванни і забезпеченням пошарового формування зливка, а також на імпульсному впливі на гідродинамічний стан розплавів шлаку і металу зовнішніми електричними і магнітними полями.

2. Показано, що параметри процесу ЕШП з нестационарним живленням електричною енергією визначаються ступенем інерційності теплових режимів витратного електроду, металевої і шлакової ванн, та гарнісажної кірки, серед яких останній є обмежуючим чинником. При цьому, в залежності від параметрів живлення, можливо два принципово різних варіанти реалізації електрошлакового процесу: у безперервному режимі або з забезпеченням періодичності процесів плавлення і кристалізації металу.

3. Встановлено, що застосування нестационарних режимів електричного живлення дозволяє зменшувати на 7...10 % питомі витрати електроенергії та подрібнювати і гомогенізувати структуру литого металу, у порівнянні з традиційним ЕШП, зменшуючи в 1,5...2 рази розмір зерна при щільності струму у ванні $\geq 0,4 \text{ А/мм}^2$.

4. Доведена ефективність керування структуроутворенням зливоків ЕШП шляхом порційного тепловнесення із забезпеченням пошарового формування зливка. Показано, що зливки, отримані способом пошарового формування, мають щільну структуру, без пористості та шлакових включень, характеризуються відсутністю великих стовпчастих кристалів та зони зустрічної кристалізації по осі зливка. При цьому, максимальна довжина кристалів обмежується висотою окремого наплавленого шару, а дисперсність структури вище, ніж у зливоків традиційного ЕШП.

5. Встановлено, що для забезпечення пошарового формування зливка з відсутністю дефектів по межах сплавлення окремих шарів, періоди подачі і плавлення витратного електроду повинні чергуватись з паузами, при яких в шлаковій ванні підтримується електричний струм, виходячи з умов твердіння під час пауз 75...95 % об'єму рідкої металевої ванни при висоті шарів наплавленого металу в межах $(0,1...0,5) \times d_{зл}$.

6. На основі експериментальних даних запропоновані розрахункові залежності для визначення параметрів пошарового твердіння зливок ЕШП діаметром до 220 мм:

- час повного твердіння металевої ванни (хв) $\tau_{п}=(0,06...0,08) \cdot k_{пд} \cdot k_{тфм} \cdot d_{зл}^2$, де $d_{зл}$ – діаметр зливка (см), $k_{пд}$ – коефіцієнт підігріву металу при неповному відключенні напруги, $k_{тфм}=\alpha_{ст}/\alpha_{м}$ ($\alpha_{ст}$ – коефіцієнт температуропровідності вуглецевої сталі, $\alpha_{м}$ – коефіцієнт температуропровідності досліджуваного сплаву);

- товщина затверділого шару металу (см) $\delta=(2,5...4,5) \cdot k_{пд} \cdot \sqrt{\tau/k_{тфм}}$, де τ – час твердіння (с);

- температура металу на відстані $0,5 \times d_{зл}$ від верхнього торця зливка і $0,25 \times d_{зл}$ від бічної поверхні, після відключення напруги ($^{\circ}\text{C}$) $T=T_{в}+(T_{мв}-T_{в}) \cdot k_{пд} \cdot k_{тфм} \cdot e^{-k_{тп}\tau}$, де $T_{мв}$ – температура металевої ванни, $T_{в}$ – температура охолоджуючої води, τ – час охолодження (хв), $k_{тп}$ – коефіцієнт теплопередачі, який для зливок діаметром 85, 125 і 220 мм дорівнює 0,19, 0,056 і 0,02 відповідно.

7. Розроблені технологічні схеми застосування розрядів ємнісних накопичувачів електричної енергії для керування процесами кристалізації металу зливок ЕШП. Показано, що застосування сумісних електричних розрядів на соленоїд кристалізатора і металургійну ванну підсилює МГД вплив на рідкий метал, що дозволяє, при питомій енергії розрядів 0,3...0,4 Дж/мм² і частоті їх дії 0,6...3 Гц, повністю усунути формування стовбчастої

структури металу зливка, забезпечуючи її подрібнення і гомогенізацію, наближаючи до структури деформованого металу.

8. Встановлено, що імпульсне поздовжнє магнітне поле, створене розрядами конденсаторів на соленоїд кристалізатора, призводить до циклічних коливань струму плавки. Ці коливання проявляються у періодичному падінні струму плавки, під час дії імпульсів магнітного поля і його відновленні, під час пауз, та залежать від частоти імпульсів і сили розрядного струму. Механізм зменшення струму плавки пов'язаний з МГД ефектами в шлаковій ванні, внаслідок чого зменшується площа контакту витратного електроду зі шлаком, збільшується міжелектродний проміжок і погіршується електричний контакт на поверхні поділу *електрод - шлак*.

9. Показано, що лімітуючим чинником реалізації процесу ЕШП у вакуумі є закипання флюсу, викликане інтенсивним випаровуванням легколетючих сполук, насамперед хлоридів і фторидів. При цьому, тиск закипання флюсу залежить як від його складу, так і від електричних режимів ЕШП. Встановлено, що критичний рівень тиску для сольових флюсів типу АН-Т2, АН-Т4 становить 12...26 кПа, а для фторидно-оксидних флюсів типу АНФ-1, АНФ-6, АНФ-28 – 3...15 кПа.

10. Отримано експериментальні дані, щодо впливу тиску в плавильному просторі, в діапазоні 20...300 кПа, на газовий склад металу злиwkів. Встановлена можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах, шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа).

11. Створено дослідно-промислове обладнання для ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів потужністю 724 кВт. Обладнання призначене для переплаву в контрольованій інертній атмосфері при надлишковому тиску, та в умовах вакууму, із живленням змінним, постійним та імпульсним електричним струмом. Обладнанням передбачено ведення процесу з пошаровим формуванням зливка та електромагнітним впливом із застосуванням розрядів конденсаторів.

12. Розроблено технологічні процеси камерного ЕШП титанових сплавів, нікеліду титану, прецизійних сплавів типу 29НК, 50Н, 46Н, 49КФ, хрому. Отримані дослідні і промислові партії зливків, метал яких характеризується високою хімічною і структурною однорідністю і відповідає вимогам нормативних документів. Розроблені технології створюють передумови для вирішення важливої народногосподарської проблеми організації в Україні конкурентоспроможного виробництва вказаних металів і сплавів та імпортозаміщення відповідних виробів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Металлургия электрошлакового процесса / Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Шевцов В.Л. и др.; Под. ред. Патона Б.Е. – Киев: Наук. думка, 1986. – 248 с.
2. Vinay K. Sethi. Electroslag remelting (ESR) technology - recent developments and trends. Электронный ресурс. Режим доступа: http://ncmm.mist2016.in/pprs/session_2/inteco_ppr_8.pdf.
3. Электрошлаковая технология за рубежом / Медовар Б. И., Цыкуленко А. К., Богаченко А. Г., Литвинчук В. М. – Киев: Наук. думка, 1982, 320 с.
4. Современная электрошлаковая технология в специальной электрометаллургии / Е. А. Казачков, А. Д. Чепурной, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ПДТУ. - Маріуполь, 2003. - Вип. 13. - С. 31-36.
5. Liu Zhongli, Liu Xihai, Yang Chuanhao. The Application of ESR Technology for Nuclear Power Equipments In China // Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 28-31
6. Dub V.S., Levkov L.Ya., Shurygin D.A. Applications of ESR in modern energy engineering // Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 39-49.
7. B.I. Medovar, L.B. Medovar, V.Ja. Saenko. Electroslag technologies in the XXIst century // Proc. “Asia Steel’ 2000”, China, Sept. 15-18. – 2000. - Vol.C. - P.143-149.
8. M. Kubin, A. Scheriau, M. Knabl, H. Holzgruber. Production of Heavy Forging Ingots up to 250 tons via the ESR process - Operational Experiences and Process Optimization Method // Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 16-20.

9. Scholz H., Biebricher U., Вгъckmann G., Esser D. ESR meets the requirements for bigger forgings. Proceedings of the 1st International Conference on Ingot Casting, Rolling and Forging, 3-7 June 2012, Aachen, Germany.

10. Медовар Л.Б., Саенко В.Я., Стовпченко А.П. и др. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков. Современ. электрометаллургия. 2010. № 3. С. 5-10.

11. Медовар Л.Б., Стовпченко А.П., Головачев А.Н., Федоровский Б.Б. ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка. Современ. электрометаллургия. 2013. № 3. С. 12-18.

12. Шурыгин Д. А. Влияние технологии электрошлакового переплава на качество и свойства изделий из 9-12%-ных хромистых сталей для энергетического оборудования с суперсверхкритическими параметрами пара: Дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов". АО НПО «ЦНИТТМАШ». М. 2016. 153 с.

13. Протокивиллов И.В., Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Титан. 2011. №4(34). С.40-44.

14. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А, и др. Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современ. электрометаллургия. 2009. №1. С.3-11.

15. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Бенц М. и др. ЭШП титана: вчера, сегодня, завтра. Проблемы спец. электрометаллургии. 1999, № 2. С.3-9.

16. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Медовар Л.Б. Возможности ЭШП в производстве интерметаллидов. Проблемы специальной электрометаллургии. 1998. № 1. С.3-11.

17. Медовар Б.И., Саенко В.Я., Медовар Л.Б и др. Химический состав и структура алюминида титана электрошлаковой выплавки. Проблемы специальной электрометаллургии. 1996. №3. С.3-8.

18. Рябцев А.Д. Электрошлаковий переплав металів і сплавів під флюсами з активними добавками у печах камерного типу: Автореф. дис. ... д-

ра. тех. наук: спец. 05.16.07 "Металургія високочистих металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. К. 2004. 32 с.

19. Троянский А.А., Рябцев А.Д., Галян Н.Н. Применение электрошлаковой технологии для получения алюминидов железа. Современ. электрометаллургия. 2004. №3 С.11-14.

20. R. Feiler, M. Mayer, M. Kubin, R. Pierer. Newly developed level 2 system for the production of highly advanced materials in special melting and remelting furnaces // Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 104-109.

21. Дуб А.В., Дуб В.С., Кригер Ю.Н., Левков Л.Я., Шурыгин Д.А. и др. Многоцелевая печь ЭШП для современного энергетического и тяжелого машиностроения. Электрометаллургия. 2011. №9. С.2-9.

22. Медовар Л.Б., Лебедь В.А., Стовпченко А.П. и др. О реконструкции печей ЭШП. Современ. электрометаллургия. 2012. №4. С. 3-6.

23. Медовар Л. Б., Цыкуленко А. К., Чернец А. В. и др. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны. Пробл. спец. электрометаллургии. 2000. № 4. С. 3-7.

24. Чернец О. В. Нові електрошлакові технології з роз'єднанням плавлення та твердіння металу: автореф. дис. ... док. техн. наук: спец. 05.16.07 "Металургія високочистих металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. К., 2001. 35 с.

25. Цыкуленко А. К., Медовар Л. Б., Чернец А. В. Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии. Пробл. спец. электрометаллургии. 2002. № 2. С. 9-11.

26. Ксендзык Г.В. Токопроводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. Спец. электрометаллургия. 1975. № 27. С. 32 - 40.

27. А. С. № 1085250 СССР, МКИ С22В 9/18. Токоподводящий секционный кристаллизатор. Г. В. Ксендзык, И. И. Фрумин, Ю. М. Кусков. - Оpubл. 30.03.82; Бюл. № 8.

28. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б. и др. Электрошлаковые процессы без расходующих электродов. Пробл. спец. электрометаллургии. 1997. №2. С. 12-16.

29. Медовар Б.И., Чернец А.В., Медовар Л.Б. и др. Электрошлаковая наплавка жидким присадочным металлом. Пробл. спец. электрометаллургии. 1995. №1. С. 7-11.

30. Полішко Г.О. Особливості укрупнення зливків послідовним кільцевим електрошлаковим наплавленням: Автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.16.02 "Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАНУ. К. 2011. 20 с.

31. Биктагиров Ф. К., Шаповалов В. А., Ефимов М. В. и др. Повышение качества крупных слитков. Современ. электрометаллургия. 2011. №1. С. 7-11.

32. Майэр В., Миттер В, Махнер П. и др. Усовершенствованный процесс БЭСТ - разработка и результаты // Электрошлаковый переплав. К. Наук. думка. 1987. Вып. 9. С. 159-163.

33. Базени С., Скепи М., Репетто Е. Способ ТРЕСТ для производства валков роторов высокого давления из хромомолибденовой стали // Электрошлаковый переплав. К., Наук. думка. 1983. Вып. 6. С. 317-321.

34. H. Holzgruber, M. Ramprecht, B. Ofner et al. New Plant Concepts for the Production of Large Size ESR Ingots // Proc. of the China International Forgemasters meeting. Cheng du, China, 2010. P.94-102.

35. ElectroSlag Remelting Furnaces. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://consarceng.com/wp-content/uploads/sites/12/2015/04/esr.pdf>.

36. Волохонский Л.А., Гуткин В.Б., Шарапов А.А. и др. Электрошлаковый переплав на переменном токе пониженной частоты. Теория металлургических процессов. М. Металлургия. 1977. № 4. С.57 – 62.

37. Левков Л.Я. Теоретические предпосылки и практические методы управления физико-химическими и теплофизическими процессами при электрошлаковом переплаве, определяющие качество ответственных изделий:

Дис. ... док. техн. наук: спец. 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов". АО НПО «ЦНИТТМАШ». М., 2015. 339 с.

38. Inteco, special melting & remelting. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.inteco.at/en/projects/special-metallurgy>

39. Универсальная двухмодульная печь электрошлакового переплава. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.ormetoyumz.ru/files/uniwercal_naya_dwuhmodul_naya_peth_elektroshlakowogo_pereplawa.pdf

40. Левков Л.Я., Шурыгин Д.А., Орлов С.В. и др. . Исследование влияния скорости наплавления на качество полых стальных заготовок электрошлаковой выплавки. *Металлург*. 2014. №8. С.72-77.

41. Шурыгин Д.А., Левков Л.Я., Дуб В.С. и др. Управление технологическими процессами при электрошлаковом переплаве. *Металл*. 2013. №7. С. 20-23.

42. Andrew J. Elliott, Raymond J. Roberts, Aaron Teske. Electroslag remelting of large diameter ingots and the effects of frequency. *Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine*, P. 9-15.

43. Компан Я.Ю., Щербинин Э.В. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. М. Машиностроение, 1989. 272 с.

44. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж. и др. Электровихревые течения / Под ред. Щербинина Э.В. Рига, "Зинатне", 1985. 315с.

45. Установки, электрошлаковый переплав (ESR). Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ald-vt.ru/cms/ru/vakuum-technologie/ustanovki/esr-ehlektroshlakovy-i-pereplav>.

46. S. Radwitz, H. Scholz, B. Friedrich. Investigation of Slag Compositions and Pressure Ranges suitable for Electroslag Remelting under Vacuum Conditions. *Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting, September 22–25, 2013, Austin, Texas*, 87–93.

47. Азотистые стали. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.energietechnik-essen.de/ru/produkty/azotistye-stali.html>

48. The Pressure Electroslag Remelting Process (PESR). Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=FR&NM=461>.

49. ESR, Electroslag remelting. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ald-vt.com/cms/ru/vakuum-technologie/ustanovki/esr-ehlektroshlakovy-i-pereplav>

50. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Щербаков А.И., Макаров А.А. Новая электрошлаковая печь под давлением ДЭШП-0,1: освоение и перспективы развития. Труды ВИАМ. 2016. № 5. С. 28-35.

51. Патон Б.Е., Чепурной А.Д., Саенко В.Я. и др. Перспективы применения электрошлаковых технологий в производстве сосудов высокого давления. Современ. электрометаллургия. 2004. №1. С. 3-9.

52. Медовар Л.Б., Дудка Г.А., Стовпченко А.П. и др. Опыт и перспективы традиционного ЭШП для производства длинномерных полых слитков - труб. Современ. электрометаллургия. 2014. №4. С. 3-9.

53. Дуб В.С., Левков Л.Я., Шурыгин Д.А. и др. Опыт производства полых трубных заготовок методом электрошлаковой выплавки. Электрометаллургия. 2015. №1. С.10-19.

54. Волохонский Л.А., Киссельман М.А., Демидов В.А., Павлова Н.П. и др. Электрошлаковое литьё полых стальных заготовок. Новый этап. Электрометаллургия. 2006. №6. С.21-26.

55. Бесшовные трубы для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. Электронный ресурс. Режим доступа <http://www.energomash.ru/upload/iblock/578/eshp.pdf>

56. ООО "Белэнергомаш", производство труб.: Электронный ресурс. Режим доступа <http://www.energomash.ru/production/proizvodstvo-trub/>

57. Л.Б. Медовар, А.П. Стовпченко, Ю.В. Костецкий. Концепция микрозаводов для выпуска продукции премиум качества электрошлаковым переплавом. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С. 3–8.

58. H. Scholz et al.. An Advanced ESR Process for the Production of Ti-Slabs. Ti-2003 Science and Technology. ed. G. Lütjering and J. Albrecht (Weinheim, Wiley-VCH-Verlag, 2004), 205-212.

59. Рябцев А. Д., Троянский А. А. Рафинирование и легирование титана в процессе камерного электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2011. № 1. С. 52–53.

60. Рябинин А. В. Перспективы электрошлакового переплава титана. Сб. допов. міжнар. конф. "Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра". Київ, 2010 р. С. 30–36.

61. И.В. Протокилов, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа. Современная электрометаллургия. 2019. №2. С.3–6.

62. Протокилов И.В. Петров Д.А. Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2017. №1. С.9–14.

63. Протокилов И.В. Петров Д.А. Порохонько В.Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо β -сплава ТС6. Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.16–20.

64. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы / Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. М. Металлургия. 1974. 368 с.

65. Ильин А. А., Колачев Б. А., Польшкин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М.: ВИЛС–МАТИ. 2009. 520 с.

66. Хорев А. И. Теория и практика создания современных титановых сплавов для перспективных конструкций. Технология машиностроения. 2007. № 12 (66). С. 5–12.

67. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Ширяев А.А., Изотова А.Ю. Перспективы разработки новых титановых сплавов. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011, С. 60–67.

68. Григоренко С.Г., Григоренко Г.М., Задорожнюк О.М.. Интерметаллиды титана. Особенности, свойства, применение (Обзор). Современная электрометаллургия. 2017. №3. С. 51–58.
69. Григоренко Г.М., Задорожнюк О.М. Дисперсионное упрочнение – путь к повышению прочностных свойств титановых сплавов нового поколения (Обзор). Современная электрометаллургия. 2012. №4. С. 42-49.
70. Сысоева Н.В. Интерметаллидное упрочнение высокопрочных титановых сплавов. Технология легких сплавов. 2002. №4. с. 85-91.
71. Фирстов С.А. Титановые «чугуны» и титановые «стали». Титан. 2005. №2. с. 33-37.
72. Фірстов С.О., Кузьменко М.І., Кулак Л.Д. та ін. Структура та властивості високомодульних сплавів системи Ti-V. Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2006, № 3, с. 27-32.
73. Плавка и литье титановых сплавов. А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин, К.М. Борзцовская. Под ред. В.И. Добаткина. М. Metallurgy, 1978. 384 с.
74. Тур А.А. Metallurgy титана. Киев. 2003. 200 с.
75. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. Электронно-лучевая плавка титана. Киев. Наукова думка, 2006. 248 с.
76. Березос В.О. Теорія і практика виробництва зливків високоміцних конструкційних сплавів на основі титану методом електронно-променевої плавки: Дис. ... д-ра. тех. наук: спец. 05.16.02 "Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. К., 2021. 350 с.
77. Григоренко Г. М., Шейко И. В. Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и охлаждаемых секционных кристаллизаторах. Киев. Сталь. 2006. 320 с.
78. Шаповалов В.А., Бурнашев В.Р., Жиров Д.М. и др. Плазменно-дуговая технология получения слитков и отливок из алюминидов титана. Современная электрометаллургия. 2012. № 4. С. 21-24.

79. Протокилов И.В., Петров Д.А., Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Современная электрометаллургия. 2018. №2. 45–51.

80. Сплавы с эффектом памяти формы. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Под ред. Фунакубо Х. Пер. с японск. М. Металлург. 1990. 224 с.

81. Никелид титана. Медицинский материал нового поколения. В.Э. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук и др. Изд-во МИЦ. 2006. 296 с.

82. Коваль Ю. М. Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів. Наука та інновації. 2005. Т 1. № 2. С. 80–95.

83. Маринский Г.С., Чернец А.В., Четверо Н.А., Дубко А.Г. Применение сплавов с памятью формы в медицине. Современная электрометаллургия. 2012. № 3. С.54-60.

84. Хачин В.Н., Пушин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: Структура и свойства. М. Наука. 1992. 160 с.

85. Ильин А.А., Карпов В.Н., Мамонов А.М., Коллеров М.Ю. Применение титана и материалов на его основе в медицине. Матер. Междунар. конф. “Ti-2006 в СНГ”, 2006 г. С. 234-237.

86. Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Н., Сысолятин П.Г. и др. Медицинские материалы и имплантанты с памятью формы. ТГУ. 1998. 486 с.

87. Курдюмов Г. В., Хандрос Л. Г. Открытие 239. Явление термоупругого равновесия фаз при фазовых превращениях мартенситного типа (эффект Курдюмова). Металлофизика. 1981. Т. 3, № 2. 124 с.

88. Моисеев В.Н. Титан. Металловедение и термическая обработка металлов. №8, 2005. С.23-29.

89. Александров А.В., Афонин Е.А., Делло С.А. и др. Выплавка сложнелегированных сплавов титана и интерметаллидов в индукционной печи с холодным тиглем. Матер. Междунар. конф. “Ti-2010 в СНГ”. Екатеринбург. 2010. С. 14-19.

90. Ильин А.А., Полькин И.С., Коллеров М.Ю. и др. Технология производства полуфабрикатов из сплава TiNi на основе никелида титана с регламентированной структурой и термомеханическими свойствами. Матер. Междунар. конф. "Ti-2007 в СНГ". Киев. 2007. С. 214-221.

91. Ермаков В.М., Николаев Б.Д., Перевалов Н.Н., Гранаткин Ю.А. Методы выплавки сплавов системы никель-титан, восстанавливающих первоначальную форму после пластической деформации, и их служебные характеристики: Обзор патентов. Электросталеплав. пр-во: Экспресс-информ. МЧМ СССР. ЦНИИЧМ. 1976. Вып.3. 8с

92. Frenzel J. et al. High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles. Alloys and Compounds. 2004. V.385. P.214-223.

93. Лотков А.И., Заводчиков С.Ю., Котрехов В.А. и др. Микроструктура и фазовый состав слитков никелида титана, полученных в установке с холодным тиглем. Матер. Междунар. конф. "Ti-2011 в СНГ". Львов. 2011. С. 223-233.

94. Березос В.А., Тригуб Н.П. Получение сплавов с эффектом памяти формы на основе титана способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Современ. электрометаллургия. 2011. № 4. С.6-8.

95. ГОСТ 10994-74. Сплавы прецизионные. Марки. Межгосударственный стандарт.

96. Грицианов Ю.А., Путимцев Б.Н., Молотилев Б.В. Metallurgy of precision alloys. M. "Metallurgy", 1975. 448 s.

97. Прецизионные сплавы. Справочник. Под. ред. Б.В. Молотилова. М. Metallurgy. 1983. 439 s.

98. Захаров А. И. Физика прецизионных сплавов с особыми тепловыми свойствами. М. Metallurgy. 1986. 237 s.

99. Metallurgy of chromium. Плинер Ю.Л., Игнатенко Г.Ф., Лаппо С.И. М. Metallurgy, 1965. 362 s.

100. Marvin J. Udy, William A. Hamor . Chromium, V2: Metallurgy Of Chromium And Its Alloys Paperback. July 21. 2012. 412 p.

101. Тихонов Л.В., Кононенко В.А., Прокопенко Г.И., Рафаловский В.А. Структуры и свойства металлов и сплавов. Механические свойства металлов и сплавов: Справочник. К. Наукова думка, 1986. 580 с.

102. Салли А. Г., Брэндз Э. А. Хром . Пер. с англ. В. А. Алексеева. Под ред. В. А. Боголюбова. 2-е изд. М. Металлургия. 1971. 360 с.

103. ДСТУ 5905:2005 (ISO 10387:1994) Хром металевий. Технічні вимоги та умови постачання.

104. Рябцев А.Д., Троянский А.А., Пашинский В.В., Самборский М.В. Использование камерных электрошлаковых печей для производства высокорекреационных металлов и сплавов. Донбас-2020: наука і техніка виробництву. Матеріали І науково- практичної конференції. м. Донецьк. 2002. С. 267-272.

105. Радченко В.Н., Рябцев А.Д., Корзун Е.Л., Тарлов О.В. К вопросу об удалении алюминия при электрошлаковом переплаве алюминотермического хрома. Проблемы специальной электрометаллургии. 1989. №4. С.12-15.

106. Радченко В.Н. Рябцев А.Д., Корзун Е.Л. Корнеев Л.И. и др. Получение способом электрошлакового переплава заготовок катодов для нанесения покрытий. Бюллетень НТИ “Черная металлургия”. Выпуск 11 (1099). 1990.

107. Джон-Хун Ли, Е. И. Марукович, Ки-Йонг Чой и др. Электрошлаковое литье заготовок из сплавов на основе хрома. Литье и металлургия. 2015. 1(78).

108. Братковский Е.В, Заводяный А.В., Шаповалов А.Н., Шевченко Е.А. Специальные стали: Учебное пособие. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС». 2013. 87 с.

109. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Белоус В.И. и др. Структура и свойства титанового сплава ВТ19, полученного способом электронно-

лучевой плавки, после термомеханической обработки. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С. 19–24.

110. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Ясинский К.К., Кочетков А.С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011, С. 53–59.

111. Jennifer Hernandez, Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan et al. Microstructures for Two-Phase Gamma Titanium Aluminide Fabricated by Electron Beam Melting. Metallogr. Microstruct. Analys. 2012. No 1, P.14–27.

112. Качество электрошлакового металла. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Дяченко Д.М. Под ред. Патона Б.Е., Медовара Б.И. Киев. Наук. думка. 1990. 312 с.

113. А. Митчелл. Кристаллизация металла в процессах переплава. Современная электрометаллургия. 2008. № 2. С. 4 – 13

114. А. Митчелл. Исследование поведения включений в специальных процессах плавки. Пробл. спец. электрометаллургии. 1993. № 2 С. 60 – 72.

115. Цыкуленко А.К. Кристаллизационные дефекты в суперсплавах. Пробл. спец. электрометаллургии. 2000. № 3. С. 21 – 26.

116. Ключев М.М., Каблуковский А.Ф. Metallургия электрошлакового переплава. М.: Metallургия, 1969. 256 с.

117. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. М. Metallургия. 1970. 239 с.

118. Электрошлаковые печи. Под ред. Б.Е. Патона и Б.И. Медовара. Киев: Наукова думка. 1976. 414 с.

119. Хольцгрубер В. Возможности и ограничения воздействия на структуру и свойства слитков ЭШП. Электрошлаковый переплав. Вып. 4. Материалы V Международного симпозиума по технологии ЭШП и другим специальным видам плавки. Киев. Наук. Думка. 1977. С. 60-75.

120. Лейбензон С.А., Трегубенко А.Ф. Производство стали методом электрошлакового переплава. Metallургиздат. 1962. 237 с.

121. Дьюснап П., Шлаттер Р. Электрошлаковый переплав легированных сталей на постоянном токе. Электрошлаковый переплав. Вып. 4. Материалы V Международного симпозиума по технологии ЭШП и другим специальным видам плавки. Киев. Наук. Думка. 1977. С. 76-96.

122. Пятыгин Д. А. Особенности плавления и кристаллизации металла при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: Специальность 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов». ЮУрГУ, Челябинск, 2006. 21 с.

123. Протокилов И.В., Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. Современ. электрометаллургия. 2014. № 3. С. 7-15.

124. Еремин Е.Н. Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла. Анализ и синтез механических систем. Изд-во ОГТУ. 1998. С. 131-134.

125. Еремин Е.Н. Применение модифицирования для повышения свойств кольцевых заготовок из азотсодержащих нержавеющей сталей, полученных способом центробежного электрошлакового литья. Современ. электрометаллургия. 2006. № 3. С.3-7.

126. Билько В. Г., Емельяненко Ю. Г. Влияние модифицирующих добавок на трещиностойкость электрошлаковых слитков. В.кн.: Проблемы электрошлаковой технологии. Киев: Наук. думка, 1978. С.134-138.

127. Медовар Б. И., Тихонов В. А., Саенко В. Я., Бешенцев А. В. Применение окислов редкоземельных металлов в качестве компонентов флюса при электрошлаковом переплаве среднелегированной Cr-Ni-Mo стали. Пробл. спец. электрометаллургии. 1981. Вып. 14. С. 63-67.

128. Попов В.С., Билоник И.М., Бережный С.П. и др. Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с инокуляторами. Современ. электрометаллургия. 2004. №2. С. 8-9.

129. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Саенко В. Я., Емельяненко Ю. Г. Управление кристаллизацией слитка путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве. В кн.: Литье с применением инокуляторов. Киев: ИПЛ, 1981, С. 13-19.

130. Davidchenko S.V., Panchenko A.I., Bilonik I.M. et al. Research of structure dispersability of ESR ingot of die tool D2 steel grade, melted with inoculators addition. Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 91-94.

131. Патент України №28530. Спосіб одержання злитків електрошлаковим переплавом. Попов В.С. Білоник І.М. Давидченко С.В. і др. Опубліковано 10.12.2007, бюл. № 20.

132. Куделькин В. П., Ключев М. М., Филиппов С. И. и др. Воздействие ультразвуковыми колебаниями на кристаллизацию при электрошлаковом переплаве. Известия вузов. Черная металлургия. 1969. №11. С. 64 - 70.

133. Куделькин В. П., Ключев М. М., Филиппов С. И. и др. Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве. Известия вузов. Чёрная металлургия. 1969. № 3. С. 54-59.

134. Абрамов О.В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М. Металлургия. 1972. 256 с.

135. Ефимов В.А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М. Металлургия, 1995. 272 с.

136. Скворцов А.А., Акименко А.Д., Ульянов В.А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и отливок. М. Металлургия. 1991. 218 с.

137. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путём воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходоуемого электрода: Автореферат дис. ... док. техн. наук: Специальность

05.16.02 «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов». ЮУрГУ, Ч., 2002. 40 с.

138. US Patent 3,776,294. Paton B. E. et al. Method of electroslag remelting. Dec. 4. 1973.

139. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Кумыш И. И. Принудительное оплавление расходуемых электродов при электрошлаковом переплаве. Спец. электрометаллургия. 1974. № 25. С. 3-7.

140. US Patent 4,185,683. Medovar et al. Electroslag remelting mould. Jan. 29. 1980.

141. Пат. РФ 2483125, МПК С22В 9/18; F27D 27/100; В22D 23/10. Способ перемешивания шлаковой ванны при электрошлаковом переплаве расходуемого электрода. Л. Я. Левков, Ю. Н. Кригер, С. В. Орлов и др. Оpubл. 27.05.2013. Бюл. №15.

142. Патон Б.Е., Лебедев В.К., Медовар Б.И. и др. Управление процессами кристаллизации слитка ЭШП. Проблемы стального слитка. Труды пятой конф. по слитку. М. Metallurgia. 1974. С. 707-714.

143. Абрамов А.В., Лоскутов В.И., Ковалев В.Г. Новая технология электрошлаковой выплавки инструментальных заготовок. Пробл. спец. электрометаллургии. 1993. №4. С. 10-12.

144. Пат. РФ № 2337979. Способ управления режимом работы установки электрошлакового переплава и устройство для его осуществления. А.В. Абрамов, А.Н. Ильгачев, Д.Г. Михадаров. Оpubл. 10.11.2008. Бюл. №31.

145. Протокилов И.В., Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием. Современ. электрометаллургия. 2014. № 2. С. 10-14.

146. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе. Автоматическая сварка. 1960. №9. С.12-16.

147. Трочун И.П., Черныш В.П. Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП. Свароч. про-во. 1965. №11. С.3-5.

148. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Ус В.И., Томиленко С.В. Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля. Пробл. спец. электрометаллургии. 1989. №4. С.3-7.

149. Максимович Б. И. Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов. Электротермия. 1992. Вып. 5.

150. Протоковілов І. В. Магнітокерована електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: Дис... канд. техн. наук: спец. 05.16.07. Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона. К. 2006. 178 арк.

151. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протоковилов И. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. Современная электрометаллургия. 2007. №4. С. 3–7.

152. Назарчук А.Т., Протоковилов И.В., Ивочкин Ю.П. и др. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2013. №4. С.21–26.

153. Ksendzyk G., Frumin I., Shyrin V. Electroslag remelting and surfacing apparatus. US Patent 4185682. Jan. 29, 1980.

154. Ksendzyk G., Frumin I., Shyrin V. Electroslag remelting and surfacing apparatus. US Patent 4305451. Dec. 15, 1981.

155. Holzgruber H. Water cooled mould for manufacturing ingots, process for continuous casting and process for electro-slag refining, European patent EP 0800879 A2. Oct. 15. 1997.

156. Holzgruber W. et al. Method and device for producing ingots or strands of metal by melting electrodes in an electroconductive slag bath, US Patent 6913066 B2. Jul. 5. 2005.

157. Holzgruber W., Holzgruber H. Process for electroslag remelting of metals and ingot mould therefor. US Patent 20080115909 A1. May 22. 2008.

158. Holzgruber W., Holzgruber H. Process for electroslag remelting of metals and ingot mould therefor. US Patent 7849912 B2. Dec. 14. 2010.

159. Holzgruber H., Holzgruber W. New ESR concepts for improved control of solidification. Proceedings of the International Symposium on Electroslag Remelting Technologies. Chicago. Illinois. 2002. P. 1–15.

160. Medovar L. et al. ESR with two power sources and process control. Proceedings of the 2005 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting. 18-21.9.2005. Santa Fe. New Mexico. USA.

161. Michael Kubin, Alexander Scheriau, Matthias Knabl et al. Investigation of the implication of the current conductive mould technology with respect to the internal and surface quality of ESR ingots. Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 174-179.

162. L. Medovar, V. Petrenko, G. Stovpchenko. Current Supplying Mould (CSM) - Possibilities and Restrictions. Proceedings of the Medovar Memorial Symposium, 7–10 June 2016, Kyiv, Ukraine, P. 180-184

163. Tsykulenko A.K. et al. Two-circuit method of electroslag remelting consumable electrodes. Advances in Special Electrometallurgy. 2000. 16 (3). P.141–144.

164. Томиленко С. В., Кусков Ю. М., Ус В. И. Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны. Пробл. спец. электрометаллургии. 1993. № 3. С. 16-18.

165. Патент України № 94333, МПК51 В22D 19/16, С22В 9/18, В23К 25/00 С23С 6/00. Спосіб виготовлення великотонажного металевого злитка. Л.Б. Медовар, Г.П. Стівпченко, В.Я. Саєнко, Б.Б. Федоровський, Г.О. Полішко, В.М. Журавель, В.А Зайцев. Опубл. 26.04.2011., Бюл. № 8.

166. Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Я. Саєнко и др. Новый технологический процесс получения сверхкрупных стальных слитков способом ЭШН ЖМ. Современная электрометаллургия. 2007. № 1. С.3 – 7

167. Махненко В.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я. и др. Математическое моделирование процессов укрупнения слитков из высоколегированных сталей и сплавов способом электрошлаковой наплавки жидким металлом в токоподводящем кристаллизаторе. Современная электрометаллургия. 2008. №4. С.30-37.

168. Медовар Б.И., Цыкуленко А.К., Медовар Л.Б. и др. Электрошлаковые процессы без расходуемых электродов. Пробл. Спец. Электрометаллургии. 1997. № 2. С.12-16.

169. Медовар Б.И., Медовар Л.Б., Чернец А.В. и др. Электрошлаковая наплавка жидким металлом - новый способ производства высококачественных композитных заготовок валков прокатных станов. Бюллетень «Черная металлургия». 2001. №4. С.42- 45.

170. Шабанов В.Б., Свиридов О.Н., Белобров Ю.В. Создание рабочего комплекса ЭШН с жидким присадочным материалом рабочих валков горячей прокатки. Автоматическая сварка. 1999. №9. С. 51-54.

171. Медовар Л.Б., Чернец А.В., Грабовский Ц.Ф. и др. Опыт изготовления и применения быстрорежущих валков ЭШН ЖМ. Пробл. Спец. Электрометаллургии. 2000. № 3. С.3-9.

172. Медовар Б.И., Медовар Л.Б., Саенко В.Я. Развитие электрошлакового процесса в специальной металлургии. Автоматическая сварка. 1999. №9. С. 7-12.

173. Медовар Л.Б., Чернец А.В., Цыкуленко А.К. Новые электрошлаковые технологии. Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра. Материалы Международной научно-технической конференции. 8-9 октября 2002. К. Політехніка. 2002. С.123-137.

174. Mitchell A, Smailer R. Practical aspects of electroslag remelting technology. International Metals Review. 1979. 24(5). 231-264.

175. Полішко Г.О. Наукові основи електрошлакового процесу з рідким металом для одержання суцільних і композитних злитків: Дис. ... д-ра. тех.

наук: спец. 05.16.02 "Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАНУ. К. 2020. 300 с.

176. Патент RU155761U1. Нерасходуемый электрод печи электрошлакового переплава. Кочкин С.В., Семин А.Е. Опубл. 20.10.2015, Бюл. № 29.

177. Чернышов Е.А. Специальные плавильные печи. Ч. 1. Электродуговые печи: учеб. пособие. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. 253 с.

178. АС СССР №344801. Способ автоматического управления установкой электрошлакового переплава. Миронов Ю.М., Алексеев В.Л., Гусев Б.Г. и др. Опубликовано 15.11.1974. Бюллетень № 6.

179. Патент RU 2483126. Печь электрошлакового переплава металлосодержащих отходов. Меркер Э.Э., Тимофеев П.В. Опубликовано 25.05.2013. Бюллетень № 15.

180. Патент RU 2603409. Печь электрошлакового переплава с полым нерасходуемым электродом. Кочкин С.В., Семин А.Е., Лосев Н. В. и др. Опубликовано 27.11.2016. Бюллетень № 33.

181. Верте Л.А. Магнитная гидродинамика в металлургии. М. Металлургия. 1975. 288 с.

182. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. М. Металлургия. 1974, 240 с.

183. Верте Л.А. МГД-технологии в производстве черных металлов. М. Металлургия, 1990. 120 с.

184. Дубоделов В.И. Состояние и перспективы развития исследований и разработок в области металлургической магнитной гидродинамики. Процессы литья. 1998. №3. С. 36-43.

185. Протокилов И.В. МГД-технологии в металлургии (Обзор). Современная электрометаллургия. 2011. №4. С.32–41.

186. Протокилов И.В., Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Титан. 2011. №4(34). С.40-44.

187. Ya. Kompan, I. Protokovilov, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. *Magneto hydrodynamics* Vol. 46 (2010), No. 3, pp. 317–324.

188. Компан Я.Ю., Протокивиллов И.В., Назарчук А.Т. Мелкозернистые слитки многокомпонентных титановых сплавов. Теория и практика металлургии. 2008. №2. С. 35–40.

189. Латаш Ю.В. Некоторые особенности электрошлаковой плавки расходующих электродов большого сечения. *Автоматическая сварка*. 1958. №6. с. 76-84.

190. Протокивиллов И. В., Петров Д.А., Порохонько В.Б. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходующего электрода из прецизионного сплава 29НЖ. *Современная электрометаллургия*. 2019. №4. С.4–8.

191. A. Kharicha, A. Ludwig, M. Wu. 3D Simulation of the Melting During an Industrial Scale Electro-Slag Remelting Process. in *LMPC 2011*. 2011. Nancy. France. pp. 41-48.

192. Медовар Б.И., Бойко Г.А., Сердюкова В.П. Физическое моделирование процесса ЭШП расходующих электродов. *Пробл. спец. электрометаллургии*. 1978. №9. С. 38-48.

193. Ю. Кожима, М. Като, Т. Тойода, М. Иноце. Исследование модели плавления расходующего электрода при ЭШП. *Электрошлаковый переплав*. 1975. вып. 3. С. 54-62.

194. Т. Гаммаль, И. Хаген, Р. Мюлленберг. Влияние электрического тока на каплеобразование при ЭШП. *Электрошлаковый переплав*. 1975. вып. 3. С. 62-69.

195. Медовар Б.И., Троянский А.А., Казимиров А.Н. и др. Исследование на модели характера оплавления расходующих электродов при выплавке горизонтальных слитков ЭШП. *Спец. электрометаллургия*. 1977. № 33. С. 28-32.

196. Троянский А.А., Дымнич А.Х., Медовар Л.Б., Рябцев А.Д. Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП. Современ. электрометаллургия. 2005. №4. С. 6-9.
197. Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б. Физическое моделирование процесса плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия. 2015. №1. С.8–12.
198. Протоковиллов И. В., Порохонько В. Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С.9–14.
199. I. Protokovilov, V. Shapovalov, V. Porokhonko, T. Beinerts. Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. Magnetohydrodynamics Vol. 57 (2021), No. 4, pp. 559–568
<https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>
200. Порохонько В. Б. Электрошлаковый переплав титановых сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів: Дис. ... канд. тех. наук: спец. спец. 05.16.02 "Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів". Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. Київ. 2021. 195 с.
201. Electrically Induced Vortical Flows. V. Wojarevičs, Ya. Freidbergs, E. I. Shilova and E. V. Sherbinin. Springer, 1989. 396 p.
202. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Емельяненко Ю.Г. и др. Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШП. Пробл. спец. электрометаллургии. 1982. вып. 17. С.3-8.
203. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки. І.В. Протоковілов, В.Б. Порохонько. Патент України на корисну модель UA 123715. Заявл. 26.07.2017, опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

204. Баландин Г.Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Кристаллизация в литейной форме. Изд. 2-е, переработ. и доп. "Машиностроение". 1973. 288 с.
205. Hasse Fredriksson, Ulla Åkerlind. Solidification and Crystallization Processing in Metals and Alloys. ISBN: 978-1-119-99305-6. 2012. 832 Pages.
206. Neil W Ashcroft, N David Mermin. Solid state physics. New York. 1976. Holt, Rinehart and Winston.
207. Y Zheng, M Wu, E Karimi-Sibaki, A Kharicha, A Ludwig. Use of a mixed columnar-equiaxed solidification model to analyse the formation of as-cast structure and macrosegregation in a Sn-10 wt% Pb benchmark experiment. International Journal of Heat and Mass Transfer. 122 (2018). 939–953.
208. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л. Машиностроение, 1976. 216 с.
209. Саратовкин Д.Д. Дендритная кристаллизация. М. Metallurgizdat. 1957. 128 с.
210. Merton C. Flemings. Our Understanding of Macroseggregation: Past and Present. ISIJ International. Vol. 40 (2000). No. 9. pp. 833–841.
211. Edward John Pickering. Macroseggregation in Steel Ingots: The Applicability of Modelling and Characterisation Techniques. ISIJ International. Vol. 53 (2013). No. 6. pp. 935–949.
212. Границы кристаллитов в литых металлах и сплавах. Мовчан Б.А. "Техніка". 1970. 212 с.
213. Y Zheng, M Wu, A Kharicha, A Ludwig. Simulation of macrosegregation in a large vertical continuous casting of steel. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 143(2016). doi:10.1088/1757-899X/143/1/012032
214. Овсиенко Д. Е. Зарождение и рост кристаллов из расплава. Киев. Наук. думка. 1994. 256 с
215. Межидов В. Х., Нурадинов А. С., Эльдарханов А. С., Таранов Е. Д. О механизме образования и роста кристаллических зародышей в расплавах. Процессы литья. 2010. № 6 (84). С. 3-7.

216. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. Подавление ликвационных процессов в крупных слитках. *Совр. электрометаллургия*. 2015. №1. С. 26–30.
217. Шаповалов В.А., Григоренко Г.М. Управление структурой металла в процессе кристаллизации. *Совр. электрометаллургия*. 2015. №2. С. 51-54.
218. L. Norhtcott. The influence of turbulence of the structure and properties of steel ingots. *The journal of the iron and steel institute*. v. 153. 1941.
219. Чернышов И.А. Электромагнитное воздействие на металлические расплавы. М. *Металлург*. 1963.
220. Розелнфельд С.Е., Юдин В.Б., Левин М.М. О методах динамического воздействия на кристаллизацию Отливок. *Литейное производство*. 1957. №11.
221. Эльдарханов А. С. Процессы кристаллизации в поле упругих волн. – М.: *Металлургия*, 1996. – 265 с
222. Добаткин В. И. , Эскин Г. И., Абрамов О. В. и др. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. Отв. ред. А. И. Манохин. Прогр. ком. «Физика, химия и механика поверхности». Ин-т физики твердого тела. М. Наука, 1986.
223. Haijie Zhang, Menghuai Wu, Christian M. G. Rodrigues at al. Dendrite fragmentation mechanism under forced convection condition by rotating magnetic field during unidirectional solidification of AlSi7 alloy. *Acta Materialia*, September 2022. DOI: 10.1016/j.actamat.2022.118391
224. Миронов Ю. М. Установки электрошлаковой металлургической технологии. М. ИНФРА-М. 2018. 404 с.
225. Миронов Ю.М. Основы управления электрошлаковыми печами. Чебоксары. Чув. гос. ун-т. 1987. 93 с.
226. Патент РФ №2432406. Способ получения слоистых слитков импульсно-электрошлаковым переплавом. А.В. Абрамов, А.Н. Ильгачев, Д.Г. Михадаров. Опубл. 27.10.2011.

227. Медовар Б.И., Шевцов В.Л., Маринский Г.С. и др. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве. Отв. ред. Б.И. Медовар. Киев. Наук. думка. 1978. 303 с.

228. Иваненко О.Г., Рошин В.Е., Повалоцкий Д.Я. Гидродинамика формирования капли при оплавлении заготовки в шлаке. Черная металлургия. Изв. Вузов. 1984. №4. С. 15–18.

229. Латаш Ю.В., Воронин А.Е., Николаев В.А. Производство высококачественных слитков способом порционной электрошлаковой отливки. Сталь. 1975. № 11. С. 999-1002.

230. Патон Б.Е., Латаш Ю.В., Воронин А.Е. и др. Порционная электрошлаковая отливка слитков. Спец. электрометаллургия. 1973. Вып. 19. С. 24–29.

231. Латаш Ю.В., Воронин А.Е., Биктагиров Ф.К. и др. Крупные кузнечные слитки порционной электрошлаковой отливки. Электрошлаковый переплав. Киев. Наук. думка. 1987. Вып. 9. С. 78–84.

232. Electroflux – the success factor in electroslag remelting (ESR). Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.wacker.com/h/medias/6321-E-final-0416.pdf> (дата звернения 06.07.2020).

233. Подгаецкий В.В., Кузьменко В.Г. Сварочные шлаки. Киев: Наук. думка. 1988. 256 с.

234. Атлас шлаков. Справ. изд. Пер. с нем. М. Металлургия. 1985. 208с.

235. R. Nafziger. High Temperature Science. 5. 1973. pp. 414 – 422.

236. I. Protokovilov, V. Shapovalov, V. Porokhonko. Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure. Ironmaking & Steelmaking. 2021. Vol. 48, No. 1, 62–68. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>

237. Протоковиллов И.В., Порохонько В.Б., Гончаров И.А. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. Современная электрометаллургия. 2015. №3. С. 7-12.

238. Гельфгат Ю.М., Гуревич С.М., Компан Я.Ю. и др. Влияние магнитного поля на структуру сварных швов при электрошлаковой сварке титановых сплавов. *Магнитная гидродинамика*. 1973. №2. С. 155-157.

239. Магнитное управление электрошлаковым процессом. В.Д. Кузнецов, Н.К. Козаков, Л.М. Шальда. К. Вища шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1987. 64с.

240. Медовар Б.И., Ступак Л.М., Мохнач В.К., Латаш Ю.В. К вопросу электромагнитного воздействия на кристаллизацию слитка при ЭШП. *Проблемы специальной электрометаллургии*. 1993. № 4. С. 12-17.

241. Компан Я.Ю., Протоковиллов И.В. Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов. *Материалы Международной научно-технической конференции “Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра”*. 8-9 октября 2002. Киев. С.256–262.

242. Протоковиллов И.В, Компан Я.Ю. Вибрация расплава при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке (МЭП) в поперечном магнитном поле. II Всеукраинская научно-техн. конф. “Сварка и смежные технологии”. Сборник тезисов. Киев. 2003. С.58.

243. Kompan Y., Protokovilov I., Fautrelle Y., Gelfgat Yu., Wojarevics A. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. *Magneto hydrodynamics*. 2010. Vol. 46, No. 3, pp. 317–324.

244. Kompan Ya.Yu., Nazarchuk A.T., **Protokovilov I.V.** Burn-Resistant Titanium of MEM Technology For Aeroengines. *Materials Technology. Advanced Performance Materials*. 2006. Volume 21, Issue 2. Pages 80-84. Published online: 19 Jul 2013. <https://doi.org/10.1179/mte.2006.21.2.80>

245. Kompan Ya.Yu, Nazarchuk A.T., Protkovilov I.V. 6). Heat- Resistant titanium with intermetallic frame-dispersion strengthening. *TMS Annual Meeting*, 2006. pp. 57-66.

246. Медовар Л. Б., Троянский А. А., Саенко В. Я. и др. О новом подходе к конструкции камерных печей ЭСП. Современ. электрометаллургия. 2005. № 2. С. 15-17.

247. Scholz H., Biebricher U., Carosi A., Poggi D. An advanced pressurized electroslag remelting process approach at laboratory scale. 7th International Conference on High Nitrogen Steels. 2004. Ostend. Belgium. P. 317–322.

248. Крылов С.А., Евгенов А.Г., Макаров А.А., Тонышева О.А. Слиток электрошлакового переплава под давлением. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №3 (51). Ст. 03. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1076

249. Крылов С.А., Макаров А.А., Тонышева О.А., Мосолов А.Н. Исследование влияния качества расходуемого электрода на технологический процесс электрошлакового переплава под давлением высокоазотистых сталей. Труды ВИАМ. 2018. №9 (69). С. 3-11

250. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. Чернега Д.Ф., Богушевський В.С., Готвянський Ю.Я. та ін. за ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського. К. Вища школа. 2006. 503 с. ISBN 966-642-310-3.

251. Куцова В.З., Камкін В.Ю., Кнапинський М.Г. та ін. Технологія виплавки чистої сталі та особливості позапічної обробки. Теорія і практика металургії. №3. 2019. С. 5-13.

252. Дрозд І.Г., Прилуцький М.І., Грищенко С.Г. Технологія отримання високоякісної сталі методом циркуляційного вакуумування. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. 2009. С. 84-89.

253. Линчевский Б. В. Вакуумная металлургия стали и сплавов. М. Металлургия. 1970. 258 с.

254. ALD Vacuum Technologies. Electro Slag Remelting Processes and Furnaces. Електронний ресурс. Режим доступу: https://www.ald-vt.com/wp-content/uploads/2018/04/ESR_Electro_Slag_Remelting.pdf

255. Yu Liu, Zhao Zhang, Guangqiang Li, Yang Wu, Deming Xu, Baokuan Li. Investigation of fluoride vaporization from $\text{CaF}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ slag for vacuum electroslag remelting. *Vacuum*. Volume 158. 2018. Pages 6-13.

256. Yu Liu, Xijie Wang, Guangqiang Li, Xuechi Huang, Qiang Wang, Baokuan Li. Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. <https://www.jmrt.com.br/en-pdf-S223878541931484X>

257. Yu Liu, Xijie Wang, Guangqiang Li, Qiang Wang, Zhao Zhang, Baokuan Li. Role of vacuum on cleanliness improvement of steel during electroslag remelting. *Vacuum*. Volume 154. 2018. Pages 351-358.

258. Xuechi Huang, Baokuan Li, Zhongqiu Liu, Mengzhen Li. Numerical study on the effect of vacuum on oxygen transfer in electroslag remelting process. *Vacuum*. Volume 172. February 2020.

259. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др. Электронно-лучевая плавка. Киев. Наукова думка. 1997. 265 с.

260. Рашев Ц. Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением. София: Изд-во БАН «Проф. Марин Дринов». 1995. 268 с.

261. Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАНУ (2021). Звіт НДР "Дослідження процесів плавлення та кристалізації металу при плазмово-дуговій та електрошлаковій виплавці злитків із відходів тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазмово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену". 241 с.

262. Титан. Гармата В. А., Петрунько А. Н., Галицкий Н. В. и др. М. Металлургия, 1983. 559 с.

263. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Саенко В.Я. и др. Переплавы губчатых титановых расходуемых электродов методами ЭСП и ДСП. Пробл. спец. электрометаллургии. 1992. №2. С.7-11.

264. Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. и др. Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана. Современная электрометаллургия. 2006. №4. С. 6–9.

265. Запорожский титано-магниевый комбинат. Технология производства. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ztmc.zp.ua/ru/o-kombinate/tekhnologiya-proizvodstva>.

266. ДСТУ 3079-95 (ГОСТ 17746-96). Титан губчастий. Технічні умови. – Введ. 01.01.1998. Державний комітет стандартизації метрології та сертифікації України. 26 с.

267. Протокилов И. В., Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Изготовление расходимых электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.8–11.

268. Протокилов И. В. Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. Современ. электрометаллурги. 2008. № 2. С. 13-16.

269. V. Shapovalov, I. Protokovilov, V. Porokhonko. Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. Procedia Structural Integrity. 2022. 36, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033>

270. Медовар Л. Б., Саенко В. Я., Рябинин В. А. Выбор флюсов для ДШП при получении слитков титановых сплавов. Современ. электрометаллургия. 2010. №1. С.8–11.

271. Патент України UA 55502, B23K35/36. Флюс для магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів. Компан Я.Ю., Протокилов І.В., Петров А.М. Опубл. 15.04.2003, бюл. №4.

272. Патент України UA 110591 C2. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів. Протокилов І.В., Порохонько В.Б. Опубл. 12.01.2016, бюл. № 1.

273. Протокилов И.В. Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. Современная электрометаллургия. 2011. №4. С.3–5.

274. Протокилов И.В., Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Материалы международной конференции “Ti-2011 в СНГ”. 25-28 апреля 2011. Львов. С. 144–147.

275. Протокилов И.В., Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Дослідження технологічних особливостей виплавки гамма - алюмінідів титану методом МЕР. Материалы VII науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”. 22-24 мая 2013, Киев. С.145.

276. Kompan Y.Y., Protokovilov I.V. Mojseev V.N. Magnetically-Controlled Electroslag Melting (MEM) of Aviation Alloys. Proceedings of the 9th World Conference on Titanium. St. Petersburg, 1999.

277. Александров А.В. Влияние технологии выплавки и обработки давлением на структуру и свойства полуфабрикатов из сплавов на основе никелида титана. А-реф. дис... канд. техн. наук: 05.16.09. МАТИ К.Э.Циолковского. М. 2011. 25 стр.

278. Северин А.Ю, Березос В.А., Пикулин А.Н. Деформационная обработка сплава Ti-Ni с эффектом памяти формы, полученного способом электронно-лучевой плавки. Совр. электрометаллургия. 2015. № 1. С.18-20.

279. Інститут електрозварювання ім. Е.О. Патона НАНУ. Звіт НДР "Розробити наукові засади технології отримання гомогенних з подрібненою структурою зливків нікелідів титану сплавів з ефектом пам'яті форми, із застосуванням магнітокерованої електрошлакової плавки". 2016. 170 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

NEXTMetals
ТОВ «НЕКСТМЕТАЛС ЮКРЕЙН»

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01
при Інституті електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
академіку НАН України Лобанову Л.М.

ІНФОРМАЦІЙНА ДОВІДКА
щодо практичного використання результатів дисертаційної роботи
к.т.н. Протоковілова Ігоря Вікторовича

Цією довідкою підтверджую, що починаючи з 2018 р. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України здійснює постачання окремих партій зливок титанових сплавів для ТОВ «НЕКСТМЕТАЛС ЮКРЕЙН».

Згадані зливки виготовляють в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона шляхом переплаву витратних електродів, пресованих з титану губчастого і легуючих елементів, в електрошлаковій печі камерного типу в атмосфері інертного газу з електромагнітним впливом на кристалізацію металу. Відповідальним виконавцем цих робіт з боку ІЕЗ ім. Є.О. Патона є к.т.н. Протоковілов І.В.

Підтверджую, що зливки титанових сплавів, отримані за даною технологією, не мають дефектів металургійного походження, характеризуються високою хімічною і структурною однорідністю і повністю відповідають Технічному завданню на їх виготовлення.

Генеральний директор
ТОВ «НЕКСТМЕТАЛС ЮКРЕЙН»



С.О. Максимов

м. Київ, вул.Є.Кошовця 36-Б
літера А, 3-й поверх,
тел: (044) 221-20-52; 068-362-99-00
Пошта: office1@nextmetals.com.ua

Додаток Б

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ**«КОНРАД ГРУП»**

код ЄДРПОУ 41635774, ІПН 416357726538
04119, м. Київ, вул. Дегтярівська, буд. 21, Літера «А» офіс 107/1
Р/р: UA 34 300528 0000026007455051104
в АТ «ОТП Банк» в м. Києві, МФО 300528
тел. +380994354589

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01
при Інституті електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України

ДОВІДКА

щодо використання результатів дисертаційної роботи
к.т.н. Протоковілова І.В. на тему "ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів
з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного
впливу"

Підтверджую, що ТОВ «Конрад Груп» співпрацює з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в галузі виробництва і постачання зливок і деформованих напівфабрикатів (пруток, лист) з прецизійних сплавів, зокрема сплаву 29НК.

Зливки прецизійного сплаву 29НК виготовляють в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона за технологією Магнітокерованої електрошлакової плавки, в якій реалізовані наукові результати і технічні рішення, викладені в дисертаційній роботі к.т.н. Протоковілова І.В.

Технологія дозволяє виплавляти зливки як з вихідної сировини, так і переробляти відходи прецизійних сплавів з отриманням кондиційного металу. Отриманий за даною технологією сплав 29НК, за хімічним складом повністю відповідає вимогам нормативних документів.

Дана довідка складена для надання до спеціалізованої вченої ради з захисту дисертацій і не може бути основою до фінансових претензій.

Директор



Краснощока Д.В.

Додаток В

Голові спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01
при Інституті електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України
академіку НАН України Лобанову Л.М.

ДОВІДКА

про використання в навчальному процесі результатів
дисертаційної роботи к.т.н. Протоковілова Ігоря Вікторовича

Наукові результати та технічні рішення, які отримані к.т.н. Протоковіловим І.В. в процесі роботи над дисертацією на тему "ЕШП високореакційних і прецизійних сплавів з нестационарними режимами електричного живлення і електромагнітного впливу", на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використовуються в матеріалах лекцій і практичних занять з дисципліни "Методи підвищення ефективності металургійного виробництва", під час навчального процесу підготовки аспірантів в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, за спеціальністю 136 «Металургія».

Гарант освітньої програми «Металургія»
заступник директора
ІЕЗ ім. Є.О.Патона НАНУ
д.т.н., чл.-кор. НАНУ



Віктор ШАПОВАЛОВ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз
Scopus та Web of Science***

1. **Igor Protokovilov**, Victor Shapovalov, Vitaly Porokhonko. (2021). Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure. *Ironmaking & Steelmaking*. Vol. 48, No. 1, 62–68. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>. (*Scopus, Web of Science*).

2. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko, T. Beinerts (2021). Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magnetohydrodynamics* Vol. 57, No. 4, pp. 559–568. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>. (*Scopus, Web of Science*).

3. V. Shapovalov, **I. Protokovilov**, V. Porokhonko. (2022). Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti-6-4 titanium alloy made by electroslag welding. *Procedia Structural Integrity*, 36, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033> (*Scopus*)

4. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. (2010). Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys // *Magnetohydrodynamics* Vol. 46, No. 3, pp. 317–324 (*Scopus, Web of Science*).

Статті у фахових виданнях

5. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковиллов И.В.** К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*. 2007. №4. С.3-7.

6. **Протоковиллов И.В.** Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов. *Современная электрометаллургия*. 2008. №2. С.13-16.

7. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протоковиллов И.В.** Мелкозернистые

слитки многокомпонентных титановых сплавов. Теория и практика металлургии. 2008. №2. С.35-40.

8. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Петров Д.А., Белов А.М., **Протокилов И.В.** Интерметаллидное жаропрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2009. №1. С.1-11.

9. **Протокилов И.В.** Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке. Современная электрометаллургия. 2011. №4. С.3–5.

10. **Протокилов И.В.** МГД-технологии в металлургии (Обзор). Современная электрометаллургия. 2011. №4. С.32–41.

11. **Протокилов И.В.**, Петров Д. А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Титан. 2011. №4(34). С.40-44.

12. **Протокилов И.В.** Дегазация электрода спрессованного из губчатого титана в процессе вакуумирования камерной печи ЭШП. Современная электрометаллургия. 2012. №1. С.12–15.

13. **Протокилов И.В.**, Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.8–13.

14. **Протокилов И.В.**, Скиба И. А., Петров Д. А. Технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки и термомеханической обработки никелида титана. Современная электрометаллургия. 2012. №2. С.17–20.

15. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия. Вісник НУК імені адмірала Макарова. 2012. №5. С.170-176 (електронне видання).

16. Ивочкин Ю.П., Тепляков И.О., **Протокилов И.В.** Физическое

моделирование электровихревых течений при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2013. №1. С.3–7.

17. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Изготовление расходуемых электродов для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки титана. Современная электрометаллургия. 2013. №3. С.8–11.

18. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Современная электрометаллургия. 2013. №4. С.21–26.

19. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. и др. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки. Автоматическая сварка. 2013. №12. С.45–50.

20. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б. и др. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием. Современная электрометаллургия. 2014. №2. С.10–14.

21. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2014. №3. С.7–15.

22. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование процесса плавления расходуемого электрода при ЭШП в условиях внешнего электромагнитного воздействия. Современная электрометаллургия. 2015. №1. С.8–12.

23. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Гончаров И.А., Мищенко Д.Д. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана. Современная электрометаллургия. 2015. №3. С.7–12.

24. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Порохонько В.Б., Петров Д.А. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭШП. Современная электрометаллургия. 2015. №4. С.3–8.

25. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б.

Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Современная электрометаллургия. 2016. №2. С.18–22.

26. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Электрошлаковая выплавка и термомеханическая обработка высокопрочного титанового псевдо β -сплава ТС6. Современная электрометаллургия. 2016. №3. С.16–20.

27. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А. Структура и свойства высокопрочного титанового сплава Ti-10-2-3 электрошлакового переплава. Современная электрометаллургия. 2017. №1. С.9–14.

28. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. Современная электрометаллургия. 2017. №3. С.9–14.

29. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Современная электрометаллургия. 2018. №2. С.45–51.

30. **Протокилов И.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А. и др. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка. Современная электрометаллургия. 2019. №1. С.11–16.

31. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа. Современная электрометаллургия. 2019. №2. С.3–6.

32. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Биктагиров Ф.К. та ін. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и подпитки. Современная электрометаллургия. 2019. №3. С.3–9.

33. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходного электрода из прецизионного сплава 29НК. Сучасна електрометалургія. 2019.

№ 4. С.4–8.

34. **Протокилов И.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме. Сучасна електрометалургія. 2020. № 2. С.3–9.

35. **Протокилов И.В.**, Порохонько В.Б., Петров Д.А. Вплив зовнішнього поздовжнього магнітного поля на електричні режими ЕШП. Сучасна електрометалургія. 2021. № 3. С.5–8.

Тези та матеріали доповідей на науково-технічних конференціях

36. Белов А.М, Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка (МЭП) титановых сплавов в продольном магнитном поле. Материалы IV всеук. н-тех. конф. молодых ученых “Сварка и смежные технологии”, 23-25 мая 2007г. С.97.

37. Компан Я.Ю., **Протокилов И.В.** Технологические аспекты получения однородных мелкозернистых слитков титановых сплавов. Материалы междунар. конф. HighMatTech “Материалы и покрытия в экстремальных условиях”, 15-19 октября 2007 г., Киев, С. 152.

38. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка титановых сплавов с дискретными воздействиями магнитных полей. Материалы междунар. конф. “Ti-2008 в СНГ”, 18-21 мая 2008 г. С.96-99.

39. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка в импульсных магнитных полях. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие”, 24-26 ноября 2008, Киев. С.212-213.

40. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., **Протокилов И.В.** и др. Возможность получения γ -алюминидов титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП). Материалы V Всеукр. науч. тех. конф. молодых ученых и спец. “Сварка и смежн. технологии”, 27-29 мая 2009 г. Киев. С.130.

41. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Yu. Gelfgat. Magnetically-Controlled Electroslag Melting (MEM) of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Conf. on Electro-magnetic processing of materials EMP 2009, Oct. 19-23, 2009, Germany. P.615.

42. Компан Я.Ю., **Протоковиллов И.В.** Электрошлаковые технологии плавки и сварки титановых сплавов с управляемыми гидродинамическими процессами. Материалы междунар. конф. “Ti-2010 в СНГ”, 16-19 мая 2010 г, Екатеринбург. С. 154–157.

43. Ya. Kompan, **I. Protokovilov**, Y. Fautrelle, Yu. Gelfgat, A. Bojarevics. Magnetically Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. Proceedings of the 6th Int. Scientific Colloquium Modelling for Material Processing, Riga, Sep. 16-17, 2010. P.85-90.

44. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Технологические аспекты получения сплавов с эффектом памяти формы системы Ti-Ni методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. XI меж. конф. “Эффективность реализации науч., ресурсного и пром. потенц. в соврем. услов.”, 10-14 фев. 2011г, п. Плавья, С. 68-70.

45. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Белов А.М. Получение слитков никелида титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Материалы VI Научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 25-27 мая 2011г. Киев. С.125.

46. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки. Матер. междунар. конф. “Ti-2011 в СНГ”, 25-28 апреля 2011 г, Львов. С. 144–147.

47. Порохонько В.Б., **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А. Особливості електрошлакового зварювання титану з використанням електромагнітних методів впливу. Матеріали II всеукр. науково-практичної конф. “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв. С. 19.

48. Порохонько В.Б., **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Бабич Л.М.

Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана. Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. С. 49.

49. Петров Д.А., **Протоковиллов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Дослідження технологічних особливостей виплавки γ -TiAl методом МЕР. Матеріали VII науч. техн. конф. молодих учених і спеціалістів “Сварка і смежні технології”, 22-24 мая 2013 г, Киев. С.145.

50. **Протоковиллов И.В.**, Петров Д.А., Назарчук А.Т., Бабич Л.М. Магнитоуправляемая электрошлаковая плавка никелида титана. Сборник тезисов междунар. конф. “Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее”, 25-26 ноября 2013, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев. С.195.

51. Ivochkin Y., Teplyakov I., Guseva A., Vinogradov D., Tokarev Y., **Protokovilov I.** Influence of the swirled electrovortex flow on the melting of the eutectic alloy IN-GA-SN. Proc. of the 9th Int. Conf. on Fundamental and Applied MHD. Riga, Latvia, June 16-20, 2014, Volume 1, P. 105-109.

52. Порохонько В.Б., **Протоковілов І.В.** Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій: матер. Всеукр. наук.-техн. конф. - Миколаїв: НУК, 2014. С. 94-96.

53. Петров Д.А., **Протоковиллов И.В.**, Порохонько В.Б., Бабич Л.М. Электрошлаковый переплав отходов прецизионных сплавов. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.150.

54. Порохонько В.Б., **Протоковілов І.В.** Фізичне моделювання процесу ЕШП в умовах дії зовнішніх електромагнітних полів. Матеріали VIII міжнар. конф. молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22 травня 2015 р, Київ. С.152.

55. **Igor Protokovilov.** Magnetically-Controlled Electroslag Melting of Titanium Alloys. The 34-th ISTC-Korea workshop on titanium materials and their

manufacturing technology. Pusan, Korea, November 26-27, 2015. P. 171-183.

56. **I. Protokovilov**, A. Nazarchuk, V. Porokhonko. ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. Proceedings of the Medovar memorial symposium. Kyiv, Ukraine, June 7-10, 2016, P. 110-115.

57. **Протоковилів І.В.**, Петров Д.А., Порохонько В.Б. Магнітоуправляема електрошлакова плавка інтерметалічних сплавів на основі титана. Тези доповідей IV Міжнар. конф. "Титан 2016: виробництво та використання в авіабудуванні". "МоторСіч". Запоріжжя, 2016 р. С. 32-36.

58. **I. Protokovilov**, V. Porokhonko, A. Nazarchuk. Control of metal solidification during ESR using the energy of the electric discharges. Proceed. of the 9-th Int. conf. of young scientists on welding and related technologies. Kyiv, May 23-26, 2017, P. 44-49.

59. V. Porokhonko., **I. Protokovilov**. Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field. Proceedings of the Int. conf. "Welding and related technologies - present and future". 5-6 December, 2018, Kyiv, Ukraine. P. 128.

60. **Протоковилів І.В.**, Назарчук А.Т., Петров Д.А., Порохонько В.Б. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. Киев, 2018. С. 128-133 с.

61. **I. Protokovilov**, V. Shapovalov, V. Porokhonko. Control of the crystallization of the ESR ingots using non-stationary power supply modes. Proceedings of the All-Ukrainian scientific and technical conference «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». Dnipro, Ukraine, November 22-24, 2022, P. 39-40.

Патенти

62. Патент України на винахід № 119931. Спосіб електрошлакового переплаву. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б., Шаповалов В.О., Назарчук О.Т. Опубл. 27.08.2019, бюл. № 16.

63. Патент України на корисну модель № 123715. Спосіб

магнітокерованої електрошлакової плавки. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.03.2018, бюл. №5.

64. Патент України на винахід № 110591 С2. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів. **Протоковілов І.В.**, Порохонько В.Б. Опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

65. Патент України на винахід № 97778. Спосіб магнітокерованої електрошлакової плавки титанових сплавів. Компан Я. Ю., Назарчук О. Т., **Протоковілов І.В.** Опубл. 12.03.2012, бюл. №5.