

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОРОХОНЬКО ВІТАЛІЙ БОГДАНОВИЧ

УДК 669.187.56

ДИСЕРТАЦІЯ

**ЕЛЕКТРОШЛАКОВИЙ ПЕРЕПЛАВ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПІД
ДІЄЮ ЗОВНІШНІХ ПОЗДОВЖНІХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ**

Спеціальність 05.16.02

«Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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



В.Б. Порохонько

Науковий керівник:



Протоковілов Ігор Вікторович

кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Порохонько В.Б. Електрошлаковий переплав титанових сплавів під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» (013 – Механічна інженерія). Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена визначенню закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх, постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробці технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Шляхом фізичного моделювання досліджено особливості плавлення витратного електроду, характеру формування і відриву крапель електродного металу та їх рух в шлаковій ванні при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів. Експерименти проводили за різними схемами із застосуванням змінного, постійного і модульованого струму плавки під дією зовнішнього постійного або імпульсного поздовжнього магнітного поля.

В результаті проведених експериментів встановлено, що під дією поздовжнього магнітного поля тороїдальні гідродинамічні течії в шлаковій ванні трансформуються в горизонтальні обертання навколо її осі, що призводить до деформації вільної поверхні шлакової ванни та поверхні поділу *шлакова - металева ванни*. Величина деформації вільної поверхні ванни залежить від швидкості обертання розплаву.

Фізичним моделюванням встановлено ряд закономірностей. Зокрема, застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу (на 20...30%), зменшення їх середньої маси (на 10...50%), збільшення траєкторій їх руху (на 30...160%) і терміну перебування в шлаковій ванні (з 0,2...0,25 до

0,4...0,8 с), а також до розосередження місць попадання крапель на дзеркало рідкої металевої ванни.

Основні результати фізичного моделювання були апробовані в умовах натурального ЕШП титану на модернізованому обладнанні під дією поздовжніх магнітних полів. Експериментально встановлено, що поздовжнє магнітне поле індукцією 0,2 Тл призводить до зменшення струму плавки (на величину до 20 %) і збільшення амплітуди його коливань, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. У випадку застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля зменшення струму плавки має циклічний характер, а величина цього падіння залежить від величини індукції і тривалості імпульсів магнітного поля і може сягати до 70...80%.

За допомогою аналізу осцилограм електричних режимів ЕШП під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл встановлено, що частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду - на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшується на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

Експериментально встановлено, що поздовжні магнітні поля при ЕШП призводять до суттєвого подрібнення макроструктури титанових зливків, при одночасному погіршенні якості формування їх бокової поверхні. Визначено оптимальні величини індукції постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, які забезпечують максимальну розорієнтацію та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм, при мінімальному погіршенні якості їх бокових поверхонь та відсутності внутрішніх дефектів. Встановлено, що для постійного магнітного поля такий діапазон індукції становить $B=0,12...0,22$ Тл, а для імпульсного - $B=0,18...0,3$ Тл при тривалості імпульсів $t_{imn}=0,9...2,5$ с, та пауз - $t_n = 6...15$ с.

Досліджено температурні залежності електропровідності, в'язкості та інтервалу твердіння сольових композицій на основі CaF_2 . На їх основі

розроблено сольовий, трикомпонентний флюс для ЕШП титану системи $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$.

Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів, режимів ЕШП злиwkів титанових сплавів у поздовжніх магнітних полях.

Способом ЕШП в поздовжньому магнітному полі отримано зливки титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4. Встановлено, що хімічний склад сплавів повністю відповідає вимогам діючих стандартів. При цьому метал злиwkів характеризується високою хімічною і фізичною однорідністю. Характеристики міцності дослідних зразків відповідають типовим значенням для даних сплавів, а характеристики пластичності і ударної в'язкості перевищують в середньому на 10...25 %.

Ключові слова: електрошлаковий переплав (ЕШП), магнітне поле, титанові сплави, фізичне моделювання, витратний електрод, плавлення, шлакова ванна, гідродинамічні течії, крапля, макроструктура, сольовий флюс.

ABSTRACT

Porokhonko V.B. Electroslag remelting of titanium alloys under influence of external longitudinal magnetic fields. - Manuscript.

The thesis for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty –05.16.02 “Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys” (013 –Mechanical Engineering). – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Dissertation is devoted to determination of regularities of processes of metal melting, transferring and crystallization at ESR in conditions of effect of external constant and impulse longitudinal magnetic fields and development of technical recommendations on their application for melting of titanium alloys.

The peculiarities of melting of the consumable electrode, the nature of formation and detachment of electrode metal droplets and their movement in the slag pool at ESR under the conditions of external magnetic fields are investigated

by means of physical modeling. The experiments were carried out according to different schemes using alternating, direct and modulated melting current under the action of an external constant or pulsed longitudinal magnetic field.

As a result of these experiments it was found that under the influence of a longitudinal magnetic field toroidal hydrodynamic flows in the slag pool are transformed into horizontal rotation around its axis, which leads to deformation of the free surface of the slag pool and the interface *slag-metal pools*. The amount of deformation of the pool free surface depends on the speed of its rotation.

By means of the physical modeling a number of laws was established. In particular, use of longitudinal magnetic field induction of 0.2...0.35 Tesla leads to a decrease in the frequency of detachment of electrode metal (by 20...30%), a decrease in their average weight (up to 10...50%), an increase in their trajectories of movement (up to 30...160%) and the period of passing through slag pool (from 0,2...0,25 to 0,4... 0,8 s), as well as to the dispersal of places where they fall on the mirror of the liquid metal pool.

The main results of physical modeling were tested in the conditions of real ESR on the modernized equipment for melting under the action of longitudinal magnetic fields. It was experimentally established that the longitudinal magnetic field induction of 0.2 Tesla leads to a decrease in the melting current (by up to 20%) and an increase in the amplitude of its oscillations, without direct change in other parameters of the process. If an impulse magnetic field is used, the reduction of the melting current has a cyclic nature, and the value of its reduction depends on the induction and the duration of its impulses and can be up to 70...80%.

By means of analysis of the electric modes of the ESR under the influence of an external longitudinal magnetic field induction of 0,2...0,28 Tesla it was established that the frequency of the electrode metal droplet detachment increases by 18...62 %, and the electrode melting rate - by 3...6 %. At the same time, the average diameter of metal droplets decreases by 5...16%, and their mass by 13...41%.

It was been experimentally established that the longitudinal magnetic fields at ESR lead to essential refinement of macrostructure of titanium ingots with simultaneous deterioration of the quality of their lateral surface. The optimum values of induction of direct and impulse longitudinal magnetic fields, which ensure the maximum disorientation and macrostructure refinement of ingots of diameter 70...140 mm with minimal deterioration in the quality of their surface and the absence of internal defects. It was found that for the direct magnetic field such induction range is $B=0,12...0,22$ Tesla, and for the pulse one - $B=0,18...0,3$ Tesla with the duration of pulses $t_{imp}=0,9...2,5$ s, and pauses - $t_p = 6...15$ s.

The temperature dependence of electrical conductivity, viscosity and solidification interval of salt compositions based on CaF_2 was investigated. On their basis the salt, three-component flux of $CaF_2 - SrCl_2 - Na_3AlF_6$ system for ESR of titanium was developed.

Technological recommendations on equipment, materials, regimes for ESR of ingots of titanium alloys in longitudinal magnetic fields were developed.

The pilot ingots of titanium alloys VT-6, TS6 and OT-4 were obtained by ESR method in the external magnetic field. It was found that the chemical composition of alloys fully meets the requirements of current standards. The ingot metal is characterized by high chemical and physical homogeneity. The characteristics of the strength of the test samples correspond to the typical values for these alloys, and the characteristics of ductility and impact elasticity exceed on average by 10...25%.

Key words: electroslag remelting (ESR), magnetic field, titanium alloys, physical modeling, consumable electrode, melting, slag pool, hydrodynamic flows, drop, macrostructure, salt flux.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. I. Protokovilov. Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure / I. Protokovilov, V. Shapovalov, **V. Porokhonko** // Ironmaking & Steelmaking. 2020. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>.
2. И.В. Протоковиллов. Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме / И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько** // Сучасна електрометалургія.–2020.– № 2. – С.3–9.
3. И.В. Протоковиллов. Влияние технологических параметров ЭШП на особенности плавления расходуемого электрода из прецизионного сплава 29НК / И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько** // Сучасна електрометалургія. – 2019. – № 4. – С.4–8.
4. И.В. Протоковиллов. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и підпитки / [И.В. Протоковиллов, **В.Б. Порохонько** Ф.К.Биктагирови и др.] // Современная електрометаллургия. – 2019. – №3. – С.3–9.
5. И.В. Протоковиллов. Получение титанового сплава ОТ4, легированного марганцем, в электрошлаковой печи камерного типа / И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько** // Современная електрометаллургия. 2019. – №2. – С.3–6.
6. И.В. Протоковиллов. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная електрометаллургия. – 2019. – №1. – С.11–16.
7. И.В. Протоковиллов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная електрометаллургия. – 2018. – №2. – С.45–51.
8. И.В. Протоковиллов. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей

/ И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия. – 2017. – №3. – С.9–13.

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

10. И.В. Протокивиллов. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана / [И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько**, И.А. Гончаров, Д.Д. Мищенко] // Современная электрометаллургия 2015 - №3 С. 7-12.

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

12. И.В. Протокивиллов. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП / И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия 2014 - №3 С. 7-16.

13. И.В. Протокивиллов. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием / [И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько**, А.Т.Назарчук и др..] // Современная электрометаллургия 2014 - №2. С.10-14.

14. И.В. Протокивиллов. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки / [И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько**, А.Т.Назарчук и др..] // Автоматическая сварка. – 2013. – №12. – С.45-50.

15. И.В. Протокивиллов. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки / И.В. Протокивиллов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Современная электрометаллургия. 2013. – №3, С. 8-11.

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

17. І.В. Протоковілов. 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.

18. І.В. Протоковілов. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Патент України на винахід UA 110591 С2. Заявл. 24.02.2015, опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

19. И.В. Протоковиллов. Управление формированием сварного соединения при электрошлаковой сварке титана / И.В. Протоковиллов, **В.Б. Порохонько** // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 134-136 с.

20. И.В. Протоковиллов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 128-133 с.

21. I. Protokovilov. Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field / I. Protokovilov, **V. Porokhonko** // Welding and related technologies – present and future. - International Conference.- 5-6 December, 2018, - Kyiv. P.128.

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

23. І. В. Протоковілов. Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Матеріали ІІІ всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. Миколаїв С. 94-96.

24. **В.Б. Порохонько.** Дослідження в'язкості і електропровідності флюсових композицій для ЕШП титану / [**В.Б. Порохонько**, А.М. Дученко, І.О. Гончаров, Д.Д. Міщенко] // Матеріали III всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. м. Миколаїв С. 91-94.

25. **В.Б. Порохонько.** Дослідження сольового флюсу на основі CaF_2 для електрошлакового переплаву титану / **В.Б. Порохонько**, А.М. Дученко, І.О. Гончаров // Матеріали конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології» 14-16 травня 2014р., Київ. С. 10.

26. І.В. Протоковілов. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Вісник НУК імені адмірала Макарова – 2012. – №5. – С.170-176. [електронне видання].

27. І.В. Протоковілов. Дослідження технологічних особливостей виплавки гамма - алюмінідів титану методом МЕР / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Материалы VII. науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. - С.145.

28. І.В. Протоковілов. Электрошлаковая сварка титановых сплавов с импульсным электромагнитным воздействием / І.В. Протоковілов, О.Т. Назарчук, **В.Б. Порохонько** // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології», 25-26 листопада 2013 р., Київ, С.146.

29. І.В. Протоковілов. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана / І.В.Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», 25-26 октября 2012 г., Киев – С. 49

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1. Технологічні особливості і проблеми ЕШП титанових сплавів	19
1.1. Сучасні способи виплавки зливків титанових сплавів.....	19
1.2. Технологічні особливості ЕШП титанових сплавів.....	24
1.3. Методи впливу на тепломасоперенесення і кристалізацію металу при ЕШП.....	32
1.4. Задачі і проблеми електромагнітного керування при ЕШП.....	41
Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень.....	48
РОЗДІЛ 2. Методики моделювання та експериментальних досліджень процесу ЕШП титану	50
2.1. Фізичне моделювання процесу плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів.....	50
2.2. Методика дослідження фізичних властивостей сольових флюсів для ЕШП титану.....	57
2.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу ЕШП титану під дією поздовжніх магнітних полів.....	60
Висновки до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3. Фізичне моделювання процесу плавлення витратного електроду при ЕШП під впливом магнітних полів	67
3.1. Аналіз факторів, що впливають на плавлення електроду та перенесення крапель електродного металу.....	67
3.2. Фізичне моделювання процесів плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу при ЕШП.....	71
3.2.1. Вплив магнітних полів на структуру гідродинамічних течій в шлаковій ванні.....	74
3.2.2. Вплив магнітних полів на деформацію поверхонь шлакової і металеві ванн.....	80
3.2.3. Дослідження процесів плавлення і крапельного перенесення електродного металу під дією зовнішніх магнітних полів.....	82
Висновки до розділу 3.....	99

РОЗДІЛ 4. Дослідження процесу ЕШП титану під впливом поздовжніх магнітних полів	102
4.1. Розроблення електромагнітної системи для ЕШП в поздовжньому магнітному полі.....	102
4.2. Дослідження процесу плавлення витратного електроду при ЕШП титану під впливом поздовжніх магнітних полів.....	106
4.3. Дослідження впливу поздовжнього магнітного поля на режими ЕШП, формування поверхні та структури титанових зливків.....	111
4.3.1. Вплив магнітного поля на режими ЕШП.....	112
4.3.2. Вплив магнітного поля на формування поверхні зливків ЕШП.....	117
4.3.3. Вплив магнітного поля на формування структури зливків ЕШП.....	125
Висновки до розділу 4.....	133
РОЗДІЛ 5. Розроблення технологічних рекомендацій щодо процесу ЕШП титану в магнітних полях та якість металу отриманих зливків	136
5.1. Оптимізація складу флюсу для ЕШП титанових сплавів.....	136
5.2. Технологічні рекомендації щодо матеріалів, обладнання та режимів ЕШП у магнітних полях.....	146
5.3. Хімічний склад та механічні властивості зливків титанових сплавів отриманих способом ЕШП в магнітних полях.....	154
5.3.1. Хімічний склад зливків титанових сплавів отриманих способом ЕШП в магнітних полях.....	156
5.3.2. Механічні властивості зливків титанових сплавів отриманих методом ЕШП в магнітних полях.....	160
Висновки до розділу 5.....	164
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	168
ДОДАТОК	192

ВСТУП

Актуальність теми. Завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, низькій густині і теплопровідності титан та сплави на його основі знаходять широке застосування в аерокосмічній, хімічній і суднобудівній галузях, в енергетичному та харчовому машинобудуванні, хімічній промисловості. Поширюється застосування титану при будівництві морських газо- і нафтовидобувних платформ та цивільному будівництві, в медицині та автомобілебудуванні.

Сьогодні найпоширенішим способом отримання зливок титанових сплавів є подвійний (інколи потрійний) вакуумно-дуговий переплав, стрімко розвивається технологія електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Крім того, для виплавки зливок титану застосовують плазмово-дуговий переплав, вакуумно-дугову гарнісажну плавку, індукційну плавку у вакуумі або аргоні, електрошлаковий переплав.

Кожен із цих способів виплавки титанових зливок має свої переваги і недоліки. Проте, проблема отримання хімічно однорідних зливок титанових сплавів із дрібнозернистою структурою, без дефектів ліквідаційного характеру залишається однією з пріоритетних. Особливо актуальна вона при отриманні зливок багатокомпонентних, складнолегованих сплавів, чутливих до хімічної і структурної неоднорідності.

Електрошлаковий переплав (ЕШП) має ряд важливих технологічних особливостей, які зумовлюють перспективність його використання для виплавки зливок титану. Це розосереджене джерело тепловиділення, відсутність випаровування легуючих компонентів з високою пружністю пари, добре формування поверхонь зливок, щільна макроструктура металу, можливість рафінування і легування металу шлаком та ін. Проте, при ЕШП титанових сплавів основною проблемою залишається отримання зливок з високим рівнем хімічної і структурної однорідності.

Ефективним інструментом безконтактного силового впливу на металургійний розплав при ЕШП є магнітні поля. Їх застосування дає

можливість впливати на плавлення витратного електроду, перенесення електродного металу і кристалізацію зливку. Проте, відомі методи електромагнітного впливу вимагають великих потужностей, а обладнання для їх реалізації громіздке, що є серйозною перешкодою на шляху їх практичного використання.

Проведений аналіз вказує на перспективність використання поздовжніх постійних і імпульсних магнітних полів для керування процесами плавлення та кристалізації металу при ЕШП. Їх застосування дозволяє активізувати гідродинамічний вплив на металургійну ванну при зменшенні масогабаритних характеристик магнітних систем.

Отже, актуальним завданням є визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробка технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота виконувалась в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт, у яких автор брав безпосередню участь як виконавець або керівник: № 38/4-П «Дослідження гідродинамічних та теплових механізмів впливу на кристалізацію металу зварних швів при електрошлаковому зварюванні (ЕШЗ) титану» (2013 р., № д/р 0113U002027); № 38,15/2-П «Дослідження в'язкості і електропровідності безкисневих сольових флюсів для електрошлакових процесів зварювання і переплаву титану» (2014 р., № д/р 0114U003147); № 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 зливків 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 зливків 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 переплаві 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 плазово-дуговій та електрошлаковій виплавці зливків із відходів тугоплавких, високореакційних і жароміцних металів та сплавів і плазово-індукційному вирощуванні крупних профільованих монокристалів вольфраму та молібдену" (2018 р.- до тепер, № д/р 0118U100514).

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП в умовах дії постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів і розробка технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Для досягнення мети, поставленої в дисертаційній роботі, необхідно вирішити наступні **задачі**:

- розробити «холодну» фізичну модель для дослідження процесів плавлення витратного електроду і перенесення електродного металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх поздовжніх магнітних полів;
- визначити закономірності впливу поздовжніх магнітних полів на особливості краплеутворення та перенесення металу при ЕШП;
- розробити лабораторне обладнання для проведення натурних експериментів з ЕШП титану під дією поздовжніх магнітних полів;
- дослідити технологічні особливості ЕШП титану під дією постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів та їх вплив на структуроутворення, хімічну однорідність та на механічні властивості отриманих зливків;
- визначити ефективні параметри електромагнітного впливу при ЕШП титанових сплавів та розробити технологічні рекомендації щодо процесу ЕШП під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

Об'єкт дослідження - ЕШП зливків титанових сплавів, отриманих під дією поздовжніх магнітних полів.

Предмет досліджень - закономірності процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП під дією поздовжніх магнітних полів, хімічна і структурна однорідність зливків титанових сплавів.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач і отримання основних результатів роботи використовували аналітичні та експериментальні методи досліджень. Дослідження металургійних процесів при ЕШП у магнітних полях здійснювали шляхом фізичного моделювання на моделі власної розробки, та шляхом натурних експериментів при виплавці титанових зливків на модернізованій електрошлаковій установці камерного типу. Дослідження в'язкості флюсів проводили на віскозиметрі ротаційного типу, а електропровідності - методом вимірювання активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, включених в мостову схему. Дослідження властивостей металу проводили із застосуванням стандартних методик металофізичних досліджень і методів механічних випробувань. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше шляхом фізичного моделювання процесу ЕШП встановлено, що створені під дією поздовжнього магнітного поля горизонтальні обертання розплаву шлаковій ванни призводить до деформації її вільної поверхні та поверхні поділу *шлакова - металева* ванни. Величина деформації вільної поверхні ванни залежить від швидкості обертання розплаву і при 350...420 мм/с досягає 10...12 мм. Крім того, застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу (з 0,62 до 0,75...0,9 Гц), зменшення їх середньої маси (з 1,4 до 0,7...1,28 г), збільшення траєкторій їх руху (з 30 до 40...80 мм) і терміну перебування в шлаковій ванні (з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с), а також до розосередження місць попадання крапель на дзеркало рідкої металевої ванни.

2. Вперше експериментально встановлено, що застосування при ЕШП постійного поздовжнього магнітного поля призводить до зменшення струму плавки і збільшення амплітуди його коливань, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. У випадку застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля, зменшення струму плавки має циклічний характер, а величина його падіння залежить від величини індукції і тривалості імпульсів магнітного поля і може сягати до 70...80%.

3. Вперше, шляхом натурних експериментів при ЕШП доведено, що під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду - на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшуються на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

4. Визначено ефективні параметри постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, необхідні для забезпечення розорієнтації та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм. Для постійного поля такий діапазон індукції становить 0,12...0,22 Тл, а для імпульсного - 0,18...0,3 Тл при тривалості імпульсів 0,9...2,5 с, а пауз 6...15 с.

Практичне значення отриманих результатів. Модернізовано обладнання для камерного ЕШП під впливом поздовжніх магнітних полів. Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів, режимів ЕШП зливків титанових сплавів у поздовжніх магнітних полях. Отримано дослідні зразки зливків титанових сплавів ВТ6, ТС6 та ОТ4, які характеризуються високими показниками хімічної та структурної однорідності, пластичності та ударної в'язкості.

Розроблено флюс для ЕШП титану, який забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливку, при зниженні питомих витрат електроенергії до 18,5%.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі мета і задачі досліджень, формування наукових положень, узагальнення результатів –

виконані автором особисто. Усі експериментальні дослідження проводились за участю автора. В публікаціях автору належить:

- планування та проведення експерименту, розробка технологічних режимів процесу ЕШП, обробка та аналіз результатів досліджень [1-3, 5, 6, 9, 13, 23,29];
- аналітичний підбір складу флюсів, підготовка, планування і проведення експериментів, обробка і аналіз експериментальних даних [10, 24, 25];
- аналіз і узагальнення літературних даних, участь в оформленні результатів дослідження [7, 12, 14-20, 29];
- розробка методики і обладнання для проведення експериментів, аналіз і узагальнення результатів фізичного моделювання [4, 8, 11, 21, 23];
- підготовка і проведення експериментальних досліджень та визначення оптимальних параметрів процесу [26, 28].

Апробація результатів роботи. Основні результати дисертаційної роботи доповідались й обговорювались на: п'ятій всеукраїнській міжгалузевій науково-технічній конференції “Зварювання та споріднені технології”, 18-20 квітня 2012 р, Київ, Україна; всеукраїнській науково-практичній конференції “Зварювання та споріднені процеси і технології”, 4-8 вересня 2012 р, Миколаїв, Україна; науково-технічній конференції “Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов”, 25-26 жовтня 2012 р., Київ, Україна; VII науково-технічній конференції молодих учених і спеціалістів “Сварка и родственные технологии”, 22-24 травня 2013 р, Кив, Україна; міжнародній конференції Зварювання та споріднені технології”, 25-26 листопада 2013 р., Київ, Україна; конференції “Зварювання та споріднені процеси і технології” 14-16 травня 2014р., Київ, Україна; III всеукраїнській науково-технічній конференції “Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій”, 9–13 вересня 2014 р. м. Миколаїв, Україна; VIII міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів “Зварювання та споріднені технології”, 20-22

травня 2015 р, Київ. Україна; 9-th International conference of young scientists on welding and related technologies, May 23-26, 2017, Kyiv, Ukraine; міжнародній конференції “Титан 2018: Производство и применение в Украине”, 2018 Київ, Україна; International Conference “Welding and related technologies – present and future”, 5-6 December, 2018, - Kyiv. Ukraine.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 29 публікацій, в тому числі 14 статей в спеціалізованих наукових виданнях, що внесені до переліку фахових видань України, 1 стаття внесена до реєстру міжнародних наукометричних баз [Scopus], 11 тез та доповідей в збірниках науково-технічних конференцій, 2 патенти на винахід України та 1 патент на корисну модель.

Структура та об’єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний об’єм роботи – 195 сторінок машинописного тексту, у тому числі 71 рисунок, 16 таблиць, список використаних джерел із 214 найменувань на 24 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ І ПРОБЛЕМИ ЕШП ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

1.1. Сучасні способи виплавки зливків титанових сплавів.

Титан і титанові сплави є перспективними конструкційними матеріалами, які завдяки високій питомій міцності, корозійній стійкості, низькій густині, високій біологічній сумісності знаходять все більш широке застосування в різних галузях сучасної промисловості і медицині [1-5].

Легування титану дозволяє значно підвищити його механічні характеристики, тому в промисловості використовують переважно титанові сплави а не чистий титан. Сьогодні розроблена велика кількість титанових сплавів, які по типу структури поділяють на α , псевдо- α , $\alpha+\beta$, псевдо- β , β - сплави [6]. Активно розробляються сплави нового покоління із дисперсійним зміцненням, інтерметалідні сплави та інші [1, 7-12].

Висока корозійна стійкість титану забезпечується завдяки утворенню на його поверхні щільної оксидної плівки TiO_2 . Однак при температурах вище 400 °С ця плівка руйнується і титан починає активно взаємодіяти з атмосферними газами. Із збільшенням в ньому вмісту [H], [O] і [N] погіршується технологічна пластичність металу, різко падає ударна в'язкість, відносне видовження і звуження, а також жароміцні властивості та термічна стабільність [2]. Тому процеси переплаву титану та сплавів на його основі потребують застосування спеціальних заходів для запобігання взаємодії рідкого металу з атмосферними газами.

Сьогодні найпоширенішим способом отримання зливків титанових сплавів залишається подвійний (в деяких випадках потрійний) вакуумно-дуговий переплав (ВДП) (рис. 1.1а) [13]. Таку схему використовують світові лідери виробництва титанових сплавів - компанії Timetal (США) [14], ВСМПО (Росія) [15]. В останній час стрімко розвивається технологія

електронно-променевого переплаву титану з проміжною ємністю (ЕПП) (рис. 1.1 б) [16-24]. Цей метод знайшов застосування в Україні, США, Китаї, Японії, та ін. Крім того, для виробництва титану застосовують такі способи як плазмово-дуговий переплав (ПДП) [25-28] (рис. 1.1 в), вакуумно-дугову гарнісажну плавку (ВДГП) [29] (рис. 1.1 з), індукційну плавку у вакуумі або аргоні (ІП) [30] (рис. 1.1 д), електрошлаковий переплав (ЕШП) [31, 54-57, 91], а також різні їх комбінації. Джерелом тепла при ВДП є електрична дуга постійного струму, яка горить між торцем електроду і поверхнею рідкого металу в кристалізаторі (рис 1.1 а). Під дією тепла, що виділяється дугою, торець витратного електроду плавиться і рідкий метал стікає в мідний, водоохолоджуваний кристалізатор, де формується зливочок. Витратні електроди виготовляють методом пресування шихти з титану губчастого і легуючих компонентів. Плавку проводять у вакуумі, підтримуючи тиск порядку $0,1 \dots 1,0$ Па.

Основними перевагами ВДП є видалення з металу газів (перш за все водню), послідовна направлена кристалізація зливку, що допомагає уникнути макроліквідації і зменшити мікроліквідацію.

Варто додати, що ВДП характеризується найвищою енергетичною ефективністю у порівнянні із іншими вищезгаданими способами спеціальної електрометалургії.

Кристалічна структура злиwkів, виплавлених ВДП, залежить від швидкості кристалізації і температурного градієнту на границі твердої і рідкої фаз. Відомо, що напрям росту дендритів співпадає з напрямом температурного градієнта. Із збільшенням глибини розплаву збільшується кут росту дендритів відносно осі зливку. В деяких випадках процес росту направлених дендритів може призупинитися і тоді середина зливку кристалізується хаотично, тобто в рівноосних зернах, що призводить до появи ліквідацій і мікродеформацій. Останні збільшуються із збільшенням відстані між осями дендритів.

Структура з дендритами, паралельними до осі зливу, є оптимальним результатом. Вона формується при відносно малих швидкостях переплаву. Проте в промислових умовах застосовують більш високі швидкості переплаву, що призводить до формування направленої структури. Це сприяє появі дефектів ліквідаційного характеру (тугоплавкі включення з високою [32] та низькою щільністю [26, 33] і т.д.). Ці дефекти можуть призводити до браку зливу, особливо у випадку складнолегованих титанових сплавів.

В деякій мірі вплинути на процеси кристалізації рідкого металу, тобто на керування хімічним складом і кристалічною структурою виплавлених зливок можна при технології ЕПП [18, 34-38]. Це досягається завдяки тому, що при ЕПП процеси плавлення витратного електроду і кристалізації зливу між собою розділені.

ЕПП реалізується у вакуумних установках (рис 1б). Плавлення металу відбувається за рахунок тепла, яке утворюється в результаті удару об його поверхню потоку електронів, сформованих в електронних гарматах. Кристалізація зливу, як і при ВДП, відбувається у мідному водоохолоджуваному кристалізаторі.

Проміжна ємність служить для забезпечення хімічної однорідності зливу, рафінування розплаву від домішок і тугоплавких включень [39-41]. На відміну від ВДП при такій схемі нема необхідності виготовляти витратні електроди. Натомість для цього можна використовувати безпосередньо шихтовий матеріал, подрібнені відходи, титанову губку, тощо. Таким чином можна виплавити зливи, сляби [42-43], а також порожнисті зливи [44]. До переваг ЕПП слід віднести високу ефективність рафінування металу від газів, що зумовлено високим вакуумом в камері електронно-променевої установки.

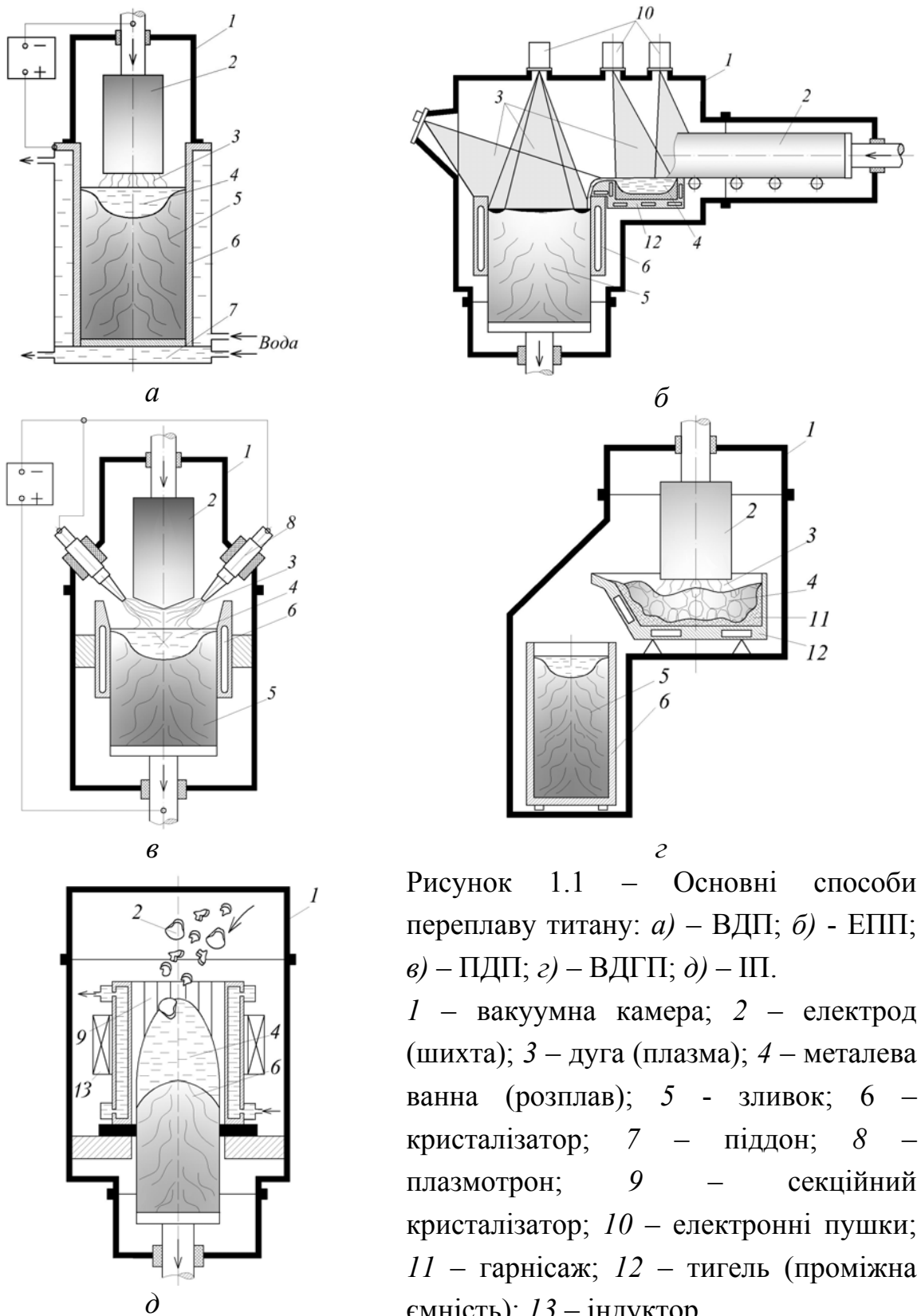


Рисунок 1.1 – Основні способи переплаву титану: а) – ВДП; б) - ЕПП; в) – ПДП; з) – ВДГП; д) – ІП.

1 – вакуумна камера; 2 – електрод (шихта); 3 – дуга (плазма); 4 – металева ванна (розплав); 5 - зливоч; 6 – кристалізатор; 7 – піддон; 8 – плазмотрон; 9 – секційний кристалізатор; 10 – електронні пушки; 11 – гарнісаж; 12 – тигель (проміжна ємність); 13 – індуктор.

До недоліків ЕПП титану належить неконтрольоване випаровування в процесі плавки легуючих елементів, перш за все з високою пружністю пари (алюміній, марганець, бор та ін.), що подекуди ускладнює виплавку цим

способом злиwkів багатокомпонентних, складнолегованих титанових сплавів [45-47]. До недоліків ЕПП ще слід віднести високі витрати електроенергії.

Наявністю незалежного джерела тепла (плазмотрона) характеризується також процес ПДП титану (рис 1в). Плазмотрон дає змогу регулювати час перебування металу в рідкому стані і як наслідок впливати на металургійні процеси (кристалізацію). Процес ПДП відбувається в атмосфері інертного газу, при підвищеному тиску над розплавом ванни, що дозволяє частково уникнути випаровування легуючих елементів [48]. Проте, в цьому випадку необхідно висувати суворі вимоги до якості плазмоутворюючих газів, для запобігання забрудненню титану киснем і воднем.

Промислове застосування і розвиток, зокрема в Росії на ВСМПО, знайшов метод вакуумно-дугової гарнісажної плавки (ВДГП) (або іншою термінологією - гарнісаж витратний електрод), (рис. 1.1 з) [15, 29]. ВДГП дає можливість переплавляти некомпактну шихту та залучати в виробництво велику кількість некомпактних відходів. Плавлення відбувається в гарнісажі з того ж самого сплаву, що переплавляють, внаслідок чого відсутня взаємодія рідкого металу із матеріалом тигля [49]. Даний спосіб дає можливість отримати зливки та сляби, різної конфігурації, близької по формі до готових виробів (деталей).

Ряд технологічних переваг при виплавці злиwkів титанових сплавів має метод ІІІ [30, 50]. Це, перш за все, можливість використання некомпактних (кускових) шихтових матеріалів різного хімічного складу, інтенсивне перемішування розплаву ванни, незначна взаємодія розплаву з матеріалом тигля, за рахунок його відтискання від стінок кристалізатора високочастотним магнітним полем. При ІІІ титанових сплавів використовують мідний водоохолоджуваний секційний кристалізатор (так званий холодний тигель) (рис. 1.1 д). За його допомогою можна отримувати зливки круглого і квадратного перерізу. В якості матеріалу можна використовувати шихтові компоненти, а також відходи виробництва, без значного їх подрібнення. Варто зазначити, що методом ІІІ отримують зливки

малого і середнього розмірів (до 300...350 мм). Проводити виплавку зливків великих діаметрів не завжди доцільно через необхідність застосування генераторів високих потужностей [51, 52].

В промисловості способи ІІІ та ВДГП головним чином використовують для попереднього компактування шихтових матеріалів або відходів виробництва у витратний електрод та рафінування металу. В подальшому їх використовують як хімічно однорідні електроди в процесах ВДП, ЕПП .

Кожен із розглянутих вище способів виплавки титанових зливків має свої переваги і недоліки. Комбінація цих методів в більшості випадків дозволяє отримувати титанові сплави необхідної якості. Проте проблема керування процесами плавлення і кристалізації металу для отримання хімічно однорідних зливків титанових сплавів із дрібнозернистою структурою, без дефектів ліквідаційного характеру, залишається однією з пріоритетних. Особливо актуальна вона при отриманні зливків багатокомпонентних, складнолегованих сплавів, чутливих до хімічної і структурної неоднорідності.

1.2. Технологічні особливості ЕШП титанових сплавів.

Принципова можливість ЕШП титану була встановлена в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона ще в 60-х роках минулого століття [53-54]. Тоді були отримані перші зливки сплавів ВТ1-0 і ОТ4 з властивостями, що не поступаються металу, отриманому у печі ВДП. Були встановлені переваги і перспективність ЕШП титану [53-55].

ЕШП титану, у порівнянні із розглянутими вище способами спеціальної металургії, має суттєві переваги.

При ЕШП джерелом нагріву є тепло, що виділяється в шлаковій ванні, в результаті проходження через неї електричного струму. Це розосереджене, відносно низькотемпературне (у порівнянні, наприклад, з електричною дугою і електронним променем) джерело тепловиділення, що зменшує неконтрольоване вигорання легуючих елементів, сприяє точному

"потраплянню" в заданий склад сплаву. Шлакова ванна виконує також захисні функції і зменшує взаємодію рідкого металу з атмосферними газами. В роботах [74, 79, 85, 91] встановлена можливість рафінування металу шлаком від шкідливих домішок і включень.

Зливки ЕШП характеризуються доброю поверхнею [54, 56], що спрощує (а інколи взагалі виключає) технологічні операції перед їх прокаткою та зменшує відповідні відходи.

До переваг ЕШП слід додати простоту і надійність технологічного обладнання, можливість отримання порожнистих злиwkів та злиwkів прямокутного перерізу (слябів) [56-61].

Проте ЕШП властиві і недоліки. На відміну від ВДП, останній в процесі переплаву не дозволяє видаляти водень. ЕШП характеризується великими витратами електроенергії, необхідністю виготовлення витратних електродів тощо.

У порівнянні із широко розповсюдженим процесом ЕШП сталі, процес ЕШП титану має ряд суттєвих особливостей, зумовлених, в першу чергу, високою хімічною активністю титану при високих температурах.

Перш за все, при ЕШП титану необхідно вживати спеціальні заходи для захисту рідкого металу і розігрітого до високих температур витратного електроду від взаємодії з атмосферними газами. Для цього пропонували використовувати обдув шлакової ванни інертним газом високої чистоти [54], застосовувати флюсовий затвор, із одночасною подачею інертного газу в плавильне середовище [65, 66, 69].

Подальші роботи показали, що зливки титану доцільно виплавляти в герметичних камерах із контрольованою атмосферою (рис. 1.2) [75, 76, 93]. По цій схемі повітря з камери попередньо видаляється за допомогою форвакуумного насосу до остаточного тиску $1...5 \times 10^{-2}$ мм.рт.ст., потім плавильне середовище заповнюється інертним газом.

Другою особливістю ЕШП титану є необхідність застосовування флюсів, які в своєму складі не містять оксиди. Наявність у флюсі, навіть в

невеликій кількості останніх, призводить до неприпустимого забруднення металу киснем [62]. Тому, в якості флюсів для ЕШП титану застосовують сольові флюси на основі фторидів та хлоридів лужноземельних металів [92].

Використання при ЕШП титану сольових флюсів обумовлює ще одну особливість, пов'язану з їх високою електропровідністю в розплавленому стані. Максимальна допустима робоча напруга згаданих флюсів переважно не перевищує 40...45 В. Тобто процес ЕШП титану характеризується пониженою напругою і більш високою (у порівнянні з ЕШП сталі) силою струму.

Також слід зазначити, що висока рідкотекучість сольових флюсів значно ускладнює практичну реалізацію схем переплаву титану з витяжкою зливку.

Ще одна особливість ЕШП титану пов'язана з високим електричним опором титанових сплавів ($45...160 \times 10^{-6}$ Ом \times см [63]). Внаслідок цього, в процесі переплаву відбувається значне падіння електричної напруги на витратному електроді і електричні режими на початку і в кінці процесу можуть суттєво відрізнятися. Це викликає необхідність корегування електричних режимів в процесі плавки задля збереження однакових умов плавлення електроду протягом всього процесу.

На рисунку 1.2 наведена класична схема процесу ЕШП титану в печі камерного типу. Плавлення витратного електроду, пресованого з губчатого титану і легуючих компонентів, відбувається в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі, в атмосфері інертного газу. Перевагами цієї схеми є надійність і простота реалізації, надійний захист не тільки металеві ванни, але й витратного електроду від взаємодії з атмосферними газами.

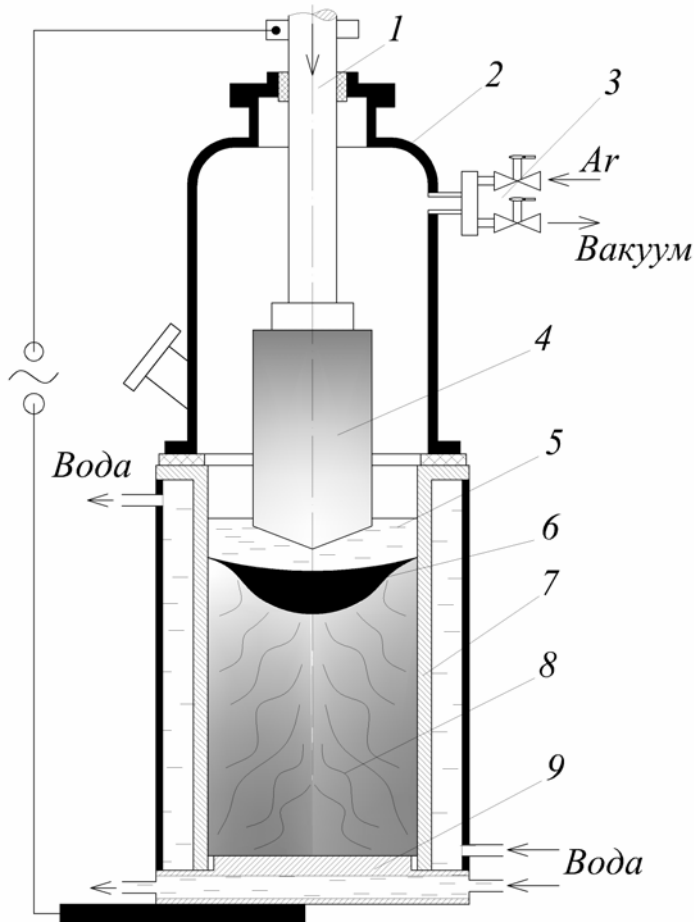


Рисунок 1.2 – Схема процесу ЕШП титану: 1 – шток; 2 – вакуумна камера; 3 – газовий затвор; 4 – витратний електрод; 5 – шлакова ванна; 6 – металева ванна; 7- кристалізатор; 8 – зливоч; 9 – піддон.

Схема камерного переплаву була запропонована ще в перших роботах по ЕШП титану [53-55]. Проте, багато подальших досліджень було спрямовано на вивчення можливостей виплавки титанових зливок в безкамерних електрошлакових печах.

В роботах [65, 66] проведено ряд експериментів по ЕШП титану із використанням відкритих печей. Показано, що найбільш низький вміст газів в зливках ЕШП титану, виплавлених в безкамерних печах, можна забезпечити у випадку застосування флюсового затвору із одночасною подачею інертного газу в плавильне середовище. Застосування флюсового затвору дозволяє в процесі переплаву створити в плавильному середовищі невеликий залишковий тиск, що запобігає проникненню кисню, водню, азоту із атмосфери.

Роботи [67-71] присвячені дослідженням розробленого в ІЕЗ ім. Є. О. Патона способу дугошлакового переплаву (ДШП). При ДШП (рис. 1.3) між торцем витратного електроду та шлаковою ванною горить дуга, тобто застосовується два джерела нагріву – дуга і рідкий електропровідний шлак. Найважливішими перевагами способу є менші (в 2-3 рази) питомі витрати шлаку та в 1,5 рази менші витрати електроенергії.

Ефективність флюсового затвору досліджували в умовах ДШП та ЕШП титанового сплаву марки ПТ-3В [69]. Отримані результати свідчать про те, що механічні властивості металу відповідають стандарту для зливок ВДП, але твердість НВ при ДШП дещо вища. Це свідчить про необхідність вдосконалення конструкції флюсового затвору для ДШП задля підвищення ефективності захисту від атмосферних газів. Проте, використання флюсового затвору є перспективним напрямком у виготовленні титанових зливок в безкамерних електрошлакових печах [70].

Показано, що технологія ДШП дозволяє отримувати великотонажні зливки титану вагою до 2,5...5 тон і більше [68, 69, 97]. Дослідження механічних властивостей товстих титанових плит, отриманих шляхом прокату зливку ВТ1-0, прямокутного перерізу масою 4,5 т показали їх відповідність вимогам ГОСТ 23755-79.

В роботі [71] досліджено методи виготовлення витратних електродів з губчастого титану для ЕШП (ДШП). Було застосовано такі методи, як холодне пресування на гідравлічному пресі, холодне ізостатичне пресування та пресування титанової губки вибухом. Наголошується, що ДШП пресованих із губки витратних електродів дозволяє отримувати за один переплав зливки, що по якості не поступаються металу подвійного ВДП.

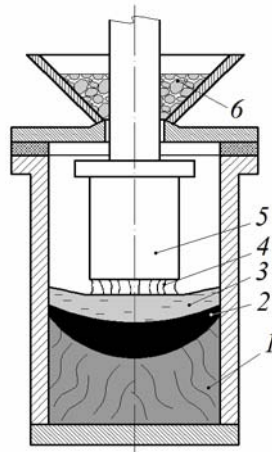


Рисунок 1.3 – Схема процесу ДШП з застосуванням флюсового затвору [69]: 1 – зливоч; 2 – металева ванна; 3 – шлакова ванна; 4 – електрична дуга; 5 – витратний електрод; 6 – флюсовий затвор.

В роботах [56, 64] запропоновано дещо інший підхід до реалізації ЕШП титану, який полягає в переплаві некомпактних матеріалів в струмопідвідному кристалізаторі (рис. 1.4). Перевага цього методу полягає в відсутності жорсткої залежності між температурним режимом і продуктивністю процесу, що дозволяє в широких межах змінювати швидкість плавки і форму металеві ванни [90]. Можливість отримання плоскої форми ванни дозволяє боротися з сегрегаційними явищами. Така технологія є можливою для переплаву титанової губки, зокрема для виготовлення витратних електродів і їх подальшого переплаву [64]. Підкреслюється перспективність такого підходу для отримання титанових зливків, без складного процесу пресування витратних електродів.

В багатьох публікаціях підкреслюється рафінуюча роль шлаку в процесі переплаву титану. Зокрема, в Донецькому національному технічному Університеті проводились дослідження процесу ЕШП титану з використанням так званих “активних” шлаків системи $\text{CaF}_2\text{-Ca}$ в печах камерного типу [74-78, 79, 85, 96].

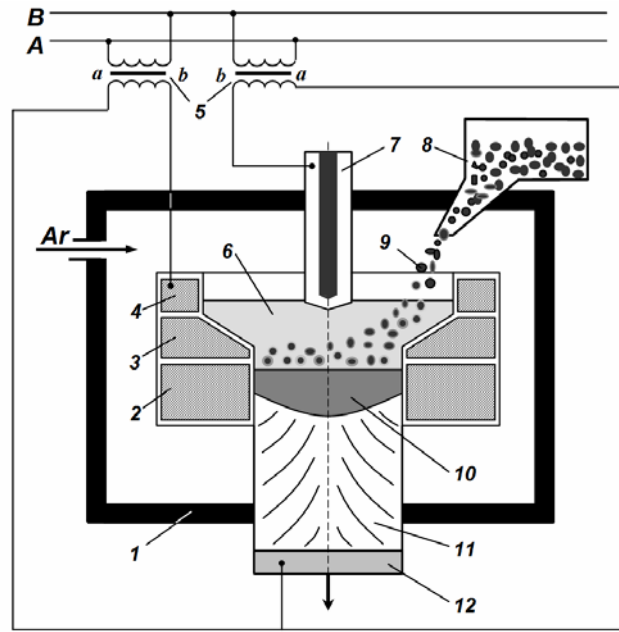


Рисунок 1.4 – Схема процесу ЕШП титанової губки в струмопідвідному кристалізаторі [56]: 1 – камера печі; 2, 3, 4 – секції кристалізатора; 5 – джерело живлення; 6 – шлакова ванна; 7 – невитратний електрод; 8 – дозатор; 9 – титанова губка; 10 – металева ванна; 11 – зливоч; 12 – піддон.

В роботі [79] для експериментів використовували пресовані електроди діаметром 60 і 40 мм, виготовлені із титанових матеріалів, забруднених киснем (близько 0,11%). Результати проведеного хімічного аналізу свідчать, що ЕШП в атмосфері аргону під флюсом 100% CaF_2 дозволяє переплавляти титан без додаткового забруднення металу азотом і киснем. Введення в шлак металевого кальцію забезпечує рафінування титану від азоту та кисню, відповідно на 10...15 і 20...25% [79].

В роботі [94] досліджували ефективність розчинення високоазотистих включень при ЕШП з застосуванням флюсів CaF_2 -2...5%Ca (мас. %). Переплавляли витратні електроди, в які були введені високоазотисті включення з вмістом 30 і 49 ат.% азоту.

Встановлено, що швидкість розчинення азотованої губки з вмістом азоту 30 ат.% становить 200...2000 мкм/с в той час, як при ВДП цей показник дорівнює 100...130 мкм/с. Тобто відбувається значне підвищення швидкості розчинення включень, у порівнянні з технологією ВДП.

Аналогічні результати підвищення ефективності розчинення включень в умовах ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі зафіксовані в роботі [81].

Проте підкреслюється, що використання зазначених заходів не дозволяє вирішити проблему повного розчинення високоазотистих включень. Потрібно використовувати додаткові механізми, які б інтенсифікували взаємодію шлак-метал і подовжували термін цієї взаємодії.

Окрім рафінування титану, в роботах [72, 73, 95] показано принципову можливість легування титану із шлакової ванни в процесі ЕШП. Легування здійснюється за рахунок введення в шлак легуючих компонентів, сильних розкислювачів і модифікаторів, таких як кальцій і рідкоземельні метали (оксиди скандію, церію). Наголошується, що легування титану рідкоземельними металами забезпечує суттєве підвищення його якості і технологічних властивостей.

В літературі зустрічається чимало публікацій щодо виплавки складнолегованих титанових сплавів електрошлаковим способом [82-89]. В роботах [84, 86, 88] показана можливість виплавки зливків інтерметалідних сплавів на основі алюмініду (Ti_3Al і $TiAl$) і нікеліду титану ($TiNi$), а в роботах [87, 89] - перспективність ЕШП для отримання високоміцних і жароміцних титанових сплавів.

Незважаючи на достатню кількість публікацій, що вказують на певні переваги ЕШП титанових сплавів, останній досі не знайшов широкого практичного застосування. Автори робіт [89, 93] зазначають, що однією з причин, що стримує розвиток ЕШП титану (і особливо складнолегованих титанових сплавів), є умови кристалізації зливків, які призводять до формування грубої крупнокристалічної структури, із стовпчастими кристалітами, витягнутими в напрямку тепловідведення.

Така будова зливку сприяє утворенню в металі різного роду неоднорідностей і ліквацийних дефектів, наявність яких збільшується з підвищенням ступеня легування металу і перетину виплавленого зливку. Крім того, грубозернистий метал погано піддається деформаційній обробці.

Для досягнення високих механічних властивостей і полегшення процесу деформації литого металу необхідно отримувати зливки із рівноосною дрібнозернистою структурою. Особливо актуальне це завдання при отриманні багатокомпонентних складнолегованих титанових сплавів, дуже чутливих до хімічної неоднорідності і що погано піддаються деформації.

Таким чином, розробка методів керування процесом первинної кристалізації злиwkів є пріоритетним завданням подальшого розвитку електрошлакових технологій виплавки титанових сплавів.

Методи впливу на кристалізацію металу злиwkів при ЕШП будуть розглянуті в наступному параграфі.

1.3. Методи впливу на тепломасоперенесення і кристалізацію металу при ЕШП.

Сьогодні відомі різні способи і технологічні прийоми керування плавленням і кристалізацією металу злиwkів при ЕШП, які ґрунтуються на застосуванні зовнішніх фізичних впливів і металургійних механізмів (рис.1.5). Це введення в ванну частинок-модифікаторів [58, 59, 98-101], мікро- і макрохолодильників (інокуляторів) та армуючих добавок [58, 59, 102, 103], створення у ванні пружних коливань і різних механічних вібрацій [58, 59, 104-108], коливання і обертання витратного електроду [109, 110], продування металургійної ванни газами (барботування) [111-114], імпульсне електроживлення [115-118], вплив зовнішніми магнітними полями [57, 91, 93] та ін. Також широкі можливості керування кристалізацією відкриває використання різних схем переплаву, із застосуванням струмопідвідного кристалізатора [119-125].



Рисунок 1.5 – Способи впливу на кристалізацію зливоків ЕШП.

Одним з найбільш простих способів подрібнення кристалічної структури литого металу є введення в нього нерозчинних частинок-модифікаторів, що стимулюють утворення центрів кристалізації. Найбільше застосування для цього знайшли рідкоземельні метали, бор, кальцій, магній, барій, титан, з'єднання типу нітридів, оксидів, боридів, карбідів та ін.

Способи модифікування металу при ЕШП досить докладно описані в роботах [58, 59, 98-103]. Слід зазначити, що використання модифікаторів і інокуляторів може призводити до зміни хімічного складу металу, що неприпустимо для широкого класу спеціальних сталей і сплавів, у тому числі складнолегованих титанових сплавів, хімічний склад яких суворо регламентований.

Тому при електрошлакових технологіях знайшли застосування способи зовнішнього фізичного впливу на кристалізацію металу, які не змінюють його хімічний склад і не вносять сторонні домішки.

Одним з таких способів є створення механічної вібрації металу, що кристалізується. Вібрація і викликані нею пружні коливання руйнують утворені в переохолодженій рідині кристали, збільшуючи тим самим число центрів кристалізації. Позитивна роль вібрацій і віброімпульсних впливів на

якість металу підкреслюється в роботах [58, 59, 104-108]. Показано, що метал, який закристалізувався під впливом пружних коливань, характеризується більш рівноосними зернами, відрізняється рівномірним розподілом зміцнюючих фаз і суттєвим зменшенням розміру мікрозерна.

При ЕШП використовуються як низькочастотні коливання (0,5 ... 100 Гц), так і ультразвукові коливання частотою 20 кГц і вище [58]. Літературні дані вказують, що ступінь диспергування литої структури збільшується зі збільшенням частоти коливань, при цьому руйнування транскристалітності досягається при частоті 40 ... 50 Гц і вище [58].

Є широкий спектр методів введення в ванну механічних коливань, деякі з яких наведено на рис. 1.6.

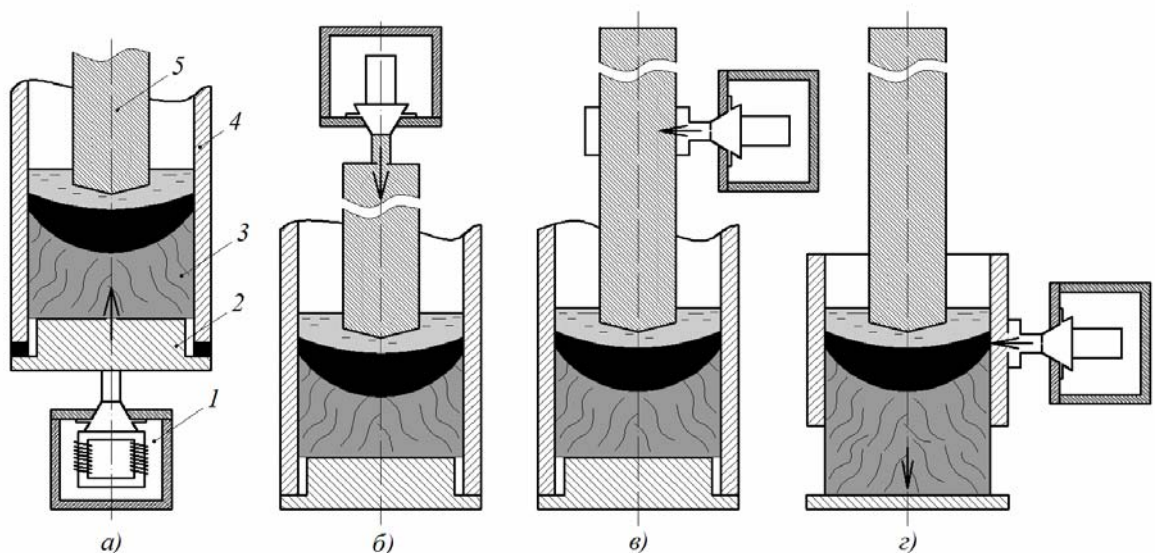


Рисунок 1.6 – Схеми введення механічних коливань при ЕШП через піддон (а), витратний електрод (б, в), кристалізатор (з): 1 - генератор пружних коливань; 2 – піддон; 3 – зливоч; 4 – кристалізатор; 5 – витратний електрод.

Для їх створення застосовують електрогідроімпульсні, електрогідролічні, електромагнітні, пневматичні, магнітострикційні, механічні та ін. перетворювачі [108]. Найбільш поширеним є метод введення коливань через піддон (рис. 1.6 а). Його особливістю є те, що симетричні

пружні коливання передаються через піддон і зливоч безпосередньо на фронт кристалізації металу, збільшуючи ефективність його обробки. Проте слід враховувати, що із збільшенням в процесі переплаву висоти зливку змінюється резонансна частота коливальної системи, а самі коливання затухають [106].

При введенні коливань в ванну через витратний електрод (рис. 1.6 б, в), крім впливу на кристалізацію, з'являється можливість впливати на процеси плавлення і краплеутворення електродного металу. Так, в роботі [105] показано, що створення ультразвукових коливань в електроді сприяє збільшенню середнього часу утворення краплі і її величини. При цьому, розвиток кавітаційних процесів сприяє поліпшенню умов реагування краплі з розплавленим шлаком і забезпечує підвищення ступеня рафінування металу. Також встановлено факт підвищення швидкості плавлення електроду на 20-30%, при накладенні поперечних (рис. 1.6 в), і на 5-10% - поздовжніх (рис. 1.6 б) ультразвукових коливань. Наголошується, що при однаковому якісному впливі, ефективність згинальних коливань вище, ніж поздовжніх.

Слід підкреслити, що застосування ультразвукових коливань при ЕШП може мати і негативні наслідки, які полягають у погіршенні формування поверхні зливків, зниження ефективності очищення металу від неметалевих включень та утворення порожнистості структури, по висоті зливку [58, 104].

Відомо, що значна частина тепла, що надходить в металеву ванну, передається з краплями електродного металу. Тому місце розташування джерела краплеутворення (відриву краплин) суттєво впливає на форму металевої ванни і умови кристалізації металу.

Зсув зони тепловиділення від центру до периферії ванни може бути досягнуто за рахунок обертання витратного електроду (рис. 1.7) [109, 110]. Суть способу полягає в наданні електроду однонаправленого або реверсивного обертання навколо своєї осі (рис. 1.7 а, б), або осі ванни, при асиметричному розташуванні електроду (рис. 1.7 в). Швидкість обертання

електроду залежить від його діаметру і для електродів діаметром 40...250 мм становить зазвичай 30...90 об/хв [109-110].

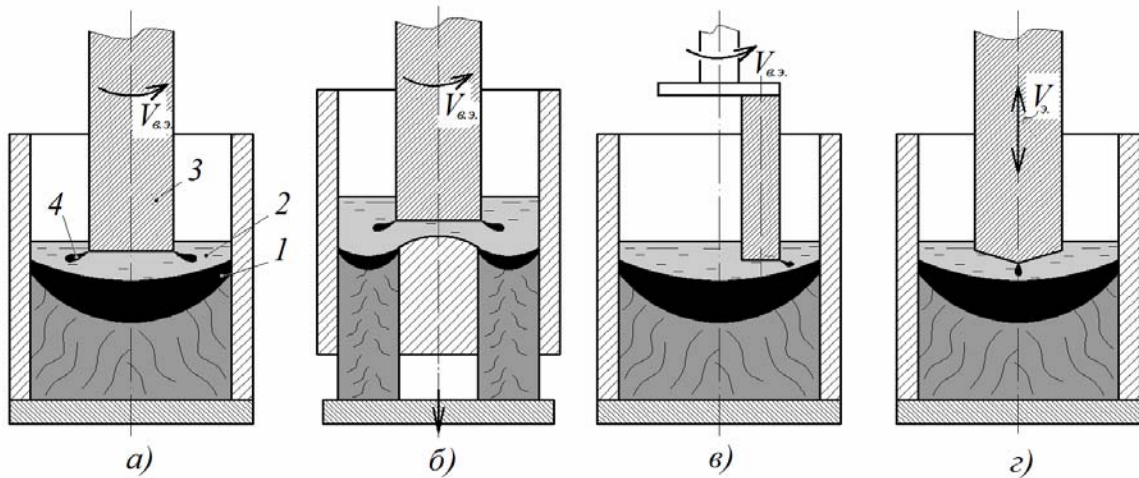


Рисунок 1.7 – Схеми ЕШП з обертанням (а-в) і зворотно-поступальним переміщенням (г) витратного електроду: 1 - металева ванна; 2 – шлакова ванна; 3 – витратний електрод; 4 – крапля електродного металу.

Обертання електроду призводить до появи відцентрової сили, за рахунок чого досягається периферійний відрив крапель металу від торця електроду і розосередження місця їх падіння в металеву ванну. Зазначені ефекти позитивно впливають на форму і глибину металевої ванни і, як наслідок, на напрямок росту кристалів. Фронт кристалізації стає більш плоским, що забезпечує зростання кристалів в осьовому напрямку. При цьому, зменшується відстань між осями кристалів I-го і II-го порядку [110].

Також наголошується, що при ЕШП, з обертанням електроду, рафінуюча здатність процесу збільшується, оскільки плівка на торці електроду більш рівномірна, товщина її менше, а краплі проходять більш довгий шлях в шлаку. У роботі показано [109], що при правильно обраній швидкості обертання витратного електроду можна досягнути підвищення продуктивності процесу ЕШП (до 40%) і знизити витрати електроенергії (до 30%).

Підкреслюється, що при переплаві різних сплавів потрібний індивідуальний вибір швидкості обертання тому, що при швидкості

обертання, вище оптимальної, може різко зростати вміст неметалічних включень дрібного розміру [109].

Зустрічається чимало публікацій, де примусове механічне перемішування розплаву і вплив на кристалізацію металу здійснюють за рахунок барботування шлакової і металевої ванн, шляхом їх продувки струменями газів [61, 108, 111-114]. Для реалізації цієї операції використовуються різні технологічні схеми переплаву, з подачею газу через трубчасті елементи, розміщені уздовж бічної поверхні електроду (рис. 1.8 *a*), в порожнину електроду (рис. 1.8 *б*), в зазор між стінкою кристалізатора і зливком (рис. 1.8 *в*), в отвори стінки кристалізатора (рис. 1.8 *з*), в порожнину дорна, при виплавці порожнистих зливків (рис. 1.8 *д*) та ін. Для продувки застосовуються переважно інертні гази, азот (є відомості про використання суміші азоту і кисню) [114]. При виплавці високореакційних металів, таких як титан і його сплави, допускається використання тільки інертних газів (аргон, гелій).

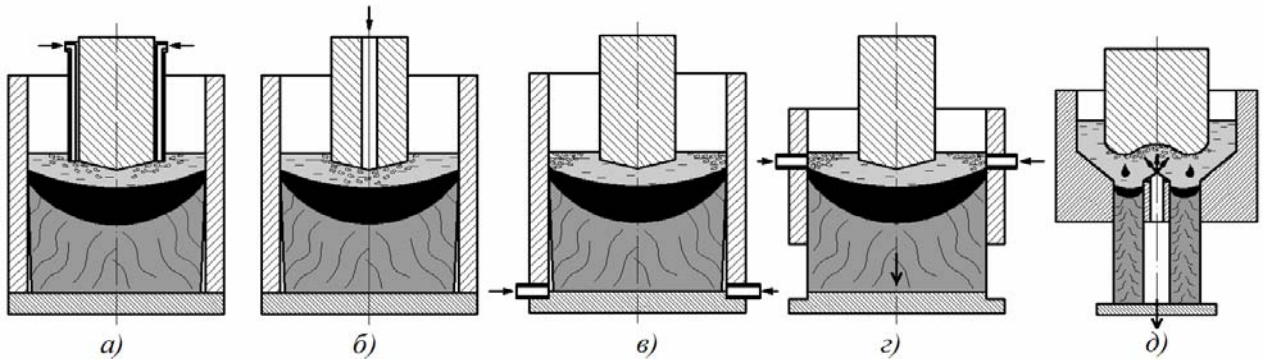


Рисунок 1.8 – Різноманітні схеми (*a-d*) введення газових сумішей в шлакову і металеву ванну при ЕШП [61, 97].

Продування газом сприяє інтенсивному перемішуванню розплаву ванни прискоренню дифузійних процесів, видаленню неметалічних і газових включень, що призводить до сприятливої зміни структури металу зливку і його фізико-хімічних властивостей [108, 113].

Іншим способом керування процесом первинної кристалізації при ЕШП є примусова періодична зміна теплового та механічного стану

металевої ванни, за допомогою імпульсного живлення електрошлакового процесу електричною енергією (модуляції потужності) (рис. 1.9) [115-118]. Завдяки тому, що шлакова і металева ванни мають значну теплову інерційність, є можливість в широких межах змінювати режими імпульсного електроживлення, при збереженні стабільності електрошлакового процесу та високої якості формування зливку.

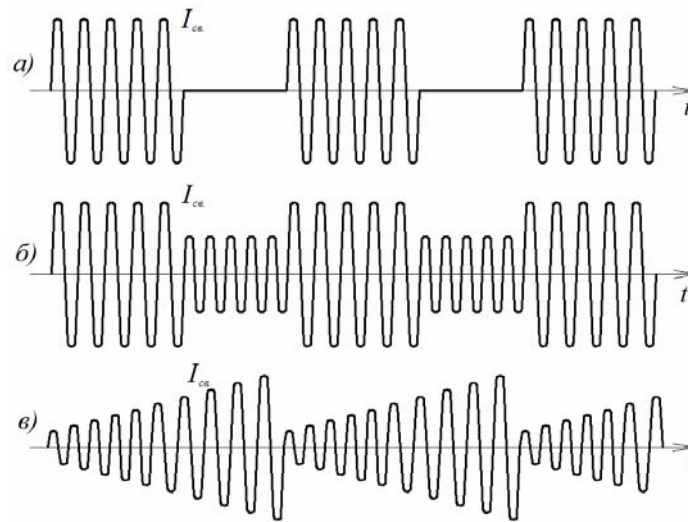


Рисунок 1.9 – Осцилограми струму плавки I при різних варіантах (а-в) імпульсного електроживлення [115-117].

Імпульсне електроживлення комплексно впливає на електрошлаковий процес, періодично змінюючи тепловий і гідродинамічний стан ванни. Зміна, за рахунок пауз електроживлення, температурного градієнта в двофазній зоні сприяє більш інтенсивному зародженню кристалів на фронті кристалізації. При цьому, зниження теплової енергії, що виділяється в шлаковій ванні, призводить до еквівалентного зменшення обсягу металевої ванни. Крім зміни температурного режиму, періодична зміна струму плавки викликає механічні коливання ванни. Все це сприяє подрібненню литої структури металу, зменшенню ліквідаційних процесів і підвищенню ізотропності його механічних властивостей.

В роботі [117] також показано, що імпульсна модуляція потужності дозволяє керувати краплеутворенням електродного металу і тим самим

підвищувати продуктивність електрошлакового процесу та його тепловий ККД.

Проведені дослідження свідчать про ефективність технології імпульсного живлення при ЕШП для отримання титану [118], а також шарикопідшипникових, швидкорізальних, інструментальних та інших сталей [115, 116].

Слід зазначити, що сьогодні, з появою потужних силових напівпровідникових приладів і сучасних мікропроцесорних систем, можливості імпульсного регулювання потужності при ЕШП суттєво розширилися, що підвищує перспективність використання даного методу впливу в електрошлакових технологіях.

Широкі можливості керування глибиною і формою металеві ванни, а отже і структурою виплавленого зливку, відкриває використання різних схем ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі (рис. 1.10) [119-125]. В даному випадку кристалізатор є не тільки пристроєм, що призначений для формування зливку, а й по суті – неплавким електродом, що підтримує електрошлаковий процес. Плавку можна здійснювати використовуючи витратний електрод, що живиться по двоконтурній схемі (ЕШП ДС) (рис. 1.8 а), а також рідкі (ЕШП РМ) або некомпактні присадкові матеріали (рис. 1.8 б, в).

Периферійний характер тепловиділення при плавці в струмопідвідному кристалізаторі і відсутність жорсткої залежності між температурним режимом і продуктивністю процесу дозволяють отримувати лінійну швидкість плавки і форму металеві ванни. Якщо при канонічній схемі ЕШП глибина металеві ванни становить зазвичай величину рівну радіусу зливку, то при ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі металева ванна може бути істотно менша і мати практично плоску форму [119]. Це дозволяє боротися з сегрегаційними явищами, зменшуючи швидкість переплаву, без втрати якості поверхні зливку.

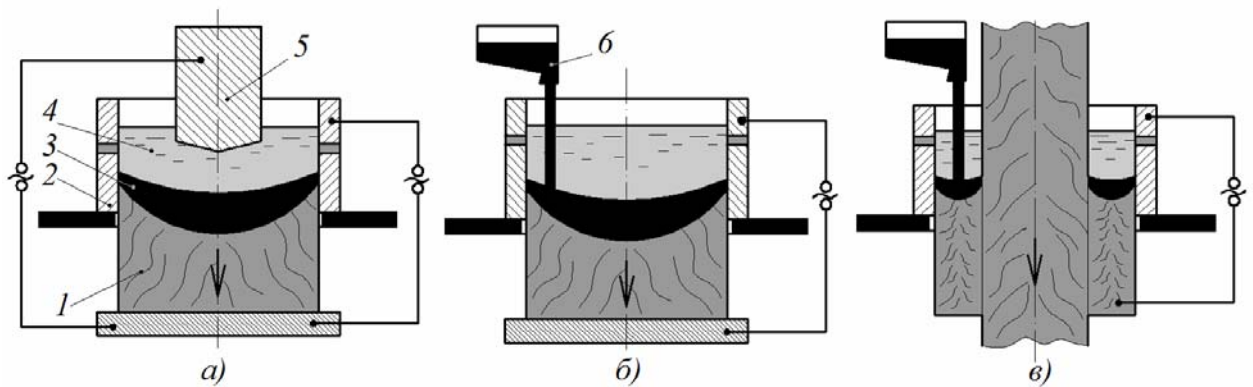


Рисунок 1.10 – Схеми ЕШП в струмопідвідному кристалізаторі [120]: *a* – ЕШП ДС; *б* – ЕШП РМ; *в* – електрошлакове збільшення зливоків; *1* – зливок; *2* – струмопідвідний кристалізатор; *3* – металева ванна; *4* – шлакова ванна; *5* – міксер – дозатор.

Слід зазначити, що використання струмопідвідного кристалізатора дозволяє організувати примусове обертання розплаву шлакової ванни, завдяки чому забезпечується вирівнювання температури по периметру струмопідвідної секції і рівномірне температурне поле ванни рідкого металу [122, 125]. Підкреслюється, що схеми ЕШП, з використанням струмопідвідного кристалізатора, є найбільш перспективними для отримання зливоків з складнолегованих сталей та сплавів, композиційних зливоків і великих ковальських зливоків [120-124].

Ефективним інструментом керування тепломасопереносом і кристалізацією металу при ЕШП є зовнішні магнітні поля [91]. Основна перевага їх використання полягає в можливості безконтактного силового впливу на розплави шлакової та металевої ванн. Варто відзначити, що електрошлаковий процес є достатньо зручним, з точки зору електромагнітного керування. Цьому сприяють широкий діапазон стійких режимів його протікання, а також високі робочі струми (десятки кілоампер), що проходять через розплави шлаку і металу, що в свою чергу дозволяє їх використовувати для електромагнітного керування.

Принципові задачі і проблеми електромагнітного керування при ЕШП будуть розглянуті в наступному параграфі.

1.4. Задачі і проблеми електромагнітного керування при ЕШП.

Починаючи з 1960 року, дослідженням методів електромагнітного впливу на електрошлакові процеси присвячено чимало робіт [91,93, 126-139]. Вже в перших роботах по застосуванню зовнішніх магнітних полів при ЕШП відзначається зміна форми металеві ванни, розорієнтація і подрібнення кристалічної структури металу, зниження витрат електроенергії та збільшення продуктивності процесу ЕШП [126, 127]. Зазначається, що це досягається завдяки примусовому електромагнітному перемішуванню шлакової і металеві ванн і зміні характеру плавлення електроду. В подальших дослідженнях було показано, що стаціонарне обертання розплаву навколо осі ванни, викликане накладенням змінного подовжнього і радіального магнітних полів, може призводити і до негативних ефектів - сприяти збільшенню глибини металеві ванни і небажаної зміни її форми [128, 129]. Таким чином, проведені роботи демонструють значний (як позитивний, так і негативний) вплив магнітного поля на плавлення, перенос та кристалізацію металу при ЕШП.

Аналізуючи літературні дані можна зробити висновок, що застосування зовнішніх магнітних полів дозволяє впливати на основні металургійні процеси при ЕШП: плавлення металу, його перенос і кристалізацію. З цього випливають основні задачі електромагнітного впливу при ЕШП. На сам перед - це підвищення хімічної однорідності металу зливку, гомогенізація і подрібнення його кристалічної структури. Також завданням застосування магнітних полів є вплив на особливості плавлення витратного електроду, характер формування і відрив крапель електродного металу, траєкторії їх руху в шлаковій ванні, для забезпечення необхідних технологічних і металургійних ефектів. Крім того, електромагнітний вплив застосовують для інтенсифікації процесів хімічної взаємодії металу та шлаку, [91, 93].

Фізичний механізм електромагнітного впливу на процес ЕШП полягає у взаємодії зовнішнього магнітного поля з електричним струмом плавки [91]. Внаслідок такої взаємодії у металевій та шлаковій ваннах формуються об'ємні електромагнітні сили \vec{f}_e , що призводять до силового впливу на ці розплави. Величина і напрям дії таких сил визначаються векторним добутком щільності струму у розплаві \vec{j} та індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} :

$$\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B};$$

При цьому, в залежності від роду струму (постійний, змінний) та частотних і амплітудних характеристик зовнішнього магнітного поля в ванні утворюються електровихрові течії або вібрація розплаву [91, 126, 130].

Таким чином фізичний принцип впливу магнітних полів на електрошлаковий процес полягає в зміні за їх допомогою структури гідродинамічних течій металургійного розплаву для забезпечення бажаних технологічних і металургійних ефектів.

Загалом ідея електромагнітного керування полягає в тому, щоб певним чином сформувати поле електромагнітної сили. Цього можна досягти за рахунок зміни параметрів векторних величин щільності струму, або індукції зовнішнього магнітного поля. Проте суттєво змінювати параметри щільності струму в процесі плавки (зокрема в широких межах) достатньо складно. Тому ефективність застосування електромагнітного впливу визначається, перш за все, параметрами зовнішнього магнітного поля, а саме його просторовою орієнтацією по відношенню до розплаву, а також амплітудними і частотними характеристиками.

Слід також зазначити, що ефективність електромагнітного впливу мало залежить від магнітних властивостей металів, так як усі метали при нагріванні вище «точки Кюрі» набувають немагнітного (парамагнітного) стану. Проте на відміну від переплаву немагнітних металів (титан, алюміній та ін.) при переплаві магнітних матеріалів можуть виникати значні

ускладнення з введенням магнітного поля в зону плавки через його шунтування феромагнітними масами.

При застосуванні зовнішніх електромагнітних полів для керування процесами ЕШП важливу роль грає характер розподілу ліній електричного струму в розплавах шлаку і металу. Відомо, що при класичному ЕШП лінії електричного струму мають як аксіальну, так і радіальну складові (рис. 1.11). Співвідношення цих складових залежить від багатьох параметрів (розмірів електроду і кристалізатору, швидкості плавки, глибини шлакової ванни, типу флюсу та ін.), проте в середньому складає 70...90% і 10...30%, відповідно [61]. Як бачимо аксіальна складова значно перевищує радіальну, що необхідно враховувати при аналізі впливу тих чи інших магнітних полів на процес ЕШП.

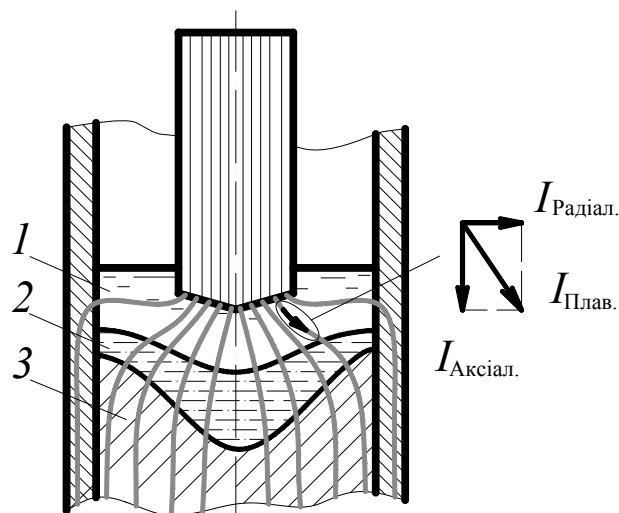


Рисунок 1.11 – Лінії розподілу електричного струму в металевій та шлаковій ванні при ЕШП: 1, 2 – шлакова та металева ванна; 3 – зливоч.

За просторовою орієнтацією по відношенню до осі ванни зовнішні магнітні поля, що застосовують для впливу на електрошлаковий процес, поділяють на радіальне (рис. 1.12 а), поперечне (рис. 1.12 б) і поздовжнє (рис. 1.12 в) [93, 130, 133].

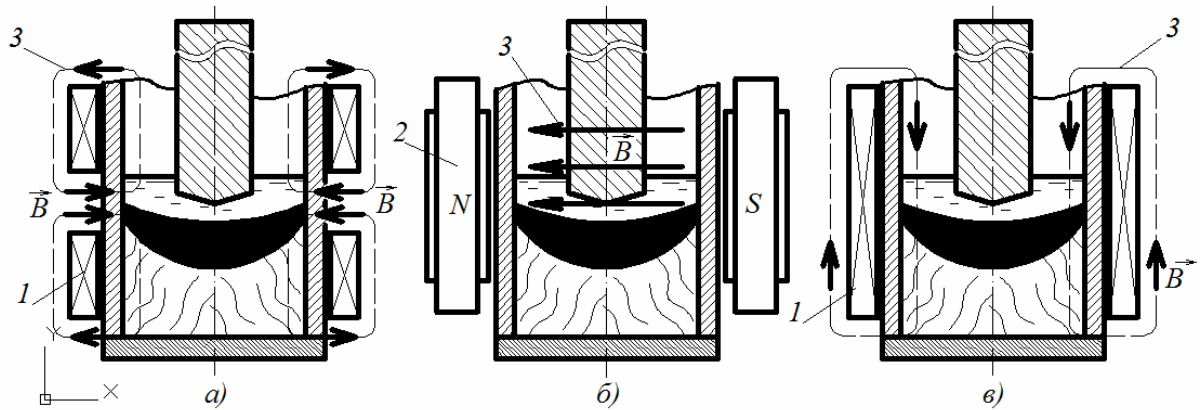


Рисунок 1.12 – Схеми ЕШП в радіальному (а), поперечному (б) і (в) - поздовжньому магнітних полях: 1 – соленоїд; 2 – електромагніт; 3 – силові лінії магнітного поля.

Радіальне магнітне поле можна створити за допомогою двох або декількох секцій соленоїда, які розміщують ззовні кристалізатора, при протилежному підключенні струму в суміжних секціях (рис. 1.12 а) [133, 137]. В цьому випадку у циліндричній системі координат (z, r, φ) електричний струм має складові $\vec{j}=(j_z, j_r, 0)$, а магнітне поле $B=(B_z, B_r, 0)$. Тоді електромагнітна сила $\vec{f}_e=\vec{j}\times\vec{B}$ буде мати складові $f_e=(0, 0, j_z B_r - j_r B_z)$. Ефективність такого магнітного поля буде максимальна, якщо його наложити безпосередньо на зону рідкометалевої ванни. В такому випадку радіальна складова магнітного поля взаємодіє із вертикальною складовою струму плавки, внаслідок чого утворюються течії або вібрації розплаву навколо осі симетрії [133].

Суттєвим недоліком такої схеми є те, що радіальне поле утворюється лише в невеликому просторі, в площині між секціями соленоїду. Це зумовлює необхідність синхронізації переміщення магнітного поля із переміщенням фронту кристалізації зливку в процесі переплаву (рис. 1.13 а), або використання схем переплаву з витяжкою зливку (рис. 1.13 б).

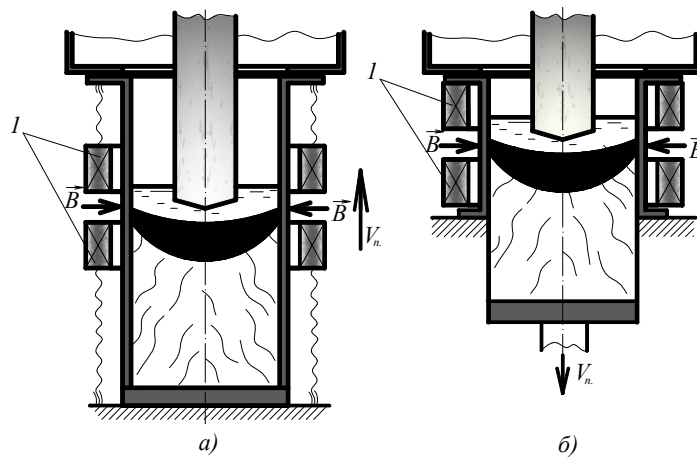


Рисунок 1.13 – Принципові схеми застосування радіального магнітного поля при ЕШП: *a* – із синхронізацією переміщення електромагнітної системи; *б* – із витяжкою зливку; 1 – двоконтурний соленоїд, \vec{B} – вектор індукції електромагнітного поля; V_n – швидкість переміщення.

Поперечне магнітне поле (рис 1.12 *б*) можна реалізувати за допомогою магніту, полюси якого розміщені з протилежних сторін кристалізатора. Принципові схеми застосування поперечного магнітного поля при ЕШП наведені на рисунку 1.14. В даному випадку силові лінії магнітного поля зорієнтовані перпендикулярно осі металеві та шлакової ванн. В Декартовій системі координат (x, y, z) , електромагнітна сила буде мати складові $\vec{f}e = (0, j_z B_x, -j_y B_x)$. Оскільки складова струму переплаву j_z значно переважає складову j_y , то можна вважати, що основний ефект від дії вказаного магнітного поля полягає в формуванні у розплаві електромагнітних сил, в горизонтальній площині, перпендикулярно силовим лініям магнітного поля [93].

В роботі [93] була показана ефективність застосування при ЕШП титану поперечного постійного магнітного поля. В результаті його взаємодії зі змінним струмом плавки, утворюється зворотно-поступальний рух (вібрація) розплаву з частотою 50 Гц. Показано, що використання поперечного магнітного поля призводить також до вібрації витратного електроду. Зазначені ефекти сприяють збільшенню частоти відриву крапель електродного металу, з великою кількістю місць краплеутворення на торці

електроду, вирівнюванню температурного поля у ванні, руйнуванню зростаючих з двофазної області дендритів і, в кінцевому підсумку, гомогенізації і подрібненню структури литого металу.

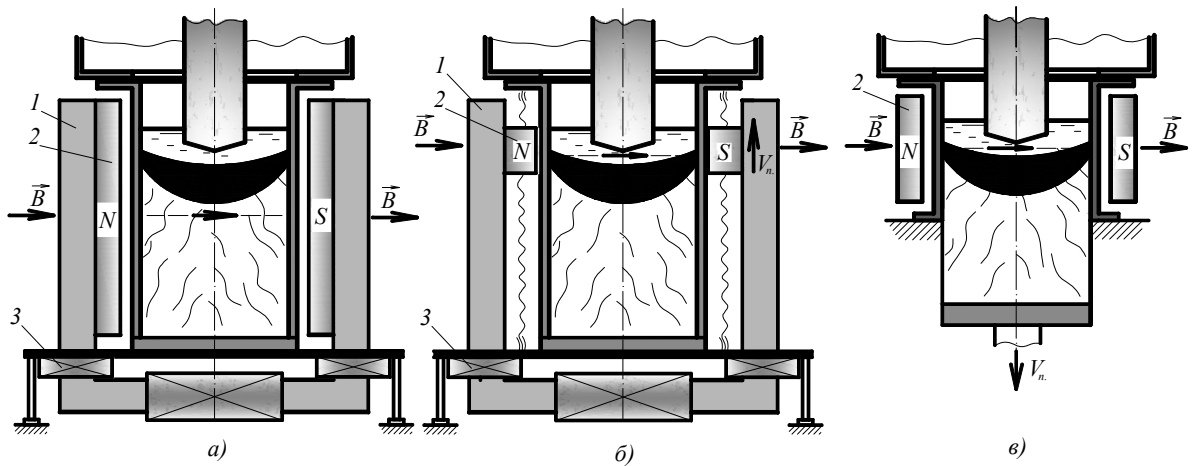


Рисунок 1.14 – Принципові схеми застосування поперечного магнітного поля при ЕШП: а) і б) без та з переміщенням електромагнітної системи, в) з витяжкою зливку; 1 – сердечник магнітопроводу; 2 (S,N) – полюси електромагніту; 3 – котушка електромагнітної системи; \vec{B} - вектор індукції електромагнітного поля; V_n – швидкість переміщення.

Проте введення поперечного магнітного поля призводить до порушення осової симетрії процесу плавки, що в свою чергу може призводити до анізотропії властивостей металу в різних зонах зливку. Крім того, для створення поперечного поля необхідно застосовувати громіздкі пристрої. Все це ускладнює практичне застосування поперечних полів при ЕШП.

Більш технологічним і ефективним при ЕШП є використання поздовжнього магнітного поля, силові лінії якого зорієнтовані паралельно осі ванни (рис.1.12 в) [131, 132]. Поздовжнє магнітне поле можна створити соленоїдом, розміщеним ззовні кристалізатора. Принципові схеми застосування поздовжнього магнітного поля при ЕШП наведені на рисунку 1.15.

Суто поздовжнє поле створюється в зоні плавки тільки у разі застосування достатньо довгих соленоїдів (рис.1.15 а). В інших випадках в

плавильне середовище проникає магнітне поле, що має крім осьової складової ще й радіальну. Таким чином, в циліндричних координатах (z, r, ψ) зовнішнє магнітне поле матиме складові $(B_z, B_r, 0)$, а струм переплаву - $(j_r, j_z, 0)$. Відповідно електромагнітна сила має складові $\vec{f}_e = \vec{j} \times \vec{B} = (0, 0, j_z B_r - j_r B_z)$.

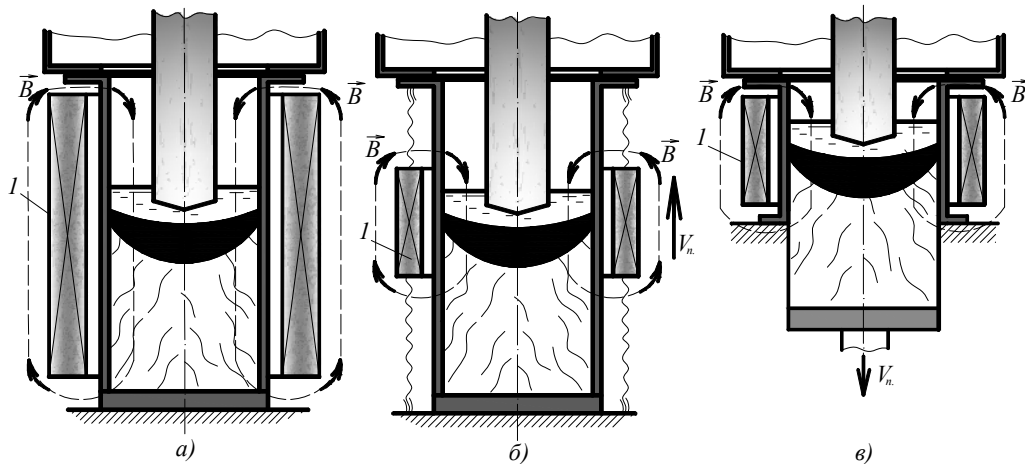


Рисунок 1.15 – Принципові схеми застосування поздовжнього магнітного поля при ЕШП; а) і б) без та з переміщенням електромагнітної системи, в) з витяжкою зливку; 1 – соленоїд; \vec{B} – вектор індукції електромагнітного поля; V_n – швидкість переміщення.

Звідси видно, що викликана зовнішнім магнітним полем електромагнітна сила буде призводити до руху розплаву в горизонтальних площинах (навколо осі ванни). Варто звернути увагу, що складові електромагнітної сили $j_z B_r$ і $-j_r B_z$ діють в один бік, і лише від знаку зовнішнього магнітного поля залежатиме напрям обертання розплаву.

У роботах [93, 131] показано, що для ефективного впливу на макроструктуру металу злиwkів діаметром 60...160 мм величина індукції магнітного поля в робочій зоні повинна складати близько 0,14...0,3 Тл і вище. Причому, із збільшенням діаметру зливку, величину індукції в зоні плавки необхідно підвищувати. Це веде за собою необхідність розроблення ефективних схем для використання магнітних полів при переплаві, дослідження їх параметрів та створення відповідних соленоїдів.

Використання поздовжніх постійних та імпульсних магнітних полів дозволяє інтенсифікувати магнітогідродинамічну дію на розплав ванн (металевої та шлакової), в зоні переплаву [132]. Імпульсні чи постійні магнітні поля можна створити використовуючи традиційні джерела живлення електромагнітних систем (трансформатори, випрямлячі) обладнанні вузлами керування [131]. Це вказує на перспективність застосування поздовжніх магнітних полів для керування кристалізацією металу при ЕШП і актуальність проведення досліджень в даному напрямку.

Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень.

1. Камерний ЕШП, із контрольованою атмосферою, є перспективним технологічним процесом для виплавки зливків титанових сплавів. Це пов'язано із рядом фізико-хімічних і технологічних особливостей, що відрізняє ЕШП від інших способів плавки титану. Серед них можна виділити наступні:

- відносно низькотемпературне, розосереджене джерело тепловиділення;
- відсутність неконтрольованого випаровування легуючих елементів, у тому числі з високою пружністю пари;
- отримання щільної структури металу без пор, неметалевих включень та інших дефектів;
- принципова можливість рафінування і мікролегування металу шлаком.

2. Не дивлячись на деякі переваги, широкого практичного застосування ЕШП титану досі не знайшов. Однією з причин є те, що титановим зливкам отриманим методом ЕШП, характерна грубокристалічна структура з стовпчастими кристалітами витягнутими в напрямку тепловідведення. Такий характер кристалізації сприяє утворенню в металі зливків різного роду неоднорідностей (хімічних, структурних) і ліквацийних дефектів. Це значно

погіршує здатність металу піддаватися деформації, знижує його механічні характеристики і ресурс.

3. Серед можливих методів керування кристалізацією зливків ЕШП найбільш ефективним є безконтактний силовий вплив на розплав ванни за допомогою зовнішніх магнітних полів. Застосування магнітних полів дає принципову можливість впливати на основні металургійні процеси при ЕШП - плавлення витратного електроду, перенесення електродного металу і його кристалізацію.

4. Застосування зовнішніх магнітних полів для керування процесом ЕШП потребує проведення експериментальних досліджень щодо їх впливу на технологічні і металургійні особливості процесу ЕШП, структуру, хімічний склад і механічні властивості металу титанових зливків.

Метою даної роботи є визначення закономірностей процесів плавлення, перенесення та кристалізації металу при ЕШП, в умовах дії постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів, і розробка технічних рекомендацій щодо їх застосування при виплавці зливків титанових сплавів.

Для досягнення мети, поставленої в дисертаційній роботі, необхідно вирішити наступні **задачі**:

- розробити «холодну» фізичну модель для дослідження процесів плавлення витратного електроду і перенесення електродного металу при ЕШП, в умовах дії зовнішніх поздовжніх магнітних полів;
- визначити закономірності впливу поздовжніх магнітних полів на особливості краплеутворення та перенесення металу при ЕШП;
- розробити лабораторне обладнання для проведення натурних експериментів з ЕШП титану під дією поздовжніх магнітних полів;
- дослідити технологічні особливості ЕШП титану під дією постійних та імпульсних поздовжніх магнітних полів та їх вплив на структуроутворення, хімічну однорідність та на механічні властивості отриманих зливків;
- визначити ефективні параметри електромагнітного впливу при ЕШП титанових сплавів та розробити технологічні рекомендації щодо процесу ЕШП під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ЕШП ТИТАНУ

2.1. Фізичне моделювання процесу плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів.

Електрошлаковий процес характеризується наявністю високотемпературних агресивних середовищ - розплавленого шлаку й металу. Як наслідок, натурні дослідження процесу ЕШП є надзвичайно складними, дорогими, а інколи й неможливими [140]. В цих умовах доцільно використовувати методи математичного і фізичного моделювання [91, 105, 109, 141-181].

Математичне моделювання використовують переважно для дослідження теплових і гідродинамічних процесів. Воно полягає в вирішенні загальновідомих рівнянь, зокрема Нав'є–Стокса, Фур'є–Кіргофа, Максвела і т.д., з урахуванням граничних умов і теорії подібності [91, 145, 151, 153]. Застосування методів математичного моделювання часом ускладнює відсутність вихідних даних для повного і адекватного опису електрошлакового процесу, складний взаємозв'язок між його параметрами, неможливість врахування усіх зовнішніх чинників, що впливають на ЕШП, необхідність здійснення різних спрощень і припущень [141]. Особливо це стосується несиметричних тривимірних задач, турбулентного руху тощо.

В цих умовах, практичний інтерес для дослідження процесу ЕШП представляє фізичне моделювання [91, 141, 144-148, 150-156, 158-167, 169, 172, 181]. Основним завданням при створенні фізичних моделей є зменшення робочих температур електрошлакового процесу, при збереженні його природи [91, 151, 153]. Це дає можливість здійснювати вимірювання температур, швидкості, тиску та ін. параметрів відомими методами та проводити візуальні спостереження процесу плавлення.

Через складність створення моделі, що описує весь процес ЕШП, доцільно здійснювати моделювання окремих його стадій: плавлення електроду; гідродинамічних процесів; процесів на поверхні розділу шлак-метал; процесу кристалізації тощо.

В технічній літературі є багато відомостей про фізичне моделювання процесу ЕШП. Особливо інтенсивно такі роботи проводились в 70-х і 80-х роках минулого сторіччя [141, 143-148, 152-155, 157-164, 166-169, 181].

Більше поширення знайшли «холодні» фізичні моделі, в яких робоча температура складає 20...150 °С [91, 143, 147, 152-155, 165-167]. Це переважно моделі для дослідження характеру плавлення витратного електроду і гідродинамічних процесів через їх ключовий вплив на техніко-економічні характеристики ЕШП і властивості металу, що виплавляють.

Для дослідження гідродинаміки використовують моделі в яких робочими рідинами є ртуть, галій, евтектичний сплав 67Ga-20,5In-12,5Sn та ін., що рідкі при кімнатній температурі [91, 143, 147, 148, 153, 156, 158-169, 172, 181].

Для вивчення особливостей плавлення витратного електроду створені моделі, що базуються на плавленні електродів з легкоплавких металів і сплавів - олова, сплаву Вуда, Розе та ін. в електролітах, переважно розчинах CaCl_2 , NaCl , ZnCl_2 , NaOH та ін. [91, 105, 109, 151, 153, 158-169].

Однією з важливих вимог, що визначає відповідність фізичної моделі натурному процесу є дотримання критеріїв подібності і розмірності. Аналіз можливостей фізичного моделювання ЕШП показує, що важко добитися відповідної рівності всіх чисел подібності моделі і натурного процесу (числа Ейлера Eu , Грасгофа Gr , Прандтля Pr , Струхала Sr , параметру електровихрових течій S та ін.) [91, 145, 146, 151, 153]. Тим не менш, фізичні моделі дозволяють оцінити якісні характеристики процесу і в ряді випадків, отримані експериментальні дані можна екстраполювати до значень натурних параметрів.

Аналіз наведених вище критеріїв подібності, показує, що найбільш важливим при моделюванні гідродинамічних процесів в рідині під дією магнітних полів є параметр $S = \mu_0 I^2 / \rho v^2$, де μ_0 – магнітна проникність середовища, I – сила електричного струму, ρ – густина рідини, v – кінематична в'язкість рідини [153]. Даний параметр S характеризує співвідношення електромагнітної сили до сили в'язкості і визначає інтенсивність руху рідини, що збуджується електромагнітною силою.

Слід відмітити, що при ЕШП під дією зовнішнього магнітного поля електромагнітні сили значно перевищують сили термогравітаційної конвекції [91]. Тобто критерій Грасгофа в нашому випадку не є вирішальним. Таким чином, враховуючи те, що основні ефекти від дії магнітних полів при ЕШП пов'язані саме зі зміною гідродинаміки шлакової і металеві ванн, моделювання ЕШП в магнітному полі доцільно вести з дотриманням параметру S та геометричної подібності до натурального процесу.

Як зазначено вище, параметр S , окрім фізичних характеристик середовища, має в своєму складі силу струму. Тобто змінюючи, при моделюванні, силу струму можна змінювати параметр S добиваючись тим самим його відповідності до параметру S натурального процесу.

Завданням робіт було розробити фізичну модель для дослідження особливостей плавлення витратного електроду, характеру формування і відриву краплин електродного металу і їх руху в шлаковій ванні, в умовах дії зовнішнього магнітного поля. Зазначені характеристики безпосередньо впливають на фізико-хімічні процеси при ЕШП і якість виплавлених зливків і їх вивчення є важливим як з наукової, так і з практичної точок зору.

Були сформульовані основні вимоги до фізичної моделі. Вона має:

- відтворювати фізичну природу електрошлакового процесу, тобто плавлення витратного електроду має відбуватись за рахунок Джоулевого тепла, що виділяється в рідкій ванні;
- відповідати критеріям фізичної (параметру S) та геометричної подібності;

- адекватно відтворювати розподіл ліній електричного струму в рідині, що імітує шлакову ванну;
- бути оптично прозорою.

При створенні моделі першим (важливим) завданням був вибір матеріалу витратного електроду і рідини, що імітує шлакову ванну. Аналіз літературних відомостей і досвід фізичного моделювання показав, що в якості електродного матеріалу доцільно використовувати сплав Вуда (12,5 Sn - 25 Pb - 50 Bi - 12,5 Cd мас.%). Цей сплав має сприятливу, з точки зору моделювання, температуру плавлення - 68,5 °С, та відповідає іншим вимогам (електропровідний, немагнітний, корозійностійкий, доступний та ін.).

Для вибору складу модельної рідини було досліджено насичені водні розчини CaCl_2 , NaCl , ZnCl_2 , NaOH . Вказані розчини нагрівали шляхом пропускання змінного електричного струму за допомогою занурених у них електродів. Оцінювали електричні параметри процесу, температуру розчину і візуальний стан рідини (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Результати досліджень характеристик електролітів для моделювання розплаву шлакової ванни.

Насичений водний розчин	$T_{\text{кипіння}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	U, В	I, А	Стан розчину
ZnCl_2	130	4,2	1,6	оптично прозорий
		8,5	3,6...4,9	прозорий $T=70^\circ\text{C}$
		12	25...27	прозорий $T=130^\circ\text{C}$
CaCl_2	122	4,37	3,2	мутний, буро-сірий
		8,38	6,8	незначне утворення «бульбашок», сильна мутність
		12,1	10,6...20	при $T=100^\circ\text{C}$ – утворення піни на поверхні;
NaCl	107	4,7	3,8	розчин частково – мутний
		8,3	6,5...8,0	поява незначних «бульбашок» біля електроду
		12,9	28...36	сильне піноутворення на поверхні, мутність середня
NaOH	95	4,5	3,3	розчин мутний, незначні «бульбашки»
		8,6	17...20	$T=68^\circ\text{C}$, сильне піноутворення
		12	47	розчин мутний, різкий запах

Проведені експерименти показали, що, з метою моделювання плавлення електроду при ЕШП, найбільш підходящим вибором є пересичений водний розчин $ZnCl_2$, який має найвищу із досліджуваних розчинів температуру кипіння (близько $130^{\circ}C$) і, що дуже важливо, в процесі експериментів тривалий час зберігає оптичну прозорість. Крім того, параметр S для розчину $ZnCl_2$ може наближатись до параметру S шлакової ванни при ЕШП ($0,82 \times 10^6$ і $1,2 \times 10^6$ відповідно).

З урахуванням цих результатів та зазначених вище вимог було розроблено фізичну модель плавлення витратного електроду при ЕШП, в умовах дії зовнішніх магнітних полів (рис. 2.1).

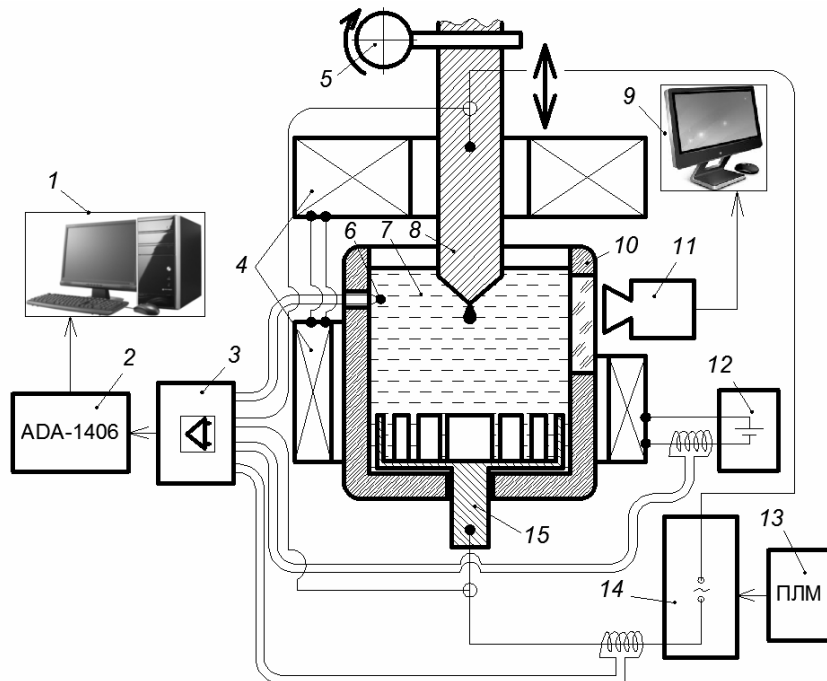


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки для моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП: 1 – комп'ютер; 2 – аналого-цифровий перетворювач; 3 – перетворювач з гальванічною ізоляцією; 4 – електромагнітна система; 5 – механізм подачі електроду; 6 – термопара; 7 – електроліт; 8 – електрод; 9 – монітор; 10 – ємність з оптично - прозорого матеріалу; 11 – відеокамера; 12 – джерело живлення електромагнітної системи; 13 – програмований логічний модуль; 14 – джерело живлення моделі; 15 – чашеподібний донний струмопідвід.

Модель собою являє циліндричну ємність, виконану з прозорого матеріалу (скла і оргскла), на дні якої розташований чашеподібний струмопідвід з листового титану. Ємність заповнюється електролітом на основі пересиченого водного розчину $ZnCl_2$, що імітує розплав шлакової ванни. Електродом служить стрижень діаметром 32 мм зі сплаву Вуда, який занурюється в розчин по центру ванни (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Витратні модельні електроди із сплаву Вуда.

Вертикальне переміщення електроду здійснюється електроприводом, що дозволяє плавно змінювати швидкість подачі (0,02...1 мм/с) і регулювати глибину занурення електроду в розчині $ZnCl_2$. Температура розчину контролюється за допомогою терморпари ТХА.

Електроживлення моделі здійснюється лабораторним трансформатором з робочим струмом до 40 А. Зовнішнє магнітне поле створюється системою з двох послідовно з'єднаних соленоїдів, які живляться від джерела постійного струму (до 400 А). Дана система дозволяє створювати в робочій зоні однорідне магнітне поле індукцією до 0,4 Тл.

Плавлення електроду зі сплаву Вуда відбувається за рахунок Джоулевого тепла, що виділяється в розчині $ZnCl_2$, при проходженні у ньому електричного струму, тобто - аналогічно ЕШП. Розміри моделі підібрані з урахуванням критерію геометричної подібності до реального ЕШП зливків $\varnothing 60...140$ мм. Форма нижнього струмопідводу забезпечує наявність в рідкій ванні осьової і радіальної складових електричного струму і тим самим найбільш адекватно відтворює його розподіл в розплаві.

Для дослідження особливостей плавлення витратного електроду, утворення на його торці крапель металу і їх відриву, використовували метод відеоспостереження з частотою запису 240 кадрів в секунду і метод осцилографування. Основні параметри процесу реєстрували за допомогою перетворювача з гальванічною ізоляцією, аналого-цифрового перетворювача і комп'ютерної техніки з програмним забезпеченням LabView і PowerGraph.

Експерименти здійснювали наступним чином. Пересичений водний розчин $ZnCl_2$ розігрівали в окремій ємності до температури $70^\circ C$, потім заливали в робочу ємність до заданого рівня, що відповідає глибині занурення електроду - 10 мм. Після цього на електроди подавали електричну напругу, внаслідок чого в електроліті утворювався електричний струм. Під дією електричного струму електроліт нагрівався і розпочинався процес плавлення електроду. Після відриву 10-тої краплі включали механізм подачі електроду із швидкістю 0,05-0,1 мм/с, температура стабілізувалася на рівні $125-130^\circ C$ і встановлювався квазістаціонарний процес плавлення електроду. В процесі експериментів підтримували на заданому постійному рівні силу струму в моделі (12 А) і глибину занурення електроду в електроліт (10 мм).

Експерименти проводили при різному роді струму в електроліті (змінний, постійний) і різних режимах дії зовнішніх магнітних полів.

В процесі експериментів, за допомогою АЦП і комп'ютерної техніки реєстрували температуру електроліту і електричні режими моделювання, процес плавлення записували цифровою відеокамерою.

Використання програмного пакету PowerGraph з функціями математичної обробки отриманих даних дозволило розраховувати інтегральні значення параметрів процесу (середні напругу, струм, витрати енергії и т.д.). Особливості краплеутворення вивчали шляхом аналізу розкадровок відеозаписів (мінімальний інтервал 0,004 с). Витратний електрод перед і після експериментів зважували на електронних вагах, що дозволяло розраховувати середню масу краплин.

2.2. Методика дослідження фізичних властивостей сольових флюсів для ЕШП титану.

Флюс є важливим елементом технологічного процесу, який безпосередньо впливає на параметри ЕШП і властивості сплавів, що виплавляють [91, 182]. Крім ряду металургійних функцій, при ЕШП флюс також виконує важливу технологічну функцію, а саме - джерела тепловиділення (Джоулеве тепло, що виділяється в флюсі при проходженні електричного струму). Відповідно фізичні властивості флюсу впливають на електричні режими та енергетику процесу, швидкість та характер плавлення електроду, особливості формування зливку і т. д.

Висока хімічна активність титану в розплавленому стані (перш за все спорідненість з киснем) виключає можливість використання при ЕШП титанових сплавів флюсів, в складі яких присутні оксиди [183]. Тому при ЕШП титану і сплавів на його основі знайшли застосування безкисневі сольові флюси. Основу таких флюсів становить чистий CaF_2 (кваліфікації Ч, ХЧ, ЧДА). В якості добавок використовують ряд фторидів і хлоридів лужних і лужноземельних металів, а також металевий кальцій [184-189].

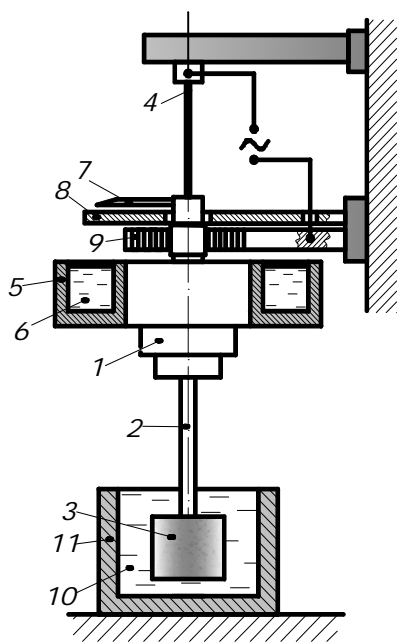
Характерною рисою сольових флюсів є відносно висока їх електропровідність в розплавленому стані, яка значно вища ніж у оксидних флюсів [91, 190-192]. Високі показники електропровідності сольових флюсів зменшують тепловиділення в шлаковій ванні, звужують межі сталого протікання електрошлакового процесу та збільшують витрати електроенергії. Сольові флюси також характеризуються вузьким температурним інтервалом затвердіння і високою рідкотекучістю в розплавленому стані, що викликає значні проблеми при ЕШП титану з витяжкою зливку.

У зв'язку цим, актуальним завданням є дослідження фізичних властивостей розплавів сольових систем на основі CaF_2 , з метою оптимізації складу флюсу і підвищення техніко-економічних показників процесу ЕШП титанових сплавів.

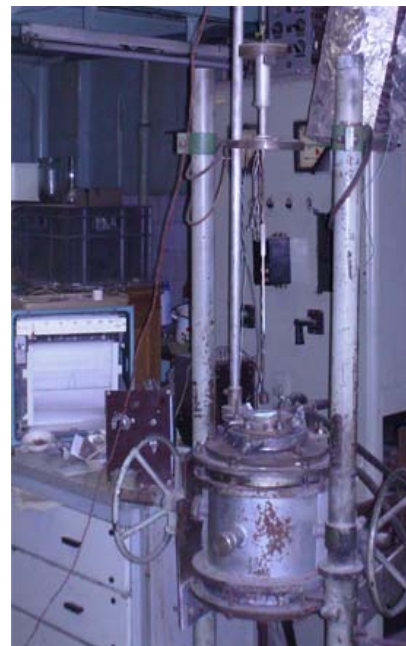
Дослідження фізичних властивостей сольових флюсів на основі CaF_2 проводили експериментально. В роботі вивчали такі основні характеристики сольових композицій, як в'язкість, електропровідність та температурний інтервал твердіння.

Дослідження в'язкості розплавлених флюсів виконували за допомогою ротаційного віскозиметра. Його принципова схема та зовнішній вигляд показані на рисунку 2.3.

Принцип роботи віскозиметра полягає у визначенні крутного моменту робочого тіла, зануреного в досліджуваний розплав, при заданій кутовій швидкості його обертання. Тобто в'язкість визначається крутним моментом, який пропорційний куту закручення корпуса електродвигуна I , за допомогою градусного лімба δ (рис. 2.3 *a*).



a)



б)

Рисунок 2.3 – Принципова схема (*a*) та зовнішній вигляд (*б*) ротаційного віскозиметра: *1*- синхронний електродвигун з редуктором; *2* - шпindelь; *3* - робоче тіло; *4* – торсіон підвісу; *5* - гаситель коливань (демпфер); *6* - рідина; *7* - стрілка; *8* - градусний лімб; *9* – спіраль для підведення струму; *10* - досліджувана рідина (розплав); *11* - тигель.

Вимірювання проводили в молібденовому тиглі з внутрішнім діаметром 40 мм, в печі опору з порожнистим графітовим нагрівачем в атмосфері аргону. Вимірювання здійснювали від температури 1600⁰С, до температури твердіння флюсу. Робоче тіло віскозиметра являло собою вольфрамовий стрижень циліндричної форми діаметром 20 мм і висотою 20 мм. Температуру контролювали вольфрам-ренієвою термопарою (ВР 5/20). Віскозиметр попередньо градували при кімнатній температурі з використанням еталонних рідин (моторних і трансмісійних масел) з відомою температурною залежністю в'язкості. Гранична відносна похибка вимірювання в'язкості за даною методикою не перевищує 10%.

Електропровідність розплавів досліджували в тому ж самому молібденовому тиглі, розміщеному в печі опору. Суть методу визначення електропровідності полягала у вимірюванні активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, включених в мостову схему. Падіння напруги на електродах відбувається за рахунок зниження температури розплаву флюсу (аналогічно, як при визначенні в'язкості, з 1600⁰С до температури твердіння). Глибина занурення електродів в розплав становила 10 мм. Живлення установки здійснювали змінним струмом від генератора ультразвукової частоти. Вимірювання проводили на частоті 62 кГц. Тарування приладу здійснювали по розплаву КСІ з відомою електропровідністю.

Температурний інтервал твердіння флюсу досліджували методом візуального (з допомогою оптичної системи) спостереження за гранулами флюсу, які знаходились на поверхні сталеві пластини. Пластина розігрівалась під дією електричного струму в межах від 0 до 1600⁰С (рис 2.4). Температуру флюсу контролювали, як і в попередніх методиках термопарою ВР 5/20.



Рисунок 2.4 – Лабораторне устаткування для вимірювання температурного інтервалу твердіння та поверхневих властивостей шлакових розплавів.

Флюсові композиції для досліджень отримували шляхом змішування порошків вихідних компонентів (переважно кваліфікації Ч і ХЧ), які попередньо прогартувували в муфельній печі при 450°C , протягом 2-х годин. Безпосередньо перед експериментами кожен із флюсових композицій ще раз прогартувували в ємностях, виготовлених із жароміцної нержавіючої сталі, протягом 3...5 годин, при температурі 450°C .

При дослідженні температурних залежностей в'язкості і електропровідності поступово збільшували концентрацію одного з компонентів флюсової системи (шляхом додавання відповідних порцій в розплав) для визначення впливу даного компоненту на згадані характеристики.

За результатами досліджень фізичних властивостей флюсів було відібрано перспективні флюсові композиції які потім випробували в умовах реального ЕШП титану. Натурні експерименти проводили при камерному ЕШП витратних електродів діаметром 32, 40, 65 мм із технічного ВТ1-0, які переплавляли в атмосфері Ar в кристалізаторах діаметром 65, 85 і 105 мм.

2.3. Методика проведення експериментальних досліджень процесу ЕШП титану під дією поздовжніх магнітних полів.

Важливим методом досліджень в рамках дисертаційної роботи були натурні експерименти з ЕШП титанових сплавів, при застосуванні різних видів дії поздовжніх магнітних полів на процес плавки.

Експериментальні дослідження здійснювали на модернізованій установці для ЕШП титанових сплавів в магнітному полі (рис. 2.5). Основні вузли установки включають в себе автомат А-1494, з силовим трансформатором ТШП - 10000/1, вакуумну камеру, систему вакуумування плавильного простору і подавання туди інертного газу, змінні кристалізатори, із розміщеними на них електромагнітними системами, джерело живлення електромагнітної системи, пульт керування, контрольно-вимірювальну апаратуру. Основні технічні параметри установки наведені в таблиці 2.2.

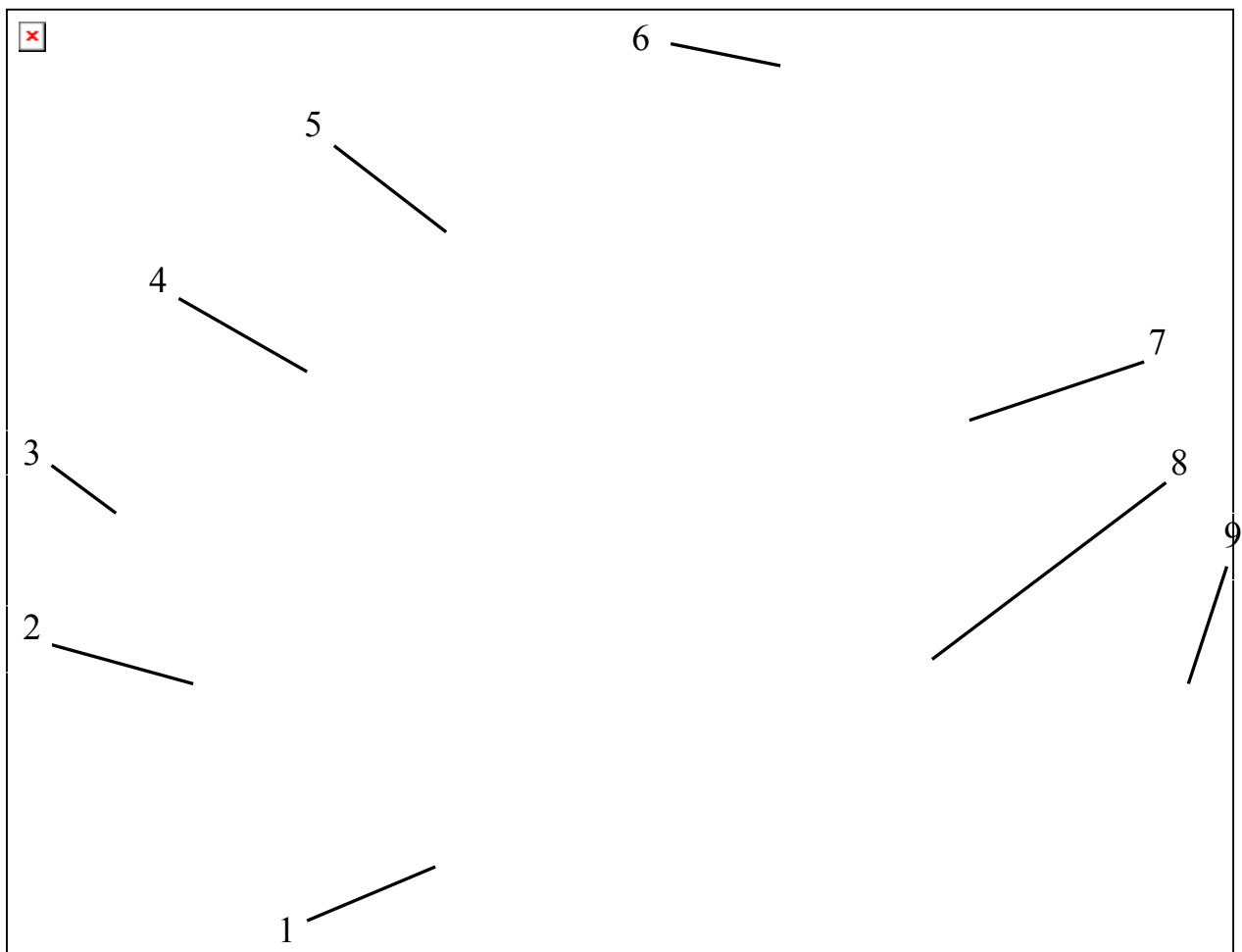


Рисунок 2.5 – Установка для переплаву титану методом ЕШП в магнітному полі: 1 – вакуумний насос; 2 – контрольно-вимірювальна апаратура; 3, 4– джерела живлення електромагнітної системи та установки відповідно; 5 – шафа керування; 6 – колона електрошлакової установки; 7 – вакуумна камера; 8 – кристалізатор з соленоїдом; 9 – балон з інертним газом.

Задля можливості плавного регулювання електричної напруги в процесі плавки трансформатор ТШП - 10000/1 був доукомплектований тиристорним блоком, що встановлений в його первинному ланцюгу. Вказаний блок також дозволяє реалізовувати роботу джерела живлення в імпульсному режимі.

Крім того, у вторинний ланцюг силового трансформатора був вмонтований діодний випрямляч, що дозволило проводити експерименти із застосуванням як змінного, так і постійного струму плавки.

Таблиця 2.2 – Технічні параметри установки для ЕШП титану в поздовжньому магнітному полі.

Параметр	Величина
Потужність, кВт	724
Максимальна сила струму, А	
- змінного	10 000
- постійного	8 000
Напруга на ванні, В	0...72
Регулювання напруги плавки	плавне під навантаженням
Мінімальний залишковий тиск в камері, Па	1,06
Тиск в камері при плавці, кПа	20...300
Індукція зовнішнього поля в зоні плавки, Тл	до 0,5
Продуктивність установки, кг/годину	до 150
Максимальна площа поперечного перерізу зливку, мм ²	до 38000
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

Зовнішнє поздовжнє магнітне поле в робочій зоні створювали за допомогою соленоїдів, котрі були розміщені на кристалізаторах. Використовували, як водоохолоджувані соленоїди, виготовлені з мідної

трубки, так і неохолоджувані соленоїди – із мідної шини [193]. Для живлення обмоток соленоїду використовували стандартне джерело постійного струму ВС-400.

Застосування випрямляча ВС-400, в комплексі з логічним модулем SRB1218D, дозволяло створювати в зоні плавки як постійне магнітне поле, так і реалізовувати різні варіанти імпульсного електромагнітного впливу (рис. 2.6). Індукція магнітного поля в зоні плавки при цьому складала до 0,2...0,3 Тл. Успішну можливість використання імпульсних магнітних полів при ЕШП в магнітному полі вперше було показано в роботі [131].

Для керування тривалістю імпульсів використовували програмований логічний модуль SRB1218D. Даний модуль забезпечує незалежне керування чотирма каналами (процесами), а також їх сумісну комбінацію по заданій програмі з дискретністю до 0,01 с.

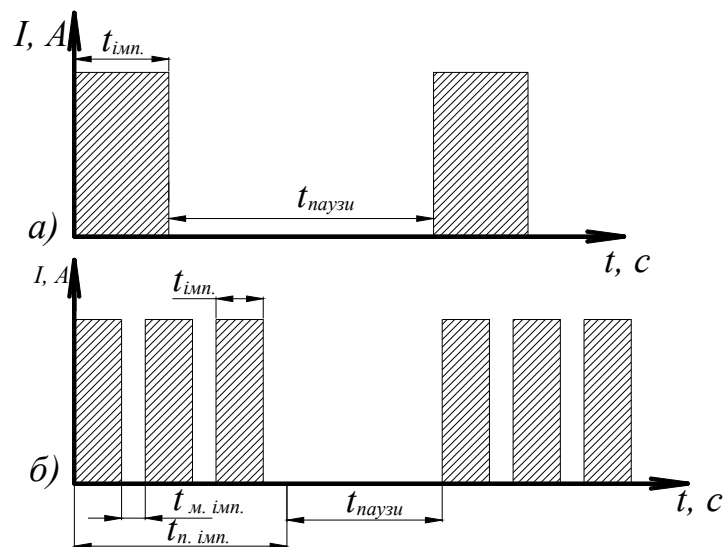


Рисунок 2.6 – Варіанти живлення соленоїда для створення імпульсних магнітних полів: *a* – окремі імпульси, *б* – групи імпульсів.

Реєстрацію параметрів плавки і електромагнітного впливу (напруга і струм плавки, швидкість подавання електроду, струм в магнітному контурі) та їх подальшу обробку здійснювали за допомогою аналого-цифрових перетворювачів ADA-1401 та USB-6008, з програмним забезпеченням

PowerGraph та LabView. Аналогові сигнали параметрів плавки нормалізували за допомогою індивідуально розроблених перетворювачів сигналів з гальванічною ізоляцією типу PSA. Контрольно-вимірвальна апаратура дозволяє одночасно реєструвати до 12 каналів з кроком дискретизації до 350 кГц.

Схема процесу ЕШП в магнітному полі показана на рисунку 2.7. Її принципова відмінність від класичного ЕШП полягає в тому, що процеси плавлення, перенесення і кристалізації металу відбуваються під впливом зовнішнього поздовжнього магнітного поля, створеного соленоїдом, котрий охоплює кристалізатор.

Плавлення і кристалізація металу здійснюються в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі, що герметично з'єднаний з піддоном і вакуумною камерою. Витратний електрод за допомогою інвентарної головки кріпиться до водоохолоджуваного штоку, який здійснює переміщення електроду і підвід до нього електричного струму.

Після монтажу електроду і засипки попередньо прогартованого флюсу за допомогою вакуумної системи з плавильного простору відкачували повітря до рівня $10^{-2} \dots 5 \times 10^{-2}$ мм.рт.ст. Далі вакуумну камеру заповнювали аргоном, до надлишкового тиску 0,2...0,5 Ат.

Наведення шлакової ванни здійснювали шляхом «холодного» старту, оскільки умови камерного переплаву значно ускладнюють заливання розплавленого флюсу для «рідкого» старту електрошлакового процесу. Після наведення шлакової ванни шляхом регулювання швидкості подачі електроду виходили на стаціонарні режими плавки та включали магнітне поле.

На заключній стадії процесу, з метою виведення усадкової раковини, плавно зменшували швидкість подавання електроду і електричну напругу на ванні, потім електрод зупиняли і в залежності від діаметру зливку витримували при нарузі 8...12 В протягом 2...8 хв.

Експерименти проводили при перепаві титанових сплавів марок ВТ1-0, Grate 4, ВТ6, ТС6, ОТ4 тощо. Для переплаву використовували флюс марки

АН-Т4 (CaF_2 - 15% SrCl_2), а також дослідні сольові флюси на основі CaF_2 з додаванням SrCl_2 , MgF_2 , Na_3AlF_6 . При проведенні експериментів випробовували різні режими електромагнітного впливу.

За результатами експериментів оцінювали в першу чергу вплив магнітних полів на технологічні та електричні параметри електрошлакового процесу і особливості формування зливку.

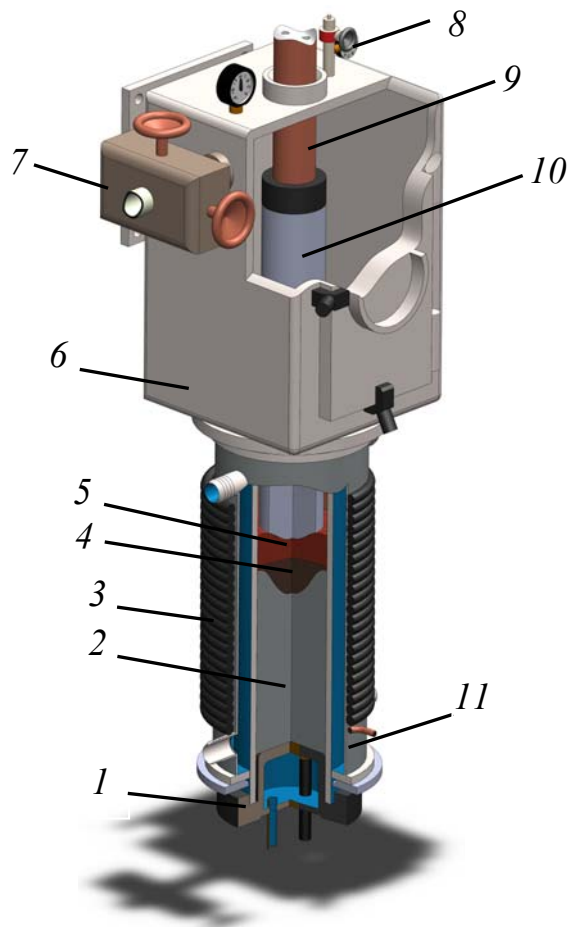


Рисунок 2.7 – Схема процесу ЕШП в магнітному полі: 1 – піддон; 2 – зливков; 3 – електромагнітна система (соленоїд); 4 – металева ванна; 5 – шлакова ванна; 6 – вакуумна камера; 7 – вакуумний затвор; 8 – запобіжний клапан; 9 – шток; 10 – витратний електрод; 11 – кристалізатор.

Для оцінки впливу магнітних полів на характер утворення і розмір дендритів виготовляли поздовжні та поперечні макрошліфи зливків. Макроструктуру зливків оцінювали оптичним методом.

Дослідження властивостей металу проводили за загальноприйнятими методиками газового, спектрального, хімічного аналізів, оптичної металографії, іспитами на твердість, статичну міцність і пластичність та ударну в'язкість.

Висновки до розділу 2.

1. Розроблено «холодну» фізичну модель для дослідження особливостей плавлення витратного електроду, характеру формування і відриву крапель електродного металу та їх руху в шлаковій ванні при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів. Модель базується на плавленні витратного електроду, виготовленого із сплаву Вуда, в оптично-прозорому електроліті за рахунок Джоулевого тепла, що виділяється в ньому при проходженні електричного струму.

2. Показано, що серед електролітів CaCl_2 , NaCl , ZnCl_2 та NaOH для моделювання процесів плавлення витратного електроду більш підходить насичений водний розчин ZnCl_2 . Він має найвищу із досліджуваних електролітів температуру кипіння (близько 130°C) і в процесі експериментів тривалий час зберігає оптичну прозорість.

3. Налагоджено обладнання і відпрацьовано методики експериментальних досліджень фізичних властивостей (в'язкість, електропровідність, температурний інтервал твердіння) сольових флюсів на основі CaF_2 . Температурну залежність в'язкості флюсових композицій визначали за допомогою ротаційного віскозиметра з граничною відносною похибкою 10%. Високотемпературні дослідження електропровідності проводили шляхом вимірювання активної компоненти падіння напруги на вольфрамових електродах, занурених в розплав із застосуванням мостової схеми. Тарування приладу здійснювали по розплаву KCl з відомою електропровідністю.

4. Для проведення натурних експериментів з виплавки титану, при застосуванні різних видів дії магнітних полів на процес плавки, було модернізовано установку для камерного електрошлакового переплаву титанових сплавів. Установка оснащена електромагнітною системою, тиристорним блоком плавного регулювання напруги плавки та діодним випрямлячем, що дозволяє проводити процес плавки на змінному та постійному струмах під впливом поздовжніх постійних і імпульсних магнітних полів.

РОЗДІЛ 3

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВИТРАТНОГО ЕЛЕКТРОДУ ПРИ ЕШП ПІД ВПЛИВОМ МАГНІТНИХ ПОЛІВ

3.1. Аналіз факторів, що впливають на плавлення електроду та перенесення крапель електродного металу.

ЕШП характеризується низкою технологічних і електричних параметрів, які впливають на процеси плавлення витратного електроду та перенесення крапель електродного металу. Вони тісно пов'язані між собою і зміна одного із них веде за собою зміну всіх інших [197].

Особливою рисою ЕШП є характер виділення тепла, необхідного для реалізації процесу плавлення електроду. Воно виділяється в шлаковій ванні в результаті проходження через неї електричного струму. Його кількість залежить, перш за все, від величини струму і електричного опору шлакової ванни. В свою чергу, сила струму плавки зростає при підвищенні напруги на шлаковій ванні і зменшенні її опору.

Закономірностям розподілення тепла при ЕШП, що використовується для плавлення електроду і підтримання в розплавленому та перегрітому стані шлакової і металевий ванн, присвячено чимало досліджень [197-206]. В основному, тепло шлакової ванни розподіляється на наступні складові:

- тепло, яке витрачається на підігрів і плавлення електродного металу, і також на його підігрів при проходженні через шлак у вигляді крапель;
- тепло, яке передається шлаковою ванною, стінкам кристалізатора і відводиться водою, що їх охолоджує;
- тепло, що випромінюється дзеркалом шлакової ванни на стінку кристалізатора, в атмосферу і електрод;
- тепло, що передається шлаковою ванною металевій ванні за рахунок теплопровідності та з краплями електродного металу.

На величину і співвідношення вищезгаданих складових витрат тепла впливають такі фактори, як схема процесу переплаву, склад і кількість флюсу, електричний режим, співвідношення розмірів електроду і кристалізатора, властивості металу, що переплавляється та інші. При цьому, не вся кількість тепла використовується корисно. Зокрема, це тепло, що випромінюється дзеркалом шлакової ванни на стінку кристалізатора і в атмосферу, а також здебільшого тепло, яке відводиться стінкою кристалізатора, в піддон та акумулюється зливком, звідки відводиться водою.

До корисних складових витрат тепла слід віднести тепло, що йде на підігрів і плавлення електродного металу та його перегрів при проходженні через шлак у вигляді крапель.

Загальні закономірності і характер плавлення витратних електродів великих перерізів при ЕШП вперше були досліджені в роботі [198]. Автори визначали вплив швидкості подачі електроду на стійкість ЕШП та на характер краплеутворення. Було встановлено, що при недостатній швидкості, процес плавки переходить в електродуговий. Торець електроду набуває плоскої форми, по якому переміщаються («блукають») електродні краплі. При збільшенні швидкості подачі електроду, переміщення крапель по плоскому торцю електроду призупиняється, і їх відрив відбувається в центральній частині електроду, а він сам набуває конічної форми. Подальше збільшення швидкості подачі електроду призводить до збільшення висоти його конічної частини та зменшення відстані між його кінцем і дзеркалом металеві ванни. Це може призводити до коротких замикань (дугових розрядів) крапель електродного металу на металеву ванну. Поява дугових розрядів підтверджується наявністю на осцилограмах напруги і струму коливань, властивих дуговому процесу. Таким чином, величина струму і стійкість електрошлакового процесу значно пов'язані зі швидкістю подачі електроду.

Важливим фактором, що впливає на процеси плавлення електроду при ЕШП, є характер розподілення електричного струму в шлаковій ванні. Ці

процеси досліджували в роботах [199, 200, 206]. Авторами доведено, що розподілення струму в шлаковій ванні визначається співвідношенням опору проходження струму на ділянках: витратний електрод – металева ванна і витратний електрод – стінка кристалізатора. Переважно основна доля струму (70-90%) протікає в ланцюгу: витратний електрод-металева ванна, проте, в деяких випадках, через стінку кристалізатора може переходити до 90% струму переплаву [197]. Також встановлено, що в ланцюгу змінного струму утворюється постійна складова струму (до 20-30% від величини змінного струму). Випрямлення струму залежить від глибини шлакової ванни, її складу та наявності шунтування струму стінкою кристалізатора. Загалом, характер розподілення електричного струму в шлаковій ванні надзвичайно важливий, оскільки він впливає як на характер плавлення так і на гідродинамічні процеси в шлаковій ванні [159, 160, 197].

Як згадувалось вище, електродний метал переноситься через шлакову ванну в металеву ванну, у вигляді крапель. Частота відриву крапель, їх середній розмір, довжина шляху, що долається ними через шлак, зумовлена параметрами процесу плавки. На краплю, що утворюється на торці електроду, головним чином діють наступні сили: тяжіння, архімедова, електродинамічна, поверхневого натягу, в'язкого тертя, обумовленого рухом шлакового розплаву (рис. 3.1). У випадку застосування зовнішнього магнітного поля на краплю впливає електромагнітна сила, викликана взаємодією електричного струму в краплі з зовнішнім магнітним полем. Її напрямком визначається вектором індукції цього поля.

Загалом, процес плавлення витратного електроду відбувається наступним чином. Джоулеве тепло забезпечує нагрів шлакової ванни вище температури плавлення матеріалу електроду. За рахунок цього відбувається оплавлення зануреного в шлак електроду, з утворенням на його торці плівки електродного металу. Далі маси рідкого металу рухаються до вершини електроду та утворюють краплю. Відповідно із збільшенням розмірів краплі, завдяки надходження нових порцій металу, збільшуються рівнодіючі

гравітаційних F_T , електродинамічних F_{ed} і сили в'язкого тертя F_{ϵ} , а сили поверхневого натягу F_{Π} , із-за її нагріву зменшуються. Крапля набуває витягнутої форми, утворюючи в верхній частині звуження («шийку»). В момент, коли рівнодіючі сили перевищують сили поверхневого натягу, «шийка» руйнується і крапля відривається від торця електроду. Частина її металу (орієнтовно 25%) силою поверхневого натягу затримується на електроді і потім розтягується по його торцю у вигляді плівки [205].

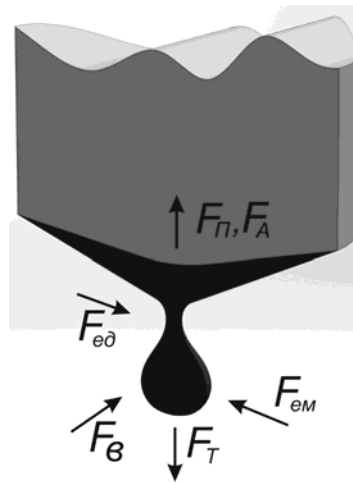


Рисунок 3.1 – Схема дії сил на краплю що утворюється: F_T - сила тяжіння; F_A – Архімедова сила; F_{Π} – сила поверхневого натягу; F_{ed} – електродинамічна сила; F_{ϵ} – сила в'язкого тертя (напрямок зображений умовно); $F_{ем}$ – електромагнітна сила (напрямок зображений умовно).

Крапля, що відірвалася, проходить через шлакову ванну в металеву. На краплю, що рухається в шлаковій ванні, діють сила тяжіння F_T , архімедова сила F_A , електромагнітна сила $F_{ем}$, та сила в'язкого тертя F_{ϵ} . Напрямок і величина останньої, значною мірою, залежить від інтенсивності і структури гідродинамічних течій в шлаковій ванні, які суттєво впливають на траєкторію руху краплі.

Відрив крапель з торця витратного електроду досліджували методом осцилографування, рентгенографування процесу ЕШП, а також на прозорих

моделях, при переплаві легкоплавких сплавів [147, 201-203]. За результатами досліджень авторами було вставлено, що значний вплив на плавлення електроду і відрив крапель має електродинамічна сила F_{ed} , яка направлена перпендикулярно лініям струму в провіднику [197, 204].

На розмір металевих крапель і характер плавлення електроду в великій мірі також впливають різного роду зовнішні фізичні дії: механічні, ультразвукові коливання, електромагнітний вплив та ін. [159, 197].

На сьогодні є чимало робіт по використанню електромагнітного впливу при ЕШП. Проте, даних по впливу зовнішніх магнітних полів на характер плавлення витратного електроду, відрив електродних крапель, їх рух в шлаковій ванні дуже мало. Тому дослідження цих процесів є актуальним завданням, яке має науковий і практичний інтерес. Одним з ефективних способів досліджень в цьому напрямку є використання фізичного моделювання, із застосуванням прозорих моделей.

3.2. Фізичне моделювання процесів плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу при ЕШП.

Дослідження проводили із застосуванням фізичної моделі, яка заснована на плавленні витратного електроду зі сплаву Вуда, в оптично прозорому розчині хлористого цинку ($ZnCl_2$). Нагрівання і плавлення електродного металу відбувається за рахунок Джоулевого тепла, що виділяється в розчині $ZnCl_2$, при проходженні в ньому електричного струму, тобто аналогічно ЕШП.

Докладно методика фізичного моделювання процесу плавлення витратного електроду при ЕШП і відповідне обладнання описані в розділі 2.

Мета експериментів полягала у визначенні впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля на гідродинаміку шлакової ванни, особливості плавлення витратного електроду, характер утворення і відриву крапель електродного металу, траєкторії їх руху в шлаковій ванні.

Експериментально досліджували швидкість плавлення електродного металу, частоту відриву крапель і їх середню масу, структуру і інтенсивність гідродинамічних течій в шлаковій ванні, траєкторії переміщення крапель в ванні та інші параметри ЕШП.

Досліди проводили з використанням різних схем електричного живлення та різних схем електромагнітного впливу (рис. 3.2). Для плавлення витратного електроду використовували змінний електричний струм промислової частоти 50 Гц (рис. 3.2 а, в), постійний струм (рис. 3.2 б), а також модульований струм (рис. 3.2 г). В останньому випадку, під час дії імпульсів зовнішнього магнітного поля, застосовували амплітудно-фазову модуляцію струму в електроді.

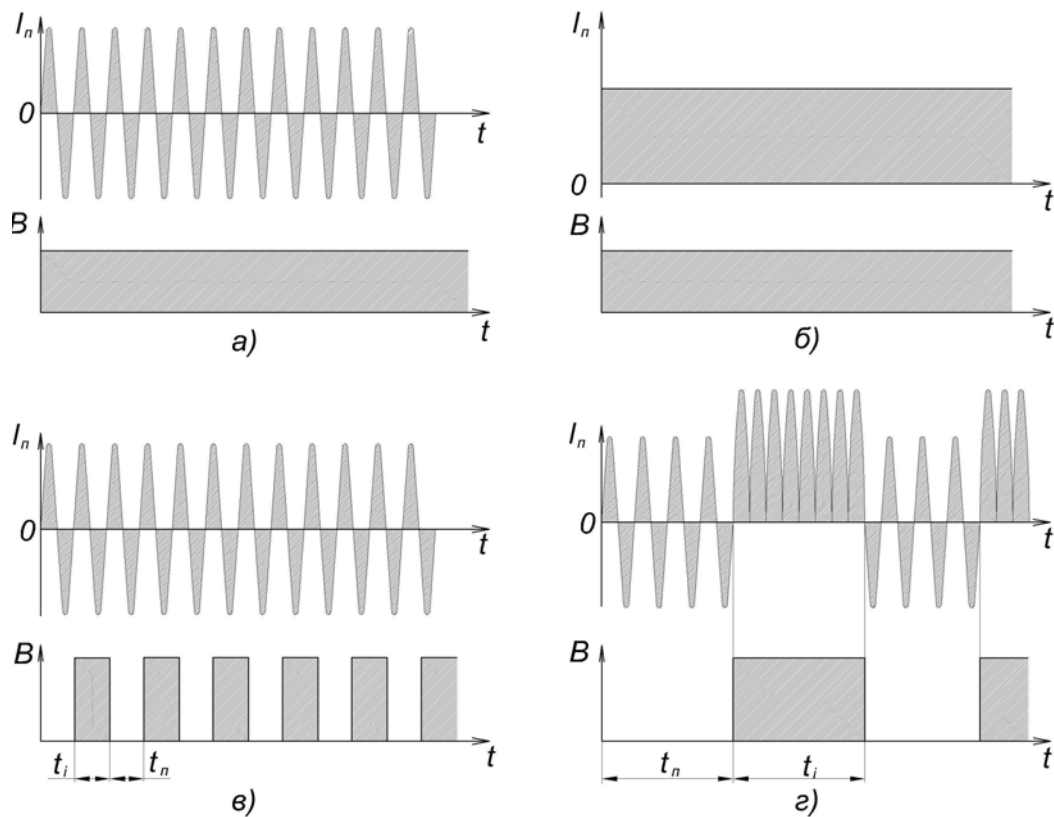


Рисунок 3.2 – Схеми зміни струму плавки I_n і індукції зовнішнього магнітного поля B при різних схемах проведення експериментів (t_i і t_n тривалість імпульсу і паузи магнітного поля, відповідно): а- струм плавки змінний, магнітне полі постійне; б – струм плавки постійний, магнітне поле постійне; в – струм плавки змінний, магнітне поле імпульсне; г – струм плавки модульований, магнітне поле імпульсне.

Експерименти проводили за відсутністю зовнішнього магнітного поля та в умовах впливу поздовжнього магнітного поля, яке діяло в постійному (безперервному) (рис. 3.2 *а, б*) або імпульсному режимах (рис. 3.2 *в, г*).

Магнітне поле створювали системою з двох послідовно з'єднаних соленоїдів, які підключали до джерела живлення постійного струму. Дана система дозволяла створювати в робочій зоні ($z=20\dots70$ мм, рис. 3.3) однорідне магнітне поле індукцією до 0,2 Тл в безперервному і до 0,4 Тл – в імпульсному режимах. Режими проведення експериментів наведені в табл. 3.1.

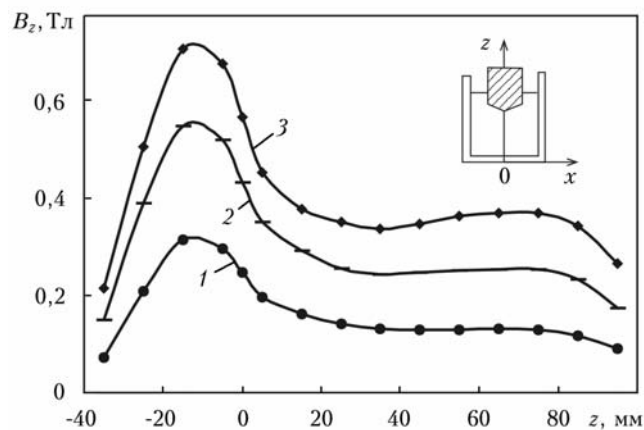


Рисунок 3.3 – Розподілення індукції зовнішнього магнітного поля по осі модельної ємності ($x=0$) при різних значеннях струму в обмотках соленоїдів, А: 1 - 300; 2 - 400; 3 - 500.

Таблиця 3.1 – Параметри експериментів з фізичного моделювання процесів плавлення витратного електроду при ЕШП

Схема проведення експерименту	Параметри магнітного поля			Напруга на ванні, В	Швидкість подачі електроду, мм/с	I _п ,* А
	t _i , с	t _п , с	B, Тл			
Без магнітного поля	-	-	-	10	0,05	12
З постійним магнітним полем	-	-	0,1...0,2	10	0,05...0,06	12
З імпульсним магнітним полем	0,5...1,5	2	0,15...0,35	8...10	0,05...0,07	12
	2...2,5	4	0,15...0,32	10	0,05...0,07	12
	3	3	0,15...0,32	10	0,05...0,07	12
З імпульсним магнітним полем і модуляцією струму	2	4...6	0,15...0,35	10/10	0,07...0,1	12 (12)
	2	6...10	0,15...0,35	10/25	0,08...0,1	12 (25)

* в дужках наведена сила постійного струму плавки під час імпульсу магнітного поля

3.2.1. Вплив магнітних полів на структуру гідродинамічних течій в шлаковій ванні.

Аналіз факторів, що впливають на характер плавлення і крапельного переносу металу при ЕШП вказує, що значний вплив на ці процеси чинять інтенсивність і напрямок гідродинамічних течій в шлаковій ванні. В свою чергу гідродинаміка шлакової ванни в значній мірі залежить від сил електромагнітного походження і відповідно - зовнішніх магнітних полів.

В розробленій фізичній моделі, в якості робочої рідини, що імітує шлакову ванну, використано оптично прозорий розчин ZnCl₂. Це надає можливість візуально спостерігати і досліджувати вплив зовнішніх магнітних полів на структуру течій у ванні. Напрямок і швидкість руху рідини визначали по переміщенню маленьких зважених часток, при подальшій розкадровці відеозаписів експериментів.

Характер руху модельної рідини в експериментах, без накладення зовнішнього магнітного поля, наведений на рисунку 3.4 *a*. В цьому випадку конвективні потоки спостерігались, як правило, у вертикальній площині. Рідина рухалась вниз по осі ванни і вгору біля бокових стінок ємності. Тим самим в області під електродом утворювався вихровий тор. В деяких випадках, в верхній ділянці ванни, біля стінок ємності, утворювалися невеликі вторинні завихрення (рис. 3.4 *a*). Загалом максимальна швидкість течій в експериментах без використання зовнішнього магнітного поля складала біля 20 мм/с.

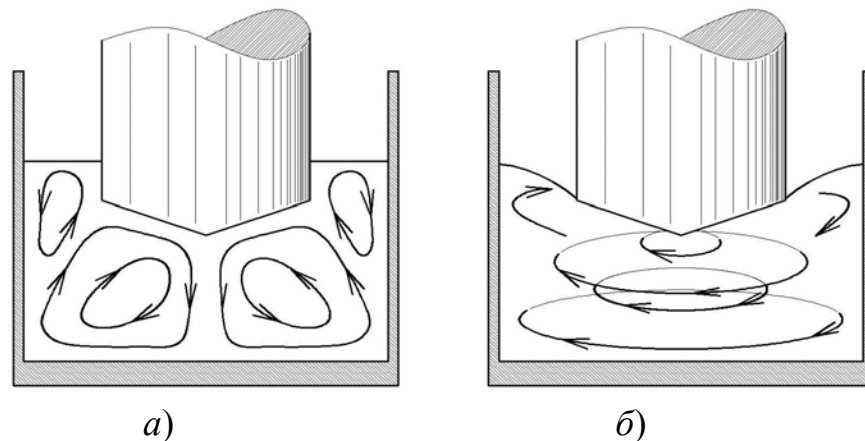


Рисунок 3.4 – Траєкторії гідродинамічних течій при моделюванні процесу ЕШП без використання магнітного поля (*a*) та з використанням поздовжнього магнітного поля (*б*).

В експериментах з використанням зовнішнього поздовжнього магнітного поля, у всіх випадках, до конвективних течій у вертикальній площині, додавались горизонтальні течії навколо осі ванни (рис. 3.4 *б*), в результаті цього утворювалися об'ємні течії розчину. В деяких випадках, при збільшенні інтенсивності горизонтальних течій, вони придушували течії в вертикальній площині, і рух у ванні складався виключно із горизонтального обертання електроліту навколо осі ванни (рис. 3.4 *б*).

Механізм формування горизонтального обертання пов'язаний з взаємодією радіальної складової струму в електроліті з осьовою складовою

зовнішнього магнітного поля, внаслідок чого формуються електромагнітні сили азимутального напрямку, які, відповідно, призводять до обертання електроліту навколо осі ванни.

Швидкість такого обертання - нерівномірна по радіусу ванни. Максимальна кутова швидкість спостерігалась в прилеглих зонах витратного електроду і плавно зменшувалась до мінімальних значень біля стінок ємності (рис. 3.5). Це пояснюється характером розподілу електричного струму у ванні, коли його щільність максимальна біля торця електроду, і мінімальна - біля стінок ванни.

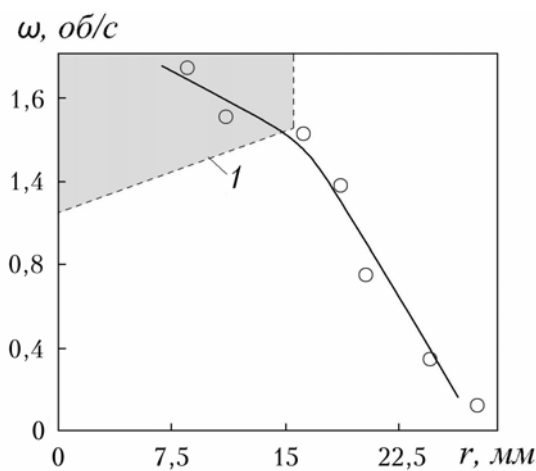


Рисунок 3.5 – Залежність кутової швидкості обертання електроліту ω від відстані r до осі ванни для $B=0,32$ Тл, $I_{\text{ел}}=12$ А, $t_i=3$ с: 1 - контур витратного електроду.

Як було показано в п. 3.2 експерименти з фізичного моделювання проводили за різними схемами (рис. 3.2). Першочерговим завданням при кожній із реалізованих схем була інтенсифікація магнітогідродинамічних процесів в шлаковій ванні. У зв'язку з цим, аналізували максимальну швидкість руху електроліту, для кожної застосованої схеми електромагнітного впливу.

Слід зазначити, що максимальна швидкість течій рідини суттєво залежала від параметрів зовнішнього магнітного поля і електричного струму

в електроліті, проте у всіх випадках вона значно перевищувала швидкість течій при відсутності зовнішнього електромагнітного впливу (рис. 3.6).

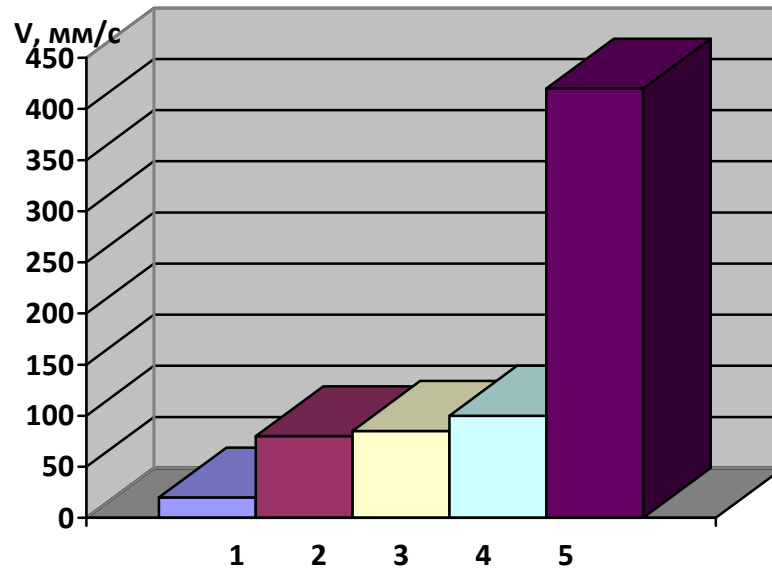


Рисунок 3.6 – Максимальна швидкість руху електроліту при різних схемах моделювання: 1 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле відсутнє; 2 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле постійне 0,2 Тл; 3 - струм плавки постійний 12 А, магнітне поле постійне 0,2 Тл; 4 - струм плавки змінний 12 А, магнітне поле імпульсне 0,32 - 0,35 Тл; 5 - з модуляцією струму плавки 12/35 А і імпульсним магнітним полем 0,35 Тл.

При застосуванні постійного магнітного поля ($B=0.2$ Тл) та змінного струму плавки ($I_{ел}=12$ А) (рис. 3.2 а) максимальна швидкість течій електроліту складала 80 мм/с, що значно вище, ніж при відсутності магнітного поля – 20 мм/с. В даному випадку варто зауважити, що взаємодія змінного струму в електроліті з постійним зовнішнім магнітним полем має створювати вібрацію модельної рідини з частотою 50 Гц. Проте, в наших експериментах виявлено утворення горизонтальних потоків електроліту, що ймовірно пов'язане з порушенням осьової симетрії процесу. Згадане порушення можливо зумовлене зміщенням електроду від осі ванни, дією магнітного поля від горизонтальних ділянок струмовідводів та частковим випрямленням робочого струму, внаслідок електролітичних процесів.

Інтенсивність вищезгаданих потоків частково збільшується (до 90 мм/с) в результаті використання постійного магнітного поля ($B=0.2$ Тл) та постійного струму плавки ($I_{el}=12$ А). Проте, при застосуванні постійного струму плавки (незалежно від його полярності) в ванні значно інтенсифікувались процеси електролізу, які проявлялись в сильному помутнінні електроліту, що значно ускладнювало подальше проведення експериментів.

Застосовуючи імпульсне магнітне поле індукцією до $B=0.35$ Тл та змінний струм плавки ($I_{el}=12$ А) швидкість потоків електроліту в деяких випадках було збільшено до 100 мм/с. Це пов'язано зі збільшенням індукції магнітного поля та відповідно збільшенням його впливу на гідродинамічні процеси в ванні.

Слід підкреслити, що при застосуванні імпульсного магнітного поля, швидкість обертання модельної рідини залежала не тільки від індукції магнітного поля, але і від тривалості дії його імпульсів. На рисунку 3.7 наведена залежність швидкості горизонтального обертання модельної рідини від тривалості імпульсів магнітного поля. Із графіка можна зробити висновок, що при збільшенні тривалості імпульсу до 1,5...2,5 с швидкість обертання рідини лінійно збільшується, а далі стабілізується на рівні 100 мм/с. Це свідчить про те, що для ефективного впливу на перемішування ванни, тривалість імпульсу магнітного поля повинна перевищувати деяке мінімальне значення, при якому встигали би сформуватися стійкі потоки рідини. В нашому випадку це досягалось при тривалості імпульсу магнітного поля більше 2,0...2,5 с (рис. 3.7).

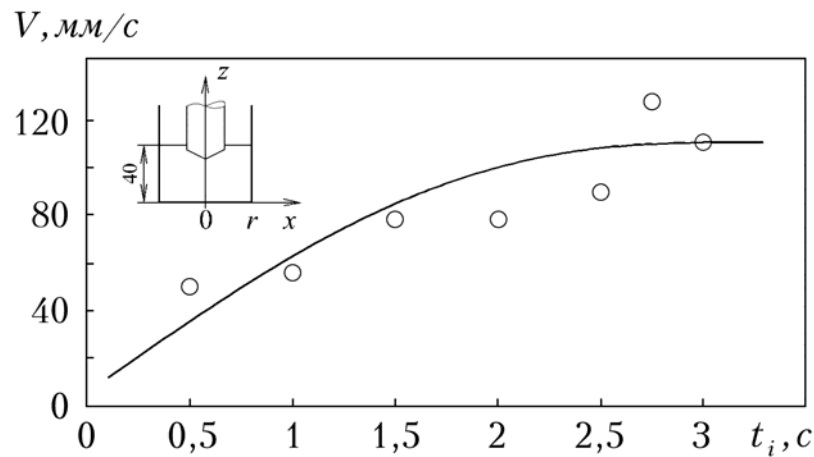


Рисунок 3.7 – Залежність швидкості обертання електроліту від тривалості імпульсу магнітного поля: $B = 0,32$ Тл, $I_{\text{эл}} = 12$ А, $x = 0,5r$, $z = 25$ мм.

Найбільший гідродинамічний ефект виявлено в експериментах з використанням модуляції струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля (3.2 з). В даному випадку, максимальна швидкість обертання модельної рідини досягала 420 мм/с. Це приблизно в 4,2 рази вище, ніж при змінному струмі плавки і в 20 разів вище, ніж при відсутності електромагнітного впливу. Такі суттєві зміни структури і інтенсивності гідродинамічних течій в ванні під дією магнітних полів відбувались за рахунок декількох факторів. Зокрема завдяки застосуванню постійного струму плавки, в момент дії імпульсу магнітного поля, і його підвищенню, більше ніж у 2,5 рази. В результаті це призводило до значного підвищення електромагнітної сили, яка діяла на рідину, без зміни її напрямку.

Таким чином, завдяки імпульсному поздовжньому магнітному полю в шлаковій ванні формуються горизонтальні течії електроліту, швидкість яких залежить від роду і сили струму в електроліті, індукції магнітного поля і тривалості імпульсів його дії. Зазначені вище течії впливають на особливості плавлення витратного електроду, що буде показано далі.

3.2.2. Вплив магнітних полів на деформацію поверхонь шлакової і металеві ванн.

Візуальне спостереження, в процесі фізичного моделювання, за поверхнями шлакової і металеві ванн показали, що під дією зовнішніх магнітних полів вони змінюють свою форму.

Зокрема, внаслідок утворення, під дією поздовжнього магнітного поля, горизонтального обертання ванни навколо своєї осі формуються відцентрові сили, які призводять до деформації вільної поверхні ванни (рис. 3.8). Внаслідок цього рівень рідини по осі ванни знижується, а біля стінок ємності – підвищується. В експериментах з модуляцією струму плавки, під час імпульсів магнітного поля, було визначено величину деформації вільної поверхні ванни та її залежність від максимальної швидкості обертання електроліту (рис. 3.9). Величина деформації, яка визначалась глибиною прогину поверхні ванни, збільшувалась пропорційно збільшенню швидкості обертання електроліту. При швидкості обертання 350...420 мм/с її максимальна величина досягала 10...12 мм.

Також встановлено, що деформація вільної поверхні ванни призводила до зниження глибини занурення електроду в модельну рідину. Цей ефект обумовлював підвищення електроопору ділянки контуру *витратний електрод - металева ванна* і, відповідно, зниження струму, що проходить через електрод. Таким чином, фізичне моделювання підтвердило гіпотезу про те, що циклічні коливання струму плавки під дією імпульсного магнітного поля, які були зафіксовані в роботі [207], викликані, перш за все, деформацією вільної поверхні шлакової ванни.

Варто додати, що в разі дії магнітного поля в імпульсному режимі деформація поверхні ванни має періодичний характер, що створює додаткові вібрації в рідкому середовищі. Це додатково впливає на формування і відрив крапель електродного металу.

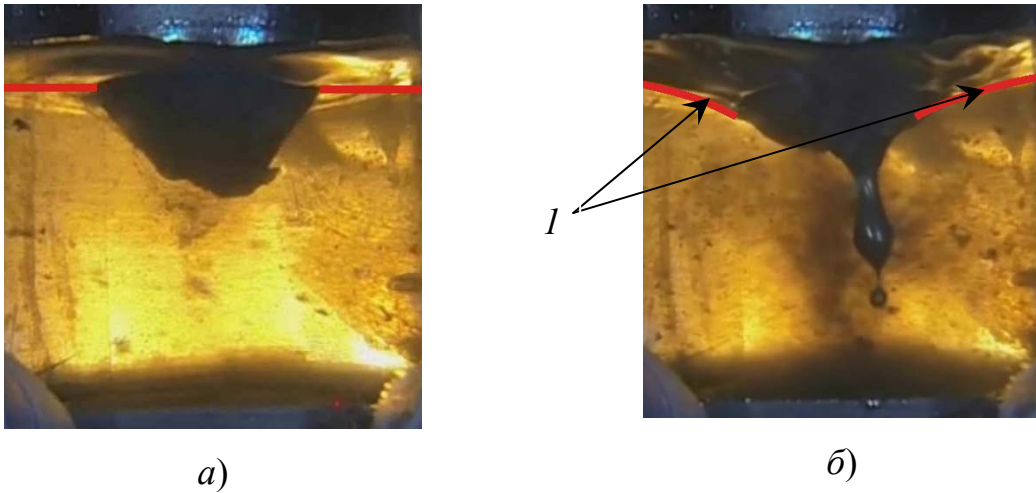


Рисунок 3.8 – Вигляд вільної поверхні модельної рідини в експериментах без застосування магнітного поля (а) та з застосуванням магнітного поля (б): l - контур деформації поверхні ванни.

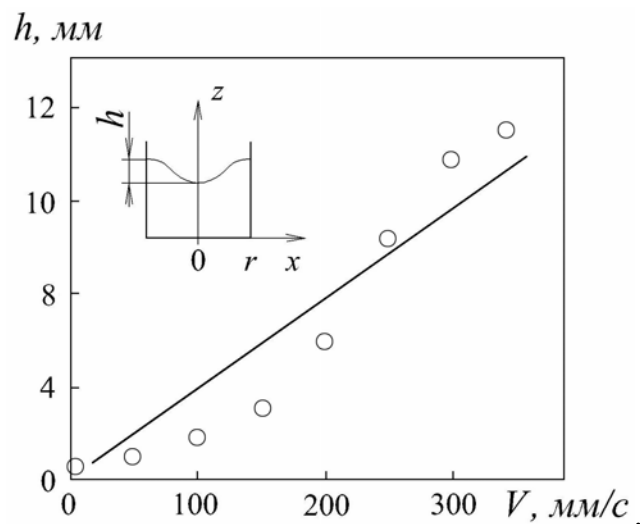


Рисунок 3.9 – Залежність глибини деформації вільної поверхні електроліту h від максимальної швидкості його обертання V .

При моделюванні процесу плавки електроду з застосуванням магнітних полів також було виявлено їх вплив на поверхню рідкої металевої ванни, тобто поверхню поділу шлакова - металева ванни (рис 3.10). Такий вплив проявлявся у піднятті металевої ванни по власній осі. Цей ефект також пов'язаний з дією відцентрових сил і утворенням, по осі шлакової ванни області з пониженим тиском. Деформація поверхні металевої ванни також

сприяла зміні електричних режимів плавки і деякому переміщенню (стіканню) крапель електродного металу по поверхні металеві ванни, в момент їх потрапляння в останню.

Таким чином показано, що зовнішні магнітні поля через зміну структури і інтенсивності гідродинамічних течій в шлаковій ванні впливають на форму її вільної поверхні і форму поверхні поділу *шлакова - металева ванни*.

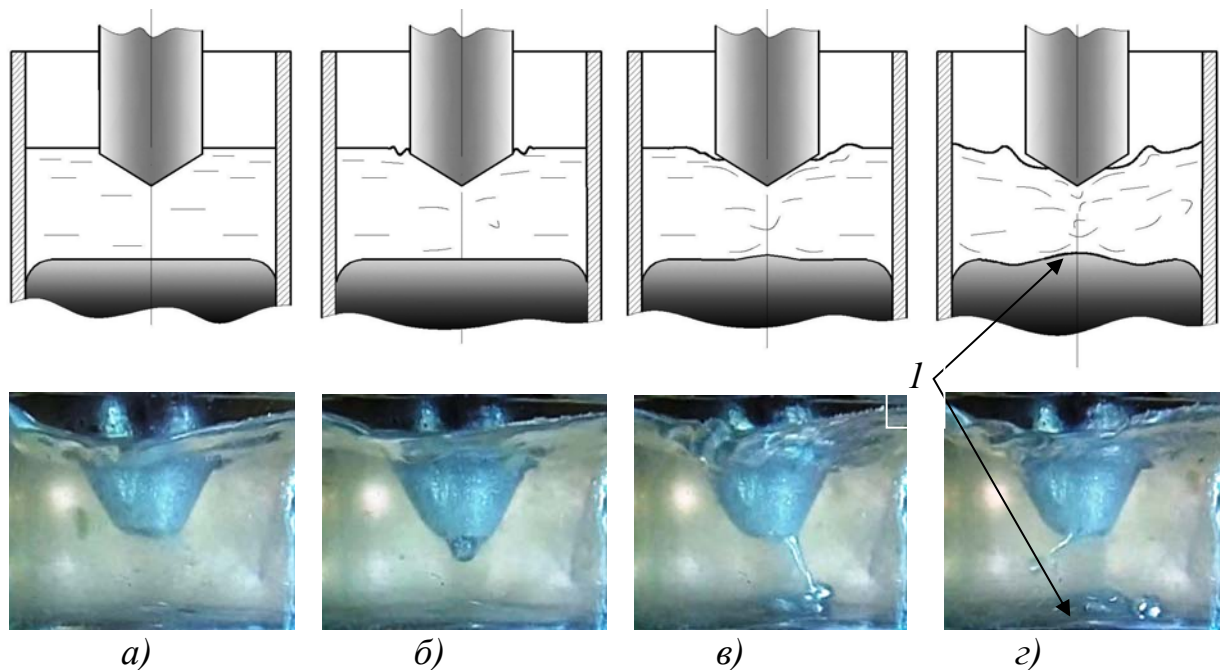


Рисунок 3.10 – Характер деформації дзеркала металеві ванни: *I*- зона підняття рівня металеві ванни: *a)* $V=0$ Тл; *б)* $V=0,15$ Тл; *в)* $V=0,25$ Тл; *г)* $V=0,35$ Тл.

3.2.3. Дослідження процесів плавлення і крапельного перенесення електродного металу під дією зовнішніх магнітних полів

Важливішою частиною експериментів з фізичного моделювання ЕШП було дослідження впливу зовнішніх магнітних полів на особливості плавлення витратного електроду, відрив крапель та їх переміщення в модельному розчині. Було проведено серію експериментів і отримано результати відносно характеру плавлення витратного електроду, без та з

використанням зовнішніх магнітних полів. Методика моделювання докладно описана в розділі 2, основні схеми проведення експериментів наведені в п. 3.2 (рис. 3.2).

В першу чергу, було проведено серію експериментів з моделювання плавлення витратного електроду, без використання зовнішнього магнітного поля. На рисунку 3.11 показано основні фази розвитку краплі при відсутності зовнішнього магнітного поля. Аналіз відеозаписів показав, що по мірі зростання краплі між нею і електродом утворюється тонка шийка, яка поступово витягується і потім руйнується у нижній частині. Основна крапля і додаткові малі краплі - сателіти, що утворюються після руйнування шийки, рухаються прямолінійно вниз по осі ванни, або зі зміщенням, якщо крапля утворюється на периферії.

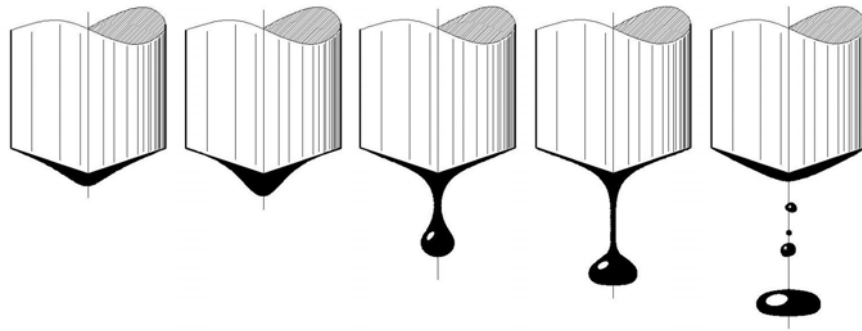


Рисунок 3.11 – Схема процесу краплеутворення металу в експериментах без використання зовнішнього магнітного поля.

Як показано на схемі (рис. 3.11), частина металу, що утворила шийку, після відриву краплі затримується на електроді і знову розтягується на оплавленій поверхні, за рахунок сил поверхневого натягу. У більшості випадків в момент руйнування шийки утворюється одна, або кілька додаткових малих крапель (крапель - сателітів) діаметром менше 2 мм.

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити наступні узагальнення. При відсутності зовнішнього магнітного поля, здебільшого (у 85-95% випадків), процес утворення і відриву краплі відбувається біля вершини конуса оплавлення, по осі електроду (рис. 3.12 *a*). Проте, в 10-15% випадків

крапля утворюється і відривається в периферійній зоні, із зміщенням від осі електроду (рис. 3.12 б), в 3-6% випадків зафіксовано одночасне утворення двох крапель (рис. 3.12 в).

Середня частота відриву крапель становила 0,62 Гц, тобто тривалість фази формування та відриву краплі складала 1,6 с. При цьому середня маса краплі дорівнювала 1,4 г, при її умовному діаметрі біля 6,5 мм (таб. 3.2).

Слід підкреслити, що дані стосовно частоти відриву крапель, отримані візуальним методом, були підтверджені методом осцилографування струму плавки. Були зафіксовані періодичні зростання струму плавки, «піки» яких відповідають моментам відриву крапель металу (рис. 3.13). Тобто метод осцилографування струму плавки доповнює та дає можливість отримання додаткових даних, щодо відриву крапель електродного металу.

Дещо іншого характеру набуває процес плавлення електроду при використанні зовнішніх магнітних полів. Узагальнивши результати фізичного моделювання можна стверджувати, що при кожній конкретній схемі проведення експериментів спостерігається декілька варіантів відриву крапель. Основні варіанти крапельного перенесення електродного металу при різних схемах проведення експериментів наведені на рисунку 3.14. Середня частота їх спостереження в залежності від схеми проведення експериментів надана в таблиці 3.3.

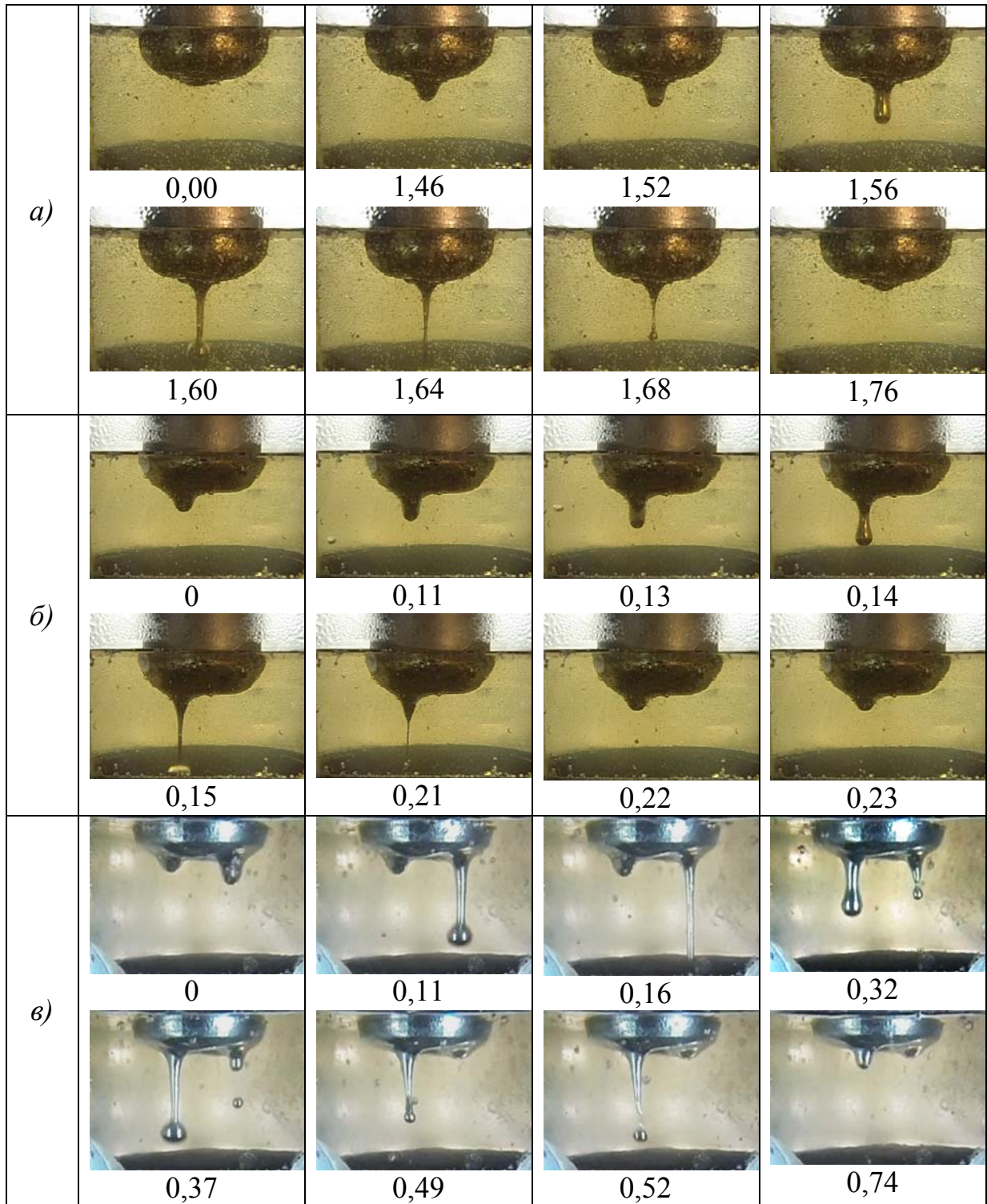


Рисунок 3.12 – Динаміка процесу краплеутворення і перенесення металу при відсутності магнітного поля: *а* – відрив краплі по центру; *б* – відрив краплі на периферії; *в* – одночасний відрив двох крапель. Цифрами вказаний час, с.

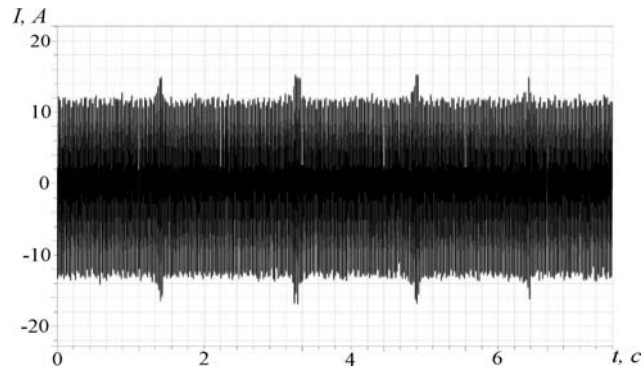


Рисунок 3.13 – Фрагмент осцилограми струму плавки при фізичному моделюванні: періодичні зростання струму відповідають моментам відриву крапель.

Таблиця 3.2. Параметри крапельного перенесення при фізичному моделюванні без використання зовнішнього магнітного поля.

Швидкість подачі електроду, мм/с	Швидкість плавки, г/с	Частота відриву краплі, Гц	Середня маса краплі, г	Середній діаметр краплі, мм
0,05	0,87	0,62	1,4	6,5

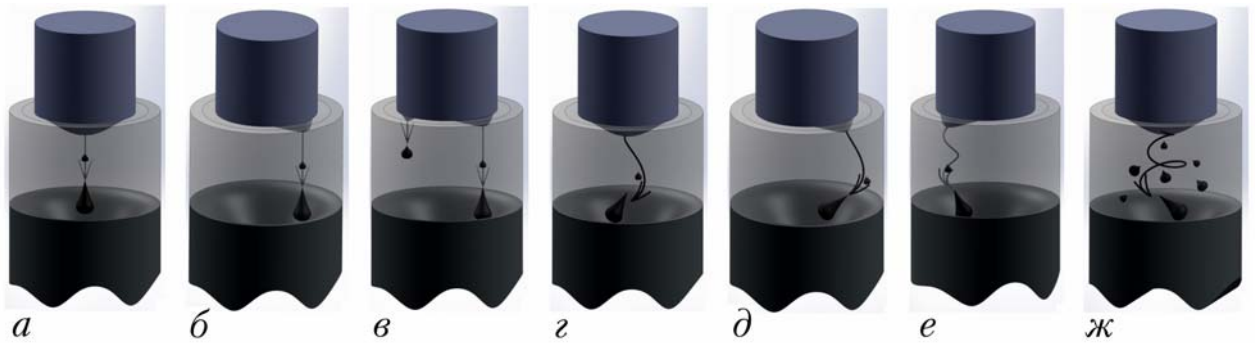


Рисунок 3.14 – Варіанти крапельного перенесення металу при різних схемах електромагнітного впливу: *а* - пряму лінійно, по осі ванни; *б* – пряму лінійно, на периферійних ділянках електроду; *в* – пряму лінійно, одночасно в декількох місцях; *г* – по осі ванни із незначним відхиленням; *д* – із незначним відхиленням, на периферійних ділянках; *е* – із спіральним закрученням, на периферійних ділянках; *ж* – із закрученням і руйнуванням, на велику кількість малих крапель

Таблиця 3.3 – Середня частота спостереження різних варіантів крапельного перенесення електродного металу при різних схемах проведення експериментів

Схема проведення експериментів	Середня частота спостереження, %						
	Рис. 3.14 а	Рис. 3.14 б	Рис. 3.14 в	Рис. 3.14 г	Рис. 3.14 д	Рис. 3.14 е	Рис. 3.14 ж
Струм плавки змінний, магнітне поле відсутнє	85-95	10-15	3-6	-	-	-	-
Струм плавки змінний, магнітне поле постійне	-	-	5-10	70-80	10-20	-	-
Струм плавки постійний, магнітне поле постійне	-	-	-	80-90	10-20	-	-
Струм плавки змінний, магнітне поле імпульсне	-	-	2-3	70-80	10-20	5-10	-
Струм плавки модульований, магнітне поле імпульсне	5-10	-	-	30-40	-	2-5	40-50

В експериментах із застосуванням змінного струму плавки 12 А та постійного магнітного поля 0,2 Тл, в середньому у 70-80% випадків краплі формуються і відриваються по осі електроду. Після руйнування «шийки» під дією вихрових течій, створених взаємодією струму плавки з постійним магнітним полем, основна крапля і додаткові маленькі краплі рухаються з незначним відхиленням від осі електроду (кут зміщення краплі становить 5...10°) (рис. 3.14 г). Верхня частина шийки за рахунок сил поверхневого натягу повертається на торець оплавленого електроду.

У 10-20 % випадків спостерігається інший варіант крапельного перенесення, з відривом крапель на периферійних ділянках (рис. 3.14 д). Крапля формується на периферії електроду. По мірі зростання краплі, під дією горизонтального обертання електроліту, вона переміщується по торцю електроду. Після набуття краплі критичного розміру за рахунок обертання рідини «шийка» закручується і руйнується. Це призводить до утворення додаткових малих крапель - сателітів, кількість яких більше, ніж у випадку

відриву крапель по осі електроду. Траєкторія руху крапель аналогічна до варіанту рисунку 3.14 г, але «завихрення» більш інтенсивне. Тобто магнітогідродинамічний ефект при утворенні і відриві крапель на периферії електроду є більший, ніж у випадку відриву крапель по осі електроду.

Крім двох вищезгаданих варіантів, у 5-10 % випадків зафіксовано формування і відрив крапель в декількох ділянках електроду одночасно. Горизонтальні обертальні течії електроліту додатково відхиляють їх від осі електроду. В іншому, процес утворення і переміщення крапель аналогічний варіанту рисунку 3.14 з. Динаміка згаданих варіантів краплеутворення і перенесення металу наведена на рисунку 3.15.

На наступному етапі проведення експериментів було застосовано схему з використанням постійного струму плавки 12 А та постійного магнітного поля індукцією 0,2 Тл. Перенесення крапель в даних експериментах відбувалось згідно варіантів рисунку 3.14 з і д у 80-90 та 10-20 % випадків, відповідно. За рахунок постійної складової струму плавки магнітогідродинамічний ефект, який виражався у завихренні крапель, був значно вищий, ніж при схемі з використанням змінного струму плавки. Проте, як згадувалось вище, через явище електролізу проведення експериментів при даній схемі було ускладнене.

Реалізація експериментів по схемі із застосуванням змінного струму плавки 12 А та імпульсного магнітного поля (в діапазоні імпульсів 0,5...2,5 с і пауз 2...4 с) забезпечувала прозорість електроліту протягом усього експерименту. Така схема за рахунок імпульсного режиму дозволяла збільшити індукцію магнітного поля до 0,35 Тл. Проте, в інтервалі імпульсів магнітного поля 0,5...1,0 с значного (і стабільного) впливу на швидкість плавлення електроду, частоту утворення крапель, їх масу не виявлено. Імовірною причиною може бути недостатня тривалість імпульсів магнітного поля для формування стійких обертальних течій електроліту, які б впливали на процес плавлення електроду.

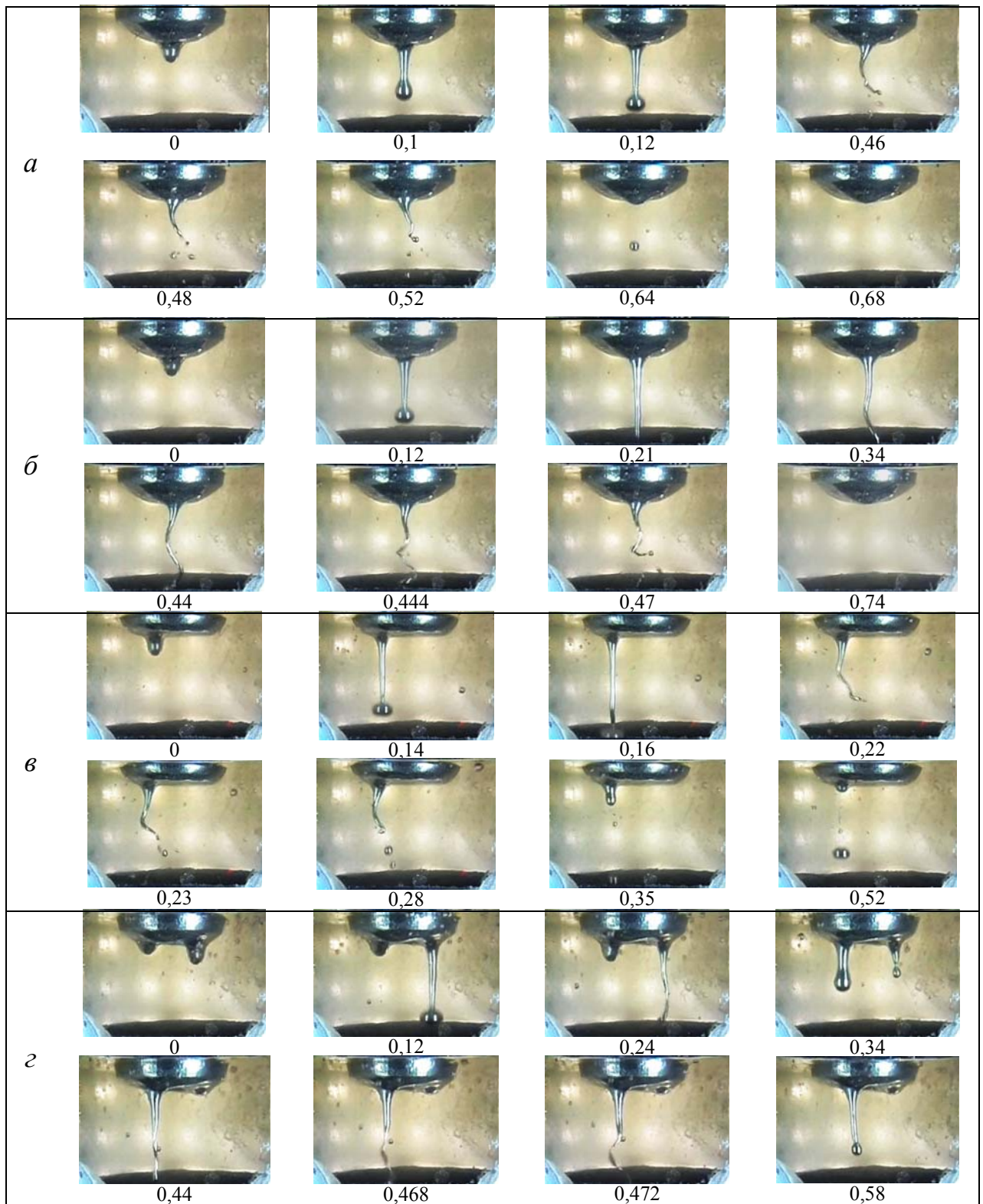


Рисунок 3.15 – Динаміка процесів краплеутворення і перенесення металу при застосуванні постійного магнітного поля: *а, б* – відрив краплі прямолінійно, із закрученням та її відхиленням різної інтенсивності; *в* – відрив краплі із незначним відхиленням, на периферійних ділянках; *г* – одночасний відрив двох (трьох) крапель та їх переміщення із незначним відхиленням. Цифрами вказаний час, с.

В діапазоні імпульсів магнітного поля 1,5...2,5 с характер плавлення електроду в цілому був аналогічний варіанту, із застосуванням постійного магнітного поля. Краплеперенесення в даному випадку відбувається згідно варіантів рисунку 3.14 *з, д, е, в*, при частоті їх спостереження 70-80, 10-20, 5-10 та 2-3 %, відповідно. При цьому, необхідно підкреслити, що у випадку співпадіння імпульсу магнітного поля і моменту відриву краплі, імпульсне поле інтенсивніше впливає на відхилення шийки і на швидкість її “завихрення”, ніж постійне. Крім того, імпульсний режим впливу магнітним полем створює додаткові вібрації ванни, що утворюються в моменти включення і відключення магнітного поля, що також впливає на формування і відрив крапель електродного металу. Тому можна наголосити на перспективності застосування імпульсних магнітних полів для керування крапельним перенесенням металу, особливо при синхронізації імпульсів магнітного поля і моментів формування і відриву крапель.

Як було показано в п. 3.2.2 значного магнітогідродинамічного ефекту вдалось досягти при застосуванні імпульсного магнітного поля і амплітудно-фазової модуляції струму плавки. Схема проведення даних експериментів полягала в періодичному випрямленні і збільшенні струму плавки під час дії імпульсів магнітного поля. Ідея полягала в підсиленні електромагнітного впливу на робочу рідину, за рахунок випрямлення і зростання струму плавки і збільшення за рахунок цього електромагнітної сили \vec{f}_e що діє на рідину.

В експериментах з амплітудно-фазовою модуляцією струму плавки ефект від впливу імпульсного магнітного поля на крапельне перенесення металу також був значно вищий. При співпадінні моменту дії імпульсу магнітного поля з моментом формування краплі критичного розміру, інтенсивні течії електроліту призводили до руйнування краплі, з появою великої кількості крапель меншого розміру. Під дією відцентрових сил останні розносились в об'ємі ванни і в ряді випадків переміщувались до її стінок рисунку 3.16. Такий варіант краплеутворення спостерігався у

40...50 % випадків, решта випадків були близькими до варіантів рисунку 3.15 *a, z, e*. Загалом, краплеутворення відбувалось переважно по центру, а в результаті вказаних ефектів краплі металу мали менший розмір, проходили довший шлях і відповідно - перебували більше часу у розплаві електроліту.

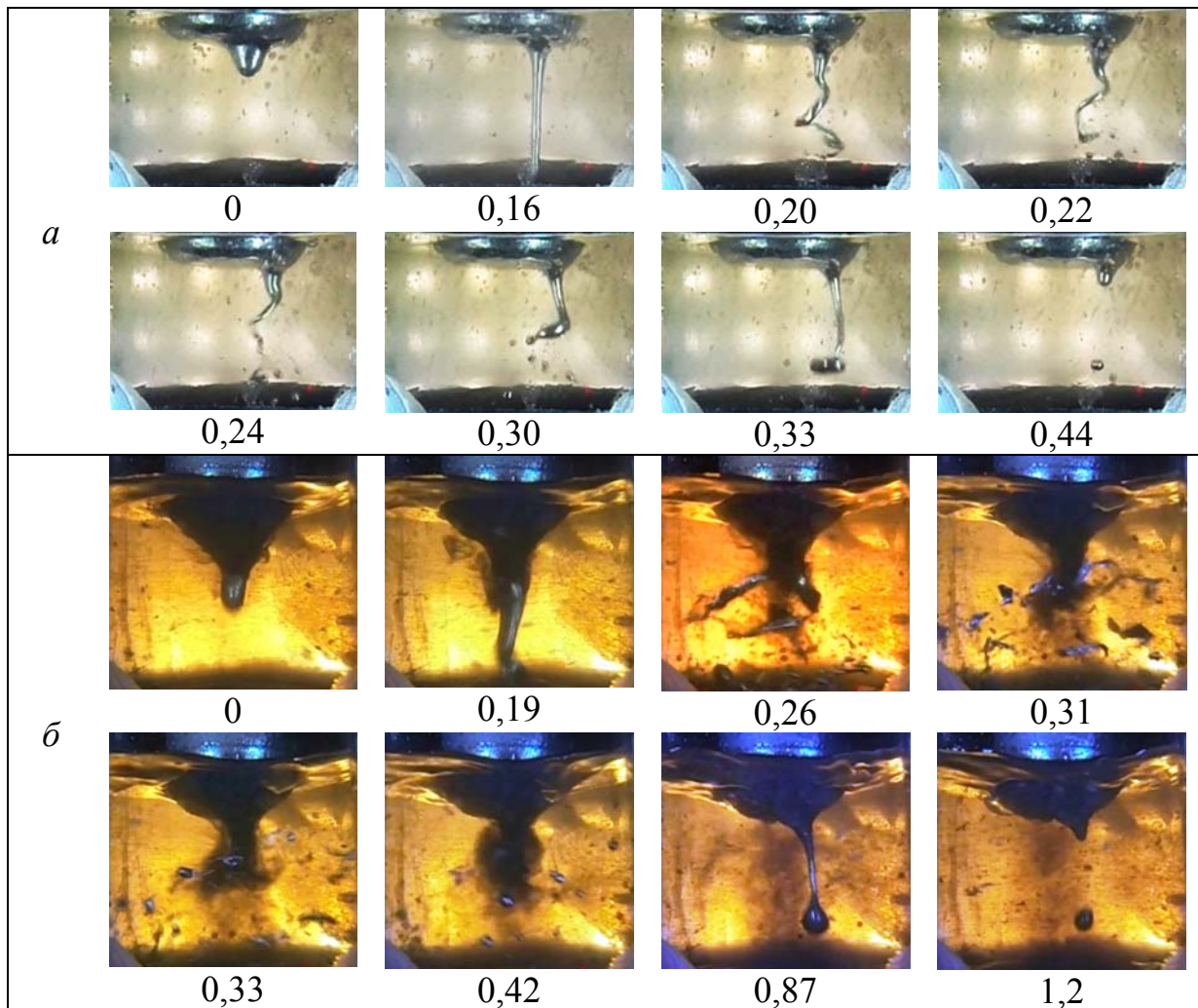


Рисунок 3.16 – Динаміка процесу краплеутворення і перенесення металу при застосуванні імпульсного магнітного поля і амплітудно-фазової модуляції струму плавки: *а* – відрив краплі із спіральним закрученням на периферійних ділянках; *б* – відрив краплі із її подальшим руйнуванням на велику кількість малих крапель. Цифрами вказаний час, с.

Узагальнені результати експериментів, отримані при різних схемах їх проведення, наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Параметри крапельного перенесення при різних схемах фізичного моделювання.

Схема проведення експерименту	Швидкість подачі електроду, мм/с	Швидкість плавлення, г/с	Частота відриву краплі, Гц	Середня маса краплі, г	Середній діаметр краплі*, мм
Струм плавки змінний, магнітне поле відсутнє	0,05	0,87	0,62	1,4	6,5
Струм плавки змінний, магнітне поле постійне	0,055	0,96	0,75	1,28	6,3
Струм плавки постійний, магнітне поле постійне	0,05	0,85	0,9	1,1	5,4
Струм плавки змінний, магнітне поле імпульсне	0,05	0,75	0,8	1,22	6
Струм плавки модульований, магнітне поле імпульсне	0,06	1,0	0,8 (3,5)	0,7	3,5

* форму краплі умовно прийнято за сферичну.

Аналізуючи результати, надані в таблиці 3.4, можна зробити висновок, що застосування магнітних полів впливає як на швидкість плавлення електроду, так і на параметри крапельного перенесення металу.

В експериментах з відсутністю магнітного поля, швидкість плавлення в середньому становила 0,87 г/с. Використання постійного магнітного поля індукцією 0,2 Тл призводило до збільшення швидкості плавлення електроду, приблизно на 10%, тобто до 0,96 г/с. При застосуванні постійного струму плавки і постійного магнітного поля швидкість плавлення електроду, стосовно схеми зі змінним струмом плавки і без дії магнітного поля, практично не змінилась (0,85 г/с). Дещо менші показники (0,75 г/с) були отримані в експериментах із застосуванням змінного струму плавки і імпульсного магнітного поля. Застосування модульованого струму плавки і імпульсного магнітного поля призвело до збільшення швидкості плавлення електроду до 1,0 г/с, тобто на 15 %.

Аналізуючи отримані дані бачимо, що застосування магнітних полів може призводити як до підвищення, так і до зменшення швидкості плавлення

електроду. Загалом, механізм впливу магнітних полів на швидкість плавлення електроду пов'язаний зі зміною структури і інтенсивності течій електроліту (шлакового розплаву) біля торця електроду і з відповідною зміною інтенсивності процесів тепломасообміну, на межі поділу *електрод - шлакова ванна*.

Збільшення на 15 % швидкості плавлення електроду, при застосуванні модульованого струму плавки, отримано як за рахунок підвищення потужності плавки (внаслідок періодичного збільшення струму), так і за рахунок інтенсифікації течій електроліту.

Важливим параметром крапельного перенесення металу при ЕШП є частота відриву крапель. Наведені в таблиці 3.4 дані свідчать, що в усіх випадках магнітне поле призводить до збільшення, в різній мірі, частоти відриву крапель.

При змінному струмі плавки і відсутності магнітного поля частота відриву крапель становила 0,62 Гц. Використання постійного магнітного поля зумовлює збільшення частоти відриву крапель до 0,75 Гц, при змінному струмі плавки, і до 0,9 Гц - при постійному. У випадках використання імпульсних магнітних полів частота відриву становила орієнтовно 0,8 Гц.

Збільшення частоти відриву крапель, вочевидь, пов'язане з збільшенням сил в'язкого тертя, що діють на краплю, яка формується на торці електроду, внаслідок інтенсифікації руху модельної рідини у біляелектродних ділянках. На збільшення частоти відриву крапель також впливають вібрації, що виникають внаслідок взаємодії постійних і змінних електричних і магнітних полів.

Окрім частоти відриву важливим параметром крапельного перенесення металу також є маса і розмір крапель. Отримані дані свідчать, що магнітні поля призводять до зменшення середньої маси і розміру крапель. Зокрема, маса краплі без використання магнітного поля в середньому складала 1,4 г. Застосування магнітних полів, в залежності від схем переплаву, призводило

до зменшення їх середньої маси до 0,7...1,28 г (табл. 3.4). Тобто, магнітне поле забезпечує подрібнення крапель із збільшенням частоти їх відриву.

Найбільший ефект подрібнення крапель отримано при схемі з використанням модульованого струму плавки та імпульсного магнітного поля. В цьому випадку середня маса крапель складала 0,7 г, а їх діаметр - 3,5 мм (форму краплі умовно прийнято за сферичну). Як свідчить аналіз відеозаписів такий ефект отримано внаслідок інтенсивної магнітогідродинамічної дії, яка призводить до руйнування крапель з появою великої кількості крапель меншого розміру.

Як відомо, значна частина тепла, що поступає в металеву ванну при ЕШП передається з краплями електродного металу. Тому від місць їх попадання на дзеркало рідкого металу суттєво залежить форма ванни і умови кристалізації зливку.

Було проведено аналіз розподілення місць падіння крапель на дзеркало металевої ванни, при різних схемах проведення експериментів (рис. 3.17). Із графіків видно, що в експериментах без електромагнітного впливу, більше 75% крапель попадає на дзеркало ванни по осі електроду (рис. 3.17 а). Застосування постійного магнітного поля призводить до незначного відхилення крапель від осі електроду, тобто по осі останнього на дзеркало металевої ванни попадає в середньому 70% крапель (рис 3.17 б). При впливі на ванну імпульсним магнітним полем цей показник зменшується до 60% (рис 3.17 в), а при додатковій модуляції струму – до 45% (рис 3.17 г).

Таким чином, електромагнітний вплив забезпечує розосередження місць потрапляння крапель на дзеркало рідкого металу. Такий ефект в процесі ЕШП слід вважати позитивним, бо із збільшенням числа крапель, що попадають в ванну ближче до стінок кристалізатора, фронт кристалізації стає більш плоским, а це забезпечує осьову направленість росту кристалітів.

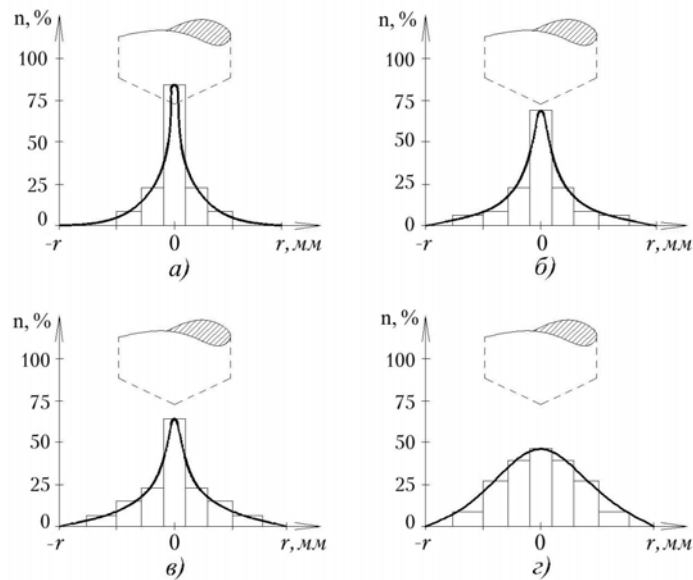


Рисунок 3.17 – Розподілення місць падіння крапель на дзеркало металевій ванні: *a* - струм плавки змінний, магнітне поле відсутнє; *б* - струм плавки змінний, магнітне поле постійне; *в* - струм плавки змінний, магнітне поле імпульсне; *г* - струм плавки модульований, магнітне поле імпульсне.

Позитивним наслідком впливу магнітного поля також є збільшення шляху (траєкторії) і часу перебування крапель у ванні модельного розчину. В умовах ЕШП це сприяє більш повній реалізації процесів хімічної взаємодії *шлак - метал* і видаленню із металу домішок і включень різного роду. Порівняльний аналіз згаданих параметрів наведено нижче.

Значний інтерес викликає такий параметр, як відстань, яку проходять краплі в шлаковій ванні, з моменту відриву до попадання в металеву ванну. За допомогою методу фотовідеофіксації побудовано траєкторії руху крапель при різних схемах моделювання та визначено середню відстань їх проходження через шлак (рис 3.18). Наведені дані свідчать, що найменшу відстань, близько 30 мм, долають краплі, при моделюванні без використання магнітних полів. Натомість, внаслідок інтенсивних гідродинамічних течій найбільшу відстань, при проходженні через шлак (близько 80 мм), долають краплі при використанні схеми з імпульсним впливом магнітного поля і модуляцією струму плавки (рис 3.18 *д*).

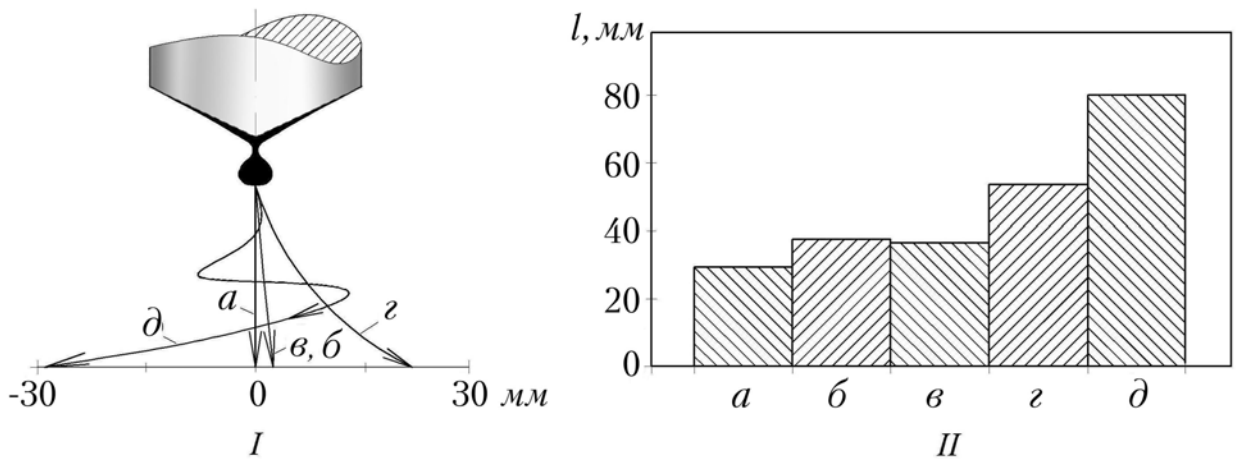


Рисунок 3.18 – Схематичне зображення траєкторій руху крапель (*I*) та середні відстані l проходження крапель через шлак (*II*) при різних схемах моделювання: *а* – без електромагнітного впливу; *б* – з постійним магнітним полем та змінним струмом плавки; *в* – з постійним магнітним полем та постійним струмом плавки; *г* – з імпульсним впливом магнітним поля та змінним струмом плавки; *д* – з імпульсним впливом магнітним полем і модуляцією струму плавки

Іншою важливою характеристикою крапельного перенесення при ЕШП є час перебування крапель у шлаковій ванні. Безумовно, на час перебування крапель у розплаві шлаку впливає ряд факторів, зокрема, таких як: в'язкість середовища, розміри електродних крапель, співвідношення густини краплі і шлаку, сили електромагнітного походження і т.д. [150]. В нашому випадку, крім схем електромагнітного впливу і розмірів крапель (таб. 3.4), всі інші фактори були дотримані в однакових умовах.

Як показали експерименти, окрім схеми електромагнітної дії, суттєвий вплив на час перебування крапель у ванні чинить і їх розмір. Це пов'язане, в першу чергу, із траєкторіями руху крапель. Маленькі краплі більш інтенсивно завихрюються потоками електроліту і, відповідно, долають більшу відстань у ванні, ніж великі. Природно, що зі збільшенням траєкторії руху крапель збільшується і термін їх перебування у ванні.

Результати статистичного аналізу залежності часу перебування крапель електродного металу в розплаві електроліту від їх середніх діаметрів при деяких схемах переплаву наведені на рисунку 3.19.

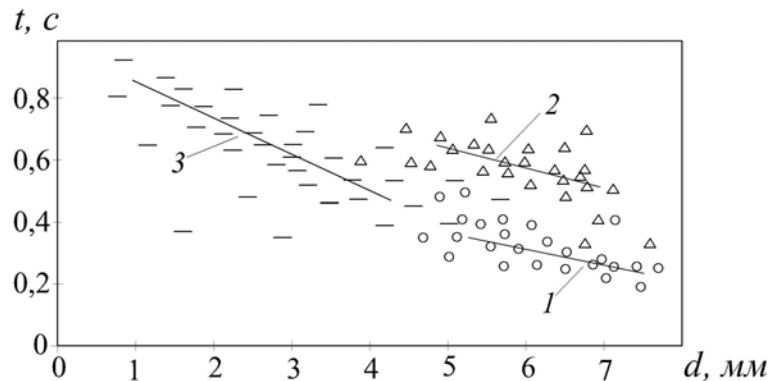


Рисунок 3.19 – Залежність часу перебування крапель електродного металу в розплаві електроліту від їх середніх діаметрів при схемах переплаву: 1 – без електромагнітного впливу; 2 – з імпульсним впливом магнітним полем та змінним струмом плавки; 3 – з імпульсним впливом магнітним полем і модуляцією струму плавки

Із отриманих даних можна зробити висновок, що краплі, які утворюються без використання магнітного поля в середньому перебувають в розплаві електроліту 0,2...0,25 с. Застосування імпульсного магнітного поля та модульованого струму плавки забезпечує збільшення терміну перебування крапель в розплаві електроліту до 0,4...0,8 с. Таке збільшення часу перебування крапель в шлаковій ванні має сприяти більш повній реалізації процесів хімічної взаємодії *шлак - метал* і видаленню із металу домішок і включень.

Про важливість геометричної поверхні реагування при ЕШП є чимало свідчень в літературі. Дослідники надають важливе значення декільком конфігураціям геометричних поверхонь реагування при ЕШП [150]. Серед них, геометрична поверхня реагування на конусі електроду, що формує краплю, геометрична поверхня рідкої металевої ванни та найбільш важлива, якою можна керувати – геометрична поверхня реагування краплі.

Відповідно, у нашому випадку, якщо застосування магнітних полів призводить до зменшення розмірів крапель, при збільшенні частоти їх відриву, то геометрична поверхня реагування крапель має збільшуватись. На рисунку 3.20 наведено діаграму площ геометричних поверхонь реагування крапель на одиницю часу, при різних схемах проведення експериментів. Отримані дані свідчать про те, що при відсутності електромагнітного впливу, геометрична поверхня реагування крапель становить близько 81 мм²/с. Деяко менша (77 мм²/с) поверхня реагування крапель при використанні постійного магнітного поля та постійного струму плавки. Найбільша площа реагування крапель електродного металу (135 мм²/с) зафіксована при застосуванні імпульсного магнітного поля і модуляції струму плавки. Збільшення площі реагування має сприяти більш повній реалізації процесів хімічної взаємодії шлак-метал, що безумовно є позитивним наслідком дії магнітних полів на процес ЕШП.

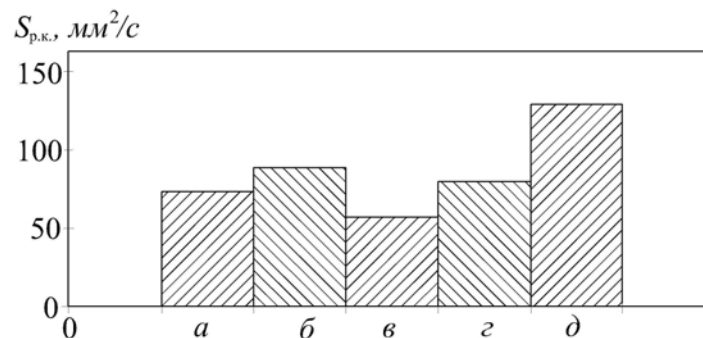


Рисунок 3.20 – Площа геометричних поверхонь реагування крапель на одиницю часу $S_{p.k.}$, при різних схемах моделювання: *а* – без електромагнітного впливу; *б* – з постійним магнітним полем та змінним струмом плавки; *в* – з постійним магнітним полем та постійним струмом плавки; *г* – з імпульсним впливом магнітним поля та змінним струмом плавки; *д* – з імпульсним впливом магнітним полем і модуляцією струму плавки.

Таким чином, результати фізичного моделювання свідчать про ефективність застосування зовнішніх магнітних полів для керування

процесами плавлення і крапельного перенесення металу при ЕШП. При цьому, певні технологічні і металургійні переваги досягаються при використанні імпульсного магнітного поля і амплітудно - фазової модуляції струму плавки. Це дає підстави вважати перспективними проведення подальших натурних досліджень згаданих методів впливу при ЕШП.

Слід підкреслити, що отримані в даному розділі результати щодо впливу зовнішніх магнітних полів на крапельне перенесення металу носять переважно якісний характер. Отримані в результаті фізичного моделювання кількісні характеристики потребують подальшого порівняння з результатами експериментів в умовах реального ЕШП.

Висновки до розділу 3.

1. Методом фізичного моделювання встановлено, що в процесі ЕШП у шлаковій ванні утворюються вихрові течії, у вертикальній площині, які спрямовані вниз по осі ванни, і вгору, біля бокових стінок ємності. Під дією поздовжнього магнітного поля ці течії трансформуються в горизонтальні обертання навколо осі ванни, швидкість і траєкторії яких залежать від роду і сили струму в електроді, індукції зовнішнього магнітного поля і тривалості імпульсів його дії. При збільшенні тривалості імпульсів магнітного поля до 1,5...2,5 с швидкість обертання рідини лінійно збільшується, а далі стабілізується на певному рівні. При цьому, максимальна кутова швидкість обертання спостерігається в прилеглих до витратного електроду областях, а мінімальна – біля стінок ємності. Загалом, максимальна швидкість обертання модельної рідини, яка становила 420 мм/с, спостерігалась при застосуванні амплітудно-фазової модуляції струму плавки ($I_{el} = 12/35$ А) і імпульсного магнітного поля індукцією $B = 0,35$ Тл.

2. Показано, що викликані дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля обертання модельної рідини навколо осі ванни призводять до деформації її вільної поверхні та поверхні поділу *шлакова - металева ванни*. Це пов'язане з дією відцентрових сил і утворенням у ванні зон з різним

тиском. Внаслідок цього рівень рідини на вільній поверхні по осі ванни знижується, а біля стінок ємності – підвищується. Деформація поверхні поділу *шлакова - металева ванни* полягає у піднятті металевої ванни по власній осі. Із збільшенням швидкості обертання величина деформації вільної поверхні ванни лінійно збільшується і при швидкості 350...420 мм/с досягає 10...12 мм. При використанні імпульсного магнітного поля деформація поверхонь носить періодичний характер, створюючи тим самим додаткові вібрації у рідкому середовищі.

3. Визначено особливості плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу в умовах дії поздовжнього магнітного поля. Встановлено, що застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу з 0,62 Гц до 0,75...0,9 Гц і зменшення їх середньої маси з 1,4 г до 0,7...1,28 г. Це пов'язане із зміною структури і інтенсивності гідродинамічних течій біля торця витратного електроду, інтенсифікацією процесів тепломасообміну на межі поділу *електрод - шлакова ванна*, збільшенням сил в'язкого тертя, що діють на краплю внаслідок руху шлакового розплаву тощо. На збільшення частоти відриву крапель також впливають вібрації, що виникають внаслідок взаємодії постійних і змінних електричних і магнітних полів.

4. Встановлено, що під дією поздовжнього магнітного поля траєкторії руху крапель в шлаковій ванні набувають спіралеподібної форми. Це призводить до розосередження місць їх потрапляння на дзеркало рідкого металу. При цьому відстань, яку долають краплі в шлаковій ванні, збільшується з 30 до 40...80 мм. Відповідно збільшується термін перебування крапель в шлаковій ванні з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с.

5. При використанні імпульсного магнітного поля і синхронної з ним амплітудно-фазової модуляції струму плавки формуються інтенсивні обертальні течії розплаву швидкістю до 420 мм/с, які призводять до руйнування крапель електродного металу, з утворенням великої кількості

крапель меншого розміру, котрі під дією відцентрових сил розносяться в об'ємі ванни.

6. Показано, що застосування поздовжнього магнітного поля впливає на площу поверхні реагування крапель електродного металу. Зокрема, застосування імпульсного магнітного поля з амплітудно-фазовою модуляцією струму плавки призвело до збільшення площі поверхні реагування крапель електродного металу в одиницю часу з $81 \text{ мм}^2/\text{с}$ до $135 \text{ мм}^2/\text{с}$.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕШП ТИТАНУ ПІД ВПЛИВОМ
ПОЗДОВЖНІХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ4.1. Розроблення електромагнітної системи для ЕШП в
поздовжньому магнітному полі.

Проведення натурних досліджень процесу ЕШП під впливом магнітних полів потребувало розроблення відповідної електромагнітної системи, ключовою функцією якої є створення поздовжнього магнітного поля необхідної індукції в зоні плавки.

Найбільш простим і ефективним способом введення в робочу зону поздовжнього магнітного поля є застосування соленоїду, що охоплює кристалізатор. Окрім соленоїду, електромагнітна система включає в себе джерело живлення, блок керування, та контрольну-вимірювальну апаратуру. Принципова схема розробленої електромагнітної системи зображена на рисунку 4.1.

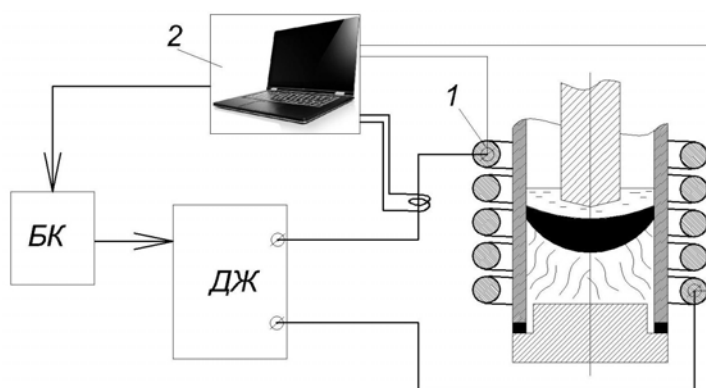


Рисунок 4.1 – Принципова схема електромагнітної системи для ЕШП з використанням поздовжнього магнітного поля: 1 – соленоїд; 2 – система реєстрації параметрів; ДЖ – джерело живлення; БК – блок керування.

В залежності від типорозмірів отримуваних зливків можна застосовувати соленоїди двох типів (рис. 4.2). Перший тип, нерухомий соленоїд доцільно використовувати при виплавці відносно невисоких зливків з співвідношенням висоти до діаметру, в середньому не вище 4/1. При виплавці більш високих зливків доцільно пристосовувати рухомий соленоїд, який в процесі плавки переміщують вгору із швидкістю переплаву, забезпечуючи поздовжнє магнітне поле в зоні плавлення електроду та кристалізації зливку (рис. 4.2 б).

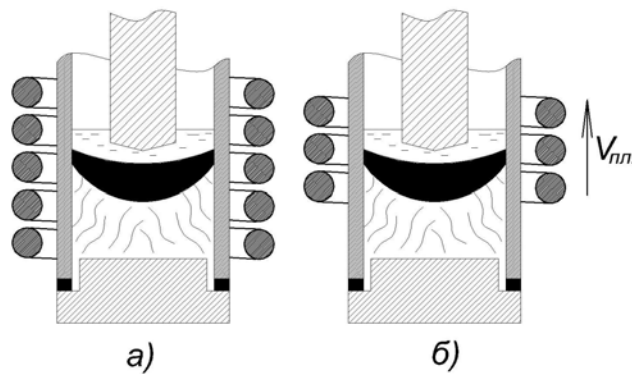


Рисунок 4.2 – Схема введення поздовжнього магнітного поля в робочу зону при ЕШП з використанням нерухомого (а) і рухомого (б) соленоїдів.

Існує декілька способів охолодження соленоїдів. Соленоїд з повітряним охолодженням є найпростішим в реалізації, проте, він здатний до перегрівання та має великі габарити. Більш ефективним є застосування соленоїдів з водяним охолодженням. В цьому випадку використовують обмотки трубчатої або іншої форми, що охолоджуються водою і забезпечують стабільну роботу електромагнітної системи при проходженні більш високих струмів. Також можливе розміщення соленоїда в водоохолоджуваному контурі кристалізатора. Не дивлячись на певні переваги (мінімальна відстань від обмоток соленоїда до зони плавки), така конструкція електромагнітної системи більш складна і потребує значної переробки кристалізатора.

Розрахунок соленоїдів здійснюється за відомими залежностями, виходячи з необхідної індукції магнітного поля в робочій зоні [208, 209]. При

виплавці зливків діаметром 60...160 мм вона складає в середньому 0,1...0,35 Тл. На основі цих розрахунків визначаються площа поперечного перерізу обмоток соленоїду, кількість ампер-витків, діапазон робочих струмів, необхідна потужність джерела живлення та інші характеристики.

Як показує власний досвід, діапазон робочих струмів в обмотках соленоїду доцільно вибирати в межах 200...1000 А. В цьому випадку, в якості джерела живлення можна застосовувати стандартні джерела постійного струму, наприклад, зварювальні випрямлячі ВС-400, ВДУ-1202 та ін. Для реалізації схеми ЕШП, з використанням імпульсного магнітного поля, джерело живлення необхідно дооснастити блоком керування (рис. 4.1). Блок керування являє собою пристрій, який забезпечує автоматичне включення-відключення джерела живлення по заданому алгоритму чим і забезпечує імпульсний режим електромагнітного впливу при ЕШП. Такий блок був створений на базі логічного модуля SR2 B101BD, який дозволяє керувати імпульсним режимом роботи джерела живлення з точністю до 0,01 с. Налаштування останнього та реєстрація параметрів електромагнітної дії здійснюються за допомогою персонального комп'ютера (ПК) та програмного забезпечення. Детальний опис логічного модуля та принцип роботи системи реєстрації наведено в п. 2.3.

Враховуючи наведені вище принципи було розроблено і виготовлено кристалізатори (діаметром 84, 105 і 144 мм) для ЕШП в поздовжньому магнітному полі (рис. 4.3). Було обрано конструкцію соленоїдів нерухомого типу виконаних з трубчатого водоохолоджуваного мідного провідника діаметром 12 мм і товщиною стінки 1 мм.



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд кристалізаторів для ЕШП в поздовжньому магнітному полі діаметром 84, 105 і 144 мм.

На рисунку 4.4 наведені залежності індукції поздовжнього магнітного поля по вісі кристалізаторів від сили струму в відповідних обмотках. Як видно, розроблені кристалізатори забезпечують індукцію магнітного поля в робочій зоні до 0,25...0,35 Тл, яка є достатньою для проведення натурних експериментів процесу ЕШП в магнітному полі.

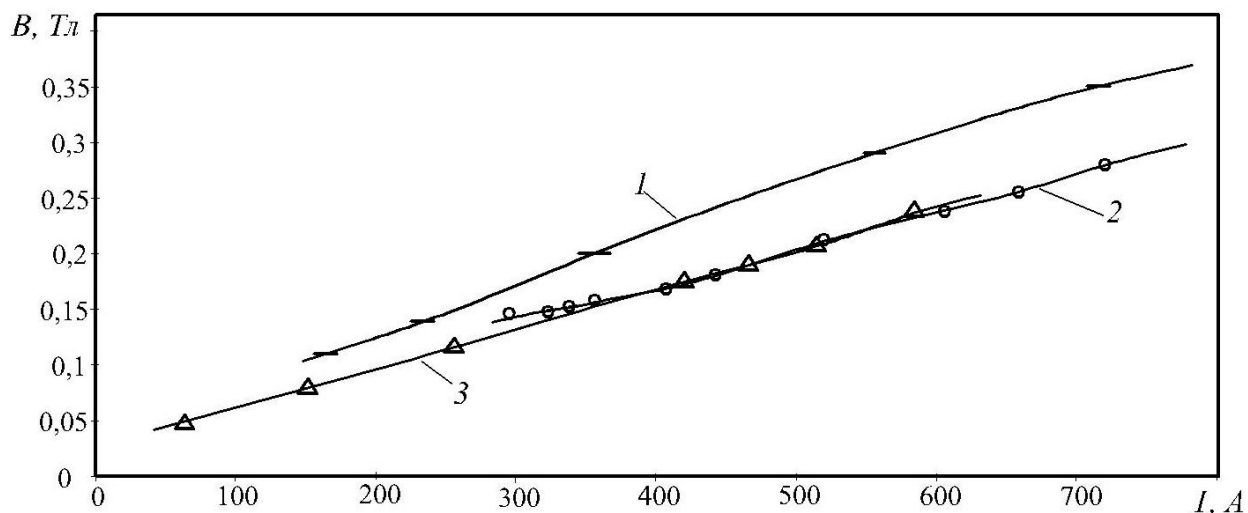


Рисунок 4.4 – Залежність індукції магнітного поля по вісі кристалізатора від сили струму в обмотці соленоїду: 1 – $D_{кр}=84$ мм; 2 – $D_{кр}=104$ мм; 3 – $D_{кр}=144$ мм.

4.2. Дослідження процесу плавлення витратного електроду при ЕШП титану під впливом поздовжніх магнітних полів.

Результати фізичного моделювання процесу плавлення електроду при ЕШП під впливом зовнішніх магнітних полів показали значну ефективність їх застосування для керування крапельним перенесенням металу. Проте, отримані результати впливу магнітних полів на особливості плавлення електроду необхідно було перевірити при реальному електрошлаковому перепаві. Для цього було проведено серію експериментів з ЕШП титанових електродів, під впливом зовнішнього магнітного поля.

Експериментальні плавки проводили в умовах камерного ЕШП електродів зі сплаву ВТ1-0, діаметром 32 і 70 мм в кристалізаторах діаметром 66 і 105 мм, відповідно. Слід підкреслити, що експерименти з перепаву електроду діаметром 32 мм в кристалізаторі діаметром 66 мм проводили із дотриманням геометричної подібності до фізичної моделі. Тобто, діаметри електроду і кристалізатора та глибина шлакової ванни в фізичній моделі і натурному експерименті були однаковими. При проведенні наступних експериментів, з метою визначення впливу масштабного фактору на процеси краплеутворення, діаметри електроду та кристалізатора було збільшено. В усіх випадках використовували фторидно-хлоридний флюс марки АН-Т4. Індукція постійного магнітного поля в зоні плавки становила 0,2 Тл, імпульсного - 0,28 Тл. Процеси плавлення витратного електроду та крапельне перенесення металу досліджували методом осцилографування, який оснований на періодичній зміні струму плавки при утворенні і відриві крапель. Завдяки подальшому аналізу осцилограм струму плавок, є можливість визначення закономірностей формування та відриву крапель електродного металу, при реальних процесах ЕШП.

В рамках проведених експериментів також були прийняті заходи щодо фіксування форми торця витратного електроду, для його порівняння з формою електроду, отриманого при фізичному моделюванні.

Результати експериментів наведені в табл. 4.1 і на рис 4.5-4.7.

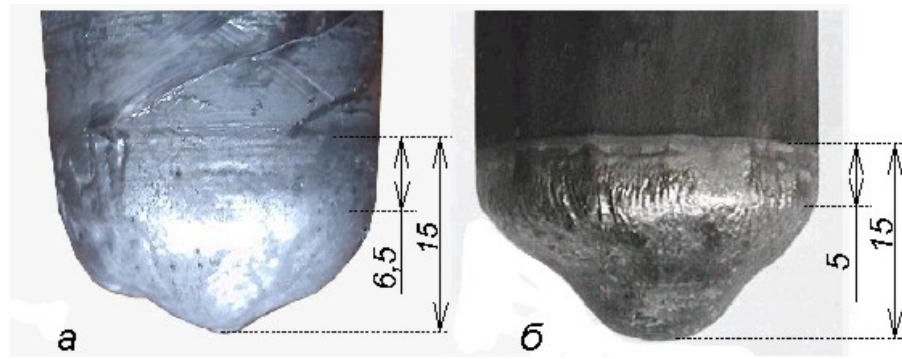


Рисунок 4.5 – Форма торця електроду діаметром 32 мм зі сплаву Вуда в експериментах з фізичного моделювання (а) та електроду діаметром 32 мм зі сплаву ВТ1-0 в експериментах з ЕШП (б)

Візуальний огляд торців електродів, отриманих при фізичному моделюванні та при реальному ЕШП, свідчить про їх відповідність (рис. 4.5). Зокрема, в обох випадках, глибина занурення їх в шлакову ванну (при моделюванні в електроліт) є однаковою і становить біля 15 мм. При цьому, занурена в ванну частина електроду складається із циліндричної і конічної частин, розміри яких також є приблизно однаковими. Загалом, зовнішній вигляд торців електродів, отриманих при фізичному моделюванні та реальному ЕШП, свідчить про однаковий характер їх плавлення.

Фрагменти осцилограм струму плавки при ЕШП, без та з використанням зовнішнього магнітного поля, наведено на рисунку 4.6.

Аналіз осцилограм струму плавки свідчить, що застосування поздовжнього магнітного поля призводить до суттєвої зміни особливостей плавлення і краплеутворення електродного металу. В першу чергу магнітне поле впливає на частоту відриву крапель електродного металу. Крім частоти відриву, магнітне поле, також впливає на амплітуду і характер коливань струму плавки (тобто розміри крапель) та швидкість плавлення електроду. Кількісні результати аналізу проведених експериментів наведено в табл. 4.1.

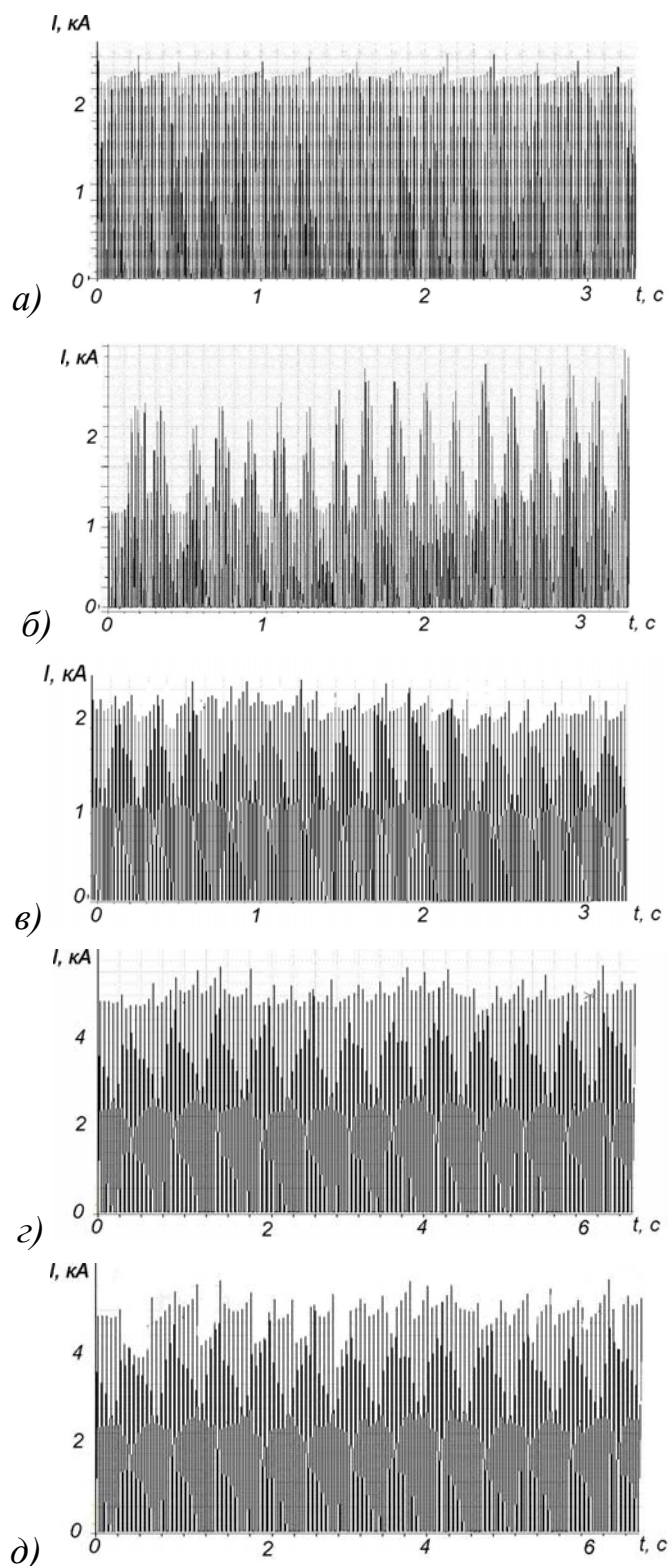


Рисунок 4.6 – Фрагменти осцилограм струму плавки електродів діаметром 32 (а, б, в) та 70 (г, д) мм: а, г – без використання зовнішнього магнітного поля; б, д – із використанням зовнішнього постійного магнітного поля індукцією $B=0,2$ Тл; в – із використанням імпульсного магнітного поля індукцією $B=0,28$ Тл

Таблиця 4.1 – Параметри крапельного перенесення при ЕШП титану в поздовжніх магнітних полях

Параметри	Переплав електроду d=32 мм в кристалізатор d=66 мм			Переплав електроду d=70 мм в кристалізатор d=105 мм	
	Без М.П.	Із постійним М. П.	Із імпульсним М. П.	Без М.П.	Із постійним М. П.
Частота відриву крапель, Гц	2,74	4,45	3,25	3,6	4,8
Середня маса краплі, г	1,5	0,96	1,3	1,78	1,04
Середній діаметр краплі, мм	8,6	7,4	8,2	9,1	7,6
Швидкість плавлення електроду, г/с	4,04	4,27	4,16	3,8	3,95

Згідно даних, наведених в таблиці, частота відриву крапель, в залежності від схеми застосування магнітного поля, зростає на 18...62 %. Також спостерігається підвищення швидкості плавлення електроду на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель електродного металу зменшується на 5...16% (форму краплі умовно прийнято сфероподібною), а їх маса на 13...41%. Вказані ефекти спостерігаються як при виплавці зливків діаметром 66 мм, так і зливків діаметром 105 мм.

Отримані результати показують, що частота відриву крапель (2,74...4,45 Гц, при переплаві електроду d=32 мм) і швидкість плавлення металу (4,04...4,27 г/с) в натурному експерименті суттєво вища від значень, отриманих при моделюванні (0,62...0,75 Гц і 0,87...0,96 г/с, відповідно). Це пов'язано із багатьма факторами, зокрема різницею фізичних характеристик модельного і натурного об'єктів (температур плавлення матеріалів, їх щільності, в'язкості, коефіцієнтів поверхневого натягу та ін.). Проте, тенденції збільшення частоти відриву крапель електродного металу, зменшення їх маси і збільшення швидкості плавлення, під дією зовнішнього магнітного поля, отримані при моделюванні, збереглися і при натурних експериментах. Це свідчить про якісну (на відміну від кількісної) відповідність розробленої фізичної моделі реальному процесу ЕШП.

Аналіз осцилограм струму плавки вказує, що окрім частоти коливань струму магнітне поле також впливає на амплітуду і характер його зміни.

Відомо, що максимум струму на осцилограмі відповідає моменту перед відривом краплі від електроду [126]. Згідно осцилограми струму (рис. 4.7 а), після відриву краплі і різкого падіння струму плавки, відбувається наступний цикл утворення краплі. Аналіз зміни струму плавки в межах одного циклу краплеутворення свідчить про те, що зберігається тенденція плавного збільшення краплі. Проте, наприкінці циклу, перед її відривом, спостерігається стрімке зростання струму плавки (рис. 4.7 а).

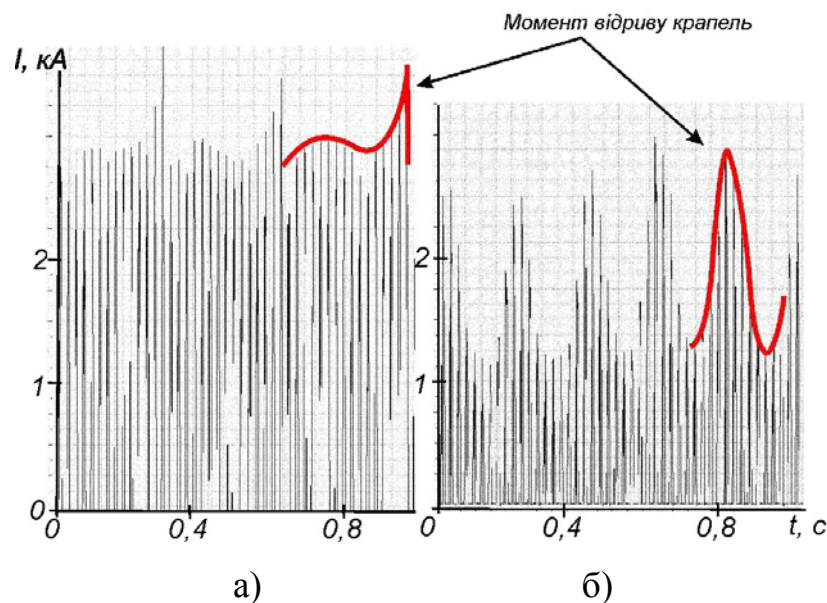


Рисунок 4.7 – Характер зміни струму плавки, без (а) та з використанням (б) зовнішнього постійного магнітного поля індукцією $B=0,2\text{Тл}$ ($d_{\text{ел}}=38\text{ мм}$)

У випадку впливу на процес плавлення електроду поздовжнім магнітним полем характер відриву крапель змінюється. Магнітне поле призводить до деякої дестабілізації процесу плавки (рис. 4.6 б,г, рис. 4.7 б). Зокрема на осцилограмах струму виявлено значне коливання його величини. В деяких випадках амплітуда коливання струму плавки (від мінімуму до максимуму) сягала до 50 %.

Така нестабільність струму плавки в умовах дії магнітного поля викликана рядом факторів. Перш за все, магнітне поле призводить до формування інтенсивних гідродинамічних течій розплавів шлаку і металу. Це, в свою чергу, сприяє утворенню періодичної деформації (коливань) поверхонь шлакової та металеві ванн. Коливання поверхні шлакової ванни призводить до зміни глибини занурення електроду у шлак, і відповідно - до коливань струму плавки. Крім того, коливання поверхні металеві ванни зумовлює періодичну зміну міжелектродного проміжку. Відповідно, в умовах дії магнітного поля, нестабільність струму плавки може бути пов'язана із зменшенням відстані між краплею, що формується на торці електроду, та дзеркалом металеві ванни. Подібні процеси були зафіксовані при фізичному моделюванні.

Таким чином, порівняння результатів фізичного моделювання і натурних досліджень, свідчать про коректність розробленої фізичної моделі плавлення витратного електроду при ЕШП. Характер плавлення електроду і закономірності впливу магнітних полів на крапельне перенесення металу, зафіксовані при фізичному моделюванні, відповідають результатам експериментів, отриманих при реальному ЕШП. Це свідчить про правомірність прогнозування впливу магнітних полів на особливості плавлення і крапельного перенесення металу при ЕШП за допомогою розробленої фізичної моделі.

4.3. Дослідження впливу поздовжнього магнітного поля на режими ЕШП, формування поверхні та структури титанових зливків.

З використанням обладнання і методик, що описані в розділі 2 і п. 4.2 було проведено ряд експериментів по впливу магнітного поля на режими ЕШП, формування поверхні та макроструктури титанових зливків. Для дослідження режимів електрошлакового процесу та структуроутворення титанових зливків, експерименти проводили в інших рівних умовах, за виключенням способу введення та величини індукції зовнішнього магнітного

поля. Переплав витратних електродів зі сплаву ВТ1-0 проводили в водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром 66, 80 і 105 мм, з використанням фторидно-хлоридного флюсу АН-Т4. В усіх випадках використовували "твердий" старт електрошлакового процесу. Результати проведених досліджень наведені нижче.

4.3.1. Вплив магнітного поля на режими ЕШП

Електричні параметри є одними із основних характеристик процесу ЕШП. Реєстрограми струму плавки та електричної напруги на ванні показують динаміку зміни енергетичних показників протягом всього процесу перепау. За допомогою них можна аналізувати характер плавлення електроду, стабільність електрошлакового процесу та вплив на нього зовнішніх факторів. В даному випадку зовнішнім фактором впливу на процес ЕШП було поздовжнє магнітне поле, дія якого відображалась на реєстрограмах струму та напруги.

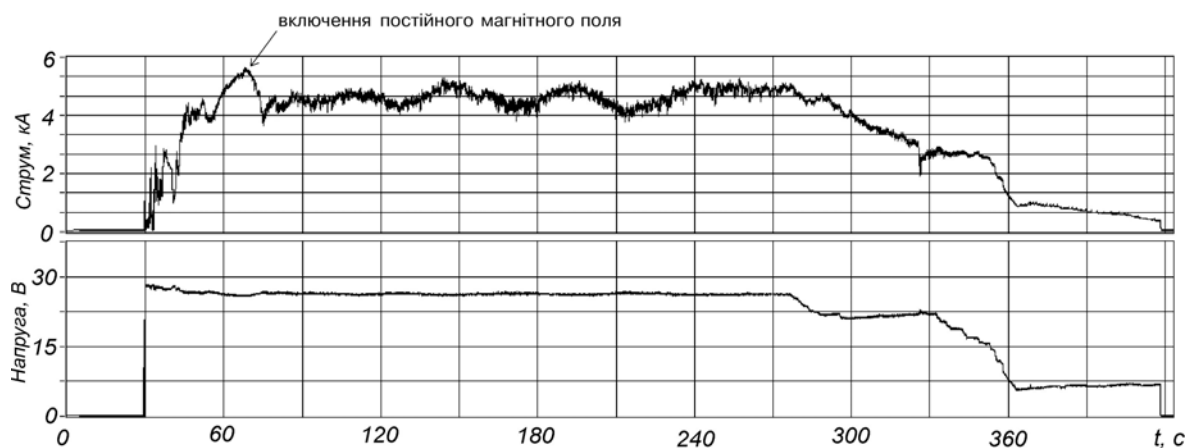
Було проведено ряд експериментів без та із застосуванням постійного та імпульсного магнітних полів. В разі застосування магнітного поля його включали після наведення шлакової ванни і виходу на стаціонарний режим плавлення електроду. Відповідні типові реєстрограми процесів ЕШП наведені на рисунку 4.8.

В усіх експериментах електрична напруга шлакової ванни, у період стаціонарного плавлення електроду, була стабільною і змінювалася незначно. Це пов'язано із жорсткою вольт-амперною характеристикою джерела живлення електрошлакового процесу, трансформатора ТШП-10000-1.

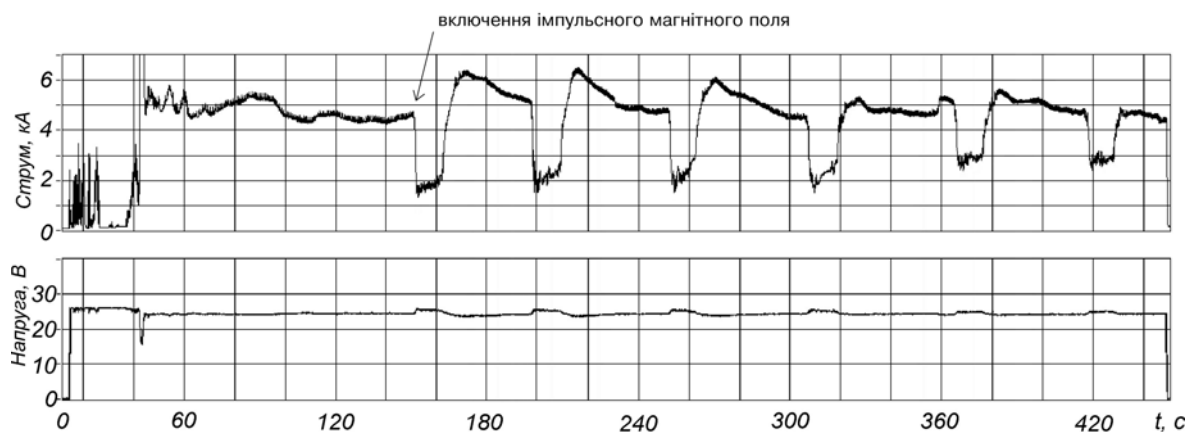
В експериментах без використання магнітного поля струм плавки характеризувався стабільністю (рис. 4.8 *a*). Коливання струму в процесі ЕШП були мінімальними, їх величина в середньому не перевищувала 5%. На реєстрограмах струму іноді спостерігались «прогини» з плавним характером падіння та зростання струму.



а)



б)



в)

Рисунок 4.8 – Реєстрограми електричного струму і напруги при ЕШП без використання магнітного поля (а), із використанням постійного магнітного поля індукцією $B=0,2$ Тл (б), та із використанням імпульсного магнітного поля індукцією $B=0,28$ Тл, $t_{\text{імп.}}=10$ с, $t_{\text{п.}}=40$ с (в)

Це ймовірно пов'язано із нестабільністю роботи механізму подачі електроду. Загалом, це типова діаграма струму ЕШП, яка дає підстави стверджувати, що процес плавлення електроду та крапельний перенос металу був стабільним.

Використання постійного зовнішнього магнітного поля індукцією $B=0,2$ Тл викликало деяку дестабілізацію електричного струму плавки (рис. 4.8 б). Застосування магнітного поля призвело, по перше, до зменшення (просідання) струму плавки на величину до 20%, по друге - до збільшення його коливань в межах до 15...18%. У п. 4.2 цієї роботи було описано вірогідні механізми таких наслідків від дії магнітного поля. Це пов'язане, в першу чергу, з вібраціями викликаними взаємодією змінного струму плавки з постійним магнітним полем, періодичною деформацією поверхонь шлакової та металеві ванн, відповідною зміною відстані між торцем електроду та дзеркалом металеві ванни, характером відриву крапель електродного металу та іншими факторами. Такий вплив на струм плавки спостерігається протягом всього періоду включення постійного магнітного поля.

Реєстрограми струму процесу ЕШП із використанням імпульсного поздовжнього магнітного поля кардинально відмінні. В експерименті, реєстрограма якого представлена на рисунку 4.8 в, було використано імпульсне магнітне поле індукцією $B=0,28$ Тл, тривалістю імпульсів $t_{\text{імп}}=10$ с та пауз $t_{\text{п}}=40$ с. На реєстрограмі струму чітко помітно дію імпульсів магнітного поля. Вона виражена в різкому падінні струму плавки в момент включення магнітного поля на величину до 70...80%, без цілеспрямованої зміни напруги та інших параметрів процесу. Величина падіння струму до мінімального значення визначається, перш за все, величиною індукції магнітного поля. Далі, в межах тривалості дії імпульсу магнітного поля, струм плавки поступово (плавно) зростає. Відключення магнітного поля призводить до різкого зростання струму плавки і в подальші 5...6 секунд він сягає максимальних значень, після чого стабілізується до початкового рівня.

Слід додати, що величина падіння електричного струму при ЕШП із використанням імпульсних магнітних полів залежить не лише від величини

індукції, як було при постійному магнітному полі, а також і від тривалості імпульсів його дії. На рисунку 4.9 наведені реєстрограми процесу ЕШП із використанням магнітних полів різної індукції і тривалості імпульсів. Тривалість пауз та інші параметри процесу ЕШП були однаковими.

Видно, що при застосуванні магнітного поля із короткотривалими імпульсами ($t_{\text{имп}}=0,8$ с) та невеликою індукцією ($B=0,1$ Тл), падіння струму є мінімальним (рис. 4.9 а). Очевидно, що і вплив на гідродинамічні процеси та на процеси плавлення електроду та перенесення металу є мінімальним. Збільшення індукції до $B=0,22$ Тл, при незмінній тривалості імпульсів $t_{\text{имп}}=0,8$ с, призводить до збільшення величини падіння струму плавки, яка сягає 30% (рис. 4.9 б). Подальше збільшення тривалості імпульсів магнітного поля до $t_{\text{имп}}=1,8$ с, при тій самій індукції $B=0,22$ Тл, також призводить до збільшення величини падіння струму плавки, до 50...60% (рис. 4.9 в).

Таким чином, можна зробити висновок, що при імпульсному електромагнітному впливі на процес ЕШП важливим фактором є не лише величина індукції магнітного поля, але й тривалість імпульсів його дії. Очевидно, що величина електромагнітної сили, яка діє на розплави шлаку і металу, визначається величиною струму плавки і індукцією магнітного поля. Проте для формування гідродинамічного впливу на ці розплави необхідна достатня тривалість дії імпульсів магнітного поля. Власне, гідродинамічні процеси впливають на коливання електричних режимів процесу ЕШП.

Слід підкреслити, що результати отриманих реєстрограм процесу ЕШП корелюються із результатами фізичного моделювання і підтверджують те, що імпульсне магнітне поле призводить до інтенсивних процесів зменшення глибини занурення електроду в шлакову ванну (через її прогин), збільшення міжелектродного проміжку і підвищення електричного опору ділянки межі *витратний електрод - металева ванна*.

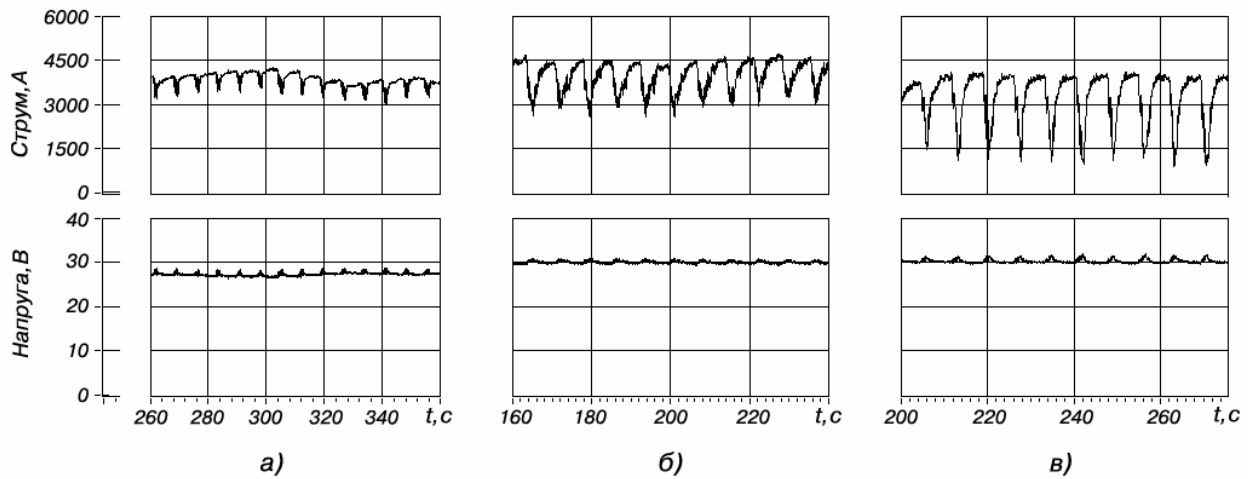


Рисунок 4.9 – Фрагменти реєстрограм ЕШП із використанням імпульсних магнітних полів: *a* – $B=0,1$ Тл, $t_{\text{имп}}=0,8$ с; *б* – $B=0,22$ Тл, $t_{\text{имп}}=0,8$ с; *в* – $B=0,22$ Тл, $t_{\text{имп}}=1,8$ с

Проведені експерименти дають підстави стверджувати, що за рахунок використання імпульсного магнітного поля підвищується ефективність гідродинамічного впливу на розплави шлакової та металевої ванн, у порівнянні з постійним магнітним полем. Крім того, імпульсне магнітне поле сприяє постійній перебудові структури гідродинамічних течій в металургійній ванні, відповідно забезпечує інтенсивне перемішування рідкого металу. В той же час, такі гідродинамічні течії не дають сформуватись стійким вихровим структурам, які можуть призводити до формування різного роду хімічних неоднорідностей в зливку.

Як відомо тепловкладення в процесі ЕШП визначається електричною напругою і струмом плавки. Відтак періодичні коливання струму плавки під дією імпульсного магнітного поля призводять і до періодичної зміни теплової потужності процесу ЕШП. Таким чином, імпульсне магнітне поле викликає дискретно-порційне тепловкладення, очевидно створюючи додаткові можливості керування процесом кристалізації зливку і властивостями його металу.

Слід наголосити, що незважаючи на суттєві коливання струму плавки, дія імпульсного магнітного поля не призводить до викидів шлаку, утворення

дугових розрядів та інших порушень стабільності електрошлакового процесу. Він проходить достатньо стабільно, в квазістаціонарному режимі, із циклічною зміною струму плавки.

4.3.2. Вплив магнітного поля на формування поверхні зливків ЕШП.

Перші експерименти з використанням зовнішнього поздовжнього магнітного поля при ЕШП показали його негативний вплив на формування поверхонь отриманих зливків. На рисунку 4.10 наведено зовнішній вигляд титанового зливку, нижня частина якого виплавлена без використання магнітного поля, а верхня - з використанням постійного, поздовжнього магнітного поля індукцією $B=0,25$ Тл. На цьому рисунку чітко видно границю цього розмежування. Зокрема, нижня частина зливку, отримана без дії магнітного поля, характеризується відмінною якістю формування поверхні. Гофри, раковини, напливи, шлакові включення та будь-які інші дефекти відсутні. Проте поверхня зливку, отримана із використанням магнітного поля, характеризується наявністю значних раковин, шлакових включень, гофр. Цілком очевидно, що для подальшого використання, зливків з такою поверхнею знадобляться заходи механічної обробки, з великою кількістю відходів.

Для дослідження закономірностей впливу магнітного поля на поверхню зливків ЕШП було проведено серію експериментів з виплавки титанових зливків діаметром 85 мм із різними параметрами зовнішнього поздовжнього магнітного поля. Використовуючи як постійне, так і імпульсне магнітне поле.

Зовнішній вигляд зливків, отриманих з використанням постійного магнітного поля індукцією $0,16...0,3$ Тл, наведено на рисунку 4.11. Поверхні зливків характеризуються в різній степені аналогічними дефектами, як і на рисунку 4.10. Проте, аналіз отриманих даних показує, що якість поверхонь залежить від величини індукції магнітного поля.



Рисунок 4.10 – Зовнішній вигляд титанового зливку діаметром 66 мм, виплавленого ЕШП, без (нижня частина) та з використанням (верхня частина) зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією $B=0,25 \text{ Тл}$

При індукції $B=0,16 \text{ Тл}$ поверхня зливку є задовільною (рис. 4.11 а). Спостерігаються незначні нерівності і впадини глибиною до 0,5...1 мм. При збільшенні індукції магнітного поля до $B=0,24...0,3 \text{ Тл}$ якість формування поверхні суттєво погіршується (рис. 4.11 б, в). При даних режимах плавки і параметрах магнітного поля його застосування призводить до утворення значних поверхневих дефектів у вигляді зашлакувань, раковин, гофр та ін.

При застосуванні імпульсного магнітного поля на особливості формування зливку впливає не тільки величина індукції магнітного поля, а й тривалість імпульсів і пауз його дії. Враховуючи вищезазначене, було проведено серію експериментів, в яких змінювали як індукцію імпульсного магнітного поля (в межах $B=0,16...0,24 \text{ Тл}$), так і тривалість імпульсів і пауз

його дії (в межах $t_{\text{імп}}=0,3\dots 21$ с, $t_{\text{п}}=10\dots 33$ с, відповідно). Зовнішній вигляд отриманих зливків наведено на рисунку 4.12.



Рисунок 4.11 – Зовнішній вигляд титанових зливків, виплавлених ЕШП з використанням поздовжнього постійного магнітного поля: а) $B=0,16$ Тл; б) $B=0,24$ Тл; в) $B=0,3$ Тл

Перші чотири експерименти були проведені із використанням магнітного поля індукцією $B=0,24$ Тл (рис. 4.12 а,б,в,г). Тривалість імпульсів магнітного поля змінювали в межах $t_{\text{імп}}=0,3\dots 2$ с. При цьому, тривалість пауз в усіх випадках дорівнювала $t_{\text{п}}=10$ с.

Отримані результати показують, що при тривалості імпульсу магнітного поля $t_{\text{імп}}=0,3$ с, його вплив на якість поверхні зливку практично непомітний (рис. 4.12 а). На поверхні зливку ледь видно сліди дії імпульсного магнітного поля. Це говорить про те, що при такій малій тривалості імпульсів поля не встигають сформуватися гідродинамічні течії розплавів флюсу і металу, які б впливали на якість поверхні зливку. Проте на

поверхнях зливків, отриманих із використанням імпульсів магнітного поля тривалістю $t_{\text{имп}}=1\dots 2$ с, вже помітні наслідки дії такого поля (рис. 4.12 б,в,г). Поверхні зливків характеризуються незначною гофристістю, яка збільшується при збільшенні тривалості імпульсів магнітного поля.



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд титанових зливків виплавлених ЕШП з використанням поздовжнього імпульсного магнітного поля:

а) $B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=0,3$ с, $t_{\text{п}}=10$ с;

б) $B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=1,0$ с, $t_{\text{п}}=10$ с;

в) $B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=1,5$ с, $t_{\text{п}}=10$ с;

г) $B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=2,0$ с, $t_{\text{п}}=10$ с;

д) $B=0,22$ Тл, $t_{\text{имп}}=11$ с, $t_{\text{п}}=21$ с;

е) $B=0,16$ Тл, $t_{\text{имп}}=11$ с, $t_{\text{п}}=33$ с;

ж) $B=0,16$ Тл, $t_{\text{имп}}=21$ с, $t_{\text{п}}=33$ с

В наступних експериментах величину індукції магнітного поля поступово зменшили до $B=0,22\dots 0,16$ Тл, а тривалість імпульсів і пауз магнітного поля збільшили до $t_{\text{імп}}=11\dots 21$ с і $t_{\text{п}}=21\dots 33$ с, відповідно (рис. 4.12 *д, е, ж*). В результаті, вплив імпульсного магнітного поля на поверхні зливків виявився інтенсивніший, ніж при попередніх експериментах. На поверхні зливків чітко виражені зони дії магнітного поля, які проявляються у вигляді перехватів, гофр, поперечних смуг (впадин). Глибина таких перехватів сягає до 1...2 мм, а висота 2...5 мм, при чому ці зони збільшуються зі збільшенням тривалості імпульсу магнітного поля (рис. 4.12 *д, е, ж*).

Слід підкреслити, що вплив дії імпульсного магнітного поля меншою індукцією $B=0,16$ Тл, але довшою тривалістю імпульсу $t_{\text{імп}}=21$ с, є вищий ніж при індукції $B=0,24$ Тл та тривалості дії імпульсу $t_{\text{імп}}=1$ с. Очевидно, поясненням такого явища можуть бути результати фізичного моделювання, в яких експериментально було показано, що для формування гідродинамічних течій модельного розплаву максимальної інтенсивності, тривалість імпульсу магнітного поля повинна бути не менше, ніж $t_{\text{імп}}=2,5$ с (п. 3.2.1).

Загалом, як показало дослідження, магнітні поля в різній мірі призводять до погіршення якості поверхонь зливків. В певній мірі, це є негативний наслідок дії магнітного поля. Ймовірно, застосування таких параметрів магнітних полів не призводить до погіршення якості та структури зливків. Проте для подальшої реалізації отриманих зливків надзвичайно важлива добра якість їх поверхонь. В протилежному випадку, як зазначалось вище, це потребує застосування додаткових заходів щодо обробки їх поверхні, що призводить до підвищення вартості кінцевої продукції (заготовок, напівфабрикатів) в цілому. У зв'язку з цим необхідно визначити механізми погіршення якості поверхонь зливків, отриманих ЕШП в магнітних полях, та знайти шляхи для їх покращень (рис.4.13, 4.14).

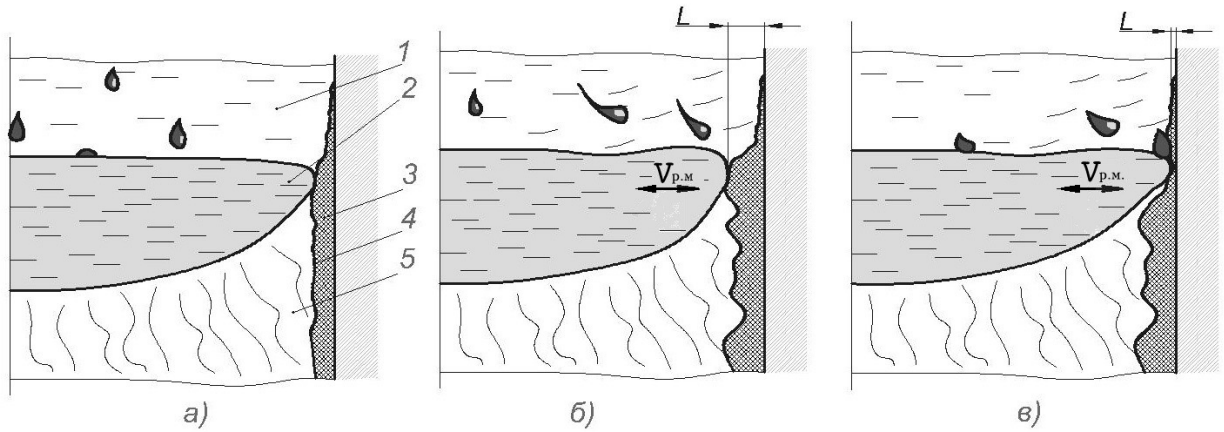


Рисунок 4.13 – Ймовірний механізм погіршення поверхні зливку ЕШП з використанням поздовжнього магнітного поля, внаслідок хаотично рознесених крапель в шлаковій ванні: *а)* – крапельне перенесення, без використання магнітного поля; *б, в)* – крапельне перенесення, з використанням магнітного поля; *1* – шлакова ванна; *2* – металева ванна; *3* – гарнісажна кірка; *4* – поверхня зливку; *5* – зливоч; *L* – відстань від зливку до стінки кристалізатора.

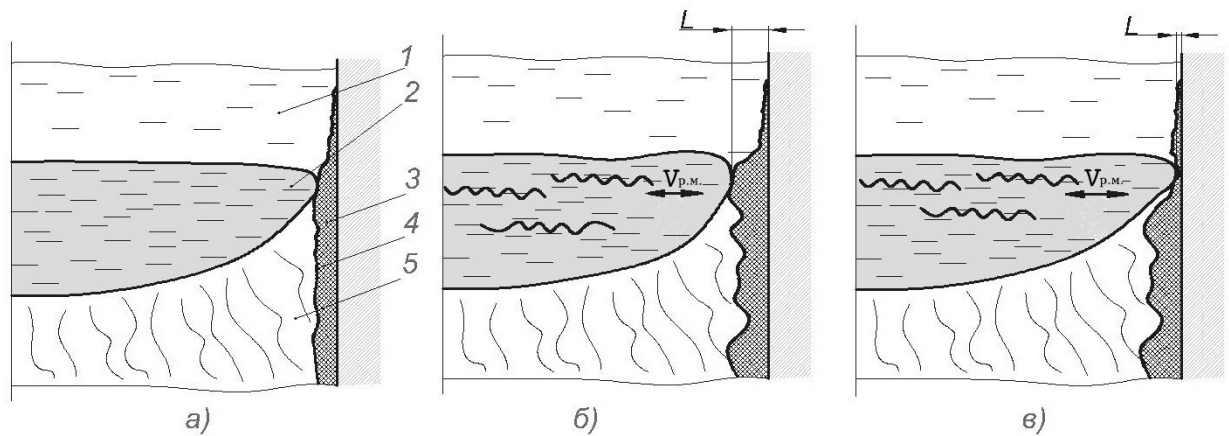


Рисунок 4.14 – Ймовірний механізм погіршення поверхні зливку ЕШП з використанням поздовжнього магнітного поля внаслідок вібрації розплавів шлакової та металевої ванн: *а)* – вібрації розплавів, без використання магнітного поля; *б, в)* – вібрації розплавів, з використанням магнітного поля; *1* – шлакова ванна; *2* – металева ванна; *3* – гарнісажна кірка; *4* – поверхня зливку; *5* – зливоч; *L* – відстань від зливку до стінки кристалізатора.

Використовуючи результати фізичного моделювання та досвід отримання зливків методом ЕШП в магнітних полях, було проведено аналіз можливих механізмів погіршення якості формування поверхонь зливків [193-196, 207]. Очевидно таких механізмів декілька і це є комплексний наслідок дії магнітного поля. Зокрема, це може бути викликано інтенсивними гідродинамічними течіями, коливаннями і вібраціями розплавів шлакової і металевої ванн, хаотичним розкиданням крапель електродного металу в шлаковій ванні, періодичними змінами товщини гарнісажної кірки на поверхні зливку та іншими факторами (рис. 4.13, 4.14).

При фізичному моделюванні крапельного перенесення при ЕШП, в магнітному полі, було встановлено, що останнє призводить до зміни гідродинамічної обстановки в шлаковій ванні, чим викликає закручення, відхилення, рознесення крапель електродного металу, в межах шлакової ванни (п. 3). Очевидно, що в реальному процесі ЕШП, з використанням магнітних полів на периферії шлакової ванни, аналогічно відбувається ряд складних процесів. В деяких випадках, під дією магнітного поля, краплі потрапляють на периферію дзеркала металевої ванни, або й виносяться до стінок кристалізатора (рис. 4.13 б, в). Краплі електродного металу в такій зоні піддаються інтенсивному охолодженню та кристалізуються. Крім того, при ЕШП на охолоджувальній стінці кристалізатора завжди утворюється гарнісажна кірка (рис. 4.13, 4,14). Як наслідок, в зоні переохолодження одночасно відбуваються процеси утворення гарнісажної кірки та кристалізації крапель електродного металу. Розплавлені краплі переохолоджуються та затримуються у в'язких шарах гарнісажної кірки. Цілком вірогідно, що ці процеси проходять в умовах інтенсивних гідродинамічних течій і вібрації, що і призводить до хаотичної зміни відстані L (товщини гарнісажної кірки) і погіршення поверхні зливку.

Про високу імовірність описаного вище механізму свідчить виявлення крапель електродного металу у периферійних ділянках шлакової ванни (рис.

4.15 *a*), у зашлакуваннях на поверхні зливку (рис. 4.15 *б*), та безпосередньо на поверхні зливків, що закристалізувались (рис. 4.15 *в,г*).

Інший механізм погіршення поверхні зливку може бути пов'язаний із вібрацією розплавів шлакової і металевої ванн (рис. 4.14). Такий висновок зроблений, як і в першому випадку, на основі фізичного моделювання процесу плавлення електроду в магнітному полі.

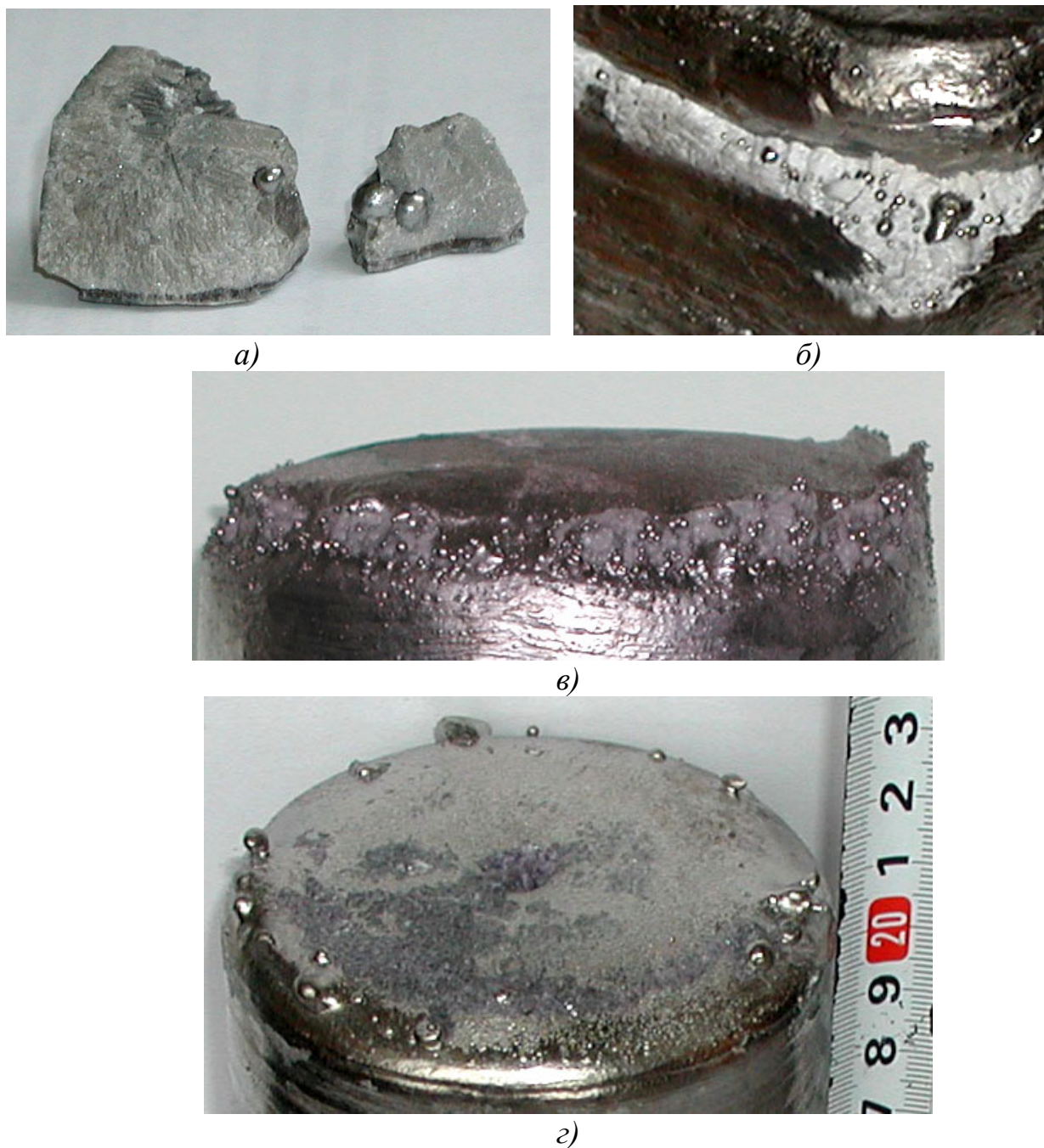


Рисунок 4.15 – Виявлення крапель електродного металу при ЕШП в магнітному полі: *a* - в шлаковій кірці; *б* - в зашлакуванні на поверхні зливку; *в, г* - в периферійних ділянках на поверхні зливку.

В пункті 3.2.2 було показано, що металева ванна під дією магнітного поля прогинається та здатна до вібрацій в залежності від інтенсивності магнітного поля (рис. 4.14 б, в). В зв'язку з цим магнітне поле в процесі плавки призводить до вібрацій (коливань) рідкометалевої ванни, чим динамічно змінює проміжок L (рис. 4.14 б, в). Відповідно цей проміжок по чергово заповнюють розплави флюсу чи рідкого металу, та призводить до погіршення поверхні зливку.

Цілком можливо, що вищезгадані механізми діють в комплексі, або існують інші, які встановити поки що не вдалось. Проте очевидно, що головною причиною цих ефектів є електромагнітні сили, що виникають внаслідок взаємодії струму плавки з зовнішнім магнітним полем, які призводять до силової дії на розплави шлаку і металу.

4.3.3. Вплив магнітного поля на формування структури зливків ЕШП.

У попередніх розділах було детально описано вплив магнітних полів на режими плавки та формування зовнішніх поверхонь зливків ЕШП. Проте, найважливішим критерієм, що визначає ефективність використання магнітного поля при ЕШП, є його вплив на структуроутворення та якість металу зливків. Власне, це і було основною метою застосування зовнішнього магнітного поля в процесі ЕШП складнолегованих сплавів.

Досліджували макроструктури титанових зливків, які були отримані із використанням постійних та імпульсних магнітних полів. Найінформативнішою площиною для дослідження макроструктури зливків ЕШП є їх осьовий переріз. Як правило зливки розрізали стрічковою пилою (або електроіскровим методом) вздовж осі. Далі їх піддавали фрезеруванню та шліфуванню. Шліфовану заготовку травили в спеціально підготовленому водному розчині плавикової та азотної кислот. Детально методика виготовлення титанових макрошліфів описана в інструкції «ВІАМ №1054-76».

Макроструктуру оцінювали на предмет наявності металургійних дефектів, досліджували особливості структуроутворення металу, форму та розміри кристалів (дендритів) і їх просторову орієнтацію. За характерний розмір кристала приймали його габаритні розміри a (довжину) та b (ширину), а напрямок його росту оцінювали кутом α (рис. 4.16).

Параметри магнітних полів, що використовували в експериментах та характеристики макроструктур отриманих зливків наведено в таблиці 4.2.

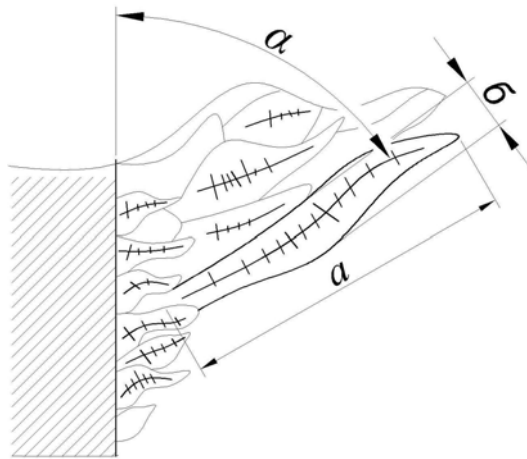


Рисунок 4.16 – Основні характеристики дендритної структури: a , b , α – довжина, ширина та кут росту дендрита

Таблиця 4.2 – Параметри магнітних полів та характеристики макроструктур отриманих зливків

№ п/п	Параметри магнітного поля			Характеристики макроструктури зливків			
	B , Тл	$t_{\text{імп}}$, с	$t_{\text{п}}$, с	Середній розмір кристалів, $a \times b$, мм	Кут перетину кристалів, $2 \times \alpha$, град	Форма кристалів	Наявність дефектів
1	-	-	-	40×3,5	80-90°	витягнута	нема
2	0,16	-	-	3×2	-	глобулярна	є
3	0,24	0,3	10	30×2	90-95°	витягнуто-звужена	нема
4	0,24	1,0	10	3,6×2,5	-	глобулярна	нема
5	0,24	1,5	10	3,4×2	75...80°	витягнута, подрібнена	нема
6	0,24	2,0	10	2×1,7	-	глобулярна	нема

На рисунку 4.17 наведена типова макроструктура зливку технічного титану ВТ1-0, отриманого методом ЕШП, без використання магнітного впливу (експеримент №1). Вона характеризується направленою структурою з великими стовпчастими дендритами, які орієнтовані в напрямку тепловідведення. Їх середній розмір (довжину) можна порівняти з радіусом зливку. В даному випадку, при виплавці зливку діаметром 80 мм, їх максимальна довжина сягає 35...45 мм. Дендрити перетинаються по осі зливку під кутом 80-90°, утворюючи зону зустрічної кристалізації (зону слабину). Власне, це і є основними недоліками такої макроструктури. Для їх усунення доцільно застосування зовнішніх магнітних полів.

На рисунку 4.18 наведено макроструктури титанових (ВТ1-0) зливків, виплавлених в аналогічних умовах (як і зливку, наведений на рис. 4.17), але із застосуванням постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів. При цьому застосовували режими електромагнітного впливу, які забезпечують добре формування поверхні зливку (див. п. 4.3.2).

Як видно з рисунку 4.18, зовнішнє магнітне поле, крім режимів переплаву та якості формування поверхні зливків, суттєво впливає і на їх макроструктуру.

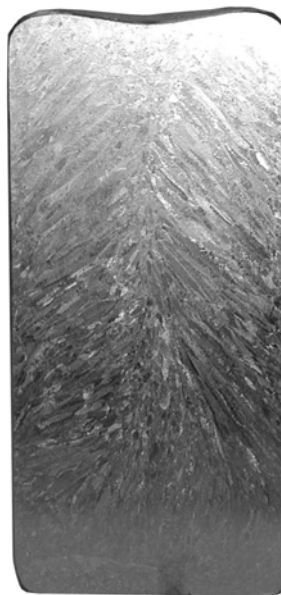


Рисунок 4.17 – Типова макроструктура титанового (ВТ1-0) зливку (№1), отриманого ЕШП, без використання магнітного поля

На рисунку 4.18 *a* наведено макроструктуру зливку (№ 2), отриманого під впливом постійного магнітного поля індукцією $B=0,16$ Тл. Загалом дана макроструктура кардинально відрізняється від макроструктури, отриманої без використання магнітного поля (рис. 4.17). Вона характеризується щільною структурою з інтенсивним подрібненням кристалів і відсутністю їх орієнтації по всій площині шліфа. Лише в нижній частині зливку, біля його бокової поверхні (на відстані від поверхні до 8-10 мм), виявлено дефекти у вигляді пор (нешільностей), які виникли при переплаві із-за невизначених причин (рис. 4.18 *a*). Можливо це є наслідок вібрацій, спричинених дією магнітного поля. Наявність таких дефектів викликає необхідність застосування токарної обробки поверхні зливку, на необхідну глибину. В інших зонах (частинах) перерізу зливку пори, тріщини, шлакові включення та інші дефекти відсутні. Характерний розмір зерен в середньому коливається від 2 до 4 мм (в середньому 3×2 мм). В центральній частині зливку, за рахунок дії магнітного поля, відсутня типова зона слабини та будь-яка направленість кристалітів, вони в значній мірі дезорієнтовані та подрібнені. Будь-якої структурної неоднорідності не спостерігається. Таким чином, можна стверджувати, що для даного типорозміру зливку, постійне магнітне поле індукцією $B=0,16$ Тл є досить ефективним інструментом подрібнення та керування його макроструктурою. Проте, із-за массогабаритних показників електромагнітної системи, небажаних наслідків від обертання рідкометалевої ванни, при використанні постійного магнітного поля, високих енергозатрат на його створення та можливості утворення поверхневих дефектів, вважаємо, що при ЕШП титану є більш раціональним використання імпульсних магнітних полів.

Результати дослідження структуроутворення зливків (№ 3-6), виплавлених ЕШП, із використанням імпульсних магнітних полів, показали різний ступінь їх впливу на макроструктуру, який залежить від параметрів магнітного поля.



Пост. м.п. $B=0,16$ Тл (№2)
а)



$B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=0,3$ с, $t_{\text{п}}=10$ с (№3)
б)



$B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=1$ с,
 $t_{\text{п}}=10$ с (№4)
в)



$B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=1,5$ с,
 $t_{\text{п}}=10$ с (№5)
г)



$B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=2,0$ с,
 $t_{\text{п}}=10$ с (№6)
д)

Рисунок 4.18 – Макроструктурі титанових зливків, отриманих методом ЕШП, із використанням постійного (а) та імпульсного (б, в, г, д) магнітних полів.

На рисунку 4.18 наведено макроструктури зливків, якість поверхні яких класифікується не гірше, ніж «добра» (рис. 4.18 б, в, з, д). Дані зливки отримані методом ЕШП, із використанням однакової індукції магнітного поля $B=0,24$ Тл і однаковими паузами його дії $t_{\text{п}}=10$ с, проте, із різною тривалістю дії імпульсів поля $t_{\text{имп}}=0,3\dots 2$ с. Власне, це й визначає ключову роль щодо впливу на структуроутворення металу.

Режими магнітного поля із тривалістю дії імпульсів $t_{\text{имп}}=0,3$ с та пауз між ними $t_{\text{п}}=10$ с, як виявилось, не забезпечили значного впливу на макроструктуру металу (рис. 4.18 б). Структура складається зі стовбчастих кристалів, які традиційно орієнтовані в напрямку тепловідведення та перетинаються між собою під кутом $90-95^\circ$, по осі зливку, утворюючи дещо розмити зону слабину. Макроструктура дуже схожа на класичну, яка спостерігається при ЕШП, без впливу магнітного поля (рис. 4.17). Проте, кристаліти набули дещо звуженої форми і по довжині зменшились в середньому до 30 мм. Раніше, при фізичному моделюванні та при дослідженні впливу дії магнітного поля на якість поверхні зливків було встановлено, що така мала тривалість імпульсу магнітного поля ($t_{\text{имп}}=0,3$ с) є недостатньою для формування необхідних електромагнітних сил і гідродинамічних течій в розплавах рідкого шлаку та металу. Очевидно, з тією ж причиною пов'язана недостатня дія імпульсного магнітного поля, з тривалістю імпульсів $t_{\text{имп}}=0,3$ с, на подрібнення макроструктури металу зливків.

Макроструктури зливків, виплавлених із використанням більшої тривалості імпульсів магнітного поля $t_{\text{имп}}=1\dots 2$ с, в усіх випадках, характеризуються значним подрібненням, відсутністю центральної зони слабину, пор, шлакових включень та інших дефектів (рис. 4.18 в, з, д). Загалом, середній максимальний розмір кристалів згаданих зливків не перевищує 3,6 мм (табл. 4.2).

Найбільш дисперсними виявились макроструктури зливків, отриманих при застосуванні поля з тривалістю імпульсу $t_{\text{имп}}=1,5\dots 2$ с. Вони

характеризуються гомогенними кристалами глобулярної форми по всій площині (рис. 4.18 в, з). В зливку, з тривалістю імпульсу $t_{\text{имп}}=1,5$ с, частково спостерігається направленість подрібнених кристалітів в напрямку тепловідведення (умовний кут перетину $2\alpha = 75\dots 80$)°(рис. 4.18 з).

Збільшення тривалості імпульсів до $t_{\text{имп}} = 2$ с не призводить до більшого (інтенсивнішого) подрібнення кристалітів (рис. 4.18 д), проте будь-яка направленість останніх не виявлена.

В цілому можна стверджувати, що макроструктура титанових зливків, отриманих методом ЕШП в імпульсному магнітному полі, при наведених вище режимах ($B=0,24$ Тл, $t_{\text{имп}}=1\dots 2$ с, $t_{\text{п}}=10$ с), наближається до структури деформованого металу.

Узагальнивши результати досліджень варто додати, що магнітне поле є ефективним інструментом керування макроструктурою титанових зливків при ЕШП. В деякій мірі, наслідки впливу магнітного поля (подрібнення макроструктури та якість поверхні зливків) тісно пов'язані між собою. Як показали експерименти, інтенсивність дії магнітного поля на процес переплаву залежить від таких факторів, як: сила струму переплаву; величина індукції магнітного поля; напрямок вектору його дії; у випадку імпульсного поля – тривалості імпульсів і пауз його дії. При цьому, закономірним є те, що при збільшенні інтенсивності дії магнітного поля можна добитися значного подрібнення макроструктури зливків. Проте, водночас це призводить до погіршення якості зовнішньої поверхні отриманих зливків. Тобто, ступінь подрібнення макроструктури зливків, за допомогою дії магнітного поля, на певному етапі обмежується значним погіршенням їх зовнішньої поверхні. Тому в кожному конкретному випадку (для кожного типорозміру зливку та конкретної схеми використання магнітного поля) необхідно визначати область ефективних режимів електромагнітного впливу.

За результатами проведених досліджень, а також враховуючи попередній досвід застосування магнітних полів при ЕШП титану, було

побудовано узагальнені залежності ступеня подрібнення кристалів (зерен) та погіршення якості поверхні зливку від параметрів магнітного поля. На рисунку 4.19 та 4.20 наведено області рекомендованих режимів впливу постійного та імпульсного магнітних полів при ЕШП титанових зливків діаметром 70...140 мм.

У випадку застосування постійного магнітного поля, область рекомендованих режимів лежить в межах індукції $B=0,12-0,22$ Тл (рис. 4.19). При такій індукції магнітного поля розмір дендритів становить $a=3...10$ мм. Згідно графіку, подальше зменшення подрібнення кристалів обмежене значним погіршенням якості поверхні зливків.

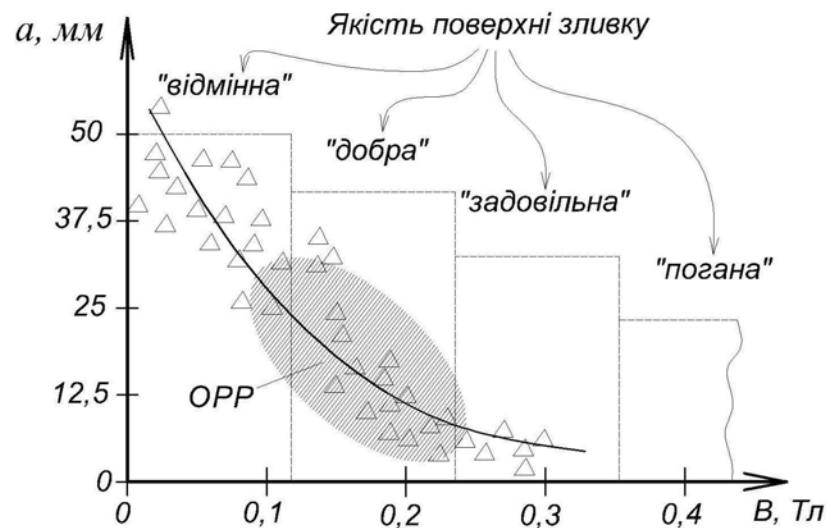


Рисунок 4.19 – Область рекомендованих режимів впливу постійним магнітним полем при ЕШП титанових зливків діаметром 70...140 мм: a – довжина дендритів; B – індукція магнітного поля; ОРР – область рекомендованих режимів

У випадку використання імпульсного магнітного поля ступінь подрібнення кристалів залежить не лише від величини індукції, а й від тривалості імпульсів ($t_{\text{імп}}$) та пауз (t_n) його дії (рис. 4.20). Теж саме стосується якості формування поверхні зливків (рис. 4.20 б). При чому, застосування імпульсного магнітного поля (у порівнянні з постійним) дозволяє дещо збільшувати індукцію поля, при збереженні доброї поверхні зливку. Також,

між оптимальними значеннями t_{imn} та t_n існує певна залежність, яка обумовлена погіршенням якості поверхонь зливків, появою перехватів, недостатнім або пошаровим подрібненням макроструктури (рис. 4.20).

Загалом, для подрібнення макроструктури титанових зливків діаметром 70...140 мм та збереження доброї якості їх поверхонь, рекомендується застосування імпульсного магнітного поля індукцією $B = 0,18...0,3$ Тл, з тривалістю імпульсів $t_{imn} = 0,9...2,5$ с, та пауз - $t_n = 6...15$ с. При таких параметрах магнітного поля розмір дендритів становить $a = 2...4$ мм.

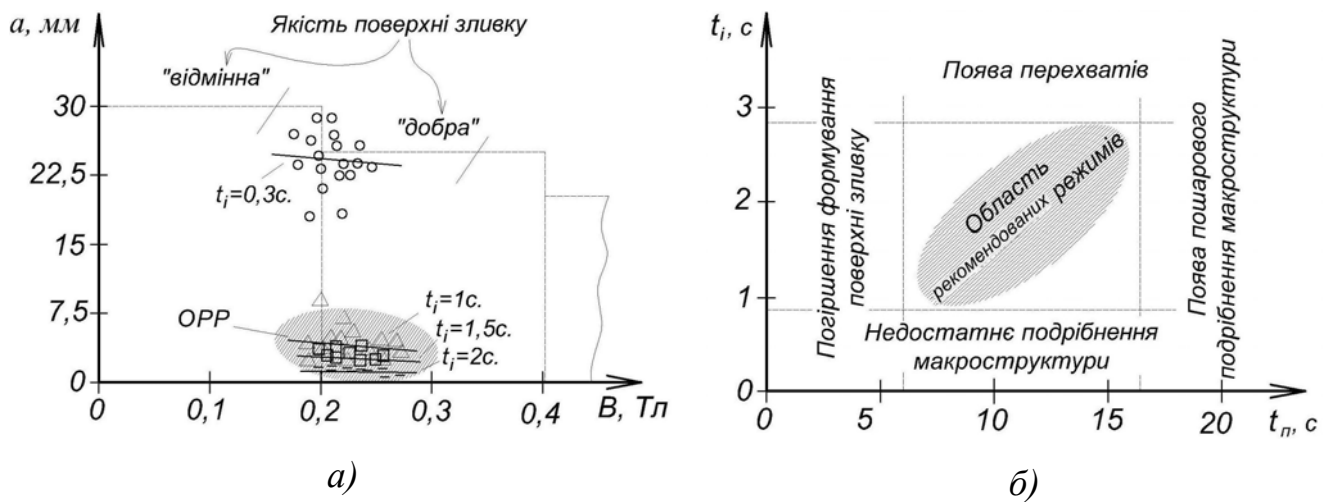


Рисунок 4.20 – Область рекомендованих режимів впливу імпульсним магнітним полем при ЕШП титанових зливків діаметром 70...140 мм в залежності від індукції магнітного поля для $t_n = 10$ с (а) і в залежності від тривалості імпульсів і пауз його дії для $B = 0,18...0,3$ Тл (б) де: a – довжина дендритів; B – індукція магнітного поля; ООР – область рекомендованих режимів.

Висновки до розділу 4

1. Найбільш раціональною схемою введення поздовжнього магнітного поля в робочу зону ЕШП є застосування нерухомого соленоїду, виконаного із водоохолоджуваного мідного провідника і розміщеного поверх кристалізатора. Згідно цієї схеми розроблено і виготовлено електромагнітні системи для ЕШП які включають в себе соленоїд, джерело живлення, блок

керування та контрольно-вимірювальну апаратуру. Електромагнітні системи забезпечують індукцію поздовжнього магнітного поля в робочій зоні кристалізаторів до 0,25...0,35 Тл.

2. Встановлено, що при ЕШП під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшуються на 5...16%, а їх маса - на 13...41%. Показано, що характер плавлення електроду і закономірності впливу магнітних полів на крапельне перенесення металу при ЕШП відповідають результатам фізичного моделювання. Це свідчить про коректність розробленої фізичної моделі і можливість її використання для якісного прогнозування впливу магнітних полів на плавлення і крапельне перенесення металу при ЕШП.

3. Доведено, що застосування постійного магнітного поля індукцією 0,2 Тл призводить до зменшення, на величину до 20 %, струму плавки і збільшення амплітуди його коливань. Це пов'язане з вібраціями поверхонь шлакової та металевої ванн, внаслідок взаємодії змінного струму плавки з постійним магнітним полем та характером відриву крапель електродного металу в умовах дії магнітного поля.

4. Показано, що застосування імпульсного магнітного поля призводить до циклічної зміни струму плавки. Зокрема, імпульсне магнітне поле ($B=0,28$ Тл, $t_{imn}=10$ с, $t_n=40$ с) призводить до циклічного різкого падіння електричного струму на величину до 70...80%, без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. Протягом паузи дії магнітного поля струм плавки відновлюється до початкового рівня.

5. Встановлено, що величина падіння електричного струму при ЕШП із використанням імпульсних магнітних полів залежить не лише від величини індукції, а й від тривалості дії імпульсу магнітного поля. Збільшення імпульсу магнітного поля з $t_{imn}=0,8$ с до $t_{imn}=1,8$ с, при однаковій індукції

$B=0,22$ Тл призводить до збільшення величини падіння струму плавки в 2 рази (на величину до 50...60%).

6. Використання поздовжніх магнітних полів при ЕШП титану в залежності від типу магнітного поля та його індукції може призводити до погіршення якості формування поверхні отриманих зливків. Максимально допустимою індукцією при переплаві титанових зливків діаметром $d=80$ мм, яка не призводить до погіршення якості поверхні останніх є $B=0,22$ Тл для постійного, та $B=0,28$ Тл для імпульсного магнітних полів при тривалості імпульсу останнього $t_{\text{імп}} \leq 2$ с. Запропоновано механізми погіршення якості формування поверхонь зливків. Зокрема, погіршення поверхні зливків може бути викликано інтенсивними гідродинамічними течіями, коливанням і вібраціями розплавів шлакової і металеві ванн, хаотичним розкиданням крапель електродного металу в шлаковій ванні, періодичними змінами товщини гарнісажної кірки на поверхні зливку.

7. Було визначено рекомендовані величини індукції постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, які забезпечують максимальну розорієнтацію та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм при відсутності будь яких дефектів. Експериментально встановлено, що для постійного магнітного поля такий діапазон індукції становить $B=0,12...0,22$ Тл, а для імпульсного - $B=0,18...0,3$ Тл, при тривалості імпульсів $t_{\text{імп}}=0,9...2,5$ с, та пауз - $t_n = 6...15$ с. Показано, що вихід за межі рекомендованих параметрів може призводити до недостатнього подрібнення макроструктури, появи дефектів на поверхні та всередині зливку, або пошарового подрібнення.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПРОЦЕСУ ЕШП ТИТАНУ В МАГНІТНИХ ПОЛЯХ ТА ЯКІСТЬ МЕТАЛУ ОТРИМАНИХ ЗЛИВКІВ

5.1. Оптимізація складу флюсу для ЕШП титанових сплавів.

Про ключову роль флюсу в технології ЕШП титану частково описано в пункті 2.2. Зокрема зазначалось, що флюс є важливим елементом технологічного процесу, який безпосередньо впливає на параметри ЕШП і властивості зливків. Його основними характеристиками є в'язкість, електропровідність та температурний інтервал твердіння. При ЕШП із використанням магнітних полів кожна із зазначених характеристик впливає на електричні режими переплаву та енергетику процесу, швидкість та характер плавлення електроду, особливості формування зливку і т. д. Від в'язкості флюсу залежить інтенсивність гідродинамічних течій в шлаковій ванні і ефективність електромагнітного впливу на процес ЕШП. У зв'язку з цим актуальним є дослідження фізико-хімічних властивостей сольових композицій, з метою оптимізації складу флюсу для ЕШП титану.

Загалом флюси для ЕШП повинні забезпечувати [182, 183, 211-212]:

- 1) швидке і легке наведення електрошлакового процесу і підтримання його стабільності, при значних коливаннях глибини і ширини шлакової ванни;
- 2) добре формування поверхні зливка, в достатньо широкому діапазоні режимів електрошлакового процесу;
- 3) відсутність в металі зливків дефектів (пор, шлакових включень).

Крім загальних вимог до флюсів для ЕШП титанових сплавів ставляться спеціальні вимоги, що враховують фізико-хімічні властивості титану:

1) компоненти флюсу, не повинні забруднювати метал шва шкідливими домішками (киснем, азотом, воднем, вуглецем та ін.);

2) густина флюсу в розплавленому стані не повинна перевищувати густини рідкого титану ($<4,1 \text{ г/см}^3$);

3) висока температура плавлення титану ($1660 \text{ }^\circ\text{C}$) вимагає, щоб флюс був тугоплавким ($T_{\text{кп}} > 1800 \text{ }^\circ\text{C}$, при мінімально можливій температурі плавлення).

Одна з головних вимог до флюсів, що використовуються при ЕШП титану, повна відсутність в їх складі оксидів [182]. Тому, для ЕШП титану можна застосовувати лише безкисневі, сольові флюси (здебільш на основі чистого CaF_2 та з додаванням фторидів і хлоридів лужних та лужноземельних металів) (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Хімічний склад флюсів для ЕШП титану і його сплавів, мас. %

Марка флюсу	CaF_2	CaCl_2	SrCl_2	BaF_2	MgF_2	CaCl	KCl	CsI	K_2TiF_6
АН-Т2	100	–	–	–	–	–	–	–	–
АН-Т4	85	–	15	–	–	–	–	–	–
АН-Т6	85	15	–	–	–	–	–	–	–
АН-Т8	85	14,5	–	–	–	0,5	–	–	–
АН-Т10	13	–	–	73	13,5	–	0,5	–	–
АН-Т12	95	–	–	–	–	–	–	–	5
АН-Т14	95	–	–	–	–	–	–	5	–

Відомо, що характерною рисою сольових флюсів є відносно висока їх електропровідність, яка значно вища ніж у оксидних флюсів [91]. Це зменшує тепловиділення в шлаковій ванні, та збільшує витрати електроенергії при ЕШП із їх використанням. До недоліків сольових флюсів також слід віднести їх високу рідкотекучість в розплавленому стані і вузький

температурний інтервал твердіння. Це значно ускладнює процес ЕШП титану, з витяжкою зливка.

З огляду на це були дослідженні можливості покращення технологічних властивостей сольових флюсів для ЕШП титану.

Відомо, що чистий CaF_2 характеризується високою електропровідністю та рідкотекучістю, проте додавання до нього хлоридів і фторидів лужних і лужноземельних металів дозволяє дещо збільшити електричний опір і зменшити рідкотекучість флюсу та, відповідно - збільшувати погонні енергії плавлення [91].

Аналіз літературних даних та фізичних властивостей солей свідчить, що в якості основи флюсу для ЕШП титану має бути CaF_2 (або MgF_2). Інші компоненти мають або недостатньо високу температуру кипіння ($<1700^\circ\text{C}$), або занадто високу густину $>4,0 \text{ г/см}^3$ (BaF_2 , LaF_3 , SrF_2). В якості добавок до CaF_2 , для покращення тих чи інших властивостей флюсу, перспективно використовувати наступні компоненти:

- хлориди — 5...20% SrCl_2 ; 5...20% BaCl_2 ; 0,5...2% KCl ; 0,5...5% CaCl_2 ;
- фториди — SrF_2 ; BaF_2 ; MgF_2 ; 5...30% LaF_3 ;
- йодиди — CsI ;
- комплексні з'єднання — 0,5...5% MgTiF_6 ; 0,5...5% K_2TiF_6 ; 0,5...5% Na_3AlF_6 ; 0,5...5% K_3AlF_6 .

Отже, в результаті проведеного аналізу було складено 5 перспективних сольових систем для проведення експериментів по дослідженню їх в'язкості і електропровідності, а також технологічних властивостей в умовах реального ЕШП титану. Відповідні сольові системи наведені нижче:

- CaF_2 - 5...50% SrCl_2 ;
- CaF_2 - 5...50% MgF_2 ;
- CaF_2 - 2...10% Na_3AlF_6 ;
- CaF_2 - 5...15% MgF_2 - 1...5 % Na_3AlF_6 ;
- CaF_2 - 5...15% SrCl_2 - 1...5 % Na_3AlF_6 .

Експерименти проводили згідно методик описаних в п 2.2.

На рисунку 5.1 наведені результати дослідження температурного інтервалу твердіння, а на рисунку 5.2 - в'язкості сольових систем $\text{CaF}_2\text{-MgF}_2$, $\text{CaF}_2\text{-SrCl}_2$ і $\text{CaF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$.

Аналіз отриманих температурних залежностей свідчить, що у всіх випадках при збільшенні концентрації доданих до CaF_2 компонентів, температура плавлення флюсу зменшується, а температурний інтервал твердіння - збільшується (флюс стає більш "довгим"). Найбільш тугоплавким і "коротким" є флюс на основі чистого CaF_2 , найбільш легкоплавкою - система $\text{CaF}_2\text{-30...50\% MgF}_2$. Найбільший температурний інтервал твердіння (140°C), із досліджуваних композицій, спостерігався у системи $\text{CaF}_2 - 25\% \text{SrCl}_2$.

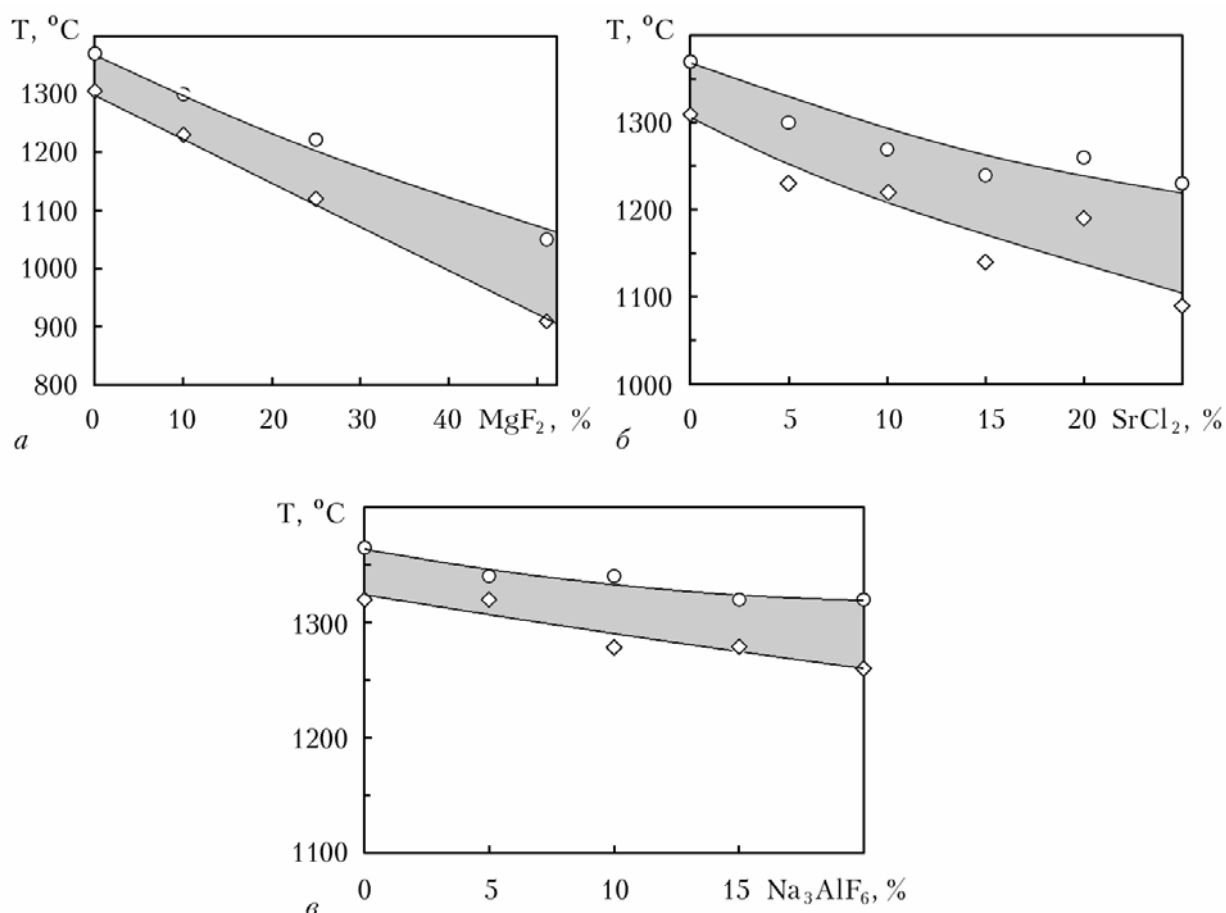


Рисунок 5.1 – Температурний інтервал твердіння сольових систем: *а* - $\text{CaF}_2\text{-MgF}_2$, *б* - $\text{CaF}_2\text{-SrCl}_2$, *в* - $\text{CaF}_2\text{-Na}_3\text{AlF}_6$.

Аналіз результатів досліджень в'язкості показує, що при температурах вище 1350 °С, тобто при робочих температурах флюсу, в'язкість досліджуваних композицій незначна і мало залежить від концентрації доданих до CaF_2 компонентів (рис. 5.2). Найбільш "довгими" були системи $\text{CaF}_2 - 20\% \text{Na}_3\text{AlF}_6$ і $\text{CaF}_2 - 20\text{...}25\% \text{SrCl}_2$.

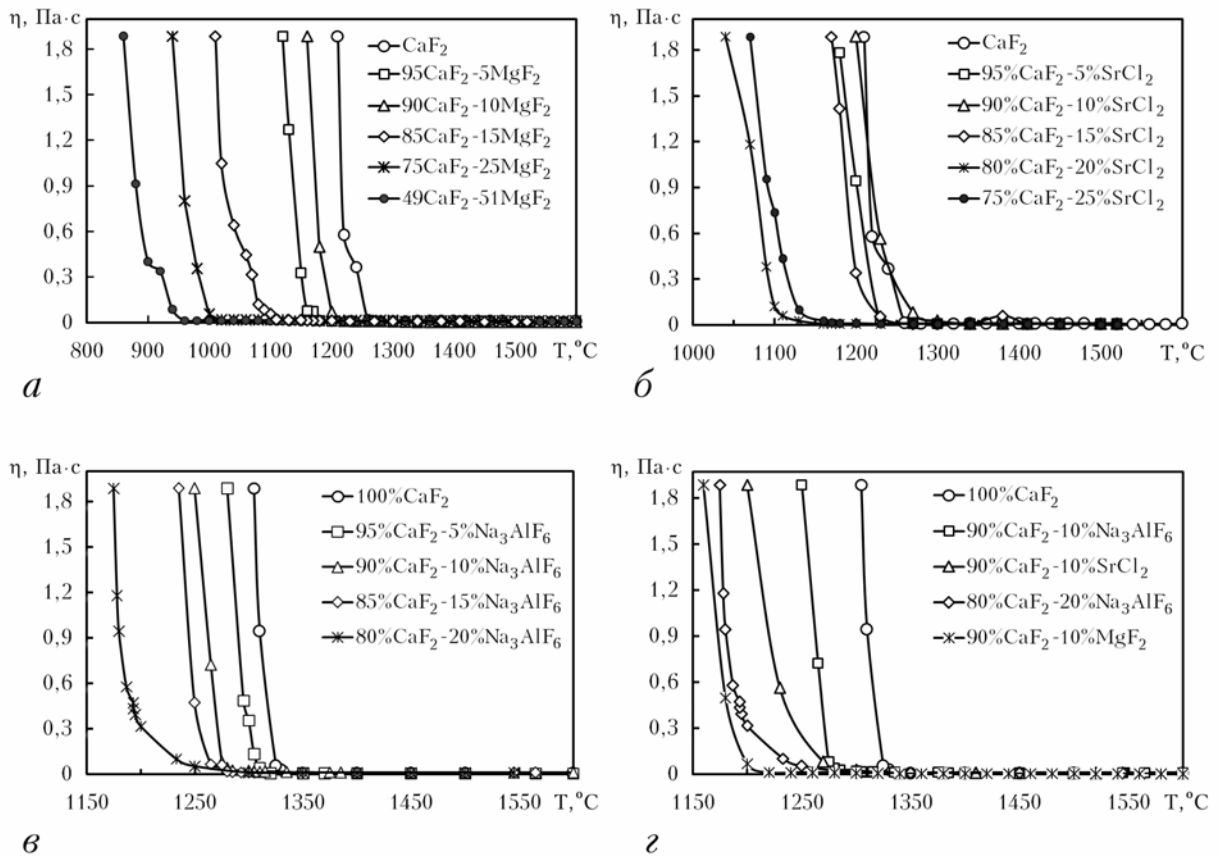


Рисунок 5.2 – Температурні залежності в'язкості сольових систем CaF_2 - MgF_2 , CaF_2 - SrCl_2 , CaF_2 - Na_3AlF_6 , при різних концентраціях компонентів (а-в) і різних складах (г).

Результати вимірювань електропровідності сольових систем на основі CaF_2 наведені на рисунку 5.3. Аналіз отриманих температурних залежностей свідчить про складний характер впливу доданих до CaF_2 компонентів на електропровідність системи.

У подвійних системах, в інтервалі температури 1100...1300 °С, додаткові компоненти переважно приводили до збільшення

електропровідності системи на основі CaF_2 . Однак, при температурах вище 1400°C ця закономірність змінювалася і при 1600°C , у всіх випадках, однокомпонентний флюс на основі чистого CaF_2 мав найвищу питому електропровідність, близько $650 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ (рис. 5.3). Найнижчу електропровідність, на рівні 380 Ом^{-1} , при даній температурі, мала система $\text{CaF}_2 - 5\% \text{ Na}_3\text{AlF}_6$.

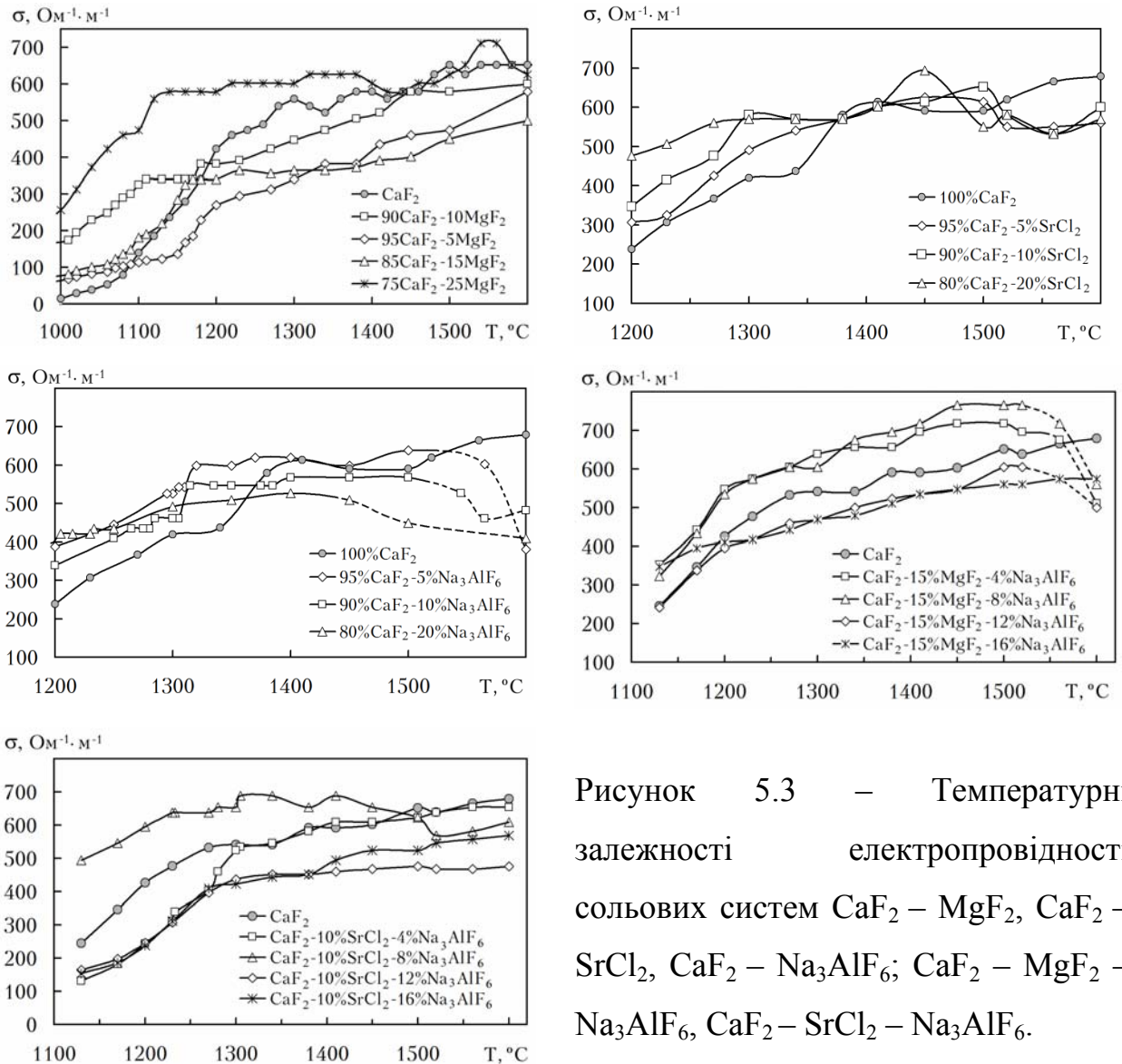


Рисунок 5.3 – Температурні залежності електропровідності сольових систем $\text{CaF}_2 - \text{MgF}_2$, $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2$, $\text{CaF}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$; $\text{CaF}_2 - \text{MgF}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$, $\text{CaF}_2 - \text{SrCl}_2 - \text{Na}_3\text{AlF}_6$.

У кожній із досліджуваних подвійних систем зафіксовано концентраційні мінімуми електропровідності: для системи $\text{CaF}_2 - \text{MgF}_2$, при

концентрації MgF_2 -10...15%, для систем CaF_2 - SrCl_2 і CaF_2 - Na_3AlF_6 - при 5% SrCl_2 і 5% Na_3AlF_6 , відповідно.

Серед потрібних композицій найнижчу електропровідність у всьому температурному інтервалі мала система CaF_2 - 10% SrCl_2 - 12% Na_3AlF_6 .

В цілому, найбільш суттєвий вплив на електропровідність сольового розплаву призвело введення в його склад Na_3AlF_6 . Ймовірно, це пов'язано з утворенням в розплаві комплексних аніонів типу AlF_6^{3-} , які мають великий іонний радіус і малу рухливість.

Далі оцінювали технологічні властивості досліджуваних флюсових композицій в умовах реального електрошлакового процесу (рис. 5.4). Досліджували подвійні системи CaF_2 -5...15% MgF_2 , CaF_2 -5...10% Na_3AlF_6 , а також потрібні системи CaF_2 -8...10% MgF_2 -4% Na_3AlF_6 і CaF_2 -8...10% SrCl_2 -2...4% Na_3AlF_6 .

Проведені експерименти показали, що вміст MgF_2 і Na_3AlF_6 у флюсі для ЕШП титану не повинен перевищувати 12...14 і 4...6%, відповідно. При перевищенні вмісту даних компонентів вище вказаних значень, флюс не забезпечує необхідні температурні параметри електрошлакового процесу і виплавлені зливки мають незадовільну якість формування бічної поверхні (рис. 5.4).

Флюси системи CaF_2 -8...10% SrCl_2 -2...4% Na_3AlF_6 і CaF_2 -8...10% MgF_2 -4% Na_3AlF_6 забезпечували надійний "холодний" старт електрошлакового процесу та стабільні режими протягом всієї плавки, а зливки, виплавлені з їх використанням, характеризувалися гарною якістю бічної поверхні (рис. 5.5).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд титанових зливків діаметром 65 мм, виплавлених із використанням різних флюсів: а - $\text{CaF}_2\text{-}10\%\text{Na}_3\text{AlF}_6$; б - $\text{CaF}_2\text{-}15\%\text{MgF}_2$; в - $\text{CaF}_2\text{-}10\%\text{MgF}_2\text{-}4\%\text{Na}_3\text{AlF}_6$; г - $\text{CaF}_2\text{-}10\%\text{SrCl}_2\text{-}4\text{Na}_3\text{AlF}_6$.



Рисунок 5.5 – Зовнішній вид титанових зливків діаметром 85 мм (а, б, в) і 105 мм (з), виплавлених з використанням різних флюсів: а – 100% CaF_2 ; б – CaF_2 - 8% SrCl_2 - 4% Na_3AlF_6 ; в – CaF_2 - 8% MgF_2 - 4% Na_3AlF_6 ; з – CaF_2 - 10% SrCl_2 - 2% Na_3AlF_6 .

У таблиці 5.2 наведені основні параметри плавок, проведених із застосуванням зазначених флюсів та однокомпонентного флюсу на основі 100% CaF_2 . Використання програмного пакета PowerGraph з функціями математичної обробки отриманих даних дозволило розрахувати середні (інтегральні) значення параметрів процесу і визначити питомі витрати електроенергії. Отримані дані свідчать про те, що використання флюсів систем CaF_2 -8% SrCl_2 -4% Na_3AlF_6 і CaF_2 -8% MgF_2 -4% Na_3AlF_6 дозволило знизити питомі витрати електроенергії у порівнянні із плавкою під флюсом на основі чистого CaF_2 , відповідно, на 14,7 і 18,3% (табл. 5.2). Зазначений ефект досягається завдяки більш високому питомому електроопору використовуваних багатокомпонентних флюсів.

Таблиця 5.2 – Параметри досліджуваних плавок

Параметр	Склад флюсу, мас. %		
	100 CaF ₂	CaF ₂ -8 SrCl ₂ -4 Na ₃ AlF ₆	CaF ₂ -8 MgF ₂ -4 Na ₃ AlF ₆
Середній струм, А	2683,3	2404,0	2519,6
Середня напруга, В	32,0	31,4	31,5
Середня швидкість подачі електроду, м/год.	63,8	65,7	72,2
Час плавки, с	610,0	422,8	484,6
Маса зливку, г	4985	3560	4480
Питомі витрати ел. енергії, кВт×год/т	2918,7	2490,3	2384,8
Відносні витрати ел. енергії, %	100	85,3	81,7

Подальші експерименти при виплавці зливків технічного титану діаметром 105 мм під флюсами CaF₂-MgF₂-Na₃AlF₆ і CaF₂-SrCl₂-Na₃AlF₆ показали, що остання система відрізняється більш стабільними режимами електрошлакового процесу та більш якісним формуванням поверхні зливку (рис. 5.5 з).

Таким чином, експериментально встановлено, що сольові флюси систем CaF₂-8...10% MgF₂- 2..4% Na₃AlF₆ і CaF₂-8...10% SrCl₂-4% Na₃AlF₆ забезпечують стабільний електрошлаковий процес і хорошу якість формування поверхні виплавлених титанових зливків. Також встановлено, що застосування флюсів систем CaF₂-10% SrCl₂-4% Na₃AlF₆ і CaF₂-10% MgF₂-4% Na₃AlF₆ при виплавці титанових зливків діаметром 85 мм забезпечило зниження питомої витрати електроенергії відповідно на 14,7 і 18,3%, по відношенню до виплавки аналогічних зливків під флюсом 100% CaF₂. Отже згідно результатів проведених експериментальних робіт в якості флюсу для ЕШП титану і сплавів на його основі доцільно рекомендувати композицію CaF₂-8...12%SrCl₂-2...5%Na₃AlF₆, яка забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливку, при зниженні питомої витрати електроенергії, в середньому на 10...18 %.

5.2. Технологічні рекомендації щодо матеріалів, обладнання та режимів ЕШП у магнітних полях.

Технологія камерного ЕШП титану у магнітних полях характеризується певними особливостями і потребує окремих вимог та рекомендацій щодо її реалізації.

Витратний електрод

Одним із важливих елементів технології камерного ЕШП титану у магнітних полях є витратний електрод. В залежності від конкретних завдань в якості витратного електроду при ЕШП титану можна використовувати електрод, пресований із титанової губки і легуючих компонентів, або електрод монолітного типу (відливки, напівфабрикати тощо).

На сьогодні відомі різні методи пресування витратних електродів із застосуванням губчастого титану. Зокрема, це різні схеми пресування брикетів або таблеток в «глуху» матрицю із подальшим їх зварюванням між собою, або пресування електродів необхідної довжини в «прохідну» матрицю. Наш досвід вказує на те, що останній метод має певні переваги і є найбільш ефективним при виготовленні електродів для ЕШП титану. Цей метод є більш продуктивним, а отримані електроди характеризуються високою щільністю, рівномірним розподілом легуючих компонентів та мають необхідну міцність. Принципова схема технології пресування електродів в «прохідну» матрицю та зовнішній вигляд пресованих електродів зображені на рисунку 5.6.

У випадку застосування електродів монолітного типу рекомендується використовувати циліндричні (або іншої форми) електроди, отримані методами спеціальної металургії, які забезпечують відсутність в металі шкідливих домішок ([O], [N], [H], [C] та ін).

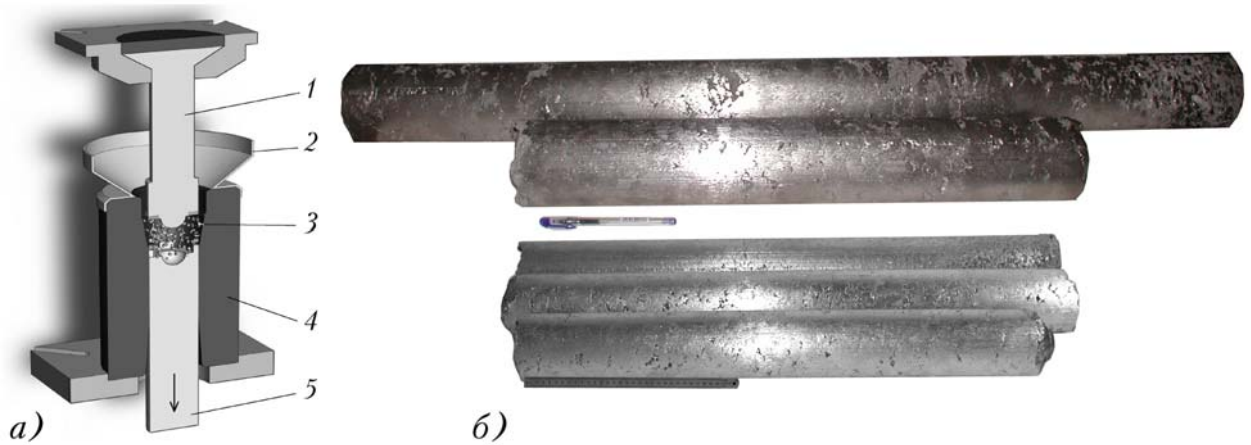


Рисунок 5.6 – Принципова схема пресування електродів в «прохідну» матрицю *a* та зовнішній вигляд електродів, пресованих з титану губчастого *б*: 1 – пуансон; 2 – приймальна воронка; 3 – шихтові компоненти; 4 – прохідна матриця; 5 – пресований електрод

В обох випадках, використовуючи пресований або монолітний тип витратного електроду, необхідно здійснити приєднання до нього інвентарної головки та наконечника для "твердого" старту процесу. Наконечник має забезпечувати розплавлення флюсу та швидкий і надійний старт електрошлакового процесу. Інвентарна головка необхідна для приєднання витратного електроду до штоку механізму подачі. Для приєднання наконечника та інвентарної головки можна рекомендувати метод аргонно-дугового (TIG) зварювання.

Флюс

Для ЕШП титанових сплавів рекомендується використовувати плавлені сольові флюси на основі галогенідів лужних та лужноземельних металів. Основні положення, щодо вибору складу флюсу наведено у попередньому підрозділі.

Обов'язковою вимогою застосування згаданих флюсів є їх прогартування безпосередньо перед процесом ЕШП при температурі 450°C з витримкою 2...4 год. Рекомендується застосовувати флюси фракцією 3...5 мм. Флюс засипають перед етапом герметизації печі ЕШП, зокрема, після

закріплення електроду та його короткого замикання на піддон кристалізатора.

Атмосфера

Важливою умовою проведення процесу ЕШП титану є контрольована атмосфера в плавильному просторі. Для цього необхідна герметизація плавильного простору і його попереднє вакуумування. Вакуумування здійснюється за допомогою вакуумної системи, яка включає в себе вакуумний насос, вакуумну засувку, трубопровід та вакуумметр. Рекомендовані значення тиску в камері ЕШП перед заповненням інертним газом становлять $P \leq 5 \times 10^{-2}$ мм. рт. ст.

Після забезпечення необхідного значення вакууму у камері печі, її заповнюють інертним газом. Рекомендований тиск інертного газу залежить від конкретного випадку. Він може бути як вище атмосферного, так і нижче, а сам процес переплаву можна проводити в застійній, або в проточній атмосфері. Загалом, рекомендований тиск інертного газу має знаходитись в межах $P = 40 \dots 130$ кПа.

При ЕШП титану можна використовувати інертні гази – аргон, гелій. Проте використання гелію через його високої вартості є недоцільним. Тому, як правило, використовують аргон першого або вищого ґатунку. Для відповідальних зливків аргон перед застосуванням можна очищати відомими методами.

Обладнання

Загалом, для реалізації ЕШП титану в магнітних полях можуть бути використані стандартні установки, проте їх необхідно доукомплектувати модернізованим джерелом живлення, електромагнітною системою, вакуумною камерою і системою вакуумування. В якості базової, стандартної установки можуть бути установка А-550, А-535, А-1494, А-1137 та ін [213]. На рисунку 5.7 зображено загальний вигляд реконструйованої установки для камерного ЕШП в магнітних полях.

До трансформаторів, які рекомендовано використовувати при ЕШП титану, ставляться окремі вимоги. А саме, вони повинні забезпечувати низьку напругу плавки (14...40 В). Це зумовлено застосуванням сольових, фторидних флюсів, які характеризуються високою електропровідністю.

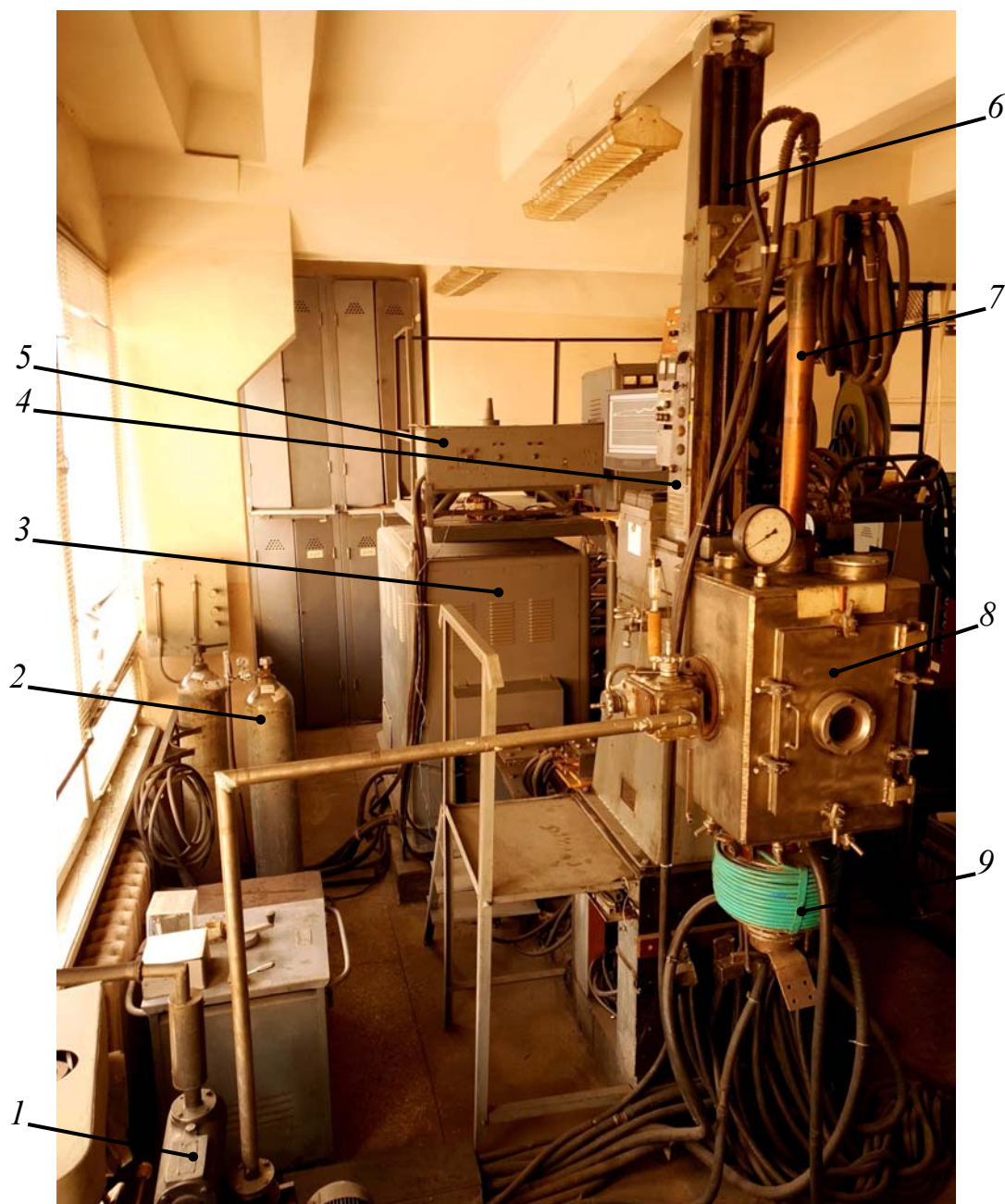


Рисунок 5.7 – Загальний вигляд установки для ЕШП в магнітних полях, де: 1 – вакуумний насос; 2 – газові балони; 3 – трансформатор; 4 – панель управління; 5 - шафа керування; 6 – колона плавильної установки; 7 – шток; 8 – вакуумна камера; 9 – соленоїд електромагнітної системи

Таким вимогам відповідають трансформатори ТШС 3000/3, ТШП 10000/1 та ін. [213, 214]. Згадані джерела живлення забезпечують ступінчате регулювання напруги під навантаженням, шляхом зміни числа включених витків первинної обмотки трансформатора. Проте процес переплаву в окремих випадках потребує плавного регулювання напруги. В такому випадку це джерело живлення доукомплектується блоком плавного регулювання електричної напруги. Воно побудоване на базі керуючих тиристорів, які включені у ланцюг первинної обмотки трансформатора.

Для забезпечення контрольованої атмосфери у плавильному просторі, установка для ЕШП титану має бути обладнана вакуумною системою. Вона складається із вакуумної камери, вакуумного насосу, трубопроводів, вакуумної засувки та приладів для контролю тиску. Конструкції механізму подавання електроду, кристалізаторів, піддонів мають забезпечувати герметичні, вакуумощільні з'єднання. В якості вакуумного насосу рекомендується використовувати стандартні форвакуумні насоси типу АВЗ, НВЗ та ін. Вакуумна засувка повинна забезпечувати можливість керувати магістралями вакуумної системи та системи подавання інертного газу.

Крім вищезгаданих особливостей і рекомендацій щодо обладнання для ЕШП титану в магнітних полях головною їх відмінністю є наявність електромагнітної системи. Вона включає в себе джерело живлення, соленоїд та блок керування. В якості джерела живлення електромагнітної системи можна використовувати традиційні зварювальні випрямлячі, в залежності від необхідної потужності, зокрема це може бути ВС-400, ВСУ-600, ВДУ-1200 та інші [213, 214]. Напруга від такого джерела живлення, за допомогою команд блока керування, подається на соленоїд, створюючи в ньому постійний чи імпульсний струм і генеруючи, тим самим, магнітне поле в плавильній зоні. Рекомендована конструкція соленоїду частково описана в розділі 2. Зокрема, доцільно застосовувати водоохолоджуваний соленоїд, який розміщений поверх кристалізатора та виготовлений із мідної трубки [193]. Такий соленоїд, із відповідною кількістю витків, здатний створювати магнітне поле

в робочій зоні з необхідною (для ефективного впливу на макроструктуру металу зливків) індукцією, біля 0,14...0,3 Тл і вище. Варто додати, що кристалізатор, на якому розміщують соленоїд, має бути виготовлений з немагнітних матеріалів.

Для керування електромагнітною системою доцільно використовувати програмовані мікропроцесорні пристрої, наприклад, логічний модуль SRB1218D або ін. Такий модуль забезпечує роботу системи в імпульсному режимі, по заданій програмі, з точністю до 0,01с.

Процес виплавки зливків

Як кожен технологічний процес, так і технологія ЕШП титану в магнітних полях потребує дотримання певної послідовності дій. Технологічні операції процесу ЕШП у магнітних полях зображено у вигляді блок-схеми на рисунку 5.8.

Окрім підготовчих операцій (підготовка матеріалів і обладнання) процес виплавки зливка складається з трьох основних етапів: наведення шлакової ванни; стаціонарний процес переплаву; виведення усадкової пористості.

Наведення шлакової ванни

В тексті дисертаційної роботи зазначалось, що при камерному ЕШП, для розплавлення флюсу, використовують виключно «твердий» старт. З урахуванням багаторічного досвіду виплавки титанових зливків в камерній печі був розроблений комплекс конструкторських і технологічних прийомів, застосування яких дозволяє надійно здійснювати старт електрошлакового процесу. Серед них можна виділити наступні:

- застосування наконечника витратного електроду спеціальної конструкції, зі змінним перерізом;
- застосування комбінованої затравки з монолітного титану і пресованого губчастого титану;
- забезпечення надійного електричного контакту затравки з піддоном;

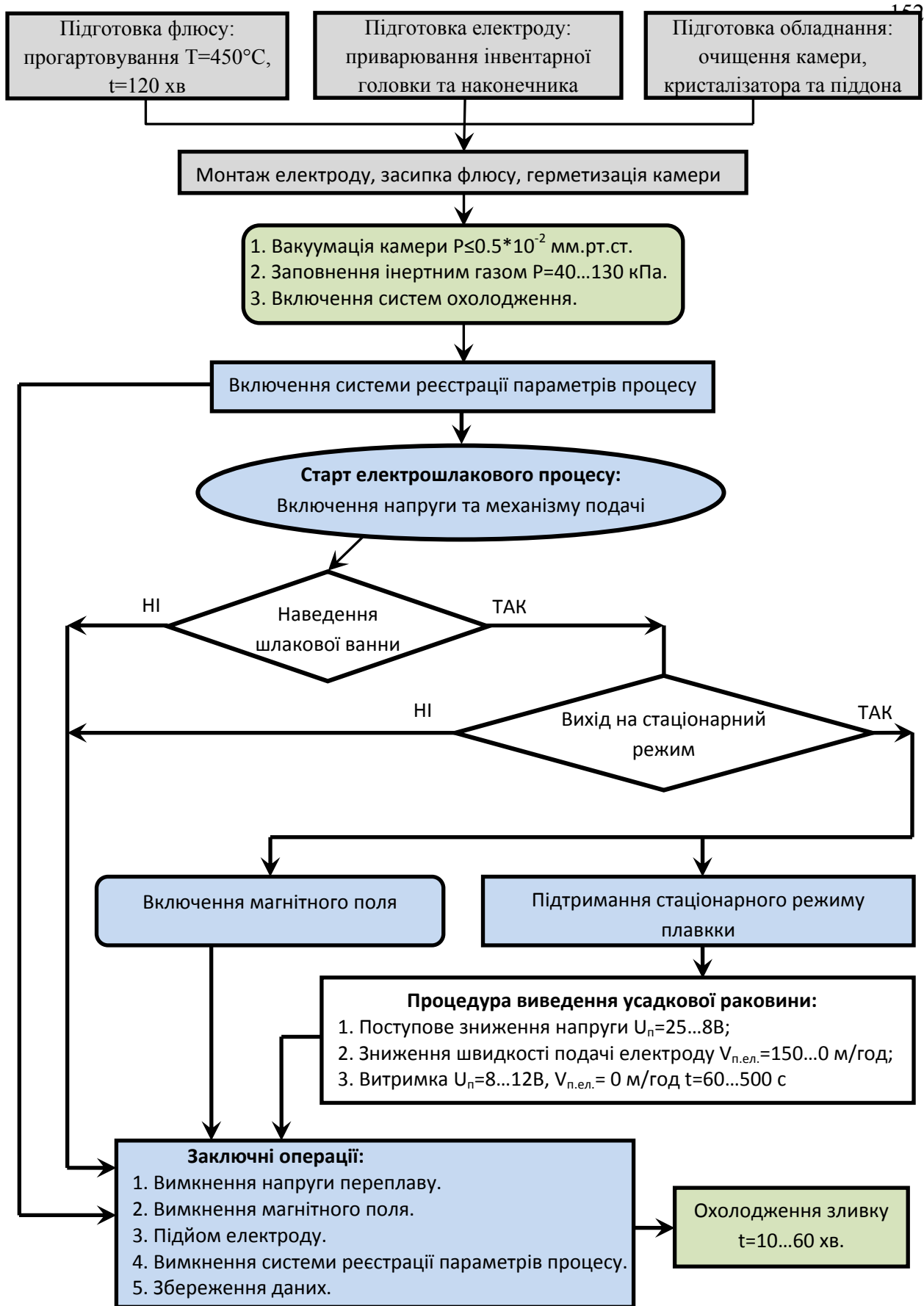


Рисунок 5.8 – Блок-схема технологічних операцій процесу ЕШП у магнітних полях.

- застосування певного алгоритму зміни електричної напруги і швидкості подавання електроду, в залежності від струму плавки.

Загалом, наведення шлакової ванни відбувається через оплавлення наконечника і затравки внаслідок короткого замикання електроду на піддон, виникнення дугового розряду, розплавлення флюсу, шунтування дуги и переходу дугового процесу в шлаковий.

Стаціонарний процес переплаву

Після наведення шлакової ванни, виходу на задані режими переплаву і стабілізації процесу починається стаціонарний процес переплаву витратного електроду. На даному етапі необхідно здійснити включення магнітного поля.

Загалом вибір режимів переплаву (на даному основному етапі) та електромагнітного впливу залежить від багатьох факторів: типу електроду, складу сплаву, типорозміру зливків, призначення та ін. Проте, враховуючи результати проведених досліджень та досвід виплавки зливків титанових сплавів, можна зробити деякі узагальнення і рекомендувати основні параметри переплаву. Такі рекомендації, стосовно виплавки зливків діаметром 60...220 мм наведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Рекомендовані параметри ЕШП титану в магнітних полях.

D _{зл.} , мм	d _{ел.} , мм	U _{п.} , В	I _{п.} , кА	Параметри магнітного поля			
				Постійне	Імпульсне		
				В, Тл	В, Тл	t _{імп.} , с	t _{п.} , с
60	30...45	24...30	2,6...3,2	0,08...0,12	0,12...0,20	0,8...1,0	6...10
80	50...60	24...30	3,8...4,2	0,10...0,14	0,12...0,20	0,8...1,0	6...10
100	60...80	24...30	4,8...5,3	0,12...0,16	0,18...0,22	0,8...1,2	6...12
140	90...110	26...32	6,0...6,5	0,18...0,22	0,18...0,24	1,0...1,6	8...14
160	100...120	26...32	7,2...7,8	0,24...0,28	0,20...0,30	1,2...2,0	10...16
220	130...180	30...36	8,5...10,0	0,28...0,32	0,24...0,35	2,8...0,3	12...20

Виведення усадкової пористості

Після переплаву основної частини витратного електроду починається заключний етап виплавки зливка, завдання якого полягає в перешкоджанні утворенню в головній частині зливка дефектів усадкового характеру.

Застосування розроблених технологічних заходів на завершальній стадії виплавки зливку дозволяє повністю уникнути формування усадкової раковини та пористості. Така можливість з'явилася завдяки плавному керуванню потужністю переплаву і її зміні по заданій програмі.

Серед основних етапів виведення усадкової пористості можна виділити наступні: плавне зниження електричної напруги переплаву із робочих значень до 8...12 В (за рахунок цього процес плавлення електроду призупиняється); плавне зменшення швидкості подавання електроду, до його повної зупинки; підтримання шлакової ванни в рідкому стані (підігрів) протягом певного часу (для злиwkів діаметром 60...220 мм від 60 до 500 с). По закінченню відведеного часу напругу плавки необхідно відключити, а електрод підняти вгору за межі шлакової ванни.

Слід відмітити, що магнітне поле рекомендується вимикати на початковій стадії етапу виведення усадкової пористості. Проте, в деяких випадках магнітне поле доцільно вимкнути після повного завершення процесу виплавки зливка.

На основі проведених робіт був розроблений спосіб електрошлакової плавки в поздовжньому магнітному полі, на який був отриманий Патент України на корисну модель.

5.3. Хімічний склад та механічні властивості злиwkів титанових сплавів отриманих способом ЕШП в магнітних полях.

Основним завданням використання магнітних полів при ЕШП є їх вплив на структурну та хімічну однорідність злиwkів. В попередньому розділі дисертаційної роботи було досліджено вплив магнітних полів на формування макроструктури злиwkів ЕШП. Показано, що застосування магнітних полів

дозволяє впливати на структуроутворення металу, та, в залежності від схеми та параметрів електромагнітного впливу може призводити до подрібнення та гомогенізації макроструктури зливків, без утворення внутрішніх дефектів та погіршення їх зовнішніх поверхонь. Відомо, що структурну однорідність металу частково можна підвищити шляхом застосування додаткових методів термодформаційної обробки, після виплавки зливків. Проте, хімічну однорідність, особливо в макрооб'ємах, яка суттєво впливає на механічні і службові характеристики металу, після отримання зливків змінити вже неможливо.

У зв'язку з цим необхідно було дослідити хімічний склад та механічні властивості титанових зливків, отриманих способом ЕШП, під впливом магнітних полів.

Об'єктом дослідження було вибрано найбільш поширений $\alpha+\beta$ титановий сплав ВТ6, а також складнолеговані $\alpha+\beta$ титанові сплави ТС6 та ОТ4. Характерним для останніх є їх легування хромом та марганцем, які мають високу пружність пару, внаслідок чого виплавка таких сплавів традиційними способами (ВДП, ЕПП) частково обмежена.

Для дослідження хімічного складу та механічних властивостей методом ЕШП в магнітному полі було отримано титанові зливки марок ВТ6, ТС6 та ОТ4. Виплавку зливків проводили згідно технологічних рекомендацій, наведених в п. 4 даної роботи. Для виготовлення зразків отримані зливки різали стрічковою пилою в осьовій та поперечній площинах.

Зразки для дослідження хімічного складу та механічних випробувань відбирали в різних частинах зливку. Зокрема аналізу піддавали нижню (30 мм від нижнього торця), центральну та верхню (30 мм від верхнього торця) частини зливків. При цьому, для дослідження хімічного складу металу, із кожної частин зливку виготовляли зразки із його осьової зони, периферійної зони (10 мм від краю) та зони половини радіусу зливку ($1/2R$).

Для механічних досліджень із нижньої, центральної та верхньої частин зливків виготовляли по 3 зразки, для випробувань на розтяг та ударну

в'язкість. Розподілення твердості НВ досліджували на макрошліфах, вирізаних в поздовжньому (осьовому) напрямку.

5.3.1. Хімічний склад зливоків титанових сплавів отриманих способом ЕШП в магнітних полях.

Хімічний склад визначали рентгенофлюоресцентним методом та методом ІСР-спектрометрії (методом оптично емісійної спектрометрії з індуктивно-зв'язною плазмою). Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливоків наведені в таблицях 5.4-5.6.

Таблиця 5.4 – Хімічний склад зливку титанового сплавів ВТ6 отриманого методом ЕШП в магнітному полі

Місце аналізу		Вміст, % мас									
		Ti	Al	V	Fe	Mn	Mo	Nb	Ni	Si	Cu
Верх	Центр	89,181	6,255	4,146	0,148	0,028	0,019	0,003	0,004	0,042	0,005
	1/2 R	89,553	6,105	4,145	0,064	0,005	0,018	0,003	0,009	0,075	0,004
	Край	89,435	6,112	4,194	0,075	0,004	0,017	0,003	0,008	0,086	0,003
Середина	Центр	89,386	6,091	4,269	0,059	0,003	0,016	0,003	0,014	0,115	0,003
	1/2 R	89,342	6,125	4,255	0,054	0,006	0,017	0,003	0,012	0,092	0,005
	Край	89,225	6,132	4,265	0,071	0,005	0,019	0,003	0,012	0,087	0,004
Низ	Центр	89,234	6,091	4,323	0,067	0,004	0,022	0,003	0,028	0,083	0,009
	1/2 R	89,056	5,945	4,231	0,063	0,003	0,017	0,003	0,016	0,084	0,007
	Край	89,082	5,958	4,423	0,07	0,003	0,19	0,003	0,019	0,09	0,006
ГОСТ 19807-91		86,45 – 90,9	5,3 – 6,8	3,5- 5,3	до 0,6	-	-	-	-	до 0.1	-

Таблиця 5.5 – Хімічний склад зливку титанового сплаву ТС6 отриманого методом ЕШП в магнітному полі.

Місце аналізу		Вміст, % мас				
		Ti	Cr	V	Mo	Al
Верх	Центр	77	9,9	6,00	4,00	3,00
	1/2 R	76,6	10,0	6,12	4,06	3,02
	Край	76,6	9,9	6,10	4,13	3,10
Середина	Центр	76,2	10,2	6,20	4,20	3,15
	1/2 R	76,5	10,1	6,18	4,10	3,09
	Край	76,7	9,9	6,14	4,02	3,08
Низ	Центр	76,3	10,2	6,20	3,98	3,06
	1/2 R	75,7	10,1	6,15	4,00	3,09
	Край	76,5	10,2	6,10	4,05	3,12
ТУ 1-5-127-73		Залишок	9,4...11,5	6,4...7,8	3,5...4,5	2,3...3,6

Таблиця 5.6 – Хімічний склад зливку титанового сплаву ОТ4 отриманого методом ЕШП в магнітному полі.

Місце аналізу		Вміст, % мас				
		Ti	Al	Mn	Si	Fe
Верх	Центр	93,7	3,94	1,51	0,08	0,059
	1/2 R	94,48	3,7	1,52	-	-
	Край	93,8	3,74	1,50	0,089	0,068
Середина	Центр	94	3,8	1,53	0,068	0,065
	1/2 R	94,2	3,82	1,54	-	-
	Край	93,8	4,03	1,52	0,059	0,063
Низ	Центр	93,7	3,95	1,55	0,07	0,085
	1/2 R	93,15	4,1	1,56	-	-
	Край	93,7	3,85	1,57	0,08	0,054
ГОСТ 19807-91		Основа	3,5...5	0,8...2,0	<0,12	<0,3

Аналіз отриманих даних свідчить, що вміст легуючих компонентів в усіх зливках відповідає нормам стандарту. По висоті та радіусу злиwkів легуючі елементи розподілені рівномірно без ознак зональної ліквациї. Легуючі компоненти в титановому сплаві ВТ6, зокрема Al та V, розподілені в межах допустимих значень, а максимальне відхилення їх вмісту в об'ємі зливка не перевищує 0,31 і 0,28 %, відповідно, що говорить про високу хімічну однорідність металу (табл. 5.4).

Характерною особливістю сплаву ТС6 є великий вміст в ньому хрому (9,4...11,5%) (табл. 5.5). Через це, при отриманні злиwkів сплаву ТС6 традиційними методами, є проблема забезпечення рівномірного розподілення Cr в об'ємі зливку, без утворення ліквацийних неоднорідностей і, відповідно, нестабільних властивостей металу. Аналізуючи розподілення Cr в різних частинах зливку ТС6 можна стверджувати, що застосування електромагнітного перемішування позитивно впливає на хімічну однорідність металу. Відхилення вмісту Cr в об'ємі зливка менше ніж 0,3%. Вміст інших легуючих компонентів також в межах допустимих значень, а його відхилення в різних ділянках зливка не перевищує, %: V - 0,20, Al-0,15, Mo - 0,22.

Сплав ОТ4 входить в окрему групу титанових сплавів, в склад яких входить легуючий компонент марганець, який виконує функцію β-стабілізатора. Через високу пружність пари марганцю, виробництво таких сплавів способами вакуумної металургії ускладнено. Проте в процесі ЕШП, який здійснюється в контрольованій атмосфері інертного газу, випаровування марганцю не відбувається. Вміст і розподілення марганцю в зливку відповідає вимогам ГОСТУ та коливається в межах від 1,5 до 1,57%. Вміст інших легуючих компоненти теж відповідає вимогам стандарту (табл. 5.6).

Варто наголосити, що відсутність випаровування легуючих компонентів з високою пружністю пари в процесі камерного ЕШП та рівномірне їх розподілення в об'ємі злиwkів надають підґрунтя вважати його

перспективним способом отримання титанових сплавів, легованих марганцем, хромом, бором, ванадієм, оловом та іншими легколетючими компонентами.

Крім рівномірного розподілу легуючих компонентів в металі зливок ЕШП, одним із важливих показників їх якості є газовий склад. Застосування спеціальних заходів в процесі камерного ЕШП, зокрема попереднє вакуумування плавильного простору і послідує його заповнення інертним газом (який при необхідності пройшов цикл очищення від вологи), а також шлаковий захист рідкого металу із застосуванням галогенідних флюсів, зводить до мінімуму можливість забруднення металу атмосферними газами. Вміст атмосферних газів в зливках титанових сплавів отриманих методом ЕШП в магнітних полях наведено в таблиці 5.7. Аналіз отриманих даних показує, що вміст [O], [N] і [H] в металі зливок повністю відповідає вимогам стандартів. Це свідчить про те, що спосіб камерного ЕШП забезпечує надійний захист розігрітого до високих температур витратного електроду і ванни рідкого металу від взаємодії з атмосферними газами.

Загалом, проведений хімічний аналіз металу зливок, отриманих способом ЕШП в магнітних полях, показав високі характеристики хімічної однорідності металу і їх повну відповідність вимогам стандартів.

Таблиця 5.7 – Газовий склад титанових сплавів отриманих способом ЕШП в магнітних полях.

Сплав	Вміст шкідливих газів, %		
	O	N	H
Дослідний OT4	0,14	0,0079	0,00220
ГОСТ 19807-91	< 0,15	< 0,05	< 0,012
Дослідний ТС6	0.086	0.0045	0.00286
ТУ 1-5-127-73	< 0,20	< 0,05	<0,015
Дослідний VT6	0,12	0,0096	0,00223
ГОСТ 19807-91	< 0,20	< 0,05	< 0,015

5.3.2. Механічні властивості злиwkів титанових сплавів отриманих методом ЕШП в магнітних полях.

Механічні властивості титанових сплавів, отриманих ЕШП в магнітних полях, визначали методами руйнівного контролю на розтяг та ударну в'язкість, при кімнатній температурі. Дослідженню піддавали як литий, не термооброблений метал, так і метал, який пройшов деформацію і термічну обробку, типову для даного сплаву. Результати механічних випробувань (середні значення) наведені в таблиці 5.8. Для порівняння, в таблиці також наведені типові значення для відповідних марок титанових сплавів.

Таблиця 5.8 – Механічні властивості металу титанових злиwkів сплавів BT6, TC6 та OT4, отриманих методом ЕШП у магнітному полі

Сплав	Зразок, вид поставки	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	КСУ, Дж/см ²
BT6	Дослідний (литий метал)	854,7	813,5	14,2	35	61,9
	Дослідний (пруток катаний і термооброблений)	971,4	929,9	16,9	44,1	38,7
	Типові значення (пруток катаний, термооброблений)	905...1050	-	>10	>30	>30
TC6	Дослідний (пруток катаний і термооброблений)	1315,8	1248,3	12,7	28,2	28,6
	Типові значення (у термозміцненому стані)	1300...1500	1240...1450	>10	>25	-
OT4	Дослідний пруток катаний і термооброблений	722	610	14,2	32,8	48
	ГОСТ 26492-85 пруток звичайної якості	>685	-	>8	>25	>40
	ГОСТ 26492-85 пруток підвищеної якості	685...885	-	>11	>30	>40

Результати механічних випробувань сплаву ВТ6 показують, що характеристики його міцності відповідають типовим значенням для металу, що пройшов аналогічну термічну обробку. При цьому, характеристики пластичності ($\delta=16,9\%$, $\Psi=44,1\%$) і ударна в'язкість ($KCU=38,7$ Дж/см²) металу були на високому рівні. Щодо властивостей литого металу, то його міцність в середньому менша на 10...13%, ніж термообробленого. Це є характерним для литого металу. В той же час слід звернути увагу на високі характеристики ударної в'язкості металу, а саме на значення 61,9 Дж/см². При цьому, в усіх випадках досліджувані зразки руйнувалися з утворенням шийки, тобто вони характеризувалися в'язким руйнуванням.

Сплав ТС6 досліджували на міцність після проведення термомеханічної обробки, яка складалась з наступних етапів:

- прокатування $T=950...1150$ °С, $\varepsilon=90\%$;
- відпал $T=800$ °С (2 години), охолодження на повітрі;
- гартування $T=820$ °С (2 години), охолодження на повітрі;
- старіння $T=490$ °С (25 годин), охолодження на повітрі.

В результаті його межа міцності досягала значення 1315,8 МПа, при показниках пластичності $\delta=10,7\%$, $\Psi=25,2\%$. Загалом, це співвідноситься з існуючими даними для сплаву ТС6 [6].

Механічні властивості прутків сплаву ОТ4 регламентовані ГОСТ 26492-85, згідно якого вони поділяються на метал звичайної та підвищеної якості. Результати випробувань свідчать, що за механічними властивостями пруток з титанового сплаву ОТ4, отриманого способом ЕШП, відповідає вимогам стандарту для прутків підвищеної якості (табл. 5.8). При цьому, метал характеризується високими показниками пластичності і ударної в'язкості. Очевидно, що такі результати, в комплексі із аналогічними результатами досліджуваного сплаву ВТ6, свідчать про високу якість металу ЕШП, а зокрема про його стійкість до різного роду руйнувань.

Загалом, проведені випробування показали, що сплави технології ЕШП в магнітному полі, при однаковому рівні міцності, характеризуються більш

високими, в середньому на 10...25 %, показниками пластичності та ударної в'язкості.

Іншим важливим показником механічних властивостей металу, який характеризує його стійкість до динамічних руйнувань є ударна в'язкість. В нашому випадку досліджували параметр КСУ. Таким чином середні показники ударної в'язкості дослідного зразка, титанового сплаву ВТ6 знаходяться між значеннями, зазначеними в стандартах та сягають 38,7 Дж/см². А сплаву ОТ4 на 17% вище, від значень зазначених в ГОСТ 26492-85 (табл. 5.8). Це свідчить про високу здатність металу зливків працювати при динамічних навантаженнях.

Одним із показників, який може характеризувати ступень однорідності металу, є розподілення твердості по висоті і по радіусу зливка. Твердість НВ визначали на поверхні осьового перерізу зливку. Вимірювання проводили із кроком точок по висоті і по діаметру зливка 10×10 мм. Твердість визначали твердоміром динамічного типу (ТД-32). Результати досліджень наведено графічно на рисунку 5.9.

Аналізуючи результати дослідження розподілення твердості, можна стверджувати, що метал по висоті та ширині поздовжнього перерізу, крім кореневої частини, є однорідним. У всіх випадках у кореневій частині зливків (приблизно до 20 мм від нижнього торця зливку) спостерігається підвищення твердості. Таке підвищення твердості у кореневої частини зливка є типовим для більшості металургійних процесів і пов'язане з підвищеним вмістом домішок в даній зоні. Тому, як правило, кореневу частину зливку видаляють методами металообробки.

Середнє значення твердості по Брінеллю титанового сплаву ВТ6 становить 282 НВ, сплаву ТС6 – 298 НВ, а сплаву ОТ4 – 258 НВ. Загалом, без врахування корневих частин, розподілення значень твердості на осьовій площині зливків коливається в межах 4%, що свідчить про досить високий ступінь гомогенності литого металу.

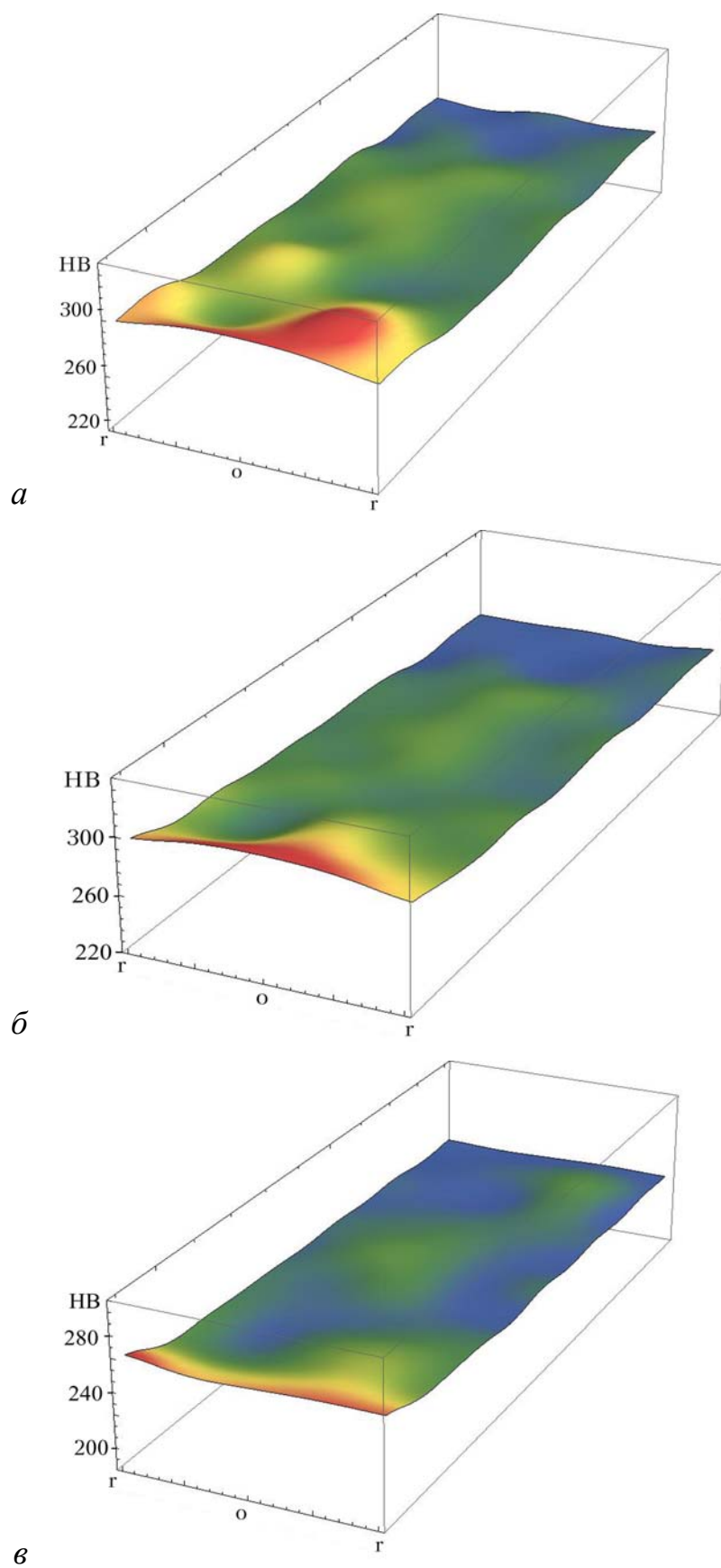


Рисунок 5.9 – Розподіл твердості НВ в поздовжньому (осьовому) перерізу титанових зливків марок ВТ6 (*a*), ТС6 (*б*) та ОТ4 (*в*), отриманих способом ЕШП в магнітному полі

Висновки до розділу 5.

1. Температурні залежності електропровідності сольових композицій на основі CaF_2 показали наявність концентраційних мінімумів електропровідності, а саме:

- CaF_2 - MgF_2 - при концентрації MgF_2 10...15%;
- CaF_2 - SrCl_2 – при концентрації 5% SrCl_2 ;
- CaF_2 - Na_3AlF_6 – при концентрації 5% Na_3AlF_6 ;
- CaF_2 - MgF_2 - Na_3AlF_6 - при концентрації 15% MgF_2 і 8% Na_3AlF_6 ;
- CaF_2 - SrCl_2 - Na_3AlF_6 - при концентрації 8% SrCl_2 і 4% Na_3AlF_6 .

2. В'язкість флюсових композицій при температурах вище 1350°C (тобто при робочих температурах ЕШП), є незначною і мало залежить від концентрацій компонентів.

3. Флюси систем CaF_2 - 8...10% MgF_2 -2..4% Na_3AlF_6 і CaF_2 - 8...10% SrCl_2 - 4% Na_3AlF_6 забезпечують стабільний електрошлаковий процес і хорошу якість формування поверхні титанових зливок, при зниженні питомої витрати електроенергії, відповідно на 14,7 і 18,3%, по відношенню до виплавки аналогічних зливок під флюсом 100% CaF_2 .

4. Розроблено та запатентовано сольовий, трикомпонентний флюс для ЕШП титану, а саме:

- гексафтороалюмінат натрію $2,0 \div 5,0$;
- хлорид стронцію $8 \div 30$;
- фторид кальцію решта.

5. Визначено технологічні особливості камерного ЕШП у магнітних полях. На основі проведених робіт розроблено рекомендації щодо обладнання, матеріалів, режимів плавки та технологічних особливостей проведення процесу ЕШП титанових сплавів у магнітних полях.

6. Встановлено, що зливки титанових сплавів ВТ6, ТС6, ОТ4, отримані способом ЕШП, в магнітному полі, по хімічному складу повністю відповідають вимогам стандартів. По висоті та радіусу зливок легуючі

елементи розподілені рівномірно, без ознак зональної ліквіації. Наявність [O], [N] і [H] в металі зливків не перевищує норми, що свідчить про те, що спосіб камерного ЕШП забезпечує надійний захист розігрітого до високих температур витратного електроду і ванни рідкого металу від взаємодії з атмосферними газами.

7. Механічні властивості сплавів ВТ6, ТС6, ОТ4, отриманих способом ЕШП в магнітному полі, відповідають типовим значенням для даних сплавів після проведення аналогічної термодіформаційної обробки. При цьому, при однаковому рівні міцності, сплави технології ЕШП характеризуються більш високими, в середньому на 10...25 %, показниками пластичності та ударної в'язкості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено фізичну модель для дослідження процесів плавлення витратного електроду і крапельного перенесення металу при ЕШП в умовах дії зовнішніх магнітних полів. Шляхом фізичного моделювання встановлено:

- в процесі ЕШП у шлаковій ванні утворюються вихрові течії у вертикальній площині, які спрямовані вниз по вісі ванни, і вгору, біля бокових стінок ємності. Під дією поздовжнього магнітного поля ці течії трансформуються в горизонтальні обертання навколо вісі ванни;

- викликані дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля обертання рідини навколо вісі ванни призводять до деформації її вільної поверхні та поверхні поділу *шлакова - металева ванни*. Із збільшенням швидкості обертання величина деформації вільної поверхні ванни лінійно збільшується і при швидкості 350...420 мм/с досягає 10...12 мм;

- застосування поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,35 Тл призводить до збільшення частоти відриву крапель електродного металу з 0,62 Гц до 0,75...0,9 Гц і зменшення їх середньої маси з 1,4 г до 0,7...1,28 г;

- під дією поздовжнього магнітного поля траєкторії руху крапель в шлаковій ванні набувають спіралеподібної форми, що призводить до розосередження місць їх попадання на дзеркало рідкого металу. При цьому відстань, яку долають краплі в шлаковій ванні, збільшується з 30 до 40...80 мм, а термін перебування крапель в ванні – з 0,2...0,25 до 0,4...0,8 с;

2. Шляхом натурних експериментів встановлено, що під дією зовнішнього поздовжнього магнітного поля індукцією 0,2...0,28 Тл частота відриву крапель електродного металу збільшується на 18...62 %, а швидкість плавлення електроду на 3...6 %. При цьому, середній діаметр крапель металу зменшуються на 5...16%, а їх маса на 13...41%.

3. Встановлено, що застосування імпульсного магнітного поля призводить до циклічної зміни струму плавки. Зокрема, імпульсне магнітне поле ($B=0,28$ Тл, $t_{\text{імп}}= 10$ с, $t_{\text{п}} = 40$ с) призводить до циклічного різкого

падіння електричного струму на величину до 70...80% без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу. Протягом паузи дії магнітного поля струм плавки відновлюється до початкового рівня. Величина падіння електричного струму залежить від величини індукції і тривалості імпульсу магнітного поля.

4. Визначено ефективні величини індукції постійного та імпульсного поздовжнього магнітних полів, які забезпечують максимальну розорієнтацію та подрібнення макроструктури зливків діаметром 70...140 мм при відсутності дефектів і збереженні якісного формування поверхні. Встановлено, що для постійного магнітного поля такий діапазон індукції становить $B=0,12...0,22$ Тл, а для імпульсного - $B=0,18...0,3$ Тл при тривалості імпульсів $t_{imp}=0,9...2,5$ с, та пауз - $t_n = 6...15$ с.

5. Досліджено температурні залежності електропровідності, в'язкості та інтервалу твердіння сольових композицій на основі CaF_2 . На їх основі розроблено та запатентовано сольовий, трикомпонентний флюс для ЕШП титану системи $CaF_2 - SrCl_2 - Na_3AlF_6$, який забезпечує стабільний електрошлаковий процес з хорошим формуванням поверхні зливку, при зниженні, в середньому на 10...18 %, питомої витрати електроенергії.

6. Способом ЕШП в поздовжньому магнітному полі отримано зливки титанових сплавів ВТ-6, ТС6 та ОТ-4. Встановлено, що хімічний склад сплавів повністю відповідає вимогам діючих стандартів. При цьому метал зливків характеризується високою хімічною і фізичною однорідністю. Характеристики міцності дослідних зразків відповідають типовим значенням для даних сплавів, а характеристики пластичності і ударної в'язкості перевищують в середньому на 10...25 %.

7. Розроблено технологічні рекомендації щодо обладнання, матеріалів та режимів ЕШП зливків титанових сплавів діаметром 60...220 мм під дією зовнішніх поздовжніх магнітних полів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ильин А.А. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин – М.:ВИЛС – МАТИ, 2009. – 520с.
2. Горынин И. В. Титан в машиностроении / И. В. Горынин, Б. Б. Гечулин // – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Основные тенденции в развитии титановой промышленности и научных исследований в области титана в СНГ [Текст] / О. М. Ивасишин, А. В. Александров // Материалы международной конференции «Ti-2011 В СНГ» (25-28 апреля 2011) - К.: 2011г. – С. 7-18.
4. Мировые товарные рынки [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.cmmarket.ru/markets/tiworld.htm>. - . – Назва з екрана.
5. Fox S. Recent Changes and Developments in Titanium Extraction / Stephen Fox, Kuang (Oscar) Yu // Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. Volume I. Beijing, June 19-24, 2011 P. 65-71.
6. Глазунов С.Г. Конструкционные титановые сплавы / С.Г. Глазунов, Моисеев В.Н.; Под. ред. А.Т. Туманова. - М.: Металлургия, 1974. –368 с.
7. Григоренко Г. М. Дисперсионное упрочнение – путь к повышению прочностных свойств титановых сплавов нового поколения (Обзор) / Г. М. Григоренко, О. М. Задорожнюк. // Современная электрометаллургия – 2012. - №4 – С. 42-49.
8. Ржевская С.В. Материаловедение / С.В. Ржевская // Учебник. Изд. 4-е. – М.: Логос, 2004. – 162 с.
9. Бочвар А. А. Повышение прочности или упрочнение материалов [Электронный ресурс] <http://do.gendocs.ru/docs/index-223261.html>. . - . – Назва з екрана.
10. Колачев Б. А. О влиянии границ зерен на пластичность интерметаллидов / Б. А. Колачев, А.А. Ильин, П.Д. Дроздов // Металлы. – 2001. - №3. – С. 41-48.

11. Сысоева Н.В. Титановые сплавы с интерметаллидным типом упрочнения // Н.В. Сысоева, В.Н. Моисеев / Авиационные материалы и технологии– М.: ВИАМ, 2002. – С. 162–170.
12. Фирстов С.А. Титановые «чугуны» и титановые «стали» / С.А. Фирстов // Титан. 2005, №2, с. 33-37.
13. Андреев А.Л. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. М.: «Металлургия», 1978, 379с.
14. First in Titanium Worldwide [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.timet.com>. – Назва з екрана.
15. Производство слитков [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.vsmmpo.ru/ru/manufacture/Titan/sheme/Proizvodstvo_slitkov - – Назва з екрана.
16. Shimizu F., Fujino S., Morinaga K. Removal of impurities during electron beam melting / F. Shimizu, S. Fujino, // J. Jap. Inst. Metals. – 1998. – №6. – P. 586-591.
17. Патон Б.Е. Электронно-лучевая плавка титана / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук, - К.: Наук. думка, 2006. - 246с.
18. Дереча А.Я. Производство титановых слитков и слябов способом ЭЛП на установка, разработанных в МК «Антарес» / А.Я. Дереча, О.Е. Собко-Нестерук, С.А. Сухин // Современная электрометаллургия 2010. № 1. С. 15-19.
19. Тригуб. Н.П. Производство крупногабаритных дисков газотурбинных установок из жаропрочного сплава титана ВТЗ-1 полученного способом электронно-лучевой плавки / [Н.П. Тригуб, В.А. Березос, В.А. Крыжановський и др.] // Современная электрометаллургия 2012. № 3. С. 8-14.
20. Северин А. Ю. Розробка технології електронно-променевого плавлення зливків алюмініду титану мікролегованого бором та лантаном : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / А.Ю. Северин, НАН України, Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона.– К. : [б.в.], 2014.– 22 с.

21. Тригуб Н. П. Получение сплавов интерметаллида системы TiAl с добавками бора и лантана способом ЭЛПЕ / [Н.П. Тригуб, Е.А. Аснис, В.А. Березос и др.] // Современная электрометаллургия 2011. № 3. С. 10-12.

22. Ахонин С.В. Удаление тугоплавких включений из титана при электронно-лучевой плавке по механизму осаждения / С.В. Ахонин, М.П. Кругленко, В.И. Костенко // Современная электрометаллургия 2010. № 4. С. 7-10.

23. Пузрин А.Л. Способ электронно-лучевой плавки низколегированного титанового сплава Grade 12 /А.Л. Пузрин, А.Ю. Северин// Современная электрометаллургия 2013. № 1. С. 8-10.

24. Пикулин А.Н. Получение слитков сложнолегированного титанового сплава VT23 способом ЭЛП / [А.Н. Пикулин, С.В. Ахонин, В.А. Березос и др.] // Современная электрометаллургия 2015. № 3. С. 16-17.

25. Seagle S.R. New titanium developments in products, processes and application in the USA / S.R. Seagle // Titanium 1990. Intern.Conf. V.1. Dayton, USA, 1990. – P. 66-73.

26. Shamblen C.E. Titanium alloy hearth melt «only» technology / Shamblen C.E. // Titanium'95. Science and Technogy. – Proc. Of the Eight World Conference on titanium, Birmingham, UK. 1995. – P. 1438 – 1445.

27. Haun R.E., Schlienger M.P. Applications for plasma arc melting in titanium processing / R.E. Haun, M.P. Schlienger // J. Jap. Inst. Metals. – 1998. – №6. – P. 1470 – 1477.

28 Шаповалов В.А. Плазменно-дуговая технология получения слитков и отливок из алюминида титана / [В.А. Шаповалов, В.Р. Бурнашев, Д. М. Жиров и др.] // Современная электрометаллургия 2012. № 3 С. 21-24.

29. Мусатов М.И. Технологические схемы производства слитков из титановых сплавов из использованием гарнисажной плавки / М.И. Мусатов, А.И. Фридман //Титан.- 1993 - №1 – С. 35 – 38.

30. Патон Б.Е. Индукционный переплав металлов в секционном кристаллизаторе / Б.Е. Патон, И.В. Шейко, В.А. Шаповалов // Современная электрометаллургия 2009. № 1. С. 43-51.

31. Медовар Б.И. Новые технологические процессы для получения титановых слитков без дефектов в виде включений высокой твердости (Обзор отечественной и зарубежной литературы) / Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, Л. Б. Медовар // Проблемы специальной металлургии. – 1997. - №1. – С.14-23.

32. Петрунько А.Н. О проблемах развития производства и применения титана в Украине / Петрунько А.Н.// Проблемы специальной металлургии. – 1996. – №3 – С.49-54.

33 Bellot J., The formation and removal of “hard - Alfa” material during the melting of titanium alloys / J.P. Bellot, S Hans, E. Hess et all. // Titanium’95. Science and Technogy. – Proc. Of the Eight World Conference on titanium, Birmingham, UK. 1995. –. P – 1454 – 1461.

34. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / З.Шиллер, У.Гайзиг, З.Панцер. - М.: «Энергия», 1980, 528 с.

35. Тригуб Н. П. Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчастого титана / [Н. П. Тригуб, С.В. Ахонин, Г.В. Жук и др.] // Современная электрометаллургия. – 2006 №4 С. 7-9.

36. Ахонин С. В. Получение трубных заготовок из титанового сплава BT14 способом ЭЛП / [С. В. Ахонин, В.А. Березос, В.А. Крыжанивский и др.] // Современная электрометаллургия. – 2014 №3 С. 21-25.

37. Патон Б.Е. Производство крупногабаритных слитков жаропрочных сплавов на основе титана способом электронно-лучевой плавки / [Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, В.А. Березос и др.] // Современная электрометаллургия 2010. № 3. С. 11-14.

38. Жук Г.В. Основы электронно-лучевой технологии получения материалов из деспергированного расплава [Текст]: автореферат дис. ... канд. техн. наук: Специальность 05.16.07 – «Металлургия металлов высокой

чистоты и специальных сплавов» / Жук Геннадий Вилиорович – Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев, 1996. – 18с.

39. Мовчан Б.А. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов / Б.А. Мовчан, А.Л. Тихоновский, Ю.А. Курапов – К.: Наук. думка, 1973. 240с.

40. Ахонин С.В. Удаление тугоплавких включений из титана при электронно-лучевой плавке по механизму осаждения / С.В. Ахонин, М.П. Кругленко, В.И. Костенко // Современная электрометаллургия 2010. № 4. С. 7-10.

41. Ахонин С.В. Удаление включений карбида титана TiC при электронно-лучевой плавке титана / С.В. Ахонин, М.П. Кругленко, В.И. Костенко // Современная электрометаллургия 2012. № 2. С. 21-24.

42. Патон Б.Е. Некоторые тенденции развития металлургического передела титана / Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин и др. // Проблемы специальной металлургии. 2009 №1. С. 3-11.

43. Жук Г. В. Производство титановых слитков-слябов методом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью / Г. В. Жук, А. Н. Калинюк, Н. П. Тригуб // Современная электрометаллургия – 2004. - №3 – С. 22-24.

44. Патон Б. Е. Получение полых титановых слитков методом ЭЛПЕ / [Патон Б. Е., Тригуб Н.П., Жук Г.В. и др.] // Современная электрометаллургия – 2004. - №3 – С. 18-21.

45. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве : монография / С. В. Ладохин, Н. И. Левицкий, В. Б. Чернявский, Т. В. Лапшук, В. Г. Шмигидин, Л. А. Кравчук, А. С. Гладков; Физ.-технол. ин-т металлов и сплавов НАН Украины. - К. : Сталь, 2007. - 626 с.

46. Левицкий Н.И. Особенности плавки многокомпонентных титановых сплавов в электронно-лучевой установке // [Н.И. Левицкий, С.В. Ладохин, В.И. Мирошниченко и др.] / Процессы литья. – 2005. – №3. – С. 58–64.

47. Ахонин С. В. Моделирование процессов испарения легирующих элементов из сплава Ti-6Al-4V при электронно-лучевой плавке с промежуточной емкостью и порционном сливе / С.В. Ахонин, А.С. Миленин, А.В. Самофалов // Современная электрометаллургия – 2007. - №2 – С. 12-16.

48. Лакомский В.И. Плазменно-дуговой переплав / В.И. Лакомский – К.: Техника, 1974. 336 с.

49. Ремізов Г. О. Вакуумно-дугова гарнісажна плавка / Г. О. Ремізов, Ю. Я. Готвянський // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. - 2009, С. 370-372.

50. Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp> – Назва з екрана.

51. Цыкуленко К.А. Титан. Проблемы производства. Перспективы. Аналитический обзор. Часть. 2. / К.А. Цыкуленко // Современная электрометаллургия – 2007. - №2 – С. 41-50.

52. Цыкуленко К.А. Титан. Проблемы производства. Перспективы. Аналитический обзор. Часть. 3. / К.А. Цыкуленко // Современная электрометаллургия – 2007. - №3 – С. 36-43.

53. Гуревич С. М. Вопросы электрошлаковой выплавки слитков титана [Текст] / С.М. Гуревич, В.П. Дидковский. / [Научно-технический бюллетень Свердловского СНХ]. №1, 1958.

54. Гуревич С. М. Электрошлаковая выплавка слитков титановых сплавов [Текст] / С. М. Гуревич, В. П. Дидковский, Ю.К. Новиков. // Автоматическая сварка 1963, №10, С. 37-42.

55. Armentront C. E. Development Electroslog Melting of Titanium / C.E. Armentront, R.H. Nafziger // Trans American Foundrymen's Society 77 (1969), pp. 353 to 359.

56. Патон Б. Є. / ЭШП титана: вчера, сегодня, завтра / [Б. Є. Патон, Б. И. Медовар, М. Г. Бенц и др.] // Проблемы специальной металлургии. – 1999. – №2. – С. 3-9.

57. Протоковилор И. В. Измельчение кристаллической структуры полых титановых слитков при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке [Текст] / И. В. Протоковилор // Современная электрометаллургия. – 2011. – №4. – С.3–5.

58. Медовар Б. И. Металлургия электрошлакового процесса [Текст] / [Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др.]; Под. ред. Патона Б. Е. – К.: Наук. думка, 1986. – 248 с.

59. Медовар Б. И. Качество электрошлакового металла [Текст] / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, Д. М. Дяченко; Под ред. Патона Б. Е., Медовара Б. И. – К.: Наук. думка, 1990.-312с.

60. Медовар Б. И. Электрошлаковая технология за рубежом [Текст] / Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. Г. Богаченко, В. М. Литвинчук – К.: Наук. думка, 1982, 320 с.

61. Электрошлаковые печи. Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. - К.: Наукова думка, 1976, 414 с.

62. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Под ред. В. Н. Замкова. - К: Наукова думка, 1986, – 240 с.

63. Глазунов С. Г. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы [Текст] / С. Г. Глазунов, В. Н. Моисеев –М.: Металлургия, 1974. 368 с.

64. Medovar B. I. Electroslag melting of titanium sponge in a current-conductive mould [Текст] / B. I. Medovar, L. B. Medovar et. al. // Proc. of the 1999 Int. Symp. on Liquid Metal Processing and Casting. Santa Fe, New Mexico, February 22-24, 1999.

65. Павлийчук Г. А. Электрошлаковая выплавка слитков титана [Текст] / Г.А. Павлийчук, В. М. Майоренко, Л. М. Ступак // Специальная электрометаллургия. Ч.1 - К.: Наукова думка, 1972. – С. 148-150.

66. Медовар, В. Г. Электрошлаковая выплавка титановых слитков в бескамерной печи ЭШП [Текст] / [Б. И. Медовар, В. Г. Попов, Л. В. Чекотило и др.] // Проблемы специальной металлургии. 1978. – №8. – 41-45.

67. А.с. 520784 СССР. Способ переплава расходуемого электрода / [Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. И. Лакомский и др.] – Оpubл. БИ, 1982, №20.

68. Медовар Б. И. Дугошлаковый переплав титана и титановых сплавов [Текст] / [Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко и др.] // Проблемы специальной металлургии, 1992, №2 С. 13-15.

69. Медовар Б. И. Как делать слитки-слябы из титана и его сплавов [Текст] / [Б. И. Медовар, В. В. Шепелев, В. Я. Саенко и др.] // Проблемы специальной металлургии. 1992. - №2. – С.16-21.

70. Саенко В. Я. Оценка эффективности применения флюсового затвора при выплавке слитков из высокопрочных титановых сплавов в бескамерных печах ЭШП [Текст] / [В. Я. Саенко, А. Г. Богаченко, Л. Б. Медовар и др.] // Проблемы специальной металлургии. 1994. - №3-4. – С.3-7.

71. Патон Б. Е., Переплав губчатых титановых расходуемых электродов методами ЭШП и ДШП [Текст] / [Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др.] // Проблемы специальной металлургии. 1994 №3-4 С.7-11.

72. Рябцев А. Д. Лабораторное опробование возможности легирования титана редкоземельными элементами из шлака в процессе ЭШС [Текст] / [Рябцев, А. А. Троянский О. В. Тарлов и др.] // Проблемы специальной металлургии. 2000, № 2. С. 11-15.

73. Медовар Л. Б. Перспективы применения металлического кальция и РЗМ при ЭШП [Текст] / [Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин и др.] // Проблемы специальной металлургии. 2000 №4. С. 18-28.

74. Ryabtsev A. D. Elestroslag remelting of metals and alloys under fluxes with active additions in furnaces of chamber type (ChESR) [Текст] / A. D. Ryabtsev, A. A. Troyansky // Processing of the 2005 Intern. Symp. on Liquid Metal Proc. and Casting «LMPC 2005» (Santa Fe, USA, Sept. 18—21, 2005). – Santa Fe, 2005. – P. 227—232.

75. Рябцев А. Д. Электрошлаковый переплав металлов и сплавов под флюсами с активными добавками в печах камерного типа [Текст] / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский // Электрометаллургия. – 2005. – № 4. – С. 25—32.

76. Троянский А. А. О работах Донецкого национального технического университета по электрошлаковой выплавке и рафинированию титана [Текст] / А. А.Троянский, А. Д. Рябцев // Титан. – 2007. – № 1. – С. 28—31.

77. Ryabtsev A. D. Chamber Electroslag Remelting (ChESR) a new method for enhanced quality ingot production [Текст] / A. D.Ryabtsev, O. A.Troyansky // Proc. of The Third biennial academic conf. baosteel ВАС 2008 (Shanghai, China, Sept. 26—28,2008). – Shanghai, 2008. – P. 39—42.

78. Медовар Б. И. Выбор флюсов для ЭШП при получении титановых слитков [Текст] / Б. И. Медовар, В. Я, Саенко, В. А. Рябинин // Современная электрометаллургия 2010 №1. С. 5-9.

79. Рябцев А. Д. Рафинирование титана от кислорода и азота при электрошлаковом переплаве [Текст] / Рябцев А. Д., Троянский А. А., Давыдов С. И. // Современная электрометаллургия 2009 № 4. С. 10-14.

80. Медовар Л. Б. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны [Текст] / [Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др.]// Проблемы специальной металлургии. 2000. - № 4. - С. 3-7.

81. Медовар Л. Б. Токоведущий кристаллизатор для электрошлакового рафинирования титановых сплавов с независимым управлением температурой шлака, скоростью вращения шлака и скоростью расплавления электрода [Текст] / Л. Б. Медовар, Бенц М. Дж.// Проблемы специальной металлургии. 1998. - №4. – С.13-16.

82. Медовар Б. И. Химический состав и структура алюминида титана электрошлаковой выплавки [Текст] / [Б. И. Медовар, В. Я, Саенко, Л. Б. Медовар и др.]// Проблемы специальной металлургии. 1996 г. № 3. С. 3-8.

83. Рябцев А. Д. Исследования возможности получения титан-алюминиевого сплава методом электрошлакового переплава в инертной атмосфере под «активными» кальцийсодержащими флюсами [Текст] / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, О. В. Тарлов // Проблемы специальной металлургии., 2000, № 1. С.75-78.

84. Возможность получения γ -алюминидов титана методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) [Текст] / [Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Петров Д. А. и др.] // Материалы V Всеукраинской научно-техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, (27-29 мая 2009г). тезисы доклада – К.: - С.130.

85. Stoephasius J. C. EESR Refining Potential for Titanium Alloys using a CaF_2 -based Active Slag [Текст] / J. C. Stoephasius, J. Reitz and B. Friedrich // ADVANCED ENGINEERING MATERIALS 2007, 9, No. 4 P. 246-252.

86. Spiess P. Experimental Research on the Absorption Fluorine in gamma-TiAl during Electroslag Remelting [Текст] / P. Spiess // Proceedings of the 2013 International Symposium on Liquid Metal Processing and Casting, (2013), P. 65-70.

87. Компан Я. Ю. Высокопрочные и жаропрочные титановые сплавы с интерметаллидами технологии МЭП [Текст] / Я. Ю. Компан, И. В. Протоковиллов, В. Н. Моисеев. // Проблемы специальной металлургии. 2004 №2. С.3-7.

88. Получение сплавов системы Ti-Ni с эффектом памяти формы методом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки [Текст] / И. В. Протоковиллов, Д. А. Петров // Материалы международной конференции «Ti-2011 в СНГ» (25-28 апреля 2011) - К.: 2011г. – С. 144-147.

89. Компан Я. Ю. Интерметаллидное жароупрочнение сплавов титана, получаемых способом магнитоуправляемой электрошлаковой плавки [Текст] / [Я. Ю. Компан, А. Т. Назарчук, Д. А. Петров и др.] // Проблемы специальной металлургии. 2009 №1. С. 3-11.

90. Медовар Л. Б. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны / [Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др.] // Проблемы специальной металлургии. - 2000. - № 4. - С. 3-7.

91. Компан Я. Ю. Электрошлаковая сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами. [Текст] / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин - М.: Машиностроение, 1989. - 272 с.

92. Протокилов И. В. Исследование физических и технологических свойств солевых флюсов для ЭШП титана [Текст] / [И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько, И. А. Гончаров, и др.] // Современная электрометаллургия 2015 - №3 С. 7-12.

93. Протокилов І. В. Магнітокерована електрошлакова плавка багатоконпонентних титанових сплавів: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.07 / Протокилов Ігор Вікторович. — К., 2006. - 178 с.

94. Benz M.G. "Active Slag" ESR Refining of Titanium Alloys for Dissolution of Nitrogen Rich Inclusions / [M.G. Benz, A.D. Riabtsev, O.V. Tarlov et al] // GE Reseach and Development Center, 2000CRD040, April 2000.

95. Ратиев С. Н. Легирование титана кислородом из газовой фазы при камерном электрошлаковом переплаве титановой губки / [С. Н. Ратиев, О. А. Рябцева, А. А. Троянский и др.] // Современная электрометаллургия 2010. № 2. С. 8-12.

96. Рябцев А. Д. Возможности камерного электрошлакового переплава в получении титана коммерческой чистоты / [А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, С. И. Давыдов и др] // Современная электрометаллургия 2012. № 1. С. 7-11.

97. Патон Б. Е. Дугошлаковый переплав - современное состояние и перспективы развития / [Б. Е. Патон, В. Я. Саенко, Ю. М. Помарин, и др.] // Проблемы специальной металлургии. - 2002. - № 1. - С. 3-10

98. Еремин Е.Н. Закономерности комплексного модифицирования литого электрошлакового металла [Текст] / Е.Н. Еремин // Анализ и синтез механических систем. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998. - С. 131-134.

99. Еремин Е.Н. Применение модифицирования для повышения свойств кольцевых заготовок из азотсодержащих нержавеющей сталей, полученных способом центробежного электрошлакового литья [Текст] / Е.Н. Еремин // Современная электрометаллургия. – 2006. – № 3. – С.3-7.

100. Билько В. Г. Влияние модифицирующих добавок на трещиностойкость электрошлаковых слитков. [Текст] / В. Г. Билько, Ю. Г. Емельяненко // Проблемы электрошлаковой технологии. К.: Наукова думка, 1978. - С.134-138.

101. Медовар Б. И. Применение окислов редкоземельных металлов в качестве компонентов флюса при электрошлаковом переплаве среднелегированной Cr-Ni-Mo стали [Текст] / [Б. И. Медовар, В. А. Тихонов, В. Я. Саенко, А. В. Бешенцев] // Проблемы специальной металлургии - 1981, - Вып. 14. С. 63-67.

102. Попов В. С. Улучшение структуры и свойств литых инструментальных сталей при электрошлаковой выплавке с инокуляторами [Текст] / В.С. Попов, И.М. Билоник, С.П. Бережный и др. // Современная электрометаллургия. - 2004. - №2. - С. 8-9.

103. Патон Б. Е. Управление кристаллизацией слитка путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве [Текст] / [Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, Ю. Г. Емельяненко]. - В кн.: Литье с применением инокуляторов. К.: ИПЛ, 1981, С. 13-19.

104. Куделькин В. П. Воздействие ультразвуковыми колебаниями на кристаллизацию при электрошлаковом переплаве [Текст] / [В. П. Куделькин, М. М. Ключев, С. И. Филиппов и др.] // Известия вузов. Чёрная металлургия. 1969. - №11. - С. 64 - 70.

105. Куделькин В. П. Воздействие ультразвуковых колебаний на капельный перенос металла при электрошлаковом переплаве [Текст] / [В. П. Куделькин, М. М. Ключев, С. И. Филиппов и др.] // Известия вузов. Чёрная металлургия. - 1969. - № 3. - С. 54 - 59.

106. Абрамов О. В. Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле [Текст] / О. В. Абрамов – М.: Металлургия, 1972. - 256 с.

107. Ефимов В. А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. - М.: Металлургия, 1995. -272 с.

108. Скворцов А. А. Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и отливок [Текст] / А. А. Скворцов, А. Д. Акименко, В. А. Ульянов — М.: Metallurgy, 1991.-218с.

109. Чуманов И. В. Повышение тепловой эффективности электрошлакового переплава и качества металла путём воздействия на процессы плавления, транспортировки и кристаллизации вращением расходуемого электрода [Текст]: автореферат дис. ... док. техн. наук: Специальность 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов» / Чуманов Илья Валерьевич – ЮУрГУ, Челябинск, 2002. - 40 с.

110. Пятыгин Д. А. Особенности плавления и кристаллизации металла при ЭШП на постоянном токе с вращением расходуемого электрода [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук: Специальность 05.16.02 – «Металлургия чёрных, цветных и редких металлов» / Пятыгин Дмитрий Александрович – ЮУрГУ, Челябинск, 2006. - 21 с.

111. US Patent 3,776,294. / [Paton B. E. et al.] Method of electroslag remelting. Dec. 4, 1973.

112. Патон Б. Е. Принудительное оплавление расходуемых электродов при электрошлаковом переплаве / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, И. И. Кумыш // Спец. электрометаллургия. - 1974. - № 25. - С. 3-7.

113. US Patent 4,185,683. Medovar et al. Electroslag remelting mould. Jan. 29, 1980.

114. 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.]; заявник та володар патенту ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" - Оpubл. 27.05.2013. - Бюл. №15.

115. Б.Е. Патон, Управление процессами кристаллизации слитка ЭШП [Текст] / [Патон Б.Е., Лебедев В.К., Медовар Б.И. и др.] // Проблемы стального слитка. Труды пятой конф. по слитку. - М.: Metallurgy, 1974, - С. 707-714.

116. Абрамов А.В. Новая технология электрошлаковой выплавки инструментальных заготовок [Текст] / А.В. Абрамов, В.И. Лоскутов, В.Г. Ковалев // Проблемы специальной металлургии. - 1993. - №4. - С. 10-12.

117. Пат. РФ № 2337979. Способ управления режимом работы установки электрошлакового переплава и устройство для его осуществления [Текст] / А. В. Абрамов, А. Н. Ильгачев, Д. Г. Михадаров; заявник та володар патенту Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова - Оpubл. 10.11.2008. - Бюл. №31.

118. Протокилов И. В. Электрошлаковая выплавка титановых слитков с импульсным электропитанием [Текст] / [И. В. Протокилов, А. Т. Назарчук, В. Б. Порохонько и др.] // Современная электрометаллургия. - 2014. № 2. С.10-14

119. Медовар Л. Б. Исследование влияния параметров двухконтурной схемы ЭШП на размеры и форму металлической ванны [Текст] / [Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, А. В. Чернец и др.] Проблемы специальной металлургии.- 2000. - № 4. - С. 3-7.

120. Чернец О. В. Нові електрошлакові технології з роз'єднанням плавлення та твердіння металу [Текст] : автореферат дис. ... док. техн. наук. Спеціальність 05.16.07 «Металургія високочистих металів та спеціальних сплавів» / Чернец Олександр Владиславович. - Інститут електрозварювання ім.. Є.О. Патона. - Київ, 2001. - 35 с.

121. Цыкуленко А. К. Некоторые новые области применения электрошлаковой технологии [Текст] / Цыкуленко А. К., Медовар Л. Б., Чернец А. В. // Проблемы специальной металлургии. - № 2. - С. 9-11.

122. Медовар Л. Б. Электрошлаковые технологии получения крупных кузнечных слитков [Текст] / [Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, А. П. Стопченко и др.] // Современная электрометаллургия. 2010. №3. С.5-10.

123. Медовар Л. Б. ЭШП и современные подходы к управлению затвердеванием крупного кузнечного слитка [Текст] / Л. Б. Медовар, А. П.

Стовпченко, А. Н. Головачев, Б. Б. Федоровский // Современная электрометаллургия. - 2013. № 3. - С. 12-18.

124. Кусков Ю. М. Электрошлаковый процесс без расходуемого электрода с использованием некомпактного присадочного материала [Текст] / Ю. М. Кусков // Проблемы специальной металлургии. - 1992. - № 2. - С. 28-32.

125. Томиленко С. В. Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающее регулируемое вращение шлаковой ванны [Текст] / Томиленко С. В., Кусков Ю. М., Ус В. И // Проблемы специальной металлургии. - 1993. - № 3. - С. 16-18.

126. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе // Автоматическая сварка. 1960. – №9. – С.12-16.

127. Трочун И.П., Черныш В.П. Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП // Свароч. про-во. – 1965. - №11. – С.3-5.

128. 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.

129. Максимович Б. И. Влияние электромагнитного вращения шлаковой ванны на кристаллизацию металла при электрошлаковом переплаве высоколегированных сталей и сплавов // Электротермия. - 1992. - Вып. 5.

130. Магнитное управление электрошлаковым процессом / В.Д. Кузнецов, Н.К. Козаков, Л.М. Шальда. – К.: Вища шк. Изд-во при Киев. ун-те, 1987. – 64с.

131. Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокивилон И. В. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов // Современная электрометаллургия. – 2007. – №4. – С. 3–7.

132. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки / [А.Т. Назарчук, И.В. Протоковиллов, В.Б. Порохонько. и др.] // Современная электрометаллургия.– 2013. – №4. – С.21–26.

133. Патон Б.Е. Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля / [Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, В.И. Ус, С.В. Томиленко] // Проблемы специальной электрометаллургии, 1989, №4, С. 3-7.

134. Томиленко С.В. Устройство электромагнитного перемешивания для токоподводящих кристаллизаторов, обеспечивающие регулируемое вращение шлаковой ванны / С.В. Томиленко, Ю. М. Кусков, В.И. Ус // Проблемы специальной электрометаллургии. 1993 - №3 - С. 16-18.

135. Медовар Б.И. К вопросу электромагнитного воздействия на кристаллизацию слитка при ЭШП / [Б.И. Медовар, Л.М. Ступак, В.К. Мохнач, Ю.В. Латаш] // Проблемы специальной электрометаллургии. 1993 - № 4 С. 12-17

136. Латаш Ю.В. Влияние импульсного переменного магнитного поля на кристаллизацию сплавов некоторых цветных металлов / [Ю.В. Латаш, Р.Г. Крутиков, В.А. Слышанкова, А.И. Букало, А.Е. Воронин] //

137. Компан Я.Ю. Получение высоколегированного титана методом МЭП / // Теория и практика металлургии – 2001. - №5. – С. 70-77.

138. Пальти А.М. Влияние электромагнитных сил на течение шлака у поверхности плавящегося электрода при электрошлаковом процессе / А.М. Пальти, В.Л. Шевцов // Сварочное производство. – 2002. - №4. - С. 17-19.

139. Гельфгат Ю.М. Влияние магнитного поля на структуру сварных швов при электрошлаковой сварке титановых сплавов / [Ю.М. Гельфгат, С.М. Гуревич, Я.Ю. Компан, А.Э. Микельсон, Ю.К. Новиков] // Магнитная гидродинамика. – 1973. – №2. – С. 155-157.

140. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Емельяненко Ю. Г. Некоторые задачи математического моделирования при ЭШП. – В кн: Рафинирующие сплавы. Киев: Наук. думка, 1974, [вып. 1], с. 3-12.

141. Медовар Б. И. Физическое моделирование процесса ЭШП расходуемых электродов / Б. И. Медовар, Г. А. Бойко, В. П. Сердюкова // Проблемы специальной металлургии. – 1978. – №9. – С. 38-48.

142. Mackenbrock A. Numerical Simulation of the Protective Gas Electro Slag Remelting Process and its Industrial Validation / [A. Mackenbrock, V. Maronnier, O. Köser, W. Schützenhöfer, G. Reiter, R. Tanzer] // Proceedings of 2nd Steelsim Conference, Graz, Austria, September 2007.

143. Гаммаль Т. Влияние электрического тока на каплеобразование при ЭШП / Т. Гаммаль, И. Хаген, Р. Мюлленберг // Электрошлаковый переплав, 1975, вып. 3. С. 62-69.

144. Медовар Б. И. Исследование на модели характера оплавления расходуемых электродов при выплавке горизонтальных слитков ЭШП / [Б. И. Медовар, А. А. Троянский, А. Н. Казимиров и др.] // Специальная электрометаллургия. - 1977. - № 33. - С. 28-32.

145. Патон Б. Е. Магнитогидродинамические явления при ЭШП и кристаллизация электрошлаковых слитков / [Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Ю. Г. Емельяненко и др.] // Проблемы специальной металлургии. – 1984. – вып. 20. – С.11-15.

146. Лебедев В. К. Правомерность физического моделирования процесса ЭШП / [В. К. Лебедев, Н. Ф. Медведенко, Б. И. Медовар и др.] Рафинирующие переплавы, Киев, Наук. Думка, 1974, с.21 – 31.

147. Кожима Ю. Исследование модели плавления расходуемого электрода при ЭШП / [Ю. Кожима, М. Като, Т. Тойода, М. Иноце] // Электрошлаковый переплав, 1975, вып. 3. С. 54-62.

148. Медовар Б. И. Исследование на модели характера оплавления расходуемых электродов при выплавке горизонтальных слитков ЭШП / [Б. И.

Медовар, А. А. Троянский, А. Н. Казимиров и др.] // Специальная электрометаллургия. – 1977. - № 33. - С. 28-32.

149. Особенности процессов массообмена в пленочной стадии процесса ЭШП / [А. А. Троянский, А. Х. Дымнич, Л. Б. Медовар, А. Д. Рябцев] // Специальная электрометаллургия. – 2005. – №4. – С. 6-9.

150. Ключев М. М. Metallurgy электрошлакового переплава / М. М. Ключев, А. Ф. Каблуковский - М. Metallurgy, - 1969, - 256с.

151. Медовар Б. И. Metallurgy электрошлакового процесса / [Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Л. Шевцов и др.]; Под. ред. Патона Б. Е. – Киев: Наук. думка, 1986. – 248 с.

152. Лебедев В. К. Правомерность физического моделирования процесса ЭШП / [В. К. Лебедев, Н. Ф. Медведенко, Б. И. Медовар и др.] // Рафинирующие переплавы, Киев, Наук. Думка, 1974, с.21 – 31.

153. Бояревич В.В. Электровихревые течения / [В.В. Бояревич, Я.Ж. Фрейберг и др.] Под ред. Щербинина Э.В. – Рига, “Зинатне”, 1985. – 315с.

154. Патон Б.Е. Исследование магнитогидродинамических явлений в шлаковой ванне при ЭШП / [Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, Ю.Г. Емельяненко и др.] // Проблемы специальной металлургии. – 1982. – вып. 17. – С.3-8.

155. Wojarevich V. Electrically induced vortical flows./ V. Wojarevich, Ya. Frejbergs, E.I. Shilova, E.V. Shcherbinin // Dordrecht. Kluwer Acad. Publ., 1989. – 400 p.

156. Петрунин А.А. Бифуркация полоидального поля в течении, вызванном радиальным электрическим током / А.А. Петрунин, В.Н. Штерн // Механика жидкости и газа. – 1993. - №2. – 4с.

157. Власюк В.Х. Турбулентные электровихревые течения в цилиндрической емкости / Власюк В.Х. // Магнитная гидродинамика. – 1988. – т. 24, № 3, – С.76-82.

158. Бояревич В.В. Влияние продольного магнитного поля на движение среды при электродуговом и электрошлаковым процессах / В.В. Бояревич,

В.И. Шарамкин, Э. В. Щербин // Магнитная гидродинамика. – 1977. – №1, С. 115-119.

159. Компан Я. Ю. Моделирование электромагнитных явлений в шлаковой ванне при электрошлаковой сварке / [Я. Ю. Компан, В.И. Шарамкин, Э.В. Щербинин, У.А. Ласис] // Автоматическая сварка, - 1997, - №3, - С. 13-18.

160. Буцениекс И.Э. Экспериментальное изучение МГД-процессов при электрошлаковой сварке / [И.Э. Буцениекс, Я. Ю. Компан, В.И. Шарамкин и др.] // Магнитная гидродинамика, - 1975, - №3, С. 143-148.

161. Меликов В. В. О физическом моделировании электрошлаковых процессов / В. В. Меликов, В. Н. Герасимов // Современные проблемы электролитической стали. Челябинск, - 1975, - Тематический сборник №166, - С. 167-172.

162. Патон Б.Е. Физическое моделирование ЭШП / [Б.Е. Патон, Б.И. Медовар, В.К. Лебедев и др.] // Рафинирующие переплавы, - 1974, №2 - С. 12 – 20.

163. Мартынова Т. И. Физическое моделирование электрошлаковой сварки на постоянном токе / Т. И. Мартынова // Автоматическая сварка, - 1983, - №12. С. 51-53.

164. Томиленко С. В. Моделирование магнитогидродинамических процессов при электрошлаковой выплавке в токоподводящем кристаллизаторе. / [С.В. Томиленко, В.И. Ус, Ю. М. Кусков и др] // Проблемы специальной металлургии. – 1992. - №4. – с. 19-21.

165. Чуманов И.В. Особенности моделирования электрошлакового переплава на прозрачных моделях / И.В. Чуманов, В.Е. Рощин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1998. - №8. С. 30-35.

166. Медовар Б.И. «Холодная» модель процесса ЭШП / Б.И. Медовар, Г.А. Бойко, Л.М. Баранова // Рафинирующие переплавы, - 1974, №2 - С. 58 – 62.

167. Медовар Б.И. Применение «холодной» модели ЭШП при моделировании процесса плавления расходующих электродов / [Б.И. Медовар, Г.А. Бойко, С.П. Егоров и др.] // Рафинирующие переплавы, - 1974, №2 - С. 63 – 67.

168. Медовар Б. И. Сравнение результатов физического и математического моделирования поля скоростей потоков в шлаковой ванне при ЭШП / [Б.И. Медовар, Ю.Г. Емельяненко, Э.В. Щербин и др.] // Проблемы специальной металлургии. – 1982. Вып. 17 – С.9-15.

169. Емельяненко Ю.Г. Физическое моделирование кристаллизации электрошлаковых слитков / Ю.Г. Емельяненко, С.Ю. Андриенко // Проблемы специальной металлургии. – 1984. – вып. 20. – С.15-19.

170. Li B. Current, Magnetic Field and Joule Heating in Electroslag Remelting Processes / B. Li, F. Wang, F. Tsukihashi // ISIJ International, Vol. 52 (2012), No. 7, pp. 1289–1295.

171. Liu F. Comprehensive model for a slag bath in electroslag remelting process with a current-conductive mould / [F. Liu, X. Zan, Z. Jiang, X. Geng, M. Yao] // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Volume 19, Number4, Apr 2012, Page 303-311.

172. Брунов О.Г. Модель переноса капли в сварочную ванну / О.Г. Брунов // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 1 С. 155-158.

173. Xihai L. Simulation of electro-slag re-melting process of 120 t large ingot for nuclear power station and its application / [L. Xihai, W. Junqing, J. Weiguo and th.] // Research & Development, November 2011, pp. 413-417.

174. Kharicha A. Thermal state of the electrode during the electroslag remelting process / A. Kharicha, A. Ludwig, M. Wu // LMPC. – 2011.- 73-80.

175. Kanchan M. Computational Modeling of the Electroslag Remelting (ESR) Process Used for the Production of Ingots of High-Performance Alloys / M.

Kanchan, Kelkar, S.V. Patankar // [Liquid Metal Processing and Casting 2013](#), pp. 1-8.

176. Choudhury M. Modeling of Fluid Flow and Heat Transfer in Industrial-Scale ESR System / M. Choudhury, J. Szekely // *Ironmaking and Steelmaking*. – 1981. - №5, 225-232.

177. Kharicha A. Integrated simulation of advanced protective gas electroslag remelting for the production of high-quality steels (ISA-PESR) / A. Kharicha, A. Ludwig, M. Wu // *Research Fund for Coal and Steel*. - 2009. – 150 pp.

178. Dilawari A.H. A Mathematical Model of Slag and Metal Flow in ESR / A.H. Dilawari, J. Szekely // *Process, Metall. Trans. B*, vol. 8B, 1977, 227-237.

179. Mackenbrock A. The ESI Guide to Numerical Simulation of the PESR Process with CALCOSOFT-2D, User Manual of PESR Module, ESI Group, France, November 2007.

180. Kharicha A. Simulations of the Electro-Slag Remelting process / A. Kharicha, A. Ludwig, M.Wu // *SIMNET days 2010*. 27pp..

181. Патент 996490 Устройство для моделирования магнитогидродинамических явлений при электрошлаковом переплаве / [Чудновский А. Ю., Чайковский А. И., Щербинин Э. В. и др] - Оpubл. БИ, 1983, №6.

182. Подгаецкий В.В. Сварочные шлаки / В.В. Подгаецкий, В.Г. Кузьменко – Киев :Наук. думка, 1988, – 256 с.

183. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов* / Под ред. В.Н. Замкова. Киев: Наук. думка, 1986, – 240 с.

184. Scholz H. An advanced ESR Process for the Production of Ti- Slabs / H. Scholz, M. Blum, U. Biedricher. // *Proceedings of the 10th World Conference on Titanium*, Hamburg, Germany 13-18 July 2003. Volume 1. P.205-212.

185. Choundhury A. Electros slag remelting of titanium / A. Choundhury, H. Scholz, N. Ludvig // *Titanium 92: Sci. And Technol.: Proc. Symp. 7th World Titanium Conf.*, San Diego, Calif., June 29 – July 2, 1992. Vol.3. - P.17-21.

186. Медовар Л. Б. Выбор флюсов для ДШП при получении слитков титановых сплавов / Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко, В. А. Рябинин // Современная электрометаллургия. – 2010. – №1. – С.8–11.

187. Медовар Б.И. Свойства толстых плит, прокатанных из листового крупнотоннажного слитка титана ВТ1-0 ДШП массой 4,5 т / [Б.И. Медовар, В.Я. Саенко, В.И. Кумыш и др.] // Проблемы специальной металлургии. – 1995. - №2. – С.10-14.

188. Рябцев А.Д Об электропроводности флюсов системы $\text{CaF}_2\text{--Ca}$ / [А.Д. Рябцев, А.А. Троянский, В.Ю. Мастепан и др.] // Современная электрометаллургия. – 2003. – №1. – С.3–4.

189. Протокилов И. В. Электрошлаковая выплавка галогенидных бескислородных флюсов / И. В. Протокилов // Современная электрометаллургия. – 2008. – № 2. С. 13-16.

190. Атлас шлаков. Справ. изд. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1985, 208с.

191. Колисник В.Н. Измерение электропроводности флюсов в интервале температур 1300-2300⁰С // Автомат. сварка. – 1964. – №4. – С. 10-14.

192. Колисник В.Н. Измерение электропроводности флюсов в интервале температур 1300-2300⁰С / Колисник В.Н. // Автомат. сварка. – 1964. – №4. – С. 10-14.

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

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

195. Пат. 9777 Україна, МПК Н 05 В 3/60; С 22 В 34/12. Спосіб магнітокерованої плавки титанових сплавів /Я.Ю. Компан, А.Т. Назарчук, И.В. Протоковілов. – Опубл 12.03.2012, Бюл. № 5.

196. Протоковілов И.В. Использование разрядов конденсаторов для управления кристаллизацией металла при ЭСП / [И.В. Протоковілов, А.Т. Назарчук, Д.А. Петров, В.Б. Порохонько] // Современная электрометаллургия 2015 - №4 С. 3-8

197. Латаш Ю.В. Электрошлаковый переплав / Латаш Ю.В., Медовар Б.И. // Изд-во Metallurgiya, 1970 с. 240.

198. Латаш Ю.В. Некоторые особенности электрошлаковой плавки расходующих электродов большого сечения / Ю.В. Латаш // Автоматическая Сварка, 1958 №6.

199. Максимович Б.И. О выпрямлении переменного тока при электрошлаковом переплаве расходующих электродов в водоохлаждаемой электрической изложнице / Б.И. Максимович // Автоматическая сварка 1961, №3.

200. Максимович Б.И. Условия возникновения постоянной составляющей тока при электрошлаковом переплаве в водоохлаждаемой изложницах / Б.И. Максимович // Автоматическая сварка 1961, №4.

201. Панин В.В. Поведение капли и поверхности жидкой ванны при электрошлаковом переплаве / [В.В.Панин, О.Б. Боровский, И.С. Ивахненко и др..] // Автоматическая сварка, 1964, №2, с. 72-74.

202. Панин В.В. Рентгеновское исследование электрошлакового переплава стали / [В.В.Панин, О.Б. Боровский, И.С. Ивахненко и др..] // Изв. АН СССР Сер. Metallurgiya и гор. Дело, 1963, №6, С. 90-95.

203. Campbell J. Fluid flow and droplet formation in the electroslag remelting process / J. Campbell // J. Metals, 1970, №7, p. 21-29.

204. Korousic B. Tropfenbildung beim Electro-Schlacke-Umschmelungsverfahren. – arch. Eisenhutt., 1976, 47, №5 S. 283-288.

205. Иваненко О.Г. Гидродинамика формирования капли при сплавлении заготовке в шлаке / О.Г. Иваненко, В.Е. Рошин, Д.Д. Поволоцкий // Известия вузов Черная металлургия, 1984, №4, с. 15-18.

206. Kharicha A. Contribution of the mould current to the ingot surface quality in the electroslag remelting process / A. Kharicha, E. Karimi Sibaki, M. Wu, A. Ludwig // TMS (The minerals, Metals & Materials Society), 2013, P. 95-99.

207. Я.Ю. Компан. К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов / Компан Я. Ю., Назарчук А. Т., Протокилов И. В. // Современная электрометаллургия. – 2007. – №4. – С. 3–7.

208. Г.С. Курахтина. Общая электротехника: Учебное пособие. - Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. - 144 с.

209. Ю. Г. Сиднеев. Электротехника с основами электроники Учебное пособие для профессиональных училищ и колледжей. Феникс, 2000

210. Я.Ю. Компан. Электрошлаковая сварка титановых сплавов. / Компан Я.Ю., Грабин В.Ф и др. – Ташкент: ФАН, 1975. - 84 с.

211 В.В. Подгаецкий. Сварочные флюсы. / В.В. Подгаецкий, И.И. Люборец – Киев: Техніка, 1984, – 167 с.

212. Б.Е. Патона. Электрошлаковые печи. [Под ред. Б.Е. Патона и Б.И. Медовара] - Киев: Наукова думка, 1976, 414с.

213. Сварочное оборудование. Каталог справочник. Ч2. Киев: Наукова думка, 1968, 388с.

214. Сварочное оборудование. Каталог справочник. Ч3. Киев: Наукова думка, 1972, 196с.

**Список опублікованих праць здобувача
за матеріалами дисертаційної роботи**

1. I. Protokovilov. Effect of layer-by-layer formation of ingot during electroslag remelting on the quality of its surface and solidification structure / I. Protokovilov, V. Shapovalov, **V. Porokhonko** // Ironmaking & Steelmaking. 2020. <https://doi.org/10.1080/03019233.2020.1731255>.

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

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

4. И.В. Протоковиллов. Физическое моделирование кристаллизации слитков в изложнице в условиях электрошлакового обогрева и підпитки / [И.В. Протоковиллов, **В.Б. Порохонько** Ф.К.Биктагирови и др.] // Современная электрометаллургия. – 2019. – №3. – С.3–9.

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

6. И.В. Протоковиллов. Особенности структурообразования прецизионного сплава 29НК при ЭШП с порционным формированием слитка / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная электрометаллургия. – 2019. – №1. – С.11–16.

7. И.В. Протоковиллов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [И.В. Протоковиллов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Современная электрометаллургия. – 2018. – №2. – С.45–51.

8. И.В. Протокилов. Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия. – 2017. – №3. – С.9–13.

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

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

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

12. И.В. Протокилов. Способы управления кристаллизацией металла слитков при ЭШП / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько** // Современная электрометаллургия 2014 - №3 С. 7-16.

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

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

15. И.В. Протокилов. Особенности создания импульсных магнитных полей для магнитоуправляемой электрошлаковой плавки / И.В. Протокилов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Современная электрометаллургия. 2013. – №3, С. 8-11.

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

17. І.В. Протоковілов. 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.

18. І.В. Протоковілов. Флюс для електрошлакового переплаву титанових сплавів / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Патент України на винахід UA 110591 С2. Заявл. 24.02.2015, опубл. 12.01.2016, бюл. №1.

19. І.В. Протоковілов. Управление формированием сварного соединения при электрошлаковой сварке титана / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 134-136 с.

20. І.В. Протоковілов. Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа / [І.В. Протоковілов, Д.А. Петров, **В.Б. Порохонько**, О.Т. Назарчук] // Титан 2018. Производство и применение в Украине. Сб. докл. межд. конф. Под. ред. проф. С.В. Ахонина. - Киев, 2018. - С. 128-133 с.

21. I. Protokovilov. Physical modelling of the drop metal transfer in ESR under effect of longitudinal magnetic field / I. Protokovilov, **V. Porokhonko** // Welding and related technologies – present and future. - International Conference.- 5-6 December, 2018, - Kyiv. P.128.

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

23. І. В. Протоковілов. Фізичне моделювання плавлення витратного електроду при ЕШП в умовах дії зовнішнього магнітного поля / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько** // Матеріали ІІІ всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і

технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. Миколаїв С. 94-96.

24. **В.Б. Порохонько.** Дослідження в'язкості і електропровідності флюсових композицій для ЕШП титану / [В.Б. Порохонько, А.М. Дученко, І.О. Гончаров, Д.Д. Міщенко] // Матеріали III всеукраїнської науково-технічної конференції «Проблеми зварювання, споріднених процесів і технологій» та «Зварювання та споріднені процеси і технології» 9 – 13 вересня 2014 р. м. Миколаїв С. 91-94.

25. **В.Б. Порохонько.** Дослідження сольового флюсу на основі CaF_2 для електрошлакового переплаву титану / **В.Б. Порохонько**, А.М. Дученко, І.О. Гончаров // Матеріали конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології» 14-16 травня 2014р., Київ. С. 10.

26. І.В. Протоковілов. Особенности электрошлаковой сварки титана с использованием электромагнитных методов воздействия / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Вісник НУК імені адмірала Макарова – 2012. – №5. – С.170-176. [електронне видання].

27. І.В. Протоковілов. Дослідження технологічних особливостей виплавки гамма - алюмінідів титану методом МЕР / І.В. Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Материалы VII. науч. техн. конф. молодых ученых и специалистов “Сварка и смежные технологии”, 22-24 мая 2013 г, Киев. - С.145.

28. І.В. Протоковілов. Электрошлаковая сварка титановых сплавов с импульсным электромагнитным воздействием / І.В. Протоковілов, О.Т. Назарчук, **В.Б. Порохонько** // Збірник тез доповідей міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології», 25-26 листопада 2013 р., Київ, С.146.

29. И.В. Протоковиллов. Технологические особенности использования электромагнитных методов воздействия на процесс ЭШС титана / І.В.Протоковілов, **В.Б. Порохонько**, Д.А. Петров // Тез. докл. науч.-техн. конф. «Современные проблемы металлургии, технологии сварки и наплавки сталей и цветных металлов», 25-26 октября 2012 г., Киев – С. 49.