

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

СЕМЕНКО АНАСТАСІЯ ЮРІЇВНА

УДК 537.84:669.18:621.746.5:66.028

**ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА ПРИНЦИПІВ
ЕНЕРГОРЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО УПРАВЛІННЯ
РОБОЧИМИ ПАРАМЕТРАМИ
ЛИВАРНИХ МАГНІТОДИНАМІЧНИХ УСТАНОВОК**

Спеціальність – 05.16.04 «Ливарне виробництво»

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

 /А.Ю. Семенко/

Науковий керівник:
Горюк Максим Степанович,
кандидат технічних наук

Київ – 2019

АНОТАЦІЯ

Семенко А.Ю. Розробка принципів енергоресурсозберігаючого управління робочими параметрами ливарних магнітодинамічних установок. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – ливарне виробництво. – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 2019 р.

На сьогодні в Україні та світі ливарне виробництво і металургія залишається основною матеріальною базою для машинобудування. Вони забезпечують одержання широкого спектру металевих матеріалів та литих заготовок і виробів з них. При цьому в останні роки вимоги щодо якості такої металопродукції зростають одночасно з вимогами щодо забезпечення економії матеріалів та енергоресурсів, додержання екологічної дисципліни на виробництві, все більш ширшої автоматизації, контролю та керованості технологічного процесу і по можливості здешевлення вартості кінцевого продукту.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого наукового завдання, яке полягає у підвищенні ефективності багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання шляхом розробки алгоритмів реалізації безперервного контролю керуючих параметрів обладнання для управління його основними процесами.

Магнітодинамічні ливарні пристрої здатні реалізувати в одному технологічному агрегаті операції накопичення розплаву, доведення його за температурою та хімічним складом, розливанням у металоприймачі. Для надання магнітодинамічному обладнанню таких функціональних можливостей використовується енергія електромагнітних полів, що безконтактно та малоінерційно передається до рідкометалевого середовища, забезпечуючи регульований індукційний нагрів розплаву та керований рух металу під дією електромагнітних сил.

Для забезпечення відповідності сучасним вимогам, можливості подальшого удосконалення і розвитку таких унікальних агрегатів, а також їх успішного впровадження, адаптації та інтегрування в новітні ливарні технології, було здійснено ґрунтовний аналіз конструкції і особливостей функціонування МДУ для алюмінієвих сплавів.

Розроблено та експериментально підтверджено методи дослідження роботи МДУ та визначення раціональних параметрів живлення її електромагнітних систем. На основі використання інтегрованої ваговимірювальної системи (ІВВС), були розроблені оригінальні методики з застосуванням інженерних розрахунків, математичного та фізичного моделювання, натурних експериментів, проведені дослідження комплексу електромагнітних силових взаємодій у МДУ і окремих операцій з приготування і розливання алюмінієвих сплавів.

В роботі встановлено та експериментально підтверджено пондеромоторні електромагнітні силові взаємодії в магнітодинамічній установці (МДУ) для алюмінієвих сплавів, досліджена динаміка зміни теплових та гідродинамічних характеристик МДУ в різних режимах роботи та пов'язаними з ними параметрами ливарних технологічних процесів. Це дозволило оцінити співвідношення між складовими генерованої електромагнітної енергії, які витрачаються ефективно (теплова (65-80%) та гідродинамічна складова (8-11%)) або втрачаються безповоротно з різних причин (наприклад, реакція з конструкцією МДУ, що складає 5-6% загальної генерованої енергії). Це дає змогу в перспективі при створенні нових магнітодинамічних агрегатів враховувати особливості конструкції як окремих вузлів, так і всього пристрою в цілому.

Завдяки подальшому розвитку теорії ливарних магнітодинамічних пристроїв, вперше встановлені особливості суперпозиції змінних електричних та магнітних полів в робочій зоні та каналах МДУ для алюмінієвих сплавів. Встановлено можливість реєстрації в реальному масштабі часу силових електромагнітних взаємодій рідкометалевого витка зі струмом із зовнішнім магнітним полем С-подібного електромагніту. Отримані математичні моделі є необхідними

для подальшої оптимізації режимів роботи МДУ та розробки САУ в різних ливарних технологіях.

Зроблено перерахунок вимірюваних пондеромоторних взаємодій в ефективну електромагнітну силу, що створює тиск та напір. Прорахована ефективна електромагнітна сила для створення електромагнітного тиску на рівні 30-35 кПа, який на 10-20% вище від паспортних даних існуючих серійних МДУ. Вона складає 23,55-31,84 Н.

Розраховано основні електричні параметри електромагнітних систем магнітодинамічної установки МДН-6А-0,63М для розливання алюмінієвих сплавів та визначено потужність теплових втрат у МДУ. Експериментально визначено: швидкість зміни температури розплаву в діапазоні системи регулювання (710-730 °С); встановлено параметри нагріву розплаву одним індуктором, двома індукторами та при їх почерговому включенні; теплові втрати МДУ в режимі «зберігання» розплаву масою 133,5 кг склали $P=21,92$ кВт. Стало можливим замінити дискретне управління роботою електромагнітних систем МДУ на аналогове, що дозволить суттєво скоротити енерговитрати при виготовленні лиття.

Проведені експериментальні дослідження на фізичній моделі МДУ з вагодозуючим зливним жолобом. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні (2,20-2,25) та відповідний інтервал напруги живлення електромагніта МДУ з метою мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди. Похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози при розливанні малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг).

Розроблено принципові підходи та запропоновано оригінальні технічні рішення щодо системи автоматичного контролю для безперервного розливання металевих розплавів на основі створюваного двокамерного магнітодинамічного проміжного ковша.

Порівняння розроблених елементів САУ МДУ з традиційними технологіями управління приготуванням та розливанням сплавів свідчить, що запропонований спосіб і агрегати для його реалізації дозволяють за рахунок скорочення

кількості різних окремих видів технологічного обладнання забезпечити розвиток сучасних процесів лиття. При цьому загальний очікуваний економічний ефект від застосування запропонованих розробок складе у середньому 65,6 \$ на 1 т лиття з алюмінієвих сплавів (при середній вартості 1 т якісного алюмінієвого лиття у розмірі 4700 \$), у т. ч. за рахунок збільшення виходу придатного лиття у розмірі 23,67 \$/1 т, за рахунок скорочення енерговитрат – до 42 \$/1 т. Додаткова економія може бути досягнута за рахунок вказаних статей і окремих статей капітальних витрат, зокрема, при скороченні числа тензометричних датчиків у складі IBBC та/або при заміні дискретної системи управління МДУ на аналогову.

Ключові слова: ливарне магнітодинамічне обладнання, інтегрована ваговимірювальна система, алюмінієві сплави, температура, розливання, режими роботи, математичне та фізичне моделювання, система автоматичного контролю та управління.

Список публікацій здобувача за темою дисертації:

Статті, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. V. Dubodelov, A. **Semenko**, K. Bogdan, M. Goryuk. Development of Principles to Control the Processes of Continuous Casting of Alloys Using Magnetodynamic Equipment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 4, No.1 (100) 2019. – PP. 69-75. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.172051>. – Цитується у базі Scopus.

Статті у наукових фахових виданнях:

2. **Кизилова А.Ю.** Обоснование концептуальных подходов реализации динамического контроля технологических параметров работы магнитодинамической установки // Процессы литья. – 2014. – № 5 (107). – С. 54-65.
3. Богдан К.С., Санкин А.А., Слажнев Н.А., **Кизилова А.Ю.** Экспериментальные исследования пружинно-тензометрических весовых устройств с пондеромоторным узлом силоведения для литейных материалов// Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 59-63.

4. *Слажнев Н.А., Богдан К.С., Дубоделов В.И., Мусеев Ю.В., Кизилова А.Ю.* Индукционный контроль и диагностика состояния каналов литейных МГД-установок в процессе их эксплуатации // Процессы литья. – 2014. – № 4 (106). – С. 22-29.

5. *Слажнев М.А., Богдан К.С., Кизилова А.Ю., Горшков А.О.* Исследование закономерностей электромагнитных силовых взаимодействий в магнито-динамических установках для алюминиевых сплавов. Сообщение 1 // Процессы литья. – 2015. – № 5. – С. 11-21.

6. *Кизилова А.Ю.* Математическое моделирование в процессах проектирования литейной технологии. // Технологический аудит и резервы производства. – 2012. -№5/2(7) С. 57-58.

7. *Богдан К.С., Кизилова А.Ю., Терновой С.А.* Заливочная МГД-установка с весодозирующим сливным жолобом для алюминиевых расплавов // Процессы литья. – 2016. – № 3. – С. 42-48.

8. *К.С. Богдан, М.С. Горюк, С.А. Терновой, А.Ю. Кизилова.* Магнитовесовая литейная установка с микропроцессорной САУ электрофизической обработкой и дозированием алюминиевых расплавов. // Процессы литья. – 2017. – №2. – С. 63-69.

9. *К.С. Богдан, В.Н. Фиксен, А.Ю. Семенко, М.С. Горюк.* Автоматическое управление процессом заполнения литейных форм при литье под низким электромагнитным давлением. // Процессы литья. – 2017. –№5. –С. 48-55.

Матеріали наукових конференцій:

10. *A.Yu. Kizilova, M.A. Slazhniev, K.S. Bogdan, Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim.* Dynamic control of operational characteristics in magneto-weighting casting installation (MWI) for aluminium alloys // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 609-612.

11. *M. Slazhniev, A. Kizilova, K. Bogdan.* Developing of pragmatic models of the ponderomotive interactions in magnetodynamic installations for aluminum al-

loys MDN-6A // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 593-596.

12. *M. Slazhniev, A. Kizilova, K. Bogdan, Kyung Hyun Kim, Hyun Suk Sim.* New concept of a modern magnetodynamic installation based on the principle of superposition of pulsating electromagnetic forces // Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – SIMAP Laboratory – EPM Group: 2015, ISBN 978-2-9553861-0-1. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – P. 155-158.

13. *V. Dubodelov, O. Smirnov, M. Goryuk, V. Pogorsky, A. Kizilova.* MHD control of flows of cast iron and steel in casting and metallurgical magnetodynamic aggregates // Abstract No. 80 of the 10th PAMIR International Conference – Fundamental and Applied MHD, June 20-24, 2016, Cagliari, Italy.

14. *В.И. Дубоделов, В.Н. Фиксен, В.А. Середенко, А.В. Яценко, А.О. Горшков, А.Ю. Кизилова, М.С. Горюк, А.А. Паренюк.* Использование МГД-оборудования при получении алюминиевого литья для высокотехнологичной техники // 6-я Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее» (23-26 мая 2017 г., г. Днепр, Украина). – С. 71-72; *V. Dubodelov, V. Fikssen, V. Seredenko, O. Yashchenko, A. Gorshkov, A. Kizilova, M. Goryuk, O. Parenyuk.* Application of MHD-equipment production of aluminium casting for high-technology engineering // 6th International Conference “Space Technologies: Present and Future” (May 23-26, 2017, Dnipro City, Ukraine). – P. 164.

15. *A.Yu. Kizilova, O.V. Yashchenko.* MHD control of the heating and the movement of the melt in magnetodynamic aggregates for casting and metallurgy // Proceedings of the 9th International Conference of young scientists on Welding and Related Technologies, ISBN 978-617-7015-58-0. – May 23-26, 2017. – Kyiv, Ukraine. – P. 163-167.

16. *В.И. Дубоделов, Н.А. Слажнев, К.С. Богдан, Ю.В. Мусеев, А.Ю. Кизилова.* Автоматический контроль и диагностика состояния индукционных каналов литейных МГД-установок в процессе их эксплуатации // Материалы

Юбилейной X Международной научно-практической конференции – 27-29 мая 2014 г., г. Запорожье, ЗТПП. – С. 63-66.

17. **А.Ю. Кізілова.** Обґрунтування концептуальних підходів реалізації динамічного контролю технологічних параметрів роботи магнітодинамічної установки // Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции – 27-29 мая 2014 г., г. Запорожье, ЗТПП. – С. 269-272.

18. **В.И. Дубоделов, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, В.К. Погорский, Ю.П. Скоробагатько, А.Ю. Кизилова, А.П. Верзилов, Ю.Ю. Кулиш.** МГД-управление течением железоуглеродистых расплавов в литейных и металлургических магнитодинамических агрегатах // «Литье. Металлургия. 2016»: Материалы XII Международной научно-практической конференции (24-26 мая 2016 г., г. Запорожье, Украина). – С. 78-79.

19. **В.И. Дубоделов, М.С. Горюк, В.Н. Фиксен, А.Ю. Кизилова, А.В. Яценко.** МГД-управление нагревом и движением расплавов в литейных и металлургических магнитодинамических агрегатах // «Литье. Металлургия. 2017»: Материалы XIII Международной научно-практической конференции (23-25 мая 2017 г., г. Запорожье, Украина). – С. 57-58.

20. **В.И. Дубоделов, В.Н. Фиксен, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, А.О. Горшков, А.В. Яценко, А.Ю. Семенко.** Специализированные МГД-устройства для управления движением расплавов при их обработке и разливке // «Литье. Металлургия. 2018»: Материалы XIV Международной научно-практической конференции (22-24 мая 2018 г., г. Запорожье, Украина). – С. 78-79.

21. **А.Ю. Семенко.** Визначення потужності теплових втрат у магнітодинамічній установці для алюмінієвих сплавів// «Литво. Металургія 2018»: Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (22-24 травня 2018р., м. Запоріжжя, Україна). – С. 173-174.

22. **А.Ю. Семенко.** Оцінка потужності теплових втрат ливарного магнітодинамічного обладнання // «Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні»: Матеріали VII Науково-практичної конференції молодих вчених України (29-30 травня 2018 р., м. Київ, Україна). – С. 47-49.

23. *В.И. Дубоделов, А.В. Наривский, В.Н. Фикссен, А.Н. Смирнов, М.С. Горюк, К.С. Богдан, А.П. Верзилов, В.К. Погорский, А.Ю. Семенко.* Новые разработки в области применения электромагнитных полей и магнитогидродинамических воздействий для получения сплавов и литых заготовок из них // Литво. Металургія. 2019: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (21-23 травня 2019 р., м. Запоріжжя) / Під заг. ред. д. т. н., проф. Пономаренко О.І. – Запоріжжя, АА Тандем. – С. 73-74.

Патенти:

24. Патент України № 111675. Магнітодинамічний спосіб нагріву і розливання металевих розплавів // МПК В22D39/00, H05B6/02, H05B6/06, H05B6/20 // Заявл. 12.03.2015 р. № а201502162 // *Слажнев М.А., Дубоделов В.І., Богдан К.С., Кізілова А.Ю.* // (ФТІМС НАН України). – Опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

ABSTRACT

Semenko A. Development of energy and resources saving principles to control of working parameters of casting magnetodynamic installations. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on acquisition of scientific degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.16.04 – Foundry production. – Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2019.

Foundry and metallurgy in Ukraine and in the world remains the main material base for mechanical engineering today. They provide a wide range of receiving materials and molten metal preparations and articles. Herewith, in recent years, the requirements for the quality of such metal products have been increasing simultaneously with the requirements to ensure the saving of materials and energy resources, compliance with environmental discipline in production, the increasing automation, con-

trol and controllability of the technological process and possibly reducing the cost of the final product.

The dissertation is devoted to the solution of important scientific task, which is increasing with efficiency of multifunctional casting magnetodynamic equipment by developing algorithms for continuous control of the equipment control parameters for controlling its basic processes.

Magnetodynamic casting devices are able in the one technological aggregate to realize the operations of accumulation the melt, refinement it on temperature and chemistry and pouring in the metal receiver. To provide magnetodynamic equipment, such functionality uses the energy of electromagnetic fields, which is transmitted proximity and inertia into the liquid metal environment, providing controlled induction of melt heating and controlled movement of the metal under the action of electromagnetic forces.

For bring into according with modern requirements, the possibility of further improvement and development of such unique aggregates, as well as their successful introduction, adaptation and integration into the latest foundry technologies, was carried out the careful analysis of the construction and features of magnetodynamic installation (MDI) for aluminum alloys.

The methods of studying the work of MDI and determining the rational power parameters of its electromagnetic systems was developed and experimentally confirmed. With using in base the integrated weighing system (IWS), original methods were developed with application of engineering calculations, mathematical and physical modeling, field experiment, researches of a complex of electromagnetic force interactions in MDI and separate operations for the preparation and casting of aluminum.

In this work, ponderomotor electromagnetic force interactions in MDI for aluminum alloys were established and experimentally confirmed, dynamics of change of thermal and hydrodynamic characteristics of MDI in different modes of operation and related parameters of foundry technological processes were investigated. This made it possible to estimate the ratio between the components of the generated electromag-

netic energy, which are efficiently consumed (thermal (65-80%) and hydrodynamic component (8-11%)) or lost irreversibly for various reasons (for example, reaction with the design of MDI, which is 5-6 % of total energy generated). This makes it possible to take into account the design features of both individual aggregates and the whole device in the future when creating new magnetodynamic aggregates.

Due to the further development of the theory of foundry magnetodynamic devices, the features of the superposition of alternating electric and magnetic fields in the working area and channels of MDI for aluminum alloys have been established for the first time. Established the possibility of real-time registration of power electromagnetic interaction of liquid metal coil with a current with external magnetic field of the C-shaped electromagnet. The mathematical models obtained are necessary for further optimization of MDI modes of operation and development of ACS in various foundry technologies.

The measured ponderomotor interactions are converted into effective electromagnetic force, which creates pressure and liquid metal head. The effective electromagnetic force was calculated for generation of electromagnetic pressure up the level of 30-35 kPa, which is 10-20% higher than the passport data of the existing series of MDI. It is 23.55-31.84 N.

The basic electrical parameters of electromagnetic systems of magnetodynamic installation MDN-6A-0,63M for casting of aluminum alloys are calculated and the power of thermal losses in MDI was determined. Experimentally determined: the rate of change of the melt temperature in the range of the control system (710-730 °C); the parameters of heating of the melt by one inductor, two inductors are set and at their alternate switching on; MDI thermal losses in the "holding mode" of the melt weighing 133.5 kg amounted to $P = 21,92$ kW. It became possible to replace the discrete control of MDI electromagnetic systems for the analog, which will significantly reduce the energy consumption in the casting.

Experimental model surveys were carried out on the physical model of MDI with a mass dispensing inclined chute. The rational interval of the ratio of the mass of the cast portion of the metal and the instantaneous value of the mass flow rate during

its casting (2.20-2.25) and the corresponding interval of the supply voltage of the electromagnet of MDI were determined in order to minimize the influence of the ripple of the jet on the metering accuracy by reducing their amplitude. The dosage error does not exceed 1.5% by weight of the dose when pouring small portions of the melt (weight 1.5-3 kg).

Principal approaches have been developed and original technical solutions for the automatic control system for continuous casting of metallic melts based on the created two-chamber magnetodynamic tundish ladle have been proposed.

Comparison of the developed elements of the ACS MDI with the traditional control technologies of preparation and casting of alloys shows that the proposed method and units for its implementation allow for the reduction of the number of different types of technological equipment to ensure the development of modern casting processes. In this case, the total expected economic effect from the application of the proposed developments will average \$ 65.6 per 1 ton of casting of aluminum alloys (at an average cost of 1 ton of quality aluminum casting in the amount of \$ 4700), including by increasing the yield of suitable casting in the amount of \$ 23.67 / 1 ton, by reducing energy consumption - up to \$ 42/1 ton. Additional savings can be achieved by the specified articles and separate capital expenditure items, in particular, by reducing the number of strain gauges in the IWS and / or when replacing discrete systems and control of MDI on analog.

Keywords: foundry magnetodynamic equipment, integrated weighing system, aluminum alloys, temperature, casting, operating modes, mathematical and physical modeling, automatic control system.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО МЕТАЛУРГІЙНОГО ТА ЛИВАРНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	26
1.1. Існуюче технологічне обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів.....	26
1.2. Аналіз існуючого ливарного МГД- обладнання.....	35
1.2.1. МГД-пристрої ливарного та металургійного призначення.....	35
1.2.2. Магнітодинамічне обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів.....	35
1.3. Систематизація існуючих способів контролю та управління техно- логічними процесами обробки та розливання у МДУ.....	42
1.4. Порівняння різних типів ливарного обладнання та принципів підходи щодо підвищення ефективності функціонування МДУ....	52
1.5. Висновки по розділу 1.....	56
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МДУ.....	59
2.1. Лабораторна установка та її підготовка до експериментальних досліджень.....	59
2.2. Методика дослідження електромагнітних силових взаємодій в МДУ.....	66
2.3. Методика розрахунку основних параметрів МДУ.....	70
2.3.1. Методика розрахунку основних електричних параметрів	70

	14
електромагнітних систем установки МДН-6А.....	
2.3.2. Методика розрахунку теплових параметрів установки МДН-6А....	82
2.3.3. Методика розрахунку основних технологічних параметрів установки МДН-6А.....	83
2.4. Методика експериментальної оцінки теплової роботи установки МДН-6А.....	84
2.5. Методика дослідження витратних характеристик МДУ в різних технологічних режимах.....	87
2.6. Висновки по розділу 2.....	90
РОЗДІЛ 3	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ, ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МАГНІТОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ МДУ	
	92
3.1. Дослідження електромагнітних силових взаємодій в МДУ за допомогою створення математичних моделей та натурних досліджень.....	92
3.2. Розрахунок основних параметрів МДУ для алюмінієвих сплавів.....	110
3.2.1. Розрахунок основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А.....	110
3.2.2. Розрахунок теплових параметрів установки МДН-6А.....	114
3.2.3. Розрахунок основних технологічних параметрів установки МДН-6А.....	115
3.2.4. Експериментальна оцінка потужності теплових втрат МДУ для алюмінієвих сплавів експериментальним методом.....	116
3.3. Експериментальне дослідження витратних характеристик МДУ за допомогою фізичного моделювання.....	118
3.4. Висновки по розділу 3.....	121
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МДУ.....	
	125
4.1. Практичні приклади застосування систем динамічного контролю технологічних параметрів роботи МДУ.....	125

		15
4.2.	Особливості САУ для процесів безперервного розливання.....	132
4.3.	Техніко-економічні переваги технологічних ливарно-металургійних процесів з використанням МДУ при застосуванні розроблених принципів і засобів управління основними робочими параметрами.....	148
	ВИСНОВКИ.....	152
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	157
	ДОДАТОК А. Технічне завдання на систему автоматичного управління пілотним зразком магнітодинамічного проміжного ковша.....	167
	ДОДАТОК Б. Акт впровадження результатів роботи.....	171

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

МГД – магнітна гідродинаміка, магнітогідродинамічний

МДУ – магнітодинамічна установка

МДН – магнітодинамічний насос

САУ – система автоматичного управління

ІВВС – інтегрована ваговимірювальна система

ВСТУП

Одним з основних технологічних процесів ливарного виробництва є заливання металевих розплавів у ливарні форми. Якість одержуваних виливків багато в чому залежать, за інших рівних умов, від функціональних можливостей застосовуваного заливально-дозувального обладнання.

Багаторічна практика експлуатації різних заливальних пристроїв показала, що високі результати були отримані у тому числі при застосуванні магнітодинамічних ливарних установок (МДУ), що дозволяють здійснювати в одному агрегаті підігрів, позапічну обробку, розливання металевих розплавів у ливарні форми.

У Фізико-технологічному інституті металів і сплавів НАН України проводяться теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на покращення техніко-економічних показників виготовлення лиття з використанням МДУ, зокрема, скорочення безповоротних енерговитрат, підвищення точності дозування, забезпечення автоматизації ливарних процесів, зниження собівартості литої металопродукції.

Приготування сплаву, його позапічна обробка і розливання є одними з найважливіших складових технологічного процесу отримання литих заготовок. Останніми роками, разом з вдосконаленням магнітодинамічного ливарного устаткування, отримали подальший розвиток і практичне застосування процеси реалізації операцій доведення розплаву по хімічному складу, рафінуванню від газів і неметалевих включень, легування та модифікування безпосередньо перед заливкою металу у форму. Такі функціональні можливості МГД-установок, як регульований індукційний нагрів розплаву, електромагнітне безконтактне кероване перемішування і електромагнітна заливка є основою для розробки сучасних технологій приготування сплавів і одержання з них литих виробів. Так, в даний час досліджуються можливості реалізації позапічної електрофізичної обробки розплаву, засновані на реалізації ефекту фізичного модифікування алюмінієвих сплавів в умовах дії електромагнітних полів та МГД-чинників, у тому

числі поєднання їх з іншими фізичними впливами, наприклад низькотемпературною плазмою, зануреною в металевий розплав.

Проблема безперервного контролю та управління основними інформативними параметрами технології і функціонування МДУ (маса, температура, витрата розплаву, потужність електромагнітних систем) до теперішнього часу залишається актуальною. Вирішення цієї проблеми дозволить поліпшити відтворюваність результатів і ефективність позапічної обробки розплаву, оптимізувати режими роботи такого устаткування, а також знизити питомі енерговитрати на тонну виходу придатного лиття, дозволить підвищити конкурентоспроможність створюваного багатофункціонального ливарного устаткування.

Універсалізація устаткування шляхом реалізації різних по складності технологічних процедур вимагає від обслуговуючого персоналу високої спеціалізації, навиків досвідченого технолога, а процес управління установкою вимагає оснащення її системами автоматичного управління (САУ), здійснюючих безперервний контроль і управління основними технологічними параметрами роботи МГД-установки при реалізації операцій з металевим розплавом.

Створення систем контролю та управління процесами розливання та обробки алюмінієвих розплавів у МДУ насамперед полягає у вивченні як локальних, так і комплексних фізичних закономірностей трансформувannya електричної енергії у теплову та механічну при створенні електромагнітних об'ємних керованих сил та нагріванні рідкого металу в установці.

Результати досліджень теорії, конструювання та використання багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання і процесів, що протікають безпосередньо при його використанні для приготування та розливання металевих сплавів висвітлені в працях В.І. Дубодєлова, В.О. Середенка, В.М. Фіксена, В.К. Погорського, К.С. Богдана, М.С. Горюка, М.А. Слажнева.

Актуальність роботи. Підвищення якості виробів з алюмінієвих розплавів нерозривно пов'язано з можливостями заливально-дозувального обладнання, що застосовується у технологічних процесах ливарного виробництва. Багаторічна практика експлуатації такого устаткування показала, що високі резуль-

тати можуть бути досягнуті при застосуванні багатофункціональних ливарних магнітодинамічних установок (МДУ), що забезпечують, разом з якісним заливанням розплавів, доведення розплаву до необхідного хімічного складу, позапічну обробку перед заливанням в ливарну форму або інший металоприймач в період міксерування.

В опублікованих за останні два десятиріччя статтях і патентах на винаходи, присвячених вирішенню вказаної проблеми, наведені, в основному, нові розробки по створенню автоматизованого ливарного устаткування для дозованого розливання металевих розплавів у разові та постійні ливарні форми. Разом з тим публікації з питань автоматизації позапічної обробки розплаву і доведення його до необхідних кондицій перед дозованою заливкою в ливарні форми практично відсутні.

Приготування сплаву, його рафінування і позапічна обробка є одним з найважливіших складових технологічного процесу отримання виливків і литих заготовок. В даний час досліджуються можливості реалізації позапічної електрофізичної обробки розплаву, засновані на реалізації ефекту фізичного модифікування до- і заевтектичних алюмінієвих сплавів за рахунок електромагнітної дії. Добрі результати застосування комплексу вищезгаданих технологій дозволили трансформувати МДУ в сучасний універсальний агрегат, який знайшов своє застосування в дослідницьких та промислових цілях (зокрема, в Нідерландах, Республіці Корея, Великій Британії).

Разом з удосконаленням магнітодинамічного ливарного устаткування, отримали подальший розвиток і практичне застосування функціональні можливості МДУ: регульований індукційний нагрів розплаву, електромагнітне безконтактне кероване перемішування і контрольоване розливання сплавів. Відповідно зростає актуальність проблеми реалізації безперервного контролю та управління основними керуючими параметрами такого обладнання (маси, температури, витрати розплаву). Вирішення цієї проблеми дозволить поліпшити відтворюваність результатів і ефективність позапічної обробки розплаву, оптимізувати режими роботи такого устаткування, а також знизити питомі енерго-

витрати на тонну виходу годного лиття, дозволить підвищити конкурентоспроможність створюваного багатофункціонального ливарного устаткування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалась у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України відповідно до планів науково-дослідних робіт у рамках тем НДР відомчого замовлення: III-16-12-625 «Розробка нових технологічних процесів одержання високоякісних сплавів, у тому числі спеціальних, і литих заготовок з використанням сучасних систем управління, концентрованих джерел нагріву та електромагнітних впливів при обробці і кристалізації металу» (№ держреєстрації 0112U001685, 2012-2016 рр.); III-14-14-649 «Розробка наукових основ створення нового покоління магнітодинамічних установок для алюмінієвих сплавів та підвищення при їх використанні ефективності процесів лиття» (№ держреєстрації 0114U000327, 2014-2016 рр.); III-09-17-671 «Розробка наукових основ створення нових високоефективних мультифункціональних магнітодинамічних проміжних ковшів для процесів безперервного лиття» (№ держреєстрації 0117U002689, 2017-2019 рр.); III-17-12-626 «Дослідження процесів тепломасопереносу, твердіння, деформації та структуроутворення металевої стрічки при литті-прокатуванні» (№ держреєстрації 0112U001463, 2012-2016 рр.).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є створення наукових і технологічних засад сучасних систем управління основними робочими параметрами ливарного магнітодинамічного обладнання для підвищення його ефективності та поліпшення техніко-економічних показників процесу одержання литих заготовок та виливків з алюмінієвих сплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

1. Систематизувати дані щодо експлуатації МДУ та оцінити сучасний рівень їх конкурентоспроможності у порівнянні з ливарно-металургійним обладнанням аналогічного технологічного призначення.

2. Ідентифікувати основні проблеми роботи МДУ, що пов'язані з особливостями їх конструкції та впливають на ефективність реалізації технологічних процесів і комплексів ливарного обладнання.

3. Адаптувати існуючі або розробити нові методики для дослідження основних технічних параметрів МДУ при роботі в різних технологічних режимах приготування та розливання алюмінієвих сплавів (як окремих операцій, так і їх комплексу).

4. З використанням комплексних досліджень на моделях та в умовах натурного експерименту, вивчити особливості протікання електричних, електромагнітних, теплових, гідродинамічних процесів у МДУ для алюмінієвих сплавів, встановити існуючі взаємозалежності і раціональні інтервали варіювання основних параметрів такого обладнання.

5. На основі отриманих експериментальних даних, перевірити доцільність запропонованих концептуальних підходів і адекватність розроблених моделей. Запропонувати принципові рішення щодо розробки новітньої системи автоматичного управління (САУ) роботою МДУ для алюмінієвих сплавів, забезпечити її апаратне втілення та інтеграцію до затребуваних ливарних технологій.

6. Перевірити на дослідній МДУ ефективність запропонованих заходів та розроблених рекомендацій.

Об'єкт дослідження. Процеси управління електромагнітними характеристиками багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання.

Предмет дослідження. Технологічні параметри, що чинять вплив на ефективність роботи МДУ.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач і отримання основних результатів дисертаційної роботи були використані аналітичні та експериментальні методи досліджень. За допомогою математичного моделювання досліджувались зміни основних параметрів від режимів роботи МДУ: швидкість створення електромагнітних сил у МДУ залежно від включення систем управління; швидкість зміни температури розплаву залежно від зміни режимів

роботи індукторів; динаміка руху розплаву залежно від зміни параметрів живлення електромагніта та/або індукторів; вплив складової струму та індукції на створювану електромагнітну силу; динаміка зміни гідродинамічних характеристик розплаву при зміні параметрів роботи МДУ в різних режимах. Фізичне моделювання було застосоване для вивчення процесу дозування розплаву з МДУ. Для дослідження потужності теплових втрат МДУ використовувались розрахункові та експериментальні методи.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше при реалізації процесів приготування та розливання алюмінієвих сплавів у МДУ оцінено обсяги перетворення електромагнітної енергії в теплову (65-80%) та гідродинамічну складову (8-11%), що стало можливим завдяки вивченню в реальному масштабі часу силовій електромагнітній взаємодії рідкометалевого струмонесучого витка з зовнішнім магнітним полем електромагніту.

2. Вперше при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів у МДУ встановлено вплив на технологічні характеристики, а саме – створюваний електромагнітний тиск, гідравлічний напір та масову витрату при розливанні – перерозподілу енергії між ефективною електромагнітною силою і силою реакції з конструкцією МДУ, що є безповоротними втратами енергії та в абсолютному вимірі складає 5-6%.

3. Отримала подальший розвиток теорія ливарних магнітодинамічних пристроїв, зокрема, вперше при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів встановлені особливості взаємодії змінних електричних та магнітних полів у металевому розплаві в робочій зоні та каналах МДУ, які полягають у відповідному співвідношенні їх геометрії, конструкції електромагнітних систем, щільності електричного струму в розплаві, індукції магнітного поля та результуючого розподілу об'ємних електромагнітних сил.

4. Вперше з використанням фізичного моделювання встановлено вплив пульсацій струменя на процес розливання металу з МДУ. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєво-

го значення масової витрати при її розливанні – (2,20-2,25). Це дозволяє за рахунок зменшення амплітуди таких пульсацій мінімізувати їх вплив на точність дозування, особливо малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг) – похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози, а також контролювати масову витрату розплаву при розливанні шляхом динамічного управління параметрами живлення електромагнітних систем МДУ.

5. Вперше на основі результатів інженерних розрахунків, моделювання та натурних досліджень розроблено новий принцип управління витратними характеристиками магнітодинамічного обладнання, який ґрунтується на застосуванні інтегрованої ваговимірювальної системи (IBVC), та запропоновано відповідну САУ МДУ.

Практичне значення отриманих результатів. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів:

- забезпечено заощадження енергетичних витрат роботи МДУ при приготуванні та розливанні алюмінієвих сплавів завдяки: оцінці перерозподілу енергії силових взаємодій МДУ між ефективно використаною та безповоротно втраченою; контролю за станом індукційного каналу МДУ та її тепловою роботою; визначенню і дотриманню раціональних параметрів живлення електромагнітних систем МДУ;
- розроблено принципову схему САУ МДУ на основі безперервного контролю за допомогою IBVC динамічних характеристик процесу лиття з використанням магнітодинамічного обладнання;
- розроблені наукові підходи та технічні засоби їх реалізації для підвищення точності дозування алюмінієвого розплаву з МДУ, особливо малими порціями (1,5-3 кг) за рахунок встановлення раціональних параметрів електричного живлення електромагнітних систем і застосування розроблених підходів та засобів управління, з метою запобігання пульсацій струменя рідкого металу;
- удосконалено методику розрахунку магнітодинамічних ливарно-металургійних агрегатів як комплексних електромагнітних систем, що дає змо-

гу проводити розробки нових зразків такого обладнання, систем живлення та управління ним.

Особистий внесок здобувача. Наукові та практичні результати роботи, які виносяться на захист, отримані автором самостійно або у співавторстві. Внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві, полягає в:

- аналізі та систематизації існуючих способів контролю та управління технологічними процесами обробки та розливання алюмінієвих сплавів магнітодинамічними установками для визначення та аналізу чинників, що знижують ефективність роботи ливарних МДУ [1, 3, 4];

- проведенні комплексу експериментальних досліджень залежностей експлуатаційних та технологічних параметрів роботи МДУ у залежності від режимів та параметрів роботи електромагнітних систем МДУ (індукторів та електромагніту) [5];

- проведенні експериментальних досліджень на математичних та фізичних моделях, аналітичній обробці експериментальних даних, зокрема, щодо інтегрованих ваговимірювальних систем та пружино-тензометричних вагових пристроїв для ливарних МДУ [5, 7, 9];

- проведенні експериментальних досліджень на фізичній моделі заливної установки з вагодозувальним жолобом традиційної конструкції та розробці нового технічного рішення, що дозволяє спростити конструкцію МДУ та позитивно впливає на собівартість ливарної продукції, забезпечує економічний ефект при впровадженні її у виробництво [5, 9];

- проведенні комплексу натурних експериментальних досліджень на діючій МДУ, математичній обробці експериментальних даних та залежностей силових пондеромоторних взаємодій [5, 8, 24].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати роботи повідомлені й обговорені на: Міжнародній науково-практичній виставці-конференції «Литво» (м. Запоріжжя, 2014-2019 рр.); 8-й Міжнародній конференції з електромагнітної обробки матеріалів «ЕРМ-2015» (м. Канни, Франція, 2015 р.); 10-й Міжнародній конференції РАМІР «Фундаментальна та прикладна

магнітна гідродинаміка» (м. Кальярі, Італія, 2016 р.); 6-й Міжнародній конференції «Космічні технології: сьогодення та майбутнє» (м. Дніпро, 2017р.); 9-й Міжнародній конференції молодих вчених «Зварювання та суміжні технології» (м. Київ, 2017 р.); VII Науково-практичній конференції молодих вчених України (2018 р., м. Київ).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 24 наукові праці, у тому числі: 9 – статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК МОН України, 1 стаття, що індексується в міжнародній наукометричній базі Scopus; 12 доповідей у збірках наукових праць міжнародних конференцій; 1 тези доповідей на науково-практичній конференції; 1 патент України.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (86 найменувань) та 2 додатків. Повний обсяг дисертації – 171 сторінка, обсяг основної частини – 125 сторінок. У розділах дисертації 37 рисунків і 15 таблиць.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО МЕТАЛУРГІЙНОГО ТА ЛИВАРНОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Існуюче технологічне обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів

За порівняно короткий по історичним міркам період часу алюміній та сплави на його основі міцно зайняли друге місце серед конструкційних металів і знаходять широке застосування у транспорті, будівництві, упаковці, електротехніці та виробництві предметів побуту. Завдяки унікальному комплексу фізико-хімічних і механічних властивостей він успішно витримує конкуренцію з боку інших матеріалів, таких як: сталь, чавун, мідні сплави, бетон, дерево, пластмаси, скло та ін.

Первинне виробництво алюмінію – це виплавка глинозему до чистого алюмінієвого металу. Вторинне виробництво – переробка алюмінієвого брухту до корисного алюмінію знову.

Зараз світове виробництво алюмінію вже майже досягло рівня в 50 млн. т/р. і продовжує своє експоненціальне зростання (рис. 1.1) [1, 2].

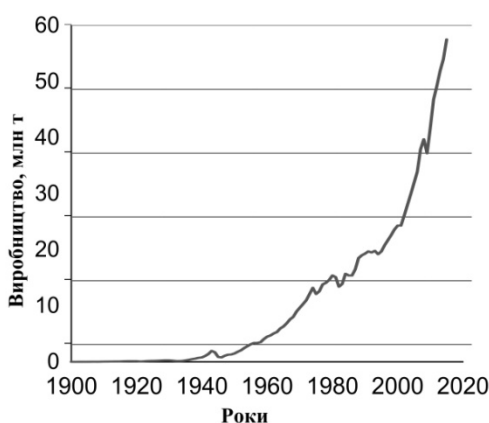


Рис. 1.1. Світове виробництво первинного алюмінію

З другої половини минулого сторіччя виробництво вторинного алюмінію стало зростати з року в рік, але особливо динамічний розвиток воно отримало з середини 80-х років (рис. 1.2).

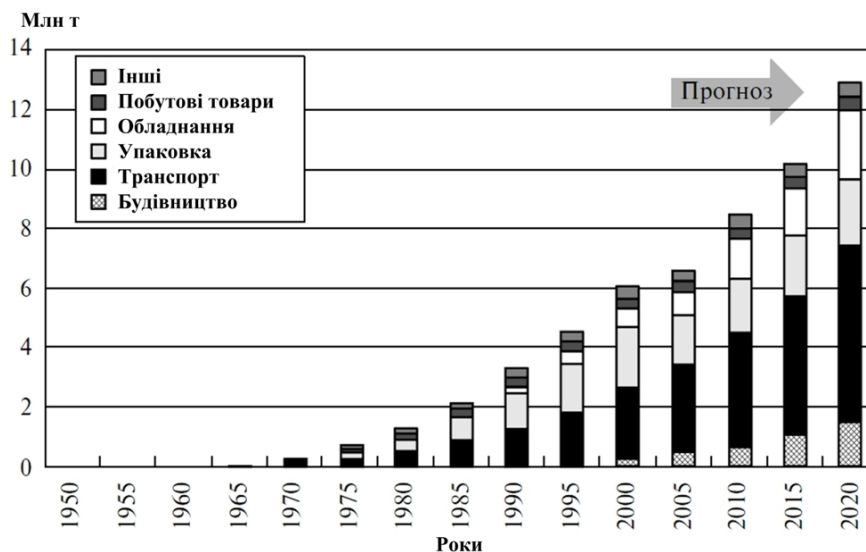


Рис. 1.2. Динаміка зростання виробництва вторинного алюмінію [3]

Первинний алюміній, отриманий на електролізних заводах, піддають подальшій переробці в напівфабрикати. У ливарних відділеннях цих заводів, використовуючи тепло рідкого алюмінію з електролізерів, із застосуванням міксерів-копильників відливають плоскі і круглі злитки, шини, катанку, смуги та стрічки для прокатки фольги, а також чушки. При цьому тільки близько 35% загального випуску напівфабрикатів виготовляють на електролізних заводах. Решта виробляють на металургійних, пресових і ливарних заводах із застосуванням чушкового алюмінію при плавлі сплавів.

Фізичні та хімічні властивості алюмінієвих сплавів багато в чому визначаються основою сплаву та без великої похибки при розгляді теплофізичних, фізико-хімічних, гідродинамічних та інших процесів в плавильних печах можна обмежитись властивостями алюмінію. Порівняно з іншими широкоживаними металами, для нього характерна велика теплоємність ($920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$) та значна питома теплота плавлення ($3,9 \cdot 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$) при відносно невисокій температурі плавлення ($660,3 \text{ }^\circ\text{C}$ для чистого алюмінію, та $658 \text{ }^\circ\text{C}$ для технічного); хороша

теплопровідність в твердому стані (в інтервалі температур 0-100 °С дорівнює 230Вт/(м·°С)) та вдвічі нижча в рідкому стані; мала в'язкість, що залежить від вмісту в розплаві нерозчинних домішок; високий поверхневий натяг, що зменшується при добавках магнію; невелика густина в твердому стані, що дещо зменшується з ростом температури розплаву; хороша електропровідність; величезна відбивна здатність щодо інфрачервоних променів; виключно висока активність в рідкому стані та хороша розчинність водню, що збільшується з ростом температури розплаву; відмінна захисна здатність поверхневої окисної плівки, що істотно погіршується при добавках магнію [4]. Детальний розгляд цих властивостей дозволив зробити висновок про те, що для отримання алюмінієвих сплавів придатні практично всі відомі способи плавки [5]. Виняток становить лише вакуумна плавка, при якій спостерігаються значні втрати легколетких компонентів сплаву.

Існує велике різноманіття плавильних печей. У класифікації К. Шмітца [6] з точки зору конструкції представлено 16 типів таких печей (відноситься саме до виробництва вторинного алюмінію):

1) Відбивна піч, стаціонарна: піч із завантаженням шихти зверху; кругла піч; піч з завантажувальним колодязем; піч двокамерна; піч з сухим подом; піч швидкісного плавлення; шахтна піч; відбивна піч, нахиляєма; нахиляєма циліндрична піч; нахиляєма овальна піч.

2) Тигельна піч: газова тигельна піч; електрична тигельна піч опору; тигельна індукційна піч; канална індукційна піч.

3) Роторна піч, що нахиляється.

По виду джерела нагріву:

– полум'яні печі, опалювані за рахунок хімічної енергії горіння газоподібного, рідкого або твердого палива;

– електричні печі, процес плавлення шихти в яких відбувається за рахунок нагрівання випромінюванням при проходженні електричного струму по нагрівальним елементам (печі електричного опору) або шляхом виділення тепла безпосередньо у розплавлюваному металі (індукційні печі).

Крім того, виробники вторинного алюмінію та сплавів з нього застосовують різне обладнання в залежності від призначення металопродукції, вимог до неї та типу алюмінієвого брухту, що переробляється.

Ливарні підприємства, які виготовляють алюмінієві виливки з вторинного ливарного алюмінію, широко застосовують вищезазначені печі – тигельні газові та електричні (індукційні та опору), а також індукційні канальні, як для плавки та витримки алюмінію, так і для розливання алюмінієвого розплаву в роздаточні або проміжні ковші чи ливарні форми.

Щоб отримати заданий алюмінієвий сплав в інтервалі встановлених допусків його хімічного складу необхідно переплавляти алюмінієвий брухт з відомим вмістом в ньому різних легуючих елементів, домішок і сторонніх забруднень. На жаль, не існує якоїсь «універсальної пічної технології», за допомогою якої можна було б отримати будь-який алюмінієвий сплав з будь-якого алюмінієвого брухту.

За останні десятиріччя в алюмінієвій промисловості набуває активного розвитку створення спеціалізованих заводів (наприклад з використанням ливарних комплексів компаній: Alu-Billets Productions GmbH, Hydro Aluminium, Hertwich Engineering). Це обумовлено тим, що приготування якісного сплаву на основі брухту та відходів становить велику складність у порівнянні з плавленням шихти, що складається переважно з чистого алюмінію, легуючих добавок та частково відходів власного виробництва з відомим хімічним складом. Крім того велику увагу доводиться приділяти процесу плавлення для мінімізації втрат металу. Зазвичай, основною складовою частиною виробничих ліній таких заводів є ливарні комплекси, що включають плавильно-роздавальну піч, пристрої для позапічної обробки (дегазації, фільтрування, модифікування) розплаву, власне ливарну машину, піч безперервної гомогенезації, а також обладнання для контролю злитків.

Найбільш доцільним у сучасних умовах є процес одержання алюмінієвого лиття, що складається з кількох стадій, зазвичай двох або трьох, іноді й більше (рис. 1.3) [7].

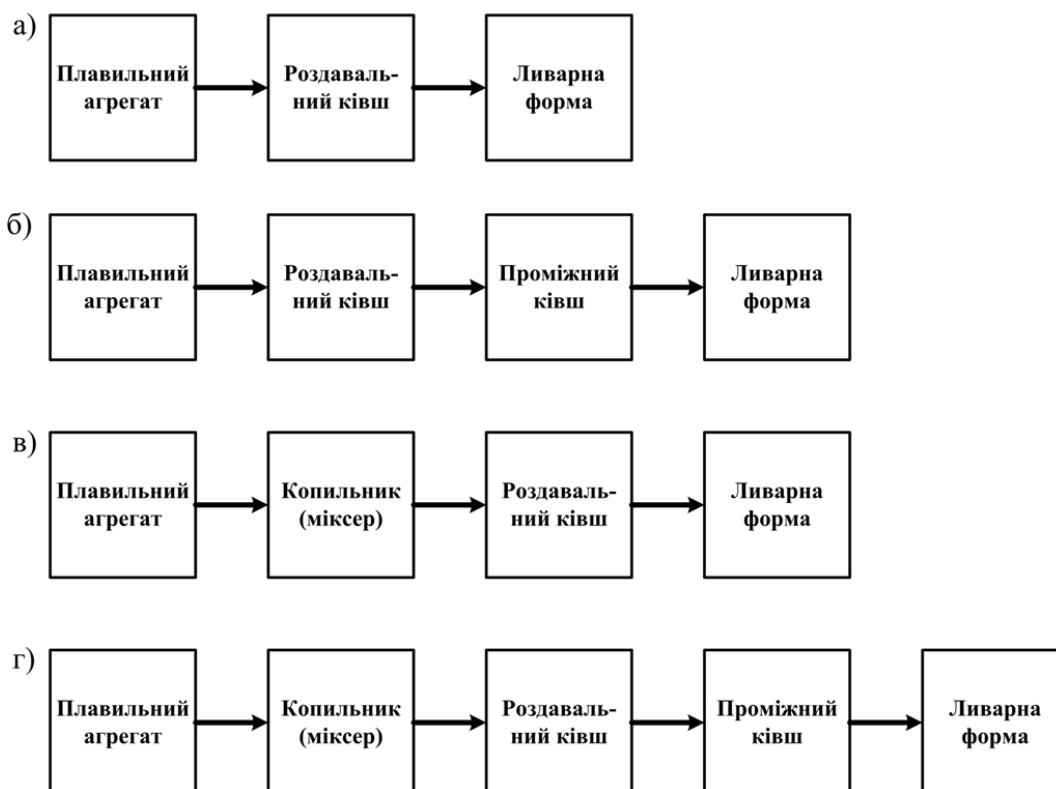


Рис. 1.3. Традиційні схеми розливання алюмінієвих сплавів [7].

На першому етапі плавильна піч повинна забезпечувати ефективне плавлення металу, по можливості видалення небажаних компонентів, які були наявні у вихідній шихті, а також належне перегрівання розплаву для передачі його до іншого технологічного агрегату.

Другий етап переділу рідких алюмінієвих сплавів відбувається у спеціалізованих агрегатах, які поєднують у собі функції печі та ковша. Ця стадія передбачає комплексне рафінування розплаву від газів і неметалевих включень, доведення сплаву за температурою та хімічним складом (включаючи операцію легування і модифікування), а також у разі технологічної або виробничої потреби – витримування чи навіть тривале зберігання розплаву. На цьому етапі отримують заданий алюмінієвий сплав.

Далі відбувається третя операція – розливання приготованого сплаву. У більшості випадків вона також двостадійна, тому що готовий сплав переливається до проміжної ємкості – мірного ковша або іншого заливального пристрою, і вже звідти потрапляє у металоприймач (ливарна форма, виливниця, кристалізатор тощо). Утворення шлаку при окисленні алюмінію має бути міні-

мальним в ході його розливання, а швидкість подачі металу у ливарні форми та виливниці добре регулюватися.

Багатостадійні схеми з великою кількістю переливів розплаву є вкрай не-вигідними з технологічної та особливо економічної точок зору. Так, при розливанні алюмінію за схемою 1 (див. рис. 1.3, а) зниження температури металу може досягати 30-40 °С, за схемами 2 і 3 (див. рис. 1.3, б і в) – 40-50 °С, за схемою 4 (див. рис. 1.3, г) – 50-60 °С. Зниження температури розливання металу залежить від ємкості ковша, відстані між ланками технологічного ланцюга та розважування виготовлюваних виливків. Чим більша відстань, на яку переміщується ківш, менше маса виливків і довше розливання металу, тим більше падіння його температури. Для компенсації тепловтрат і забезпечення заданої температури розливання алюміній перегрівають у печі.

Крім зазначеного, традиційні технологічні схеми процесу розливання алюмінієвих сплавів (див. рис. 1.3) мають ряд інших істотних недоліків, зокрема: - відсутність (в більшості випадків) додаткового підігріву металу; - труднощі автоматизації процесу розливання алюмінію, так як зниження його температури та ливарних властивостей призводить до заростання жолобів розливних ковшів і пристроїв.

Очевидно, що найбільш доцільною та технологічно вигідною схемою є така, в якій поєднуються друга та третя стадії, тобто остаточне доведення розплаву і його видача у металоприймач забезпечуються за рахунок використання одного автономного багатофункціонального агрегату. Це також більш виправдано при частій зміні виплавлюваних алюмінієвих сплавів. Фактично, затребуваний агрегат має бути по своїй суті міксером-дозатором.

Промислові підприємства з виробництва алюмінію застосовують різні типи ливарного обладнання. Деякі з них спроектовані для вельми специфічних умов застосування, наприклад, для безперервного або напівбезперервного лиття алюмінієвих сплавів, одержання виробів за технологією лиття під тиском тощо.

Разом з тим вже з 90-х рр. XX ст. виробники ливарного обладнання почали пропонувати спеціалізовані електромагнітні перемішувачі [8] для проведен-

ня операцій позапічної обробки безпосередньо у плавильних печах або міксерах.

З огляду на забезпечення відповідних техніко-економічних показників виробництва лиття, за своєю конструкцією та принципом дії найбільш доцільними в якості вторинних агрегатів є електричні установки, зокрема індукційні тигельні та каналні міксери. Вони відзначаються високим електричним та тепловим ККД, здатні реалізувати різні режими нагрівання та фізико-хімічної обробки розплаву в умовах дії електромагнітних полів, однак, на жаль, в них складно забезпечити розливання рідкого металу, особливо малими порціями. Тому все одно доводиться застосовувати спеціальні дозуючі пристрої механічного або пневматичного типу.

Іншим шляхом вирішення проблеми стало створення спеціалізованих пристроїв на базі індукційних каналних печей для розливання алюмінієвих сплавів у ливарні форми, що пояснюється їх наступними перевагами: - можливість підігріву металу та стабілізації температури розливання; - можливість управління якістю та властивостями металу; - можливість автоматизації процесу розливання; - стабільність і відтворюваність результатів; - висока продуктивність; - мінімальна витрата електроенергії; - простота конструкції та легкість управління; - зручність в обслуговуванні, висока експлуатаційна якість та надійність.

Згідно [9] установки в залежності від способу дозованої подачі алюмінієвих сплавів в форми виготовляють наступних типів: 1 – пневматичні; 2 – магнітодинамічні; 3 – ковшові. Їх основні параметри згідно зазначеної нумерації мають відповідати вимогам, наведеним у табл. 1.1.

Використання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів і формоутворення литих виробів енергії електромагнітних полів та магнітогідродинамічних (МГД) ефектів є вельми перспективним, оскільки забезпечує безконтактний, малоінерційний і легко керований термосиловий вплив у широкому діапазоні основних технологічних параметрів на рідкометалеві системи [9, 10].

Таблиця 1.1

Типи і основні параметри установок для розливання алюмінієвих сплавів

Тип	Назва Параметрів		Значення Параметрів						
1	Корисна маса завантаження ванни, кг		100	160	250	400	630	1000	1600
	Витрата сплаву при заливці, кг/с	мін.	0,15	0,2	0,3	0,4	0,7	1,0	1,5
		макс.	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
	Маса дози, кг	мін.	0,3	0,4	0,6	0,9	1,5	2,4	4,0
		макс.	20	35	45	70	110	180	300
	Похибка дозування, %	мін. маси дози	5,0	4,0	3,0	2,0	1,5	1,2	1,0
		макс. маси дози	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7
2	Корисна маса завантаження ванни, кг		100	160	250	400	630	-	-
	Витрата сплаву при заливці, кг/с	мін.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	-	-
		макс.	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5	-	-
	Маса дози, кг	мін.	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	-	-
		макс.	20	30	50	80	120	-	-
	Похибка дозування, %	мін. маси дози	6,0	5,0		4,0		-	
		макс. маси дози	3,0	2,5	2,0	1,5		-	
3	Маса дози, кг		2,5	4	6,3	10	16	25	40
	Похибка дозування маси, %		2,0						
	Похибка позиціонування ковша, мм		Вибирати з ряду: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5.						
	Максимальні лінійні переміщення ковша (для довідок), мм		Вибирати з ряду: 1000; 1250; 1400; 1600; 1800; 2000; 2500; 3150; 4000 5000.						
	Максимальні кутові переміщення ковша (для довідок), мм		Вибирати з ряду: 180; 210; 240; 270; 300; 340.						

Крім того, слід враховувати конкретні вимоги до заливального обладнання, які висуваються сучасними широкозастосовуваними технологіями лиття. Передусім це стосується процесів одержання виливків литтям під тиском.

Виходячи з конструкції, продуктивності та особливостей експлуатації машин лиття під тиском у виробничих умовах, були стандартизовані необхідні параметри заливального обладнання [11]. Основними з них, що чинять вирішальний вплив на формування якісного виливка, є:

- 1) відповідність корисної місткості заливального агрегата об'єму камери пресування машин лиття під тиском і заданій серійності виробництва. Вона має становити не менше 100 кг рідкого алюмінієвого сплаву;
- 2) забезпечення суворого додержання температурних режимів розливання для кожного конкретного виду сплаву, оскільки це чинить визначальний вплив на фізичні властивості розплаву [12];
- 3) забезпечення суворого додержання гідродинамічного режиму заповнення камери пресування (ламінальний режим руху розплаву) та точності поданої до неї маси порції рідкого металу, особливо при одержанні тонкостінних та/або рівностінних виливків;
- 4) запобігання виникнення найбільш поширених ливарних дефектів: неспаї, недоливи, глухі тріщини, усадочні раковини, пористість;
- 5) автоматизація процесу лиття для максимально можливого усунення негативного впливу людського фактору.

Порівняння вищенаведених стандартизованих характеристик МДУ та обов'язкових технологічних параметрів [9-11] свідчить про загальну відповідність ливарного магнітодинамічного обладнання вимогам сучасних процесів одержання литої металопродукції, у т. ч. спеціальних способів лиття. Однак для забезпечення подальшого розвитку технологій лиття на найближчу та довгострокову перспективу слід передбачити можливість збільшення корисної місткості обладнання, а також розширення діапазону температурних та витратних характеристик розливання рідкого сплаву. Це неможливо без застосування сучасних засобів контролю і управління роботою МДУ та інтегрованого з нею в єдиний комплекс ливарного обладнання.

1.2. Аналіз існуючого ливарного МГД- обладнання

1.2.1. МГД-пристрої ливарного та металургійного призначення

Роботи зі створення ливарних МГД-технологій і обладнання отримали широкий розвиток і знайшли практичне застосування: при транспортуванні та дозуванні металевих розплавів, для інтенсифікації тепло- і масопереносу в плавильних агрегатах, рафінуванні металів і сплавів, управлінні кристалізації злитків та ін. [13-15]. Метою їх застосування є поліпшення властивостей одержуваних металів і сплавів та виробів з них, зниження їх вартості, отримання нових властивостей та матеріалів. Узагальнена класифікація основних типів МГД-обладнання ливарного і металургійного призначення наведена на рис. 1.4.

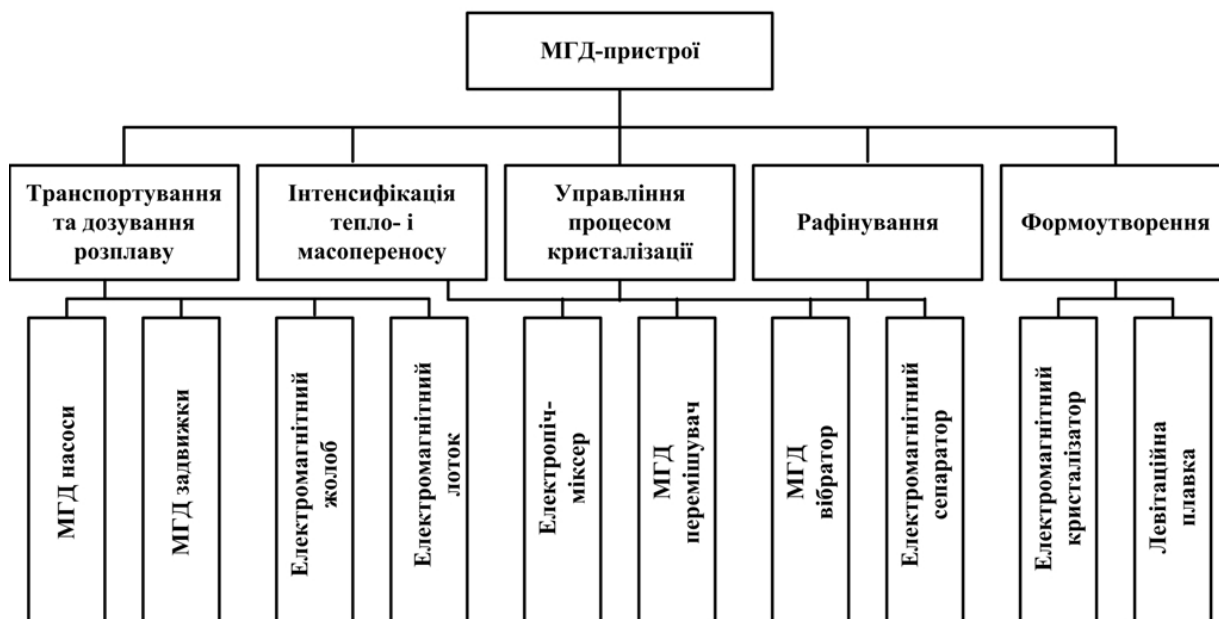


Рис. 1.4. Призначення та основні типи металургійних МГД пристроїв

1.2.2. Магнітодинамічне обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів

Проведений у ФТІМС НАН України аналіз умов роботи засобів МГД-техніки в ливарному виробництві (Табл. 1.3), перш за все при вирішенні задач

обробки, транспортування та дозування рідкого металу, дозволив виробити критерії оцінки працездатності та оптимальності конструктивних і технологічних параметрів ливарних МГД-установок [10]. Це стало передумовою до розробки відповідаючим цим критеріям нового класу МГД-обладнання – магнітодинамічних насосів і установок (табл. 1.2) [10], які були стандартизовані, сертифіковані та серійно випускалися на замовлення ливарних, металургійних і машинобудівних підприємств України і зарубіжжя. Такі агрегати дозволяють інтенсифікувати тепломасоперенос при обробці (рафінуванні, легуванні, модифікуванні) та здійснити ефективне управління течією металу при заливці його в ливарну форму. За допомогою застосування магнітодинамічного обладнання створений ряд ефективних технологій плавки, обробки та заливки ливарних сплавів, в основу яких покладено концепцію одночасного незалежного управління тепловими та гідродинамічними параметрами процесів в широкому діапазоні [15-19].

Таблиця 1.2

Основні параметри магнітодинамічних установок згідно ГОСТ 26 354-84

Корисна маса завантаження ванни, кг		100	160	250	400	630*
Витрата сплаву при розливанні, кг/с	мін.	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	макс.	2,0	2,5	3,0	3,0	3,5
Маса дози, кг	мін.	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2
	макс.	20	30	50	80	120
Похибка дозування, %	мін.маси дози	6,0	5,0		4,0	
	макс. маси дози	3,0	2,5	2,0	1,5	

* Проведено модернізацію МДУ місткістю 630 кг та забезпечено її функціонування при живленні струмом частотою 60 Гц, досягнуто верхню межу масової витрати на рівні 10 кг/с (для частоти 50 Гц до 13 кг/с).

Для порівняння технічних та експлуатаційних характеристик існуючих МДУ для алюмінієвих сплавів та визначення напрямів удосконалення було взято аналогічне обладнання провідних виробників: АВВ (Швейцарія – Швеція), Otto Junker (Німеччина), Siemens VAI (Австрія) [20, 21]. Основні параметри іс-

нуючого обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів наведено у табл.1.3.

Таблиця 1.3

Технічні та експлуатаційні характеристики існуючого обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів [20-24]

Обладнання Параметр	Існуючі зразки МДУ для алюмінієвих сплавів	Роботизовані заливальні пристрої	Індукційні каналні печі	Машини лиття під низьким регульованим тиском (пневматичні)	Необхідні значення
Місткість по рідкому алюмінієвому сплаву, кг	160-630	-	150-5000	150-500	до 1000
Швидкість нагріву, °С/хв.	до 5,0	-	до 7,0	до 3,0	до 10,0
Тиск, кПа	до 35	-	-	до 50	до 50
Напір, мм	0-1250	-	-	до 2000	до 2000
Масова витрата, кг/с	0,3-10,0	-	-	до 5,0	0,05-15
Доза, кг	2-150	0,3-3,0	-	2-150	0,5-500
Похибка дозування, %	2,0	3,0	-	3,0	1%
Швидкість руху розплаву, м/с	0-5	-	до 1,0	-	0-10

Аналіз аналогічних за технологічними можливостями агрегатів, які застосовуються у світі показав, що для забезпечення сучасного рівня конкурентоспроможності ливарних магнітодинамічних установок (МДУ) для приготування та розливання алюмінієвих сплавів, необхідно здійснити ряд технологічних та функціональних удосконалень, завдяки яким:

– напірні характеристики агрегата (як насоса) мають бути підвищені з 1250 мм алюмінієвого стовпа (для існуючої МДН-6А) до принаймні 2000 мм (рис. 1.6). Це особливо актуально для технологій лиття під низьким регульованим електромагнітним тиском (ЛЕМТ) [25, 26], у т. ч. з використанням нетвер-

днучої розосередженої ливниково-живильної системи (РОЗЛИВ-ЛЕМТ-процес) [27, 28, 29];

– витратні характеристики мають бути розширені, як у нижньому діапазоні із забезпеченням стабільності процесу нижче 0,3 кг/с (до 0,05 кг/с для режимів доливу порцій та технологій напівбезперервного лиття алюмінієвих заготовок в умовах мікровиробництва), так і у верхньому діапазоні вище досягнутих 10 кг/с – до 15 кг/с при для одержання крупно габаритних виливків та при безперервному розливанні (рис. 1.5);

– збільшення корисної місткості магнітодинамічних установок до 1000-1500 кг рідкого алюмінієвого сплаву, що забезпечить більший запас розплаву поблизу ливарної лінії (металоприймача), збільшення маси одержуваних виливків, скорочення частоти та загальної кількості технологічних переливів рідкого металу та в цілому стабілізує процес одержання лиття [30].

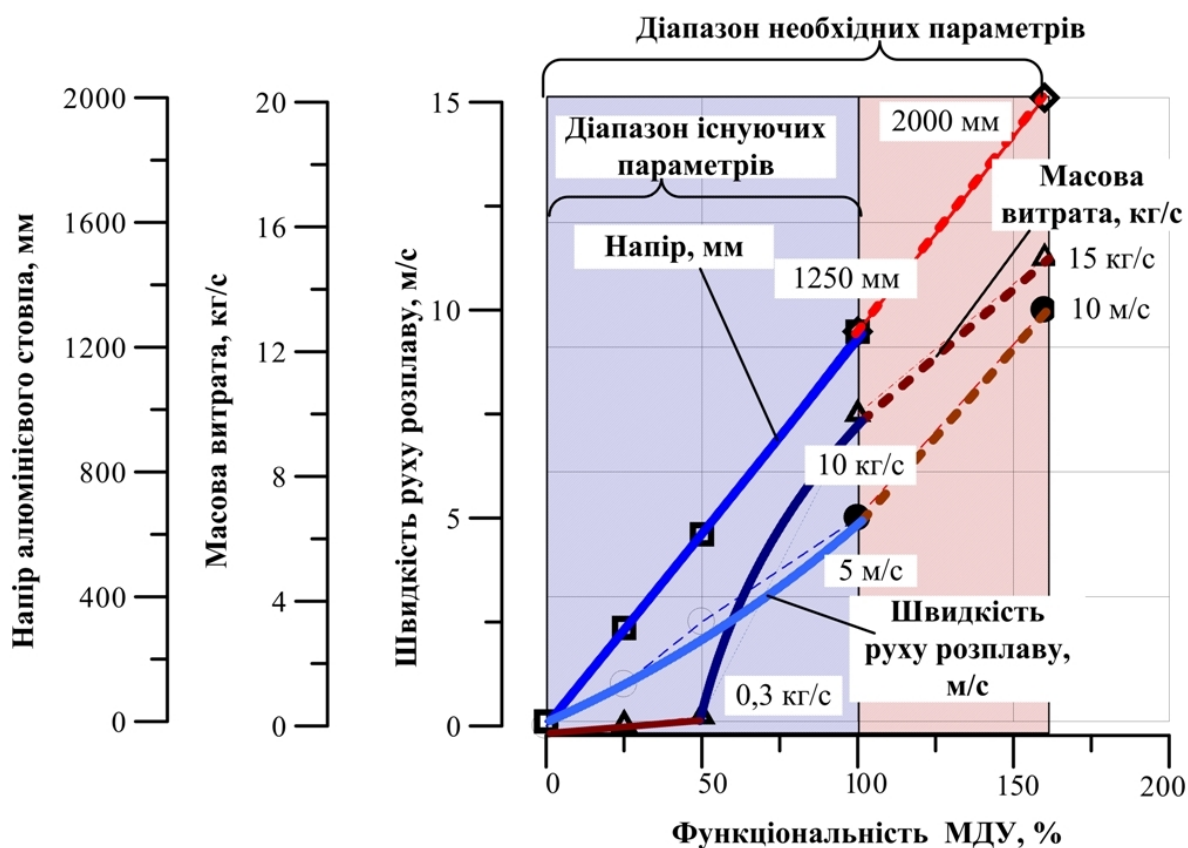


Рис. 1.5. Відповідність характеристик МДУ для алюмінію та його сплавів вимогам сучасного ливарного виробництва (функціональність МДУ, %)

В рамках даної роботи розглянуто багатofункціональну ливарну магнітодинамічну установку для алюмінієвих сплавів МДН-6А (рис. 1.6) [16], яка являє собою роздавальну індукційну каналну піч з електромагнітної видачею металу за допомогою МДН-насоса, яку можна застосовувати в цехах серійного та масового виробництва виливків (основні характеристики див. у табл.1.2).

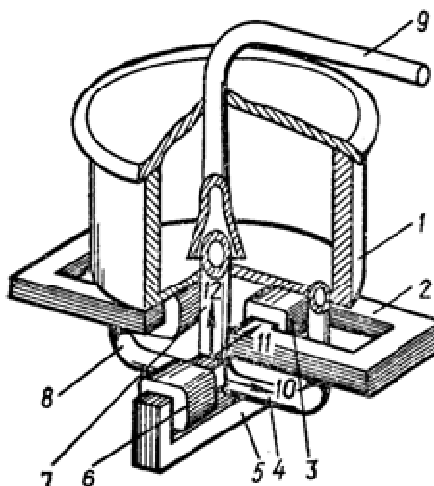


Рис. 1.6. Магнітодинамічна установка МДН- 6:

1 – тигель; 2 – магнітопровід індуктора; 3 – обмотка індуктора; 4 та 8 – бічні канали; 5 – магнітопровід електромагніта; 6 – обмотка електромагніта; 7 – центральний канал; 9 – знімний металопровід; 10 – напрямок електричного струму; 11–напрямок магнітного поля; 12 – напрямок електромагнітної сили.

Вищенаведена МДН-6А може бути використана в різних технологічних процесах ливарного виробництва: для заливки сплавів у кокіль, камеру пресування машин лиття під тиском, при заливці алюмінієвих сплавів у виливниці і для регульованої подачі металу в установку безперервного лиття заготовок. За допомогою неї можливо здійснювати:

- інтенсивний регульований індукційний перегрів розплаву при високому електричному та тепловому ККД;
- технологічне витримування або довготривале зберігання рідкого сплаву при заданих параметрах, проведення ряду операцій позапічної обробки, електромагнітне перемішування та розливання;

– принцип роботи та конструктивне виконання дозволяє незалежно, активно та плавно керувати тепловими і гідродинамічними параметрами розплаву, що знаходиться в установці та впливати на енергетичні витрати процесу розливання;

– забезпечує розливання металу з каналу індукційної одиниці – елемента конструкції установки з найбільш високою температурою розплаву, що дозволяє змінювати температуру розливання металу диференційовано та забезпечує можливість перегріву металу при видачі його в ливарні ковші або форми.

Враховуючи розмаїття операцій, що можливо здійснювати за допомогою цієї установки, можна вважати її магнітодинамічним міксером-дозатором алюмінієвих сплавів.

Для прикладу можна навести ливарний комплекс компанії Hertwich Engineering (рис. 1.7) [23, 24], де МДН-6А може замінити позицію 4 (як установку для позапічної обробки розплаву) з переносом до неї також частини операцій, що реалізуються за допомогою двокамерної печі 2.

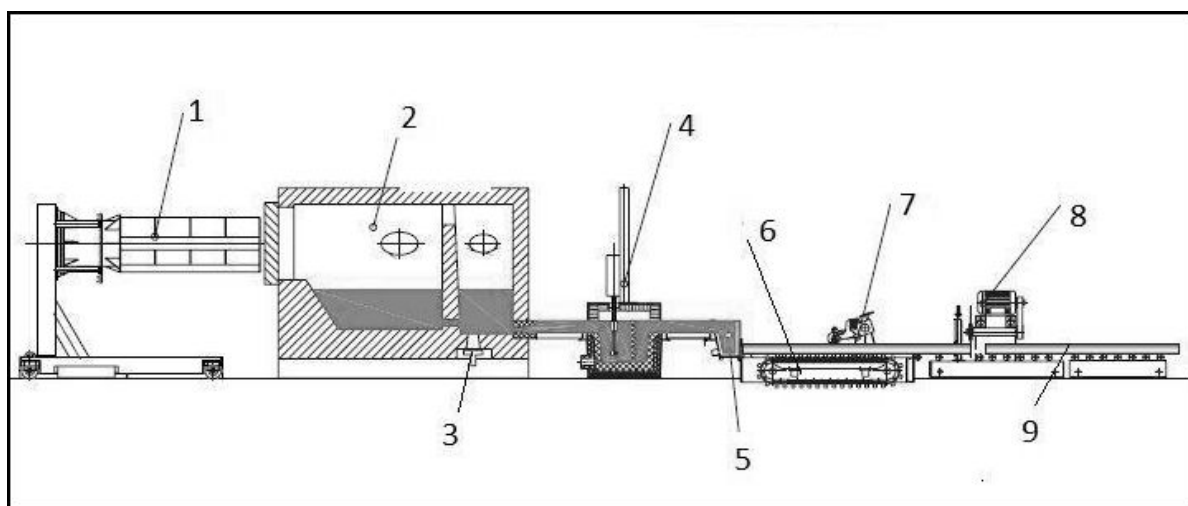


Рис. 1.7. Схема установки для горизонтального лиття злитків компанії Hertwich Engineering: 1 – завантажувальна машина; 2 – двокамерна піч; 3 – пориста діафрагма у подіні ливарної камери печі; 4 – установка для позапічної обробки розплаву; 5 – металоприймач з блоком кристалізаторів; 6 – транспортер; 7 – притискні ролики; 8 – летуча дискова пила; 9 – злиток.

В ливарному комплексі компанії Alu- Billets Production GmbH (рис. 1.8), МДН-6А можна застосувати в якості багатофункціонального ливарного комплексу, що може бути використано на позиціях 2, 5, 8 та 9 [24, 31].

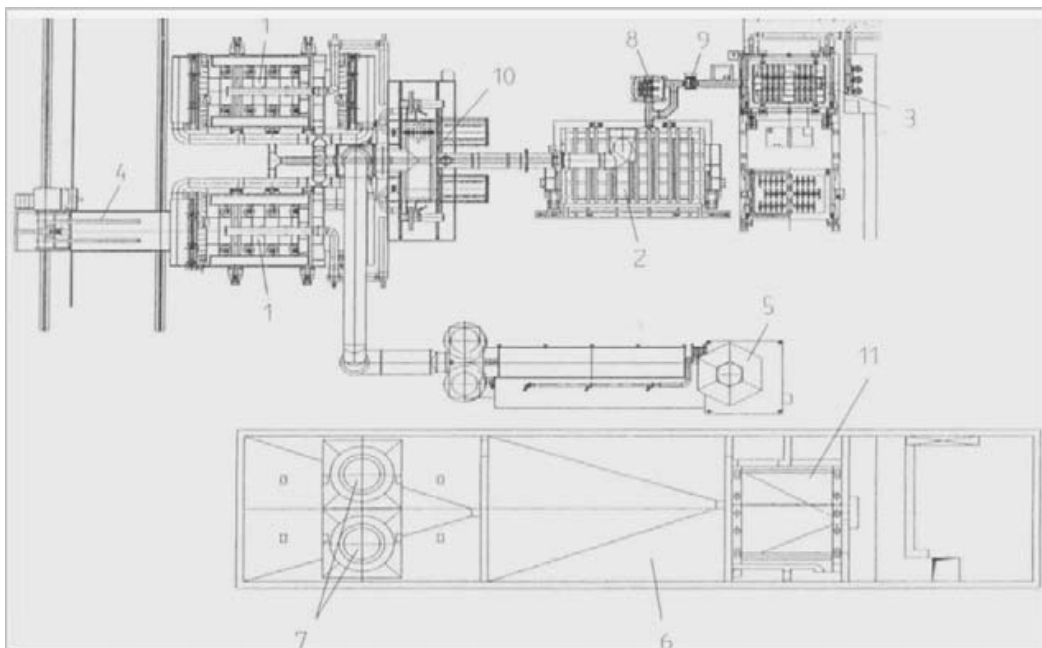


Рис. 1.8. Розміщення плавильно-ливарного агрегату компанії Alu-Billets Productions GmbH: 1 – плавильна піч; 2 – міксер; 3 – ливарна машина; 4 – машина для завантаження шихти; 5 – фільтр для очищення газових включень; 6 – басейн для охолоджуючої води; 7 – вежа для охолодження води; 8 – система позапічної дегазації розплаву SNIF; 9 – камера для фільтрування розплаву; 10 – відділення для збору шлаку.

За останні роки провідні виробники ливарного обладнання значно вдосконалили його, і на сьогодні процес виробництва литва на ливарних лініях відбувається в автоматичному режимі [31].

Вищенаведені приклади показують, що для забезпечення високого рівня конкурентоспроможності МДУ, для неї має бути розроблена система автоматичного управління (САУ), що буде вибудована на сучасних та принципово нових підходах та укомплектована сучасними зразками автоматичної та комп'ютерної техніки.

1.3. Систематизація існуючих способів контролю та управління технологічними процесами обробки та розливання у МДУ

Технологічний процес отримання якісного алюмінієвого лиття у сучасному ливарному виробництві потребує контроль якості розплаву безпосередньо перед його подачею у металоприймач (піщана форма, кокіль, проміжна ємність пресформи, тощо), температури, масової витрати при заливанні, тиску та керування цими параметрами за технологічно заданими алгоритмами.

Зокрема, контроль якості розплаву може здійснюватися декількома способами: відбором проб для експрес-аналізу, проб для визначення технологічних та ливарних властивостей (рідкотекучість, горячеломкість, фізико-механічні властивості, вміст неметалевих включень, тощо) та спеціальними методами діагностики структурного стану рідкого сплаву. Серед них лишаються актуальними методи, що дозволяють оцінити параметри якості розплаву безпосередньо у металургійно-ливарному агрегаті без відбору проб. Особливо це важливо для раціонального використання МДУ у серійному та багатосерійному виробництві, з огляду на те, що вона є безперервно працюючим агрегатом.

Безперервне вимірювання, контроль та регулювання температури у МДУ здійснюється з використанням датчика температури (термопари), що занурюється в розплав та термоконтролеру, що може працювати у дискретному режимі чи за законами пропорційно-інтегрально-диференціального регулювання (ПІД-регулювання).

Управління режимами нагрівання алюмінієвого розплаву у Ш-подібному індукційному каналі МДН-6А здійснюється у напіваавтоматичному або ручному режимах за рахунок варіювання напруги, що подається на обмотки індукторів, а у період зберігання – шляхом вмикання/вимикання одного з індукторів.

При розливанні чи позапічній обробці управління здійснюють переважно у ручному і у деяких випадках напіваавтоматичних режимах. Зокрема, система електроживлення індукторів установки виконана у вигляді понижуючих п'ятиступеневих трансформаторів із електроконтактною комутацією з дискрет-

ністю 12% від 40 до 80 В на кожен з них. Фактично існуюча система живлення індукторів працює у дискретному режимі, не реалізує плинного пропорційного регулювання і перевантажена електрокомутаційним обладнанням. Перспективою, з точки зору енергозощадження та реалізації безперервного регулювання і підтримання температури розплаву на заданому рівні, є сучасний тиристорний регулятор напруги.

Вибір і встановлення параметрів нагрівання алюмінієвого розплаву в МДУ здійснюється, як і в аналогічному обладнанні сучасного ливарного виробництва, відповідно до фактичної маси розплаву, що міститься у тиглі. При цьому для типового алгоритму підтримання температури розплаву в МДУ за принципом вмикання/вимикання одного з індукторів, вибір напруги на постійно працюючий індуктор встановлюється експериментально та повсякчас підлягає декільком етапам коригування, в залежності від маси розплаву (мінімальний рівень, середній та повний тигель). Напруга, яка подається на другий індуктор, встановлюється на тому ж рівні, що і на перший, а це іноді призводить до перегрівання розплаву вище заданої температури більш ніж на 50 °С, внаслідок чого можуть виникати порушення технологічного циклу.

Реалізація дискретного та безперервного розливання, коли у якості параметру для контролю використовується маса розплаву m та її зміна у часі dm/dt , стає більш перспективною із використанням ваговимірювальних пристроїв [32]. Це дає можливість контролювати не тільки дозування порції розплаву Δm із високою точністю та заданою масою m_0 , але й здійснювати контроль і регулювання параметрів (Q , t) та режимів розливання. Особлива увага приділяється масовій витраті, як технологічному параметру.

Серед широко застосовуваних вимірювальних пристроїв у ливарному виробництві відомі такі як: витратоміри (безконтактні), рівнеміри (контактні, безконтактні, оптичні тощо). Однак, оснащення ливарного обладнання спеціальними датчиками та пристроями контролю масової витрати може призвести до значного підвищення ціни обладнання. В цілому, йде мова про створення на

базі датчиків ваговимірювального пристрою систем динамічного контролю зміни маси у часі, температури у часі і т. ін.. Ці підходи є основою для розробки сучасних систем автоматичного управління (САУ) із використанням мінімальної кількості датчиків контролю основних параметрів.

Серед головних вимог, є забезпечення підтримки заданої температури розплаву та режимів перемішування при коригуванні його хімічного складу, управління масовою витратою рідкого металу при його електромагнітному розливанні за різноманітними технологіями лиття (відкритим струменем, під низьким регульованим електромагнітним тиском, тощо).

Для комплексного управління роботою МДУ, таке обладнання оснащується системами вагового контролю для здійснення безперервного вимірювання маси рідкого металу у тиглі установки, зміни її кількості у процесі електромагнітної подачі у ливарну форму [32].

МДУ додатково містить засоби автоматичного управління видачею заздалегідь заданої порції рідкого металу і в разі необхідності – виконання програми зміни масової витрати (подачі металу Q (кг/с) – згідно ГОСТ 26354 – 84 [10]).

Робота МДУ, як правило, носить циклічний характер і складається з двох основних стадій – власне заливання та витримування металу між заливками. Цикл характеризується двома параметрами: абсолютної t_z і відносної $\overline{t_z}$ тривалістю стадії заливки:

$$\overline{t_z} = t_z / t_u \quad (1.1)$$

де t_u – тривалість одного циклу.

Відмінності та вимоги до МДУ визначаються особливостями технології лиття: в одних випадках необхідна видача точної порції металу при можливих коливаннях в певних межах величини його подачі (лиття під тиском, заливка в проміжні пристрої), в інших – точне виконання програми зміни швидкості за-

ливки (безперервне лиття), а в більшості необхідне дотримання обох цих вимог (лиття в кокіль, піщані форми та ін.).

Особливість МДУ полягає в тому, що в зв'язку з можливістю ефективного управління тепловими та гідродинамічними параметрами металу в каналі більшість з цих вимог виконується за допомогою самої МДУ, без залучення додаткових пристроїв і пов'язаних з цим фінансових витрат. Це підвищує компактність, надійність і економічність установки, однак ускладнює управління її роботою.

МДУ належить до напірних установок, у яких металопровід – напірний (обмежений замкнутими стінками) трубопровід [33].

Розглянемо загальну схему процесу заливання на прикладі установки МДН-6 з найбільш простим – прямим крутовисхідним – металопроводом (див. рис. 1.6). Стадія заливки складається з наступних етапів: I – запуск (від моменту подачі сигналу на заливку до моменту початку підйому металу в металопроводі); II – заповнення металопровода; III – керований злив (видача металу при включеній в режим заливки МДУ); IV – інерційний злив (видача металу при повністю відключеній або переведеній у режим витримування МДУ); V – зворотній злив розплаву з металопровода у тигель МДУ (у т. ч. згасання гідравлічних коливань відносно положення рівноваги).

Переважно у більшості випадків течія металу в металопроводі МДУ має нестационарний характер. У таких установках тривалість перехідних гідравлічних процесів значно більше, ніж в пристроях, що мають одну електромагнітну систему. Якщо не враховувати деякі МГД-чинники особливості течії металу, то в першому наближенні заливку можна розглядати як чисто гідравлічний процес [34].

Аналітичний опис цього процесу на підставі рішення рівнянь гідродинамічної рівноваги рідини виконується при допущенні, що потік металу повільно змінюється по всій довжині металопровода, а втрати напору на гідравлічний опір визначаються за формулами для усталеного руху в квадратичній області:

$$A(x)\ddot{x} + B(x)\dot{x} + C(x) - p_h = 0, \quad (1.2)$$

де x – координата течії, що відраховується від початкового рівня металу в ємності; $\dot{x}, \ddot{x}$ – відповідно швидкість і прискорення металу в ємності. Перший член рівняння являє собою втрати тиску на подолання інерції спокою, другий – втрати тиску на створення швидкісного напору, третій – втрати тиску на створення гідростатичного напору, четвертий – тиск, що розвиває МДУ.

Доза – маса металу G , злитого з МДУ за один цикл, - складається з G_y – маси металу, злитого в процесі керованого зливу (етап III), і G_i – маси металу, злитого в процесі інерційного зливу (етап IV) [35].

$$G = G_y + G_i \quad (1.3)$$

При трохи зміниться параметрів відхилення i -тої дози G_i від заданої G_0 може бути визначено за формулою [36]:

$$\begin{aligned} d_{Gi} &= \frac{G_i - G_0}{G_0} \approx \frac{G_i^2 - G_0^2}{2G_0^2} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{G_i}{G_0} \right)^2 - 1 \right] = \\ &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_{ci} t_i}{k_{c0} t_0} \right)^2 \frac{z_{h0} p_{ei} (1 - k_{hi})}{z_{hi} p_{e0} (1 - k_{h0})} \right] - \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Позначаючи відносні зміни за i -тий цикл коефіцієнта $k_c - d_{ci}$, тривалість заливки $t_y - d_{ty}$, приведенного гідравлічного опору $z_h - d_{zi}$, електромагнітного тиску $p_e - d_{pi}$, коефіцієнта $k_h - d_{hi}$, отримуємо формулу для визначення помилки дози:

$$\begin{aligned} d_{Gi} &= \frac{(1 + d_{ci})^2 (1 + d_{ti})^2}{2(1 + d_{zi})} \left(1 + \frac{d_{pi} - k_h d_{hi}}{1 - k_h} \right) - \frac{1}{2} \approx \\ &\approx d_c + d_t - \frac{1}{2} \left(d_z - \frac{1}{1 - k_h} dp + \frac{k_h}{1 - k_h} d_h \right) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Аналіз цього виразу показує, що чим менше k_h , тим менше – за інших рівних умов – помилка дози, тобто зі зменшенням відносної величини гідростатичного напору МДУ працює більш стабільно. Якщо створюваний тиск незмінний, то по мірі витрати металу з тигля точність дозування знижується.

З точки зору організації контролю і управління процесом розливання, до основних методів дозування відносять: 1 – вагове дозування; 2 – об'ємне дозування; 3 – дозування за часом; 4 – дозування за імпульсом тиску; 5 – дозування виплеском.

Нижче коротко описано особливості та переваги цих методів (згідно з вищенаведеною нумерацією) [34]:

1. Є одним з найбільш точних і універсальних методів. МДУ або приймальний пристрій встановлюють на вагах необхідної вантажопідйомності та високої чутливості. Управління заливкою здійснюється при зміні маси МДУ або приймального пристрою на задану величину. Похибка дозування залежить від точності та швидкодії вагів, а також від зміни величини інерційного зливу.

2. Стосовно до МДУ цей метод зводиться до контролю зміни рівня металу в тиглі, проміжному пристрої або ливарної формі. Точність методу визначається чутливістю датчиків і залежністю між сталою заданою масою дози і поточним рівнем розплаву в тиглі. Чим більше це співвідношення, тим вища точність і менш жорсткі вимоги до датчиків. Тому дозування за зміною рівня металу в тиглі МДУ застосовується тільки для заливки великих доз з порівняно невеликих тиглів (на 1-5 виливків) при відсутності високих вимог до точності дози.

3. Даний метод найбільш поширений в ливарному виробництві завдяки простоті і невисокої вартості апаратури, легкості її переналагодження і регулювання. Однак через непрямий характер вимірювання дози цей метод найменш точний і найбільш чутливий до зміни умов заливки. Застосування засобів електронної автоматики дозволяє врахувати все більше число змінних факторів і підвищити точність дозування за часом. У ряді випадків, особливо при вироб-

ництві дрібного лиття на швидкодіючих ливарних машинах, цей метод єдино можливий.

4. Суть методу полягає в тому, що задається не час дозування, а імпульс тиску:

$$A = \int_0^t p_H dt, \quad (1.5)$$

і керований злив закінчується тоді, коли поточне значення цього імпульсу A_t стовітсь рівним A . Для дозування при постійному тиску ця умова має вигляд:

$$p_i t_i = p_0 t_0 \quad (1.6)$$

Перевагою методу, у порівнянні з методом дозування за часом, є можливість урахування короткочасних коливань тиску (мережевої напруги) в процесі заливки. Стосовно до МДУ метод має додаткову перевагу – зручність вимірювання цієї величини. Тому при наявності коливань напруги доцільно замінити завдання часу дозування завданням імпульсу тиску. Для врахування імпульсу тиску в різних системах автоматизації можуть бути застосовані спеціальні електронні пристрої [37-39].

5. Суть цього способу полягає в тому, що електромагнітний насос створює напір h_{cm} менший, ніж гідростатичний напір h_{zl} , до рівня зливного отвору металопровода. Тому злив з дозатора відбувається тільки в той період, коли метал за рахунок запасу кінетичної енергії, отриманої при розгоні, піднімається вище зливного отвору h_{max} , а потім опускається до h_{cm} [40]. Перевагою методу є максимальна простота управління: доза визначається тільки тиском, що розвивається МДУ. Метод особливо зручний для малих доз. До дозування виплеском близький метод дозування, коли тиск відключають в момент досягнення металом зливного отвору і весь слив металу відбувається за інерцією ($G_y = 0$) [41].

Загалом задача управління витратою металу при заливанні істотно ускладнює систему управління МДУ. Тому там, де це можливо, її вирішують збільшенням обсягу ливникової чаші форми до $(0,8-0,9) G / r_m$. При цьому МДУ видає в чашу всю дозу, а необхідні швидкості заповнення форми забезпечуються її ливниковою системою. Крім спрощення заливальної установки, такий метод підвищує продуктивність ливарних ліній, оскільки час заливки стає менше, ніж час заповнення форми [42].

Створена спеціалістами ФТІМС НАНУ магнітова установка, реалізує контрольований процес дискретного дозування розплаву (рис. 1.9) за методом від'єднання маси [43].

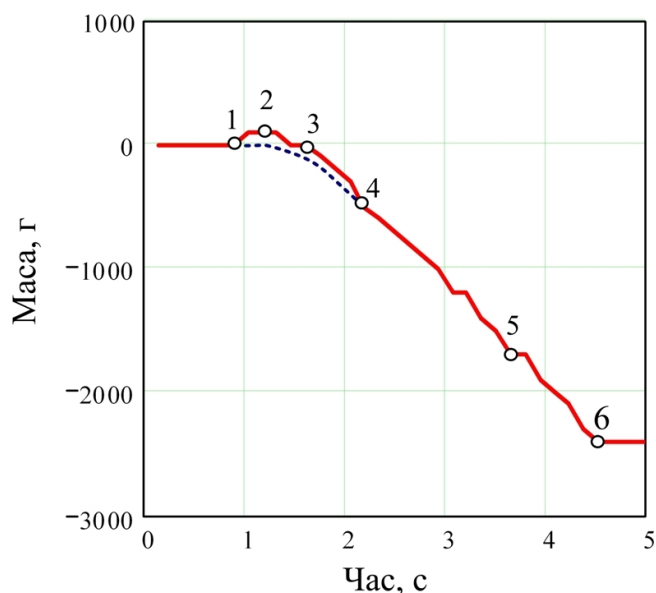


Рис. 1.9. Дозоване розливання порції $m_0 = 2 \text{ кг}$ алюмінієвого розплаву та характеристика від'єднання маси від маси МДУ при розливанні розплаву.

Магнітова установка (МВУ) реалізує наступні режими заливання в ливарні форми: традиційний режим заливання при постійній витраті розплаву з введенням випередження в програму дозування; двостадійний режим заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті у вихідній фазі дозування; режим дозування і заливання при постійній витраті розплаву з гальмуванням у

вихідній фазі дозування; режим дозування і заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті та гальмуванні у вихідній фазі дозування.

При реалізації керованого електромагнітного дискретного розливання алюмінієвих розплавів, наприклад за технологіями лиття відкритим струменем [16, 44], лиття під низьким електромагнітним тиском [25, 26], та з використанням принципу РОЗЛИВ-ЛЕМТ [24, 26, 28], частина питань безперервного контролю і їх використання для автоматичного управління процесами розливання вже вирішена.

До базових процедур в САУ приготування/обробки закладені стандартні, часто використовувані на практиці технології: дегазація, фільтрування, модифікування, легування, плавлення, термочасова обробка (ТЧО) тощо.

З огляду на ієрархію побудови САУ МВУ, система відпрацьовує процеси регулювання режимів розливання за статичним принципом, без врахування неконтрольованих інерційних процесів розливання, що мають місце перед початком у процесі та кінці розливання. Серед таких є: початковий рівень осциляції рівня металу у МДУ (який дає похибку у 1-2 кг), осциляції напірних та витратних характеристик (від 5 до 20% від номінальної величини), та їх впливу на вихідний етап дозованого розливання. Вказані осциляції напірних характеристик є результатом виникнення та взаємодії вихрових та циркуляційних структур у робочій зоні МДУ, що здійснюють суттєвий вплив на гідродинамічні та напірні характеристики. Особливо відчутній вплив (від 5 до 10% від номінального створюваного електромагнітного тиску) дії таких вихрових структур спостерігається при розвиненні лінійних швидкостей руху розплаву від 1 до 3 м/с, а при досягненні максимальних значень електромагнітного тиску осциляції напірних характеристик досягають 10-20% напору (від 20 до 60 мм стовпа алюмінієвого розплаву).

Картина осциляції напірних, та як результат витратних характеристик, у випадку для конкретної геометрії та особливостей роботи Т-подібної (трійникової) робочої зони МДН-6А, досліджена [45], та складає для перших 3-х гармонік 1– 0,4-0,8 Гц; 2- 2,5-3 Гц; 3-4,4 Гц. Закономірність частотно-амплітудних

характеристик спостерігається за лінійним законом в залежності від зміни складових електромагнітної сили F_{em} , щільності струму j та індукції магнітного поля B .

Для здійснення підтримки на заданому рівні та стабілізації витратних характеристик МДУ, незалежно від зміни параметру рівня металу у тиглі, який власне формує перепад між наявним рівнем металу ($H_{мет}$) та місцем подачі розплаву у ливарну форму ($H_{зал}$), спеціалістами ФТІМС НАН України була розроблена та впроваджена автоматична система стабілізації витратних характеристик в залежності від рівня металу у тиглі.

Сутність реалізації регулювання параметру масової витрати за вказаною розробкою полягає у безперервному визначенні фактичного значення рівня металу у тиглі $H_{мет-поточ} = f(m_{мет})$, визначенні фактичного перепаду рівнів між поверхнею металу у тиглі та власне рівнем нижнього торця зливного жолобу металопроводу $DH = H_{зал} - H_{мет} \equiv DP_{ем-тиску}$ (1.7).

Відповідно до зміни рівня металу у тиглі МВУ та створюваного МДУ напору, масова витрата розплаву що зливається із металопроводу:

$$Q(H) = r \cdot e_{\epsilon} \cdot e \cdot j \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot (H - L_{мет-пров} + h_{ур})^{\frac{3}{2}}, \quad (1.7)$$

де $Q(H)$ - масова витрата розплаву, що зливається із металопроводу, як функція напору (H), створюваного у МДУ, кг/с; $S_{зливу}$ - площа зливного носка металопроводу, m^2 ; e_{ϵ} - коефіцієнт вертикального стиснення потоку; b - ширина зливного носка, м; e - коефіцієнт бокового стиснення потоку, при $h/b \leq 1$, $e = 0.85 - 0.9$ [36]; j - коефіцієнт швидкості ($j = 0.97$).

Контроль фактичного рівня металу у даному випадку реалізується за допомогою прогресивного методу з використанням ваговимірювальної системи (ІВВС), що визначає масу розплаву у тиглі та каналах МДУ та здійснює перерахунок її значення у рівень розплаву.

У якості системи управління напругою за даним способом використані стандартні системи регулювання напруги, що реалізують дискретне підвищення чи зменшення напруги із дискретом 6%. Особливістю розвитку та удосконалення розробленої системи може бути реалізація процесу плавного пропорційного регулювання напруги, що подається на обмотки електромагніту, (наприклад із тиристорного регулятора напруги), зокрема із застосуванням системи визначення динаміки зміни контрольованих параметрів (маси розплаву, рівня металу у тиглі, температури, напруги у промисловій електромережі, тощо).

Узагальнюючи вищевикладене, для розробки та вдосконалення існуючих систем автоматичного управління технологічними параметрами роботи МДУ при реалізації процесів лиття чи обробки розплавів з їх використанням, напрямок подальших досліджень спрямований на відтворення законів ПД-регулювання, та встановлення раціональних напрямків щодо здійснення підтримки на заданому рівні та регулювання сталих у часі величин.

1.4. Порівняння різних типів ливарного обладнання та принципові підходи щодо підвищення ефективності функціонування МДУ

В умовах ливарного виробництва розливання металевих сплавів у ливарні форми є дуже відповідальним технологічним процесом. Розплавлений метал готують до розливання періодично або безперервно, при цьому важливим чинником є контроль та регулювання температури розплаву для забезпечення компенсації теплових втрат при його транспортуванні та для дотримання технологічного режиму заливки форм.

У загальному випадку розплав з плавильного агрегату заливають в ківш транспортного пристрою і подають в заливочно-дозуючий пристрій, а з нього – в ливарну форму. Управління процесом заповнення форми може здійснюватися вручну або автоматично за допомогою регулятора того чи іншого типу.

У зв'язку з впровадженням високопродуктивних формувальних машин різко зросла швидкість ливарних конвеєрів. Тому ручне дозування розплаву на

формувальних лініях, що видають 5-7 форм/хв, є складним, небезпечним та шкідливим для здоров'я заливальника процесом. Крім того, в цьому разі якість лиття багато в чому залежить від людського фактора, наприклад, неправильний швидкісний режим заливки може спричинити дефекти лиття.

Автоматизація процесу дозування та заливки розплаву у форми дозволяє знизити трудомісткість процесу при повному усуненні ручної праці, скоротити брак і підвищити якість виливків, зменшити кількість обслуговуючого персоналу і ймовірність нещасних випадків, підвищити ступінь використання обладнання.

В сучасних ливарних цехах з високим рівнем механізації і автоматизації розплав заливують за допомогою автоматизованих заливочно-дозуючих пристроїв, принцип дії яких заснований на об'ємному, часовому або ваговому методах дозування.

Як зазначалося вище, згідно з [9], за способом видачі розплаву заливально-дозувальні пристрої поділяють на електромеханічні, пневматичні, електромагнітні та комбіновані. Порівняння їх функціональних можливостей наведено у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Порівняння різних типів обладнання для приготування та розливання сплавів

Тип обладнання	Простота конструкції	Можливість підігріву розплаву	Можливість додаткової позапічної обробки	Перемішування розплаву	Точність дозування	Можливість використання додаткових технологій
Електро-механічне	«++»	«—»	«+»	«—»	«++»	«—»
Пневматичне	«+»	«+»/ «—»	«+»	«—»	«++»	«+»
Магніто-динамічне	«+»	«++»	«++»	«++»	«++»	«++» [*]

Примітка: «*» - лиття ЛЕМТ, РОЗЛИВ-ЛЕМТ.

Очевидно, що магнітодинамічні установки, попри певне ускладнення конструкції порівняно з конкурентами, мають ряд принципових та суттєвих переваг. Подальший розвиток такого обладнання, спрямований на поліпшення ефективності його роботи, може ґрунтуватися на двох основних підходах, що можуть бути реалізовані як окремо, так і у поєднанні:

- модернізація конструкції МДУ і її окремих систем, геометрії каналу, робочої зони тощо;

- систематизація даних досліджень гідравлічних та теплових процесів, що мають місце у МДУ при її роботі, їх аналіз та побудова імітаційних моделей, які б з високим коефіцієнтом адекватності відтворювали МГД-процеси в залежності від параметрів роботи електромагнітних систем та фізико-механічних властивостей розплаву.

Поряд з тим, що перший напрямок зумовлює ряд складних експериментальних досліджень, що супроводжуватимуться випробовуванням відповідності інженерних розрахунків та особливо придатності до використання у основних технологіях лиття алюмінієвих сплавів, другий має менш складний шлях.

Систематичний аналіз процесів, що мають місце у досить складній електротехнологічній одиниці – МДУ, проводився неодноразово, як у відповідності до режиму роботи МДУ та її електромагнітних систем, так і відносно технологій нагрівання, витримування, дозування тощо. Але такий аналіз містив експериментальне поетапне дослідження закономірностей роботи МДУ у залежності від параметрів живлення індукторів та електромагніту та мав виключно інтерполяційний характер. За умов збільшення питомих величин магнітної індукції, густини струму, зміни геометрії та конструкції Ш-подібного каналі та р. з., такий аналіз і така модель вже не адекватна, та не підлягає екстраполяції.

Особливо це вагомо при розробці технологій лиття як відкритим струменем, так і при литті під низьким електромагнітним тиском, а також при розробці нових поколінь магнітодинамічних установок із суттєво підвищеними технічними показниками.

З огляду на відсутність діючих засобів контролю фізичних параметрів роботи МДУ, окрім електричних, розробка адекватної математичної та комп'ютерної моделі неможлива, оскільки не охоплено ряд інших фізичних процесів, що мають місце у трійниковій р. з. та каналах МДУ.

Одним із етапів досліджень, які мають високу цінність та актуальність, є вивчення і систематизація розподілу магнітних силових ліній у міжполюсному проміжку електромагніта, що знаходиться у межах робочої зони, та власне розподіл густини струму в рідкометалевому провіднику за умов впливу скін-ефекту у поєднанні з геометрією робочої зони.

Поглиблене вивчення процесів розподілу магнітних полів у трійниковій робочій зоні МДУ у поєднанні із вивченням розподілу щільності індукованого струму, дозволить встановити закономірності генерування об'ємних електромагнітних сил, та власне на їх основі формування гідравлічної картини руху рідкого металу дозволить сформулювати подальші тенденції вдосконалення зони генерування електромагнітного тиску, та як результат оптимізувати роботу магнітодинамічної установки.

Оптимізація роботи трійникової робочої зони МДУ, на базі побудови математичної та комп'ютерної моделі, дозволить створити умови для усунення створення паразитарних вихрових гідродинамічних структур на околицях робочої зони та з гідродинамічної точки зору виключити створюваний у результаті додатковий гідродинамічний опір та фактор дестабілізації характеристик руху рідкого металу у системах каналів МДУ.

Така модель та науково-технологічні підходи відповідають перспективним напрямкам науково-дослідних робіт, спрямованих у першу чергу на створення електромагнітних систем, які дозволять забезпечити стабільні гідродинамічні характеристики роботи МДУ та підвищення з їх використанням параметрів створюваного у робочій зоні електромагнітного гідравлічного тиску і його стабілізації.

1.5. Висновки по розділу 1

На підставі проведеного аналізу існуючих технологій і обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів, можна узагальнити наступне:

1. Зростаючі вимоги до якості алюмінієвого лиття при одночасному забезпеченні підвищення техніко-економічних показників суттєво ускладнюють виробництво в умовах застосування традиційних підходів і агрегатів як щодо технологічної побудови процесу, так і з огляду на наявні функціональні можливості окремих пристроїв.

2. Стосовно систем управління зазначеними технологічними процесами слід враховувати не лише необхідність використання сучасної апаратної бази і контрольно-вимірювальних приладів, але й реалізовувати нові підходи для здійснення контролю, регулювання та керування окремими операціями і агрегатами та комплексом обладнання в цілому.

3. Стає очевидним, що в сучасних умовах промислового виробництва алюмінієвого лиття є постійно зростаюча затребуваність у новітніх багатофункціональних агрегатах, оснащених сучасними засобами контролю і управління технологічними процесами.

4. Використання енергії електромагнітних полів для впливу на процеси тепломасопереносу в рідких алюмінієвих сплавах з метою поліпшення їх якості є поширеною світовою тенденцією. В такому разі забезпечується малоінерційна безконтактна передача суттєвої термосилової дії безпосередньо в об'єм розплаву, при цьому такий вплив легко контролювати та керувати ним.

5. Поряд з відомими агрегатами для одержання алюмінієвого лиття особливе місце займають магнітодинамічні установки та міксери-дозатори конструкції ФТІМС НАН України. Більш того, особливості конструкції та широкий діапазон технічних характеристик такого обладнання надає йому в багатьох випадках пріоритетне місце в разі необхідності поєднання в одному агрегаті операцій з приготування та розливання сплаву, а також можливості чинити силову дію під час формоутворення та кристалізації литих заготовок.

6. Накопичений досвід розробки, впровадження та тривалої експлуатації магнітодинамічного обладнання показав, що для забезпечення сучасних виробничих вимог та можливостей для більш ефективної реалізації наявного широкого спектру функціональних можливостей воно потребує удосконалення конструкції і, передусім, системи управління.

Виходячи з вищенаведеного, метою дисертаційної роботи є створення наукових і технологічних засад сучасних систем управління основними робочими параметрами ливарного магнітодинамічного обладнання для алюмінієвих сплавів для підвищення його ефективності та поліпшення техніко-економічних показників процесу одержання лиття.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

7. Систематизувати дані щодо експлуатації магнітодинамічних установок (МДУ) та оцінити сучасний рівень їх конкурентоспроможності у порівнянні з ливарно-металургійним обладнанням аналогічного технологічного призначення.

8. Ідентифікувати основні проблеми в роботі МДУ, пов'язані з особливостями їх конструкції та інтеграцією до відповідних технологічних процесів і комплексів обладнання.

9. Адаптувати існуючі або розробити нові методики для дослідження основних технічних параметрів МДУ при роботі в різних технологічних режимах приготування та розливання алюмінієвих сплавів (як окремих операцій, так і їх комплексу).

10. З виростанням комплексних досліджень на моделях та в умовах натурного експерименту, вивчити особливості протікання електричних, електромагнітних, теплових, гідродинамічних процесів у МДУ для алюмінієвих сплавів, встановити існуючі взаємозалежності і раціональні інтервали основних параметрів такого обладнання.

11. На основі отриманих експериментальних даних, перевірити доцільність запропонованих концептуальних підходів і адекватність розроблених моделей. Запропонувати принципові рішення щодо розробки новітньої системи

автоматичного управління (САУ) роботою МДУ для алюмінієвих сплавів, забезпечити її апаратне втілення та інтеграцію до затребуваних ливарних технологій.

12. Перевірити на дослідній МДУ ефективність запропонованих заходів та розроблених рекомендацій.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ МДУ

2.1. Лабораторна установка та її підготовка до експериментальних досліджень

В рамках даної роботи в якості об'єкта досліджень вивчалась дослідна багатофункціональна ливарна магнітодинамічна установка для алюмінієвих сплавів типу МДН-6А. Предметом досліджень були її основні технічні характеристики та технологічні режими роботи, що чинять вплив на якісні та економічні одержання литої металопродукції з алюмінієвих сплавів [13, 16, 46].

Магнітодинамічна установка МДН-6А відноситься до ливарного магнітодинамічного обладнання для приготування та розливання алюмінієвих сплавів, за допомогою якого можна реалізувати комплекс фізико-хімічних дій на металевий розплав, зокрема:

- накопичення розплаву, виплавленого у плавильній печі;
- регульований індукційний нагрів рідкого металу та його перемішування під дією електромагнітних сил;
- рафінування від газових та неметалевих включень;
- модифікування, у т. ч. фізичне, тобто без застосування модифікуючих добавок;
- легування;
- розливання (дозоване або безперервне).

Успішна реалізація всіх цих операцій вимагає суворого дотримання температурних, часових та гідродинамічних параметрів, які можуть суттєво відрізнятися для різних технологічних операцій.

В деяких випадках установка може бути використана як міксер для рідкого металу і приготування спеціальних марок алюмінієвих сплавів.

Виходячи зі світового досвіду розробки та експлуатації ливарного і металургійного обладнання аналогічного призначення, для створення системи автоматичного управління (САУ) основним інформативним параметром обрано масу, яка нерозривно пов'язана з контролем температури розплаву та його масовою витратою. Структурно-функціональна схема дослідної магнітовагової установки, основним елементом якої є МДН-6А, що оснащена системою контролю температури, маси та масової витрати відповідно до керуючих параметрів електромагнітних систем, наведена на рис. 2.1. [47, 48].

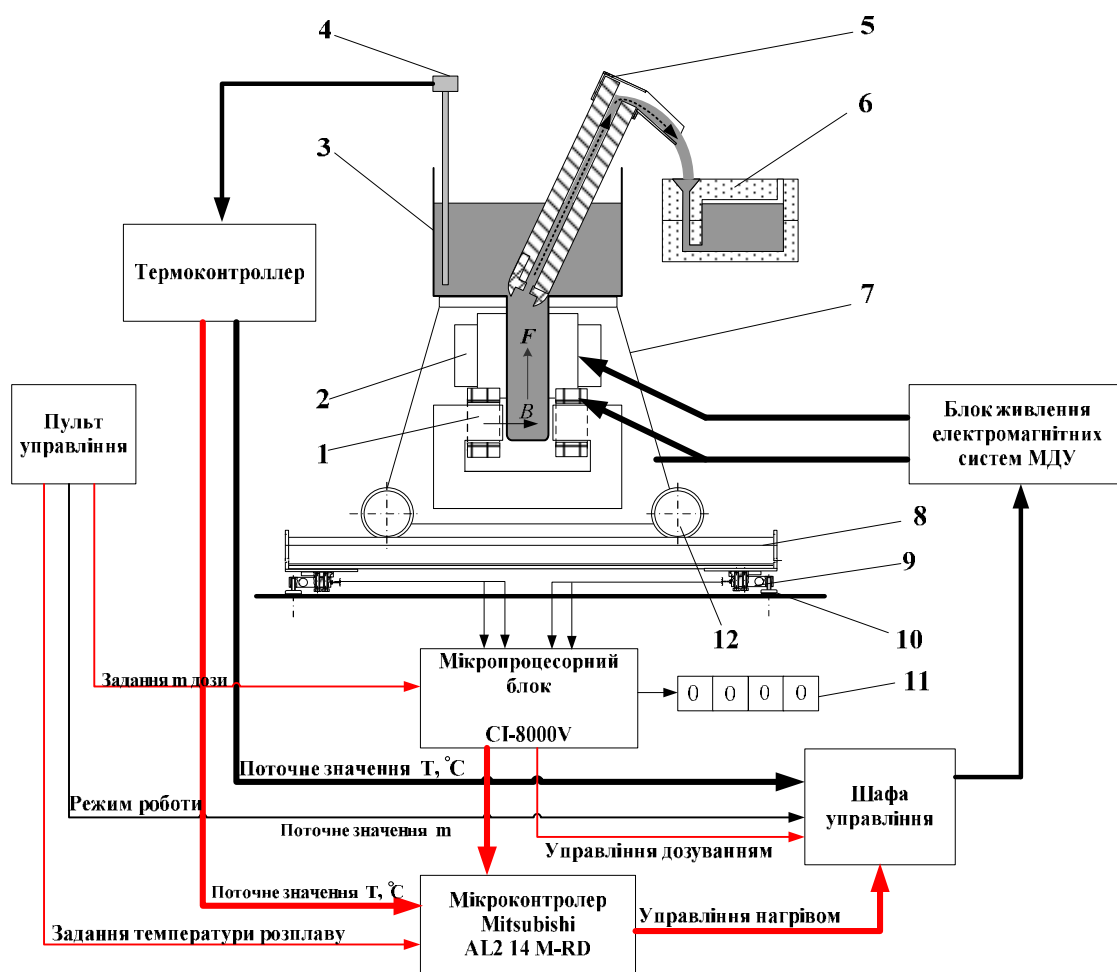


Рис. 2.1. Структурно-функціональна схема магнітовагової установки для дискретного дозування і заливки розплаву алюмінію в ливарні форми: 1 – електромагніт; 2 – індуктор; 3 – тигель установки; 4 – термопара; 5 – зливний жолоб; 6 – ливарна форма; 7 – корпус установки; 8 – вагова платформа; 9 – тензорезисторні датчики; 10 – ніжка-опора; 11 – цифровий індикатор маси; 12 – колісні пари

В корпусі, оснащеному двома колісними парами, розміщені індуктор, електромагніт, тигель з металопроводом, зливний жолоб. Корпус колісними парами встановлений на рейках, закріплених на вантажоприймальній ваговій платформі, що спирається на чотири силовимірювальних тензорезисторних датчики з консольними пружними елементами подвійного вигину. Сумарне номінальне навантаження датчиків складає 8 т. Датчики закріплені на жорсткій ніжці-опорі, в якій передбачена можливість переміщення у вертикальній площині по осі, перпендикулярній подовжній осі колісних пар корпусу. Така конструкція магнітовагової установки забезпечує заливку розплаву при будь-якому розташуванні заливального отвору ливарної форми 6 за рахунок переміщення установки в горизонтальній площині по двох координатах. Виходи датчиків через комутаційний блок підключені до мікропроцесорного блоку, виходи якого пов'язані з мікроконтролером, цифровим індикатором маси та шафою управління, виходи якої підключені до блоку живлення електромагнітних систем магнітодинамічної установки (МДУ) (електромагніту та індуктора). Контроль температури розплаву в тиглі здійснюється за допомогою термопари, підключеної до термоконтролера, виходи якого підключені до мікроконтролера та шафи управління. Виходи пульта управління підключені до мікропроцесорного блоку, мікроконтролера і шафи управління. Технічні характеристики установки наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Основні технічні характеристики МДН-6А

Місткість по алюмінієвому розплаву, кг	60-630
Максимальний електромагнітний тиск, кПа	25-30 (1200мм алюмінієвого стовпа)
Швидкість потоку, кг/с	0,3-10
Швидкість нагрівання, °C/хв.	3-9
Температура розплаву, °C	600-850
Спосіб дозування за:	за часом, об'ємом, вагою, витратою
Маса дози, кг	1-400
Похибка дозування, %	2±0,5 (для доз 1-50кг)

Порожнина установки МДН-6А сформована кількома шарами вогнетривкої футеровки (рис. 2.2). Параметри окремих шарів представлено у табл.2.2.

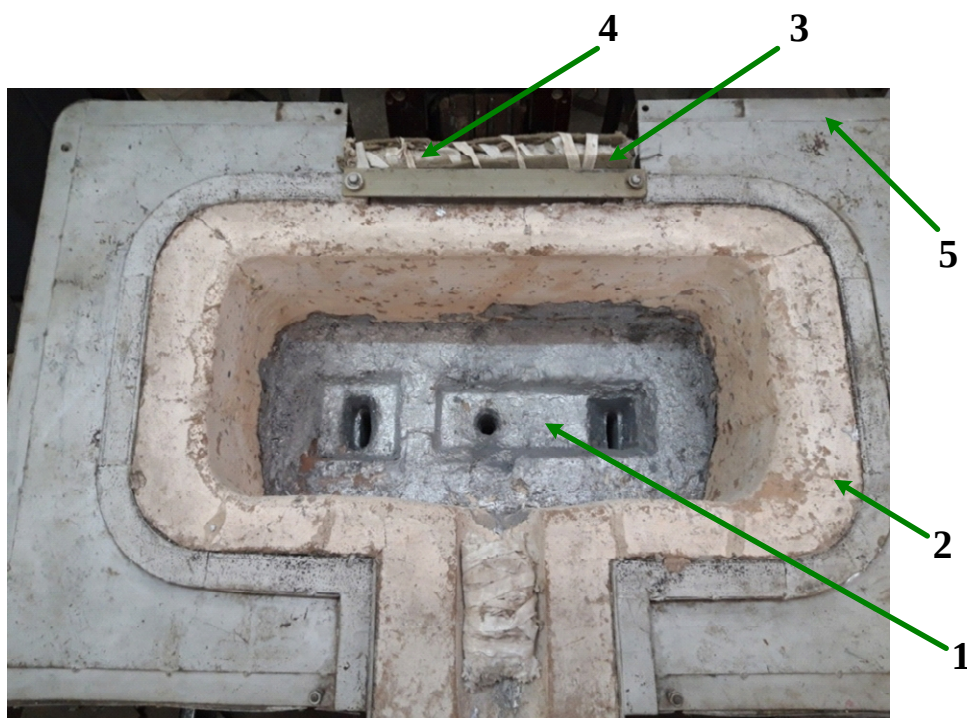


Рис. 2.2. Схематичне зображення шарів футеровки тигля установки МДН-6А: 1 – вставка з синтетичного калієвого фторфлогопіту для формування порожнини каналу; 2 – жаростійкий бетон; 3 – базальтовий картон; 4 – каолінова вата; 5 – конструкційна сталь.

Табл. 2.2

Параметри шарів футеровки (див. рис. 2.2)

№ Шару	Шар футеровки	Товщина шару, м	Коеф.теплопроводності шару, Вт/(м·К)
1	Синтетичний калієвий фторфлогопіт	0,0015	1,24
2	Жаростійкий бетон	0,08	1,28
3	Базальтовий картон	0,006-0,007	0,18
4	Каолінова вата	0,19	0,127-0,147
5	Конструкційна сталь	0,0015-0,002	58

За допомогою установки МДН-6А можуть бути реалізовані наступні режими заливки сплаву в ливарні форми:

- 1– традиційний режим заливки при постійній витраті розплаву з введенням упередження в програму дозування;
- 2– двостадійний режим заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті у вихідній фазі дозування;
- 3– режим дозування і заливання при постійній витраті розплаву з гальмуванням у вихідній фазі дозування;
- 4– режим дозування і заливання з доливанням розплаву при зменшеній витраті і гальмуванні у вихідній фазі дозування.

В базовому варіанті системи автоматичного управління закладено два основні режими роботи: режим нагріву і зберігання та режим розливання.

Комплексна система автоматичного управління (САУ) МДУ включає в себе три основні блоки (рис.2.3):

- САУ нагріву і зберігання;
- САУ приготування/обробки;
- САУ розливання.

Режим нагріву і зберігання (міксерування або витримування), є основним технологічним режимом роботи і складає до 60-80% часу роботи установки. Тому раціоналізація цього режиму ґрунтується на управлінні електромагнітними системами індукторів і електромагніту в залежності від: температури навколишнього середовища ($T_{окр}, C_e$); поточної температури розплаву ($T_{мет}, C_e$); температури розливання ($T_{зал}, C_e$); фактичної маси розплаву в тиглі ($m_{мет}$, кг), напруги мережі ($U_{мережі}$, В); потужності індукторів ($P_{I_{1-2}}$, кВт), потужності електромагніту ($P_{ем}$, кВт), а також електричних режимів включення індукторів і електромагніту. До задач цього режиму відноситься реалізація помірною циклічно реверсуючого перемішування розплаву (лінійна швидкість руху рідкого металу – від 0,01 до 0,1 м/с) в тиглі установки для гомогенізації рідкометалевої ванни за температурою та хімічним складом, циркуляція розплаву в гілках Ш-

подібного каналу з метою відведення тепла, що виділяється в них, підтримка усередненої температури рідкого сплаву на заданому значенні. Введення задання на підтримку температури розплаву проводиться з пульта управління і блоку введення параметрів.

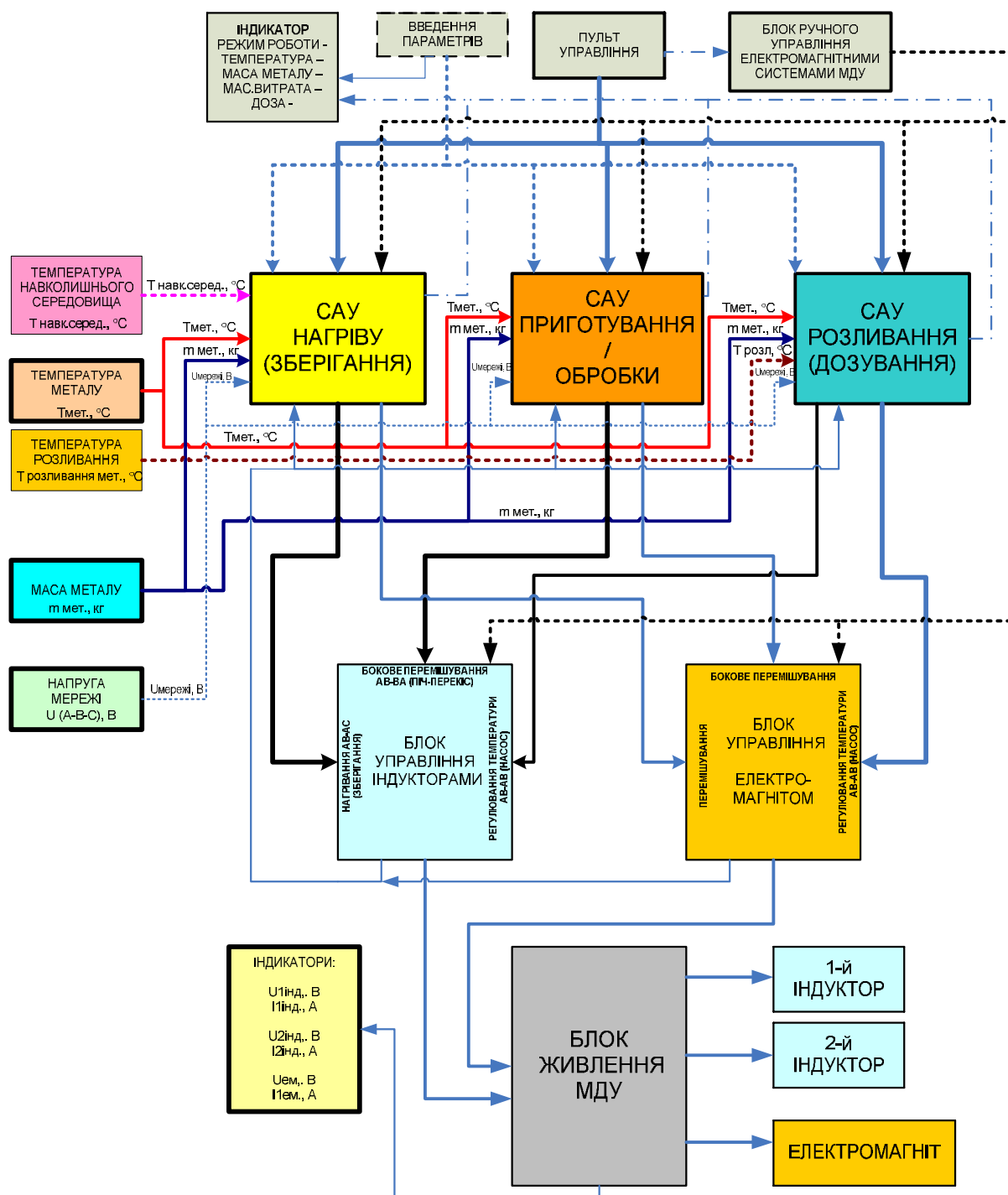


Рис. 2.3.Схема САУ процесами приготування, обробки і дозованого розливання алюмінієвих розплавів з магнітовагової ливарної установки

В САУ приготування/обробки (блок 2 рис. 2.3.) закладено регулювання режимів роботи індукторів і електромагніту, диференційованого нагріву розплаву в гілках Ш-подібного каналу, організації спеціальних режимів електромагнітного перемішування розплаву в тиглі і каналах установки (нагнітання, всмоктування, бічне перемішування тощо). Первинна інформація аналогічна тій, що і в блоці 1 САУ для режиму нагріву і зберігання. Функціонально блок САУ приготування може містити до десятка алгоритмів спеціалізованих режимів обробки. Введення параметрів обробки спочатку вже здійснено у вигляді алгоритму і може бути скориговане оператором.

До складу базових процедур САУ приготування/обробки закладені стандартні, часто використовувані на практиці технології: дегазація; фільтрування; модифікування; легування; плавлення; термочасова обробка (ТЧО) тощо. Оператор може вибрати тип обробки або закласти послідовність операцій з металом. Інтерфейс САУ передбачає взаємозв'язок з оператором, коли САУ сигналізує про початок виконання етапу роботи світловою або звуковою індикацією. САУ також може бути оснащено системою безпроводного зв'язку, що забезпечує безперервну передачу даних про стан виконання операції. Наприклад, однією з важливих процедур обробки розплаву безпосередньо перед його заливкою в ливарну форму (за 30-60 хв) є дегазація розплаву шляхом його продування аргоном з одночасним фільтруванням розплаву від неметалевих включень.

Реалізація цих задач оператором складна і вимагає його високої кваліфікації, що істотно утрудняє використання обладнання. При цьому, відхилення від вказаних параметрів приводить до перевитрати електроенергії, аргону, перегріву розплаву, його додатковому забрудненню неметалевими включеннями, особливо при перегріванні розплаву і створенні умов його інтенсивного перемішування на поверхні.

Аналогічним чином в САУ приготування і обробки закладені алгоритми управління і для інших важливих процедур.

З урахуванням вищевикладеного, запропонована узагальнена структурно-функціональна схема комплексної САУ (рис. 2.3) складається з блоку введення

і контролю інформації оператором і системи контролю вхідних параметрів. У разі відмови автоматичної системи або необхідності проведення ремонтних робіт, в схемі САУ передбачений режим ручного управління.

Враховуючи вищенаведене, метою створення вказаної САУ є істотне спрощення та уніфікація управління основними режимами роботи МДУ, яка реалізує ряд циклів обробки розплаву та його безпосереднє розливання.

2.2 Методика дослідження електромагнітних силових взаємодій в МДУ

Відштовхуючись від принципів роботи магнітодинамічного ливарного обладнання, необхідності його вдосконалення, з метою покращення функціональності роботи МДУ, може бути реалізовано шляхом вивчення механізмів взаємодії електричних та електромагнітних полів індукційних струмів і зовнішнього змінного поля електромагніту з рідким металом, а також результуючої складової їх взаємодії – електромагнітної сили.

Можливість вивчення та систематизації закономірностей гідродинамічних, електромагнітних, пондеромоторних і силових взаємозв'язків, що виникають між рідким металом і електромагнітними системами МДУ, з'явилася з розробкою інтегрованої ваговимірювальної системи (IBBC) [47]. Розроблена IBBC дає ряд можливостей контролю технічних і експлуатаційних характеристик установки.

Метою цієї частини роботи є дослідження та комплексний аналіз взаємозв'язку технологічних та експлуатаційних параметрів роботи МДУ із використанням IBBC, що безпосередньо входить до її складу.

В даному дослідженні IBBC використовується як пристрій для вимірювання та контролю силових електромагнітних взаємодій індукованих в Ш-подібному каналі установки струмів підвищеної щільності, зовнішнього магнітного поля, електромагнітних сил в робочій зоні з електромагнітними системами МДУ.

Завдання досліджень полягає у:

- вивченні можливостей реєстрації, контролю та вимірювання технологічних параметрів роботи МДУ, встановленні закономірностей математичного характеру основних експлуатаційних характеристик роботи МДУ від параметрів роботи її електромагнітних систем;

- визначенні основних показників ефективності роботи існуючого МГД-обладнання, встановленні ролі, величини та характерних залежностей впливу параметрів індукованих в Ш-подібному каналі МДУ електричних струмів, електромагнітних сил і взаємодій на їх основі, при створенні електромагнітного тиску та управління його параметрами.

Експериментальну установку з IBVC наведено на рис. 2.4. Особливістю МДУ з IBVC є те, що силовимірювальні тензорезисторні датчики розташовані безпосередньо під тиглем МДУ та на їх силові входи діє сила, створювана тільки сумарною масою тигля з каналом і металопроводом та змінна маса розплаву, що знаходиться у тиглі МДУ[48]. Це рішення дозволило знизити вимірювану масу бруто МДУ, відповідно підвищити точність дозування, а саме зменшити відносну похибку зважування до 20 г при дискретності зміни 10 г , що задовольняє вимоги технології заливання ливарних форм.

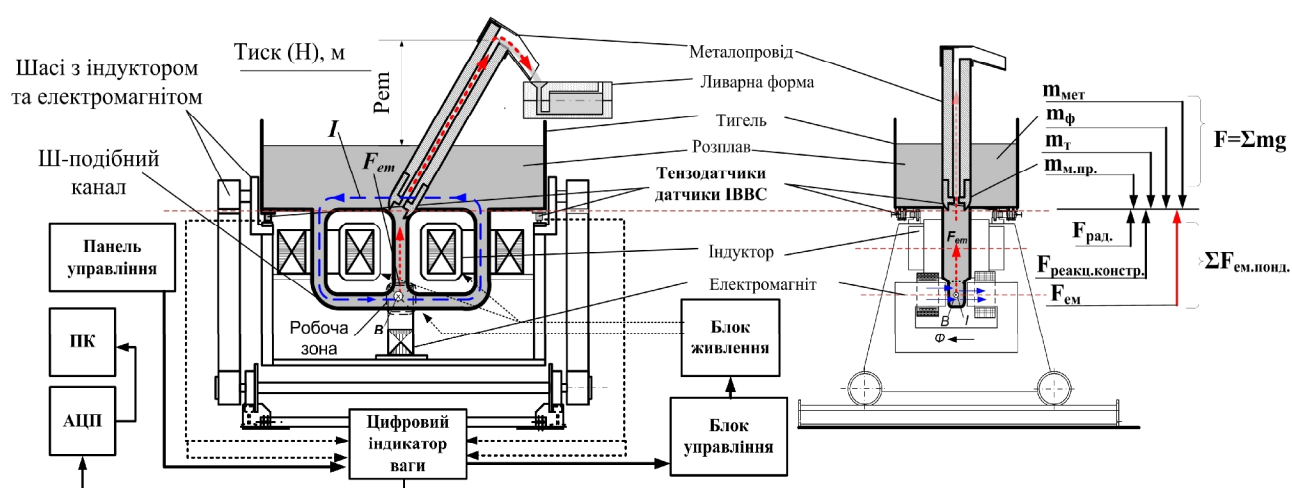


Рис. 2.4. Структурно-функціональна схема МДУ з інтегрованою ваговимірною системою (IBVC)

Дослідження проводили на алюмінієвому сплаві марки АК7, що перебував у МДН-6А у кількості від 100 до 500 кг (використовувався максимальний за місткістю тигель – до 630 кг алюмінієвого розплаву) при температурі 680-740°C.

Для визначення еквівалентів силових взаємодій електромагнітних систем та вузлів конструкції перед включенням МДУ в режим «насос» на ваговимірному індикаторі ІВВС було обнулено величину «тара», що визначає статичне навантаження на ІВВС $(m_m + m_\phi + m_k + m_{м.п.})g = 0$. Після включення режиму «насос» на індикаторі ІВВС виводилась величина $m_{ІВВС}$, що характеризує сумарне значення силового впливу електромагнітних сил та силових електромагнітних взаємодій у еквіваленті маси, тобто «кг» $(\sum F_{ем} = (F_{ем} + F_{реакц.констр.} + F_{рад.сил.}) / g = F(m_{ІВВС}))$.

Складова $F_{ем.взаємод.}$ величини силової електромагнітної взаємодії змінного електричного струму на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу навколо робочої зони МДУ з С-подібним магнітопроводом електромагніта не впливала на величину створюваної електромагнітної сили, через те, що магнітний потік $\Phi_{ем.взаємод.}$ компенсувався магнітним потоком Φ_0 , індукованим обмотками електромагніта $(\Phi = \Phi_0 - \Phi_{ем.взаємод.}, \Phi_0 \gg \Phi_{ем.взаємод.})$.

Для вивчення закономірностей силових електромагнітних взаємодій $\sum F_{ем}$ МДУ, в роботі було прийнято використовувати як аргумент (параметр управління) величину напруги, що подається безпосередньо на обмотки індукторів $(U_{інд.})$ та електромагніту $(U_{ем})$, тобто $\sum F_{ем} = f(U_{інд.}, U_{ем})$. Взагалі величина електричної напруги є основним параметром управління електромагнітними системами МДУ (індукторами та електромагнітом) при її роботі в різних технологічних режимах (нагріву і зберігання, приготування і обробки, розливання) з реалізацією різних схем циркуляції розплаву в системі «канал – тигель» (нагнітання, всмоктування, бокове перемішування тощо). Тому закономі-

рності їх регулювання завжди є першорядними при розробці спеціальних джерел живлення електромагнітних систем МДУ та побудови САУ.

Для здійснення більш глибокого аналізу електромагнітних процесів взаємодії індукованого електричного струму в Ш-подібному каналі МДУ та індукції магнітного поля, як в магнітопроводі електромагніту, так і в його міжполюсному просторі – робочій зоні (р. з.) каналу, встановлені закономірності можуть бути приведені до класичного виразу створення електромагнітних сил та електромагнітного тиску в МДУ з Т-подібною (т. зв. трійниковою) р. з. [16].

На першому етапі досліджували залежність нормальної складової сумарних електромагнітних силових взаємодій $(\sum F_{em} = f(U_{ind}, U_{em}))$ у МВУ IBVC при включенні МДУ у режим «насос», при включенні індукторів в синфазних режим (АВ-АВ) на ступені 1, 3 та 5 (відповідно 42, 60 і 80 В на кожному) і варіюваних значеннях напруги, що подається на електромагніт, від 40 до 80 В (ступені 1, 2, 3, 4, 5). Отримані експериментальні дані, за допомогою вимірювання реального перепаду рівнів металу в тиглі МДУ та у металопроводі у залежності від напруги живлення електромагніту (від 35 до 75В) та для 3-х значень напруги, що подається на обмотки індукторів (44, 58 і 73 В) відображені у розділі 3 п.3.1.

Наступним етапом комплексних багатофакторних досліджень у магнітоваговій установці для алюмінієвих сплавів є вивчення, систематизація та обґрунтування закономірностей силових електромагнітних взаємодій рідкометалевого струмонесучого витка з металоконструкцією тигля та каналу МДУ – $F_{реакц.констр.}$. Враховано, що у р. з. при цьому протікають струми підвищеної щільності, генерується об'ємна електромагнітна сила $F_{ем.сил}$, а також наявні сили, що виникають в результаті взаємодії індукторів з рідкометалевим витком у здвоєному Ш-подібному каналі $F_{рад.сил}$. Це дозволить встановити силовий еквівалент взаємодії змінного електричного струму на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу МДУ на периферії (границях) р.з. з магнітопроводом елек-

тромагніту $F_{ем.взаємод.}$ при реалізації технологічного режиму нагріву і зберігання в умовах бокового перемішування, що застосовуються головним чином при електрофізичній обробці рідких алюмінієвих сплавів.

2.3. Методика розрахунку основних параметрів МДУ

Для дослідження основних електричних параметрів електромагнітних систем магнітодинамічних пристроїв, теплової роботи МДУ та її технологічних характеристик, з метою уточнення методики розрахунку МДН-6А з тиглем місткістю до 630 кг для алюмінієвих сплавів (технічні характеристики якої наведено у табл.2.1), проведено відповідні інженерні розрахунки.

2.3.1. Методика розрахунку основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А

Для розрахунку основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів та у подальшому пов'язаних з ними основних технологічних характеристик і режимів роботи обладнання, було адаптовано методику розрахунку магнітодинамічної установки для чавуну МДН-6ч-3,0-1, розроблену у відділі магнітної гідродинаміки ФТІМС НАН України [49]. В її основі лежить стандартний розрахунок індукційних каналних пристроїв [8, 50, 51], який доповнено у зв'язку з більшою кількістю електромагнітних систем МДУ, порівняно з індукційними каналними агрегатами, та необхідністю врахувати їх взаємний вплив.

На першому етапі розглянуто систему індукування струму в рідкому металі.

Індуктор складається з двох С-образних магнітопроводів, сполучених разом і двох обмоток, які є первинними в системі індукування струму. Вторинним витком є рідкий метал (алюмінієвий сплав в каналі), який замикається навколо

індуктора. Магнітопровід виконується шихтованим з листової електротехнічної сталі марки Э412 [52, 53] товщиною листа 0,35 мм.

Стрижень, на якому розміщується котушка, виготовляється ступінчастим.

Площа перерізу заліза магнітопровода під котушкою (без урахування площі накладних пластин) $S'_{Feu} = 0,0420 \text{ м}^2$.

Обмотки індуктора однакові і кожна є котушкою, розміщеною на стрижні магнітопровода, що проходить всередині витка. Кожна з них виконана у вигляді одношарової циліндричної котушки, навитої з профільованої мідної трубки. Навивка проведена на циліндричний каркас із склотекстоліту завтовшки 5 мм. Стягування котушки по висоті здійснюється за допомогою двох склотекстолітових шайб завтовшки 25 мм. Між витками передбачаються прокладки завтовшки 3 мм.

Для розрахунку активного опору половина витка (виток є симетричним відносно осі, що проходить через його центральну гілку) розбивається на ділянки.

Розрахунок електроопору системи «індуктор – виток рідкого металу» ведеться по формулах:

- активний опір:

$$R_g = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1}{s_m} \cdot f} \cdot \sum \frac{a_{xi}}{b_{xi}} \cdot F_{xi}, \text{ Ом} \quad (2.1)$$

де $\frac{1}{s_m}$ – питомий опір алюмінієвого сплаву, Ом·м (s_m – питома електрична провідність алюмінієвого сплаву, См); f – частота струму, Гц; a_{xi} – довжина ділянки витка, м; l_{xi}, b_{xi} – розміри перерізу витка на ділянках завдовжки a_{xi} (l_{xi} – розмір у напрямку проникнення електромагнітної хвилі, м), м; F_{xi} – функція Бесселя для ділянок із різною геометрією;

- індуктивний опір:

$$x_b = 8 \cdot 10^{-6} \cdot f \frac{DS}{b_u} \cdot K_R \cdot K_S, \text{ Ом} \quad (2.2)$$

де DS – еквівалентна площа проміжку, рівна сумі площ між обмоткою і витком, з урахуванням 1/3 площ обмотки індуктора і витка, м^2 ; K_R – коефіцієнт Роговського; K_S – коефіцієнт, що враховує різницю висот витка і обмотки індуктора;

- повний опір:

$$z_b = \sqrt{R_b^2 + x_b^2}, \text{ Ом} \quad (2.3)$$

Обмотки індуктора включені таким чином, що створювані ними струми в центральному каналі рідкометалевого витка направлені назустріч один одному.

Для розрахунку активного опору половина витка (виток є симетричним відносно осі, що проходить через його центральну гілку) розбивається на ділянки. Для розрахунку основними їх характеристиками є довжина, ширина та геометрія (непрямолінійні ділянки розглядаються окремо).

Індуктивний опір:

- розрахункова площа проміжку DS :

$$DS = DS' + DS'', \text{ мм} \quad (2.4)$$

де DS'' – площа проміжку між обмотками, м^2 ; DS' – решта площі проміжку, м^2 .

Для них коефіцієнти K_R і K_S , що входять у формулу для розрахунку X_b , різні.

Коефіцієнт Роговського K_R :

$$K_R = 1 - \frac{D_{cp} + l_{bcc} + l_u}{pb_u} \quad (2.5)$$

де $D_{cp} = \frac{DS_1}{L_{cp}}$ – середній проміжок між витком і обмоткою індуктора;

$DS_1 = DS'_1 + DS''_1$ – площа проміжку між витком і обмоткою «+» площа проміжку між обмотками індуктора (визначається аналогічно DS , але без урахування 1/3 площі обмотки і витка); L_{cp} – довжина середньої лінії проміжку.

Коефіцієнт K_S :

$$K_S = 1 + \frac{b_u - b_{всп}}{3,5 \cdot b_u} \left(1 + \frac{p}{3} \cdot \frac{b_u - b_{всп}}{D_{cp} + \frac{l_{всп} + l_u}{3}} \right) \quad (2.6)$$

Електрорушійна сила (ЕРС), створювана індуктором у витку рідкого металу:

$$E_\epsilon = \frac{2U_i}{K_i \cdot W_i}, \text{ В} \quad (2.7)$$

де K_i – коефіцієнт, що враховує падіння напруги в обмотці індуктора.

Максимальна індукція в залізі магнітопровода індуктора:

$$B_{Fe_i} = \frac{E_{\epsilon}}{4,44 \cdot f \cdot 2S_{Fe}}, \text{ ТЛ} \quad (2.8)$$

Електричний струм в рідкому металі:

$$I_{\epsilon} = \frac{E_{\epsilon}}{Z_{\epsilon}}, \text{ А} \quad (2.9)$$

Активна потужність, що виділяється у витку:

$$P_{a\epsilon} = E_{\epsilon} \cdot I_{\epsilon}, \text{ кВА} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт потужності витка:

$$\cos j_{\epsilon} = \frac{R_{\epsilon}}{Z_{\epsilon}} \quad (2.11)$$

Електричний струм в індукторі:

$$I_i = \frac{I_{\epsilon}}{W_i}, \text{ А} \quad (2.12)$$

Параметри індуктора:

Вага сталі магнітопровода індуктора:

$$G_{Fe_i} = g_{Fe} \cdot \sum S_{Feie} \cdot L_{Feie}, \text{ кг} \quad (2.13)$$

де S_{Feie} – площа перерізу набору сталі на i -тій ділянці, м^2 ; g_{Fe} – густина сталі, кг/м^3 .

Втрати потужності в сталі магнітопровода (без урахування втрат в накладних пластинах):

$$P_{Fei} = P_{1,5/50} \cdot \frac{B_{Fei}}{B_{Fe(ГОСТ)}^2} \cdot G_{Fei}, \text{ кВт} \quad (2.14)$$

Активна складова струму холостого ходу індуктора:

$$I_{oa} = \frac{P_{Fei}}{2U_i}, \text{ А} \quad (2.15)$$

Розрахунок струму намагнічення (реактивна складова струму холостого ходу).

Магнітний потік в магнітопроводі індуктора проходить прямолінійні ділянки (тобто кут між магнітним потоком і напрямом прокатки смуги з електротехнічної сталі (ЕТС) дорівнює 0°), і ділянки на стику стрижнів магнітопровода, де він направлений в середньому під кутом 45° до напрямку прокатки. Тому для створення заданої індукції в сталі магнітопровода $1/2$ індуктора B_{Fe} необхідна магніторушійна сила (МРС), що дорівнює

$$(IW)_m = H_{01}l_1 + H_{02}l_2, \text{ А} \cdot \text{вит} \quad (2.16)$$

де H_{01} – напруженість магнітного поля на прямолінійних ділянках, А/м; l_1 – сумарна довжина цих ділянок, м; H_{02} – напруженість магнітного поля на торцевих ділянках, А/м; l_2 – сумарна довжина цих ділянок, м.

В місцях стикування ярма із стрижнями магнітопровода залишаються повітряні проміжки d_z , в яких МРС:

$$(IW)_z = \frac{B_{Fei} \cdot 2 \cdot d_z \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot m_0}, \text{ А} \cdot \text{вит} \quad (2.17)$$

Реактивна складова струму холостого ходу:

$$(IW)_{op} = (IW)_m + (IW)_z, \text{ А} \cdot \text{ВИТ} \quad (2.18)$$

$$I_{op} = \frac{(IW)_{op}}{W_i}, \text{ А} \quad (2.19)$$

Струм холостого ходу індуктора:

$$I_{oi} = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}, \text{ А} \quad (2.20)$$

Максимальний струм в обмотці індуктора:

$$\bar{I}_i = \bar{I}_e + \bar{I}_{oi}, \text{ А} \quad (2.21)$$

де $\bar{I}_e$ – приведенне до первинної обмотки значення струму витка, А.
Активний опір обмотки індуктора:

$$R_i = \frac{1}{s_{Cu}} \cdot \frac{L_{Cu} \cdot W_i \cdot L_{aux}}{S_{Cu}}, \text{ Ом} \quad (2.22)$$

де $\frac{1}{s_{Cu}}$ – питомий електроопір міді, Ом·м; S_{Cu} – площа міді в поперечному перетині водоохолоджуваної трубки, м²; L'_{Cu} – довжина середньої лінії одного витка обмотки, м; L_{aux} – довжина двох виходів обмотки, м.

Втрати потужності в обмотці індуктора:

$$P_{Cui} = I_i^2 \cdot R_i, \text{ кВт} \quad (2.23)$$

Вага міді обмотки індуктора:

$$G_{Cui} = g_{Cu} (L'_{Cu} W_i + L_{aux}), \text{ кг} \quad (2.24)$$

де g_{Cu} – вага шини $10 \times 12,5$ мм, кг.

Активна потужність індуктора:

$$P_{ai} = P_{av} + 2P_{Cui} + P_{Fei}, \text{ кВт} \quad (2.25)$$

Кожна обмотка індуктора включена від свого живлячого трансформатора, тобто навантаження на кожну обмотку трансформатора дорівнює $\frac{1}{2}P_{ai}$.

Повна потужність індуктора

$$P_{Si} = 2U_i \cdot I_i, \text{ кВА} \quad (2.26)$$

Реактивна потужність індуктора

$$P_{pi} = 2 \cdot \sqrt{P_{Si}^2 - P_{ai}^2}, \text{ кВАр} \quad (2.27)$$

Коефіцієнт потужності індуктора (фактично його половини)

$$\cos j_i = \frac{P_{ai}}{P_{Si}} \quad (2.28)$$

Компенсація реактивної потужності здійснюється таким чином. Для підвищення коефіцієнта потужності до $\cos j_i = 1$ передбачається установка батареї конденсаторів в ланцюг живлення кожної обмотки індуктора. Розрахунок компенсації проводимо для напруги $U_i = 380 \text{ В}$.

Потужність конденсаторів при $U_i = 380 \text{ В}$:

$$P_{Cu} = \frac{1}{2} P_{pi(380)}, \text{ кВАр} \quad (2.29)$$

Потужність батареї конденсаторів в ланцюзі живлення кожної обмотки індуктора:

$$C_{u(380)} = \frac{P_{Cu} \cdot 10^3}{2 \cdot p \cdot f \cdot U_u^2}, \text{ мкФ} \quad (2.30)$$

Втрати потужності в конденсаторах при $U_i = 380\text{В}$

$$P_{aCu} = 2P_{Cu(380)} \cdot \text{tg}d, \text{ кВт} \quad (2.31)$$

- при $U_i = 349\text{В}$:

$$P_{aCu} = P_{aCu(380)} \cdot \left(\frac{349}{380} \right)^2, \text{ кВт} \quad (2.32)$$

де $\text{tg}d$ – активна потужність питомих втрат (тангенс кута втрат).

Максимальна потужність, споживана в системі «індуктор – виток рідкого металу»:

$$P_i = P_{ai} + 2P_{ampi} + P_{aCu}, \text{ кВт} \quad (2.33)$$

де P_{ampi} – втрати в трансформаторі живлення обмотки індуктора, кВт.

Струм після компенсації реактивної потужності (у вторинній обмотці трансформатора):

$$I_{mp2(max)} = \frac{\frac{1}{2}P_i}{U_i \cdot \cos j_{i(min)}}, \text{ А} \quad (2.34)$$

де $\cos j_{i(min)}$ – мінімальне допустиме значення коефіцієнта потужності після компенсації.

Електричний ККД системи індукції струму:

$$h_{ел.і} = \frac{P_{ав}}{P_i} \quad (2.35)$$

Система створення зовнішнього магнітного поля

Розрахунок системи створення зовнішнього магнітного поля в робочій зоні магнітодинамічної одиниці (у місці встановлення електромагніту).

ЕРС на виток при номінальній напрузі живлення $U_e = 380 \text{ В}$:

$$E_e = \frac{U_e}{K_i W_e}, \text{ В} \quad (2.36)$$

Максимальна індукція в магнітопроводі електромагніту:

$$B_{Fe_e} = \frac{E_e}{4,44 \cdot f \cdot S'_{Fe_e} \cdot 0,9}, \text{ Тл} \quad (2.37)$$

Середня величина індукції в робочій зоні визначається із виразу:

$$\frac{B_n}{B_z} = (z')^2 + 1 \quad (2.38)$$

де B_n – магнітна індукція в центрі полюса

$$B_n = \frac{B_{Fe_e}}{K_h}, \text{ Тл} \quad (2.39)$$

де K_h – коефіцієнт розсіяння магнітного потоку (визначений експериментально на аналогічному магніті); Z – відстань від полюса до площини симетрії робочої зони:

$$z' = \frac{z}{l_0}; \quad l_0 = \frac{2S_n}{P_n} \quad (2.40)$$

де l_0 – характерний розмір однополюсного магніту, м; S_n – площа полюсного наконечника, м²; P_n – периметр полюсного наконечника, м.

Індукція B'_z на відстані Z дорівнює:

$$B_z = \frac{B_n}{(z')^2 + 1}, \text{ Тл} \quad (2.41)$$

Щільність струму в обмотці (катушці) електромагніта:

$$j_{Cu_e} = \frac{I_e}{S_{Cu_e}}, \text{ А/мм}^2 \quad (2.42)$$

Активний опір обмотки електромагніта:

$$R_e = \frac{1}{s_{Cu}} \cdot \frac{L_{Cu_e} + L_{виг}}{S_{Cu_e}}, \text{ Ом} \quad (2.43)$$

де L_{Cu_e} - довжина мідної трубки двошарової обмотки електромагніта.

Втрати потужності в обмотці електромагніта:

$$P_{Cu_e} = I_e^2 \cdot R_e, \text{ кВт} \quad (2.44)$$

Вага трубки обмотки електромагніта:

$$G_{Cu_e} = g_{Cu} (L_{Cu_e} + L_{виг}), \text{ кг} \quad (2.45)$$

Вага магнітопровода електромагніта:

$$G_{Fe_e} = g \sum S_{Fe_{ei}} \cdot L_{Fe_i}, \text{ кг} \quad (2.46)$$

Втрати потужності в залізі магнітопровода:

$$P_{Fe_e} = P_{1,5/50} \frac{B_{Fe_e}^2}{B_{Fe(ГОСТ)}^2} G_{Fe_e}, \text{ Вт} \quad (2.47)$$

Активна потужність електромагніта:

$$P_{ae} = P_{Cu_e} + P_{Fe_e}, \text{ кВт} \quad (2.48)$$

Повна потужність електромагніту:

$$P_{se} = U_e I_e, \text{ кВА} \quad (2.49)$$

Реактивна потужність електромагніту:

$$P_{pe} = \sqrt{P_{se}^2 - P_{ae}^2}, \text{ кВАр} \quad (2.50)$$

Коефіцієнт потужності електромагніта:

$$\cos j_e = \frac{P_{ae}}{P_{se}} \quad (2.51)$$

Ємність батареї конденсаторів:

$$C_e = \frac{P_{ce} \cdot 10^3}{2 \cdot p \cdot f \cdot U_e^2}, \text{ мкФ} \quad (2.52)$$

2.3.2. Методика розрахунку теплових параметрів установки МДН-6А

З метою вибору раціональних техніко-економічних показників МДУ з багатошаровою футеровкою (див. рис. 2.2) теплові втрати в даній роботі було досліджено двома методами: розрахунковим та експериментальним.

На першому етапі, теплові втрати було розраховано.

Втрати тепла в установці відбуваються за рахунок теплопровідності і теплової конвекції та визначаються по формулі [55]:

$$P = k \cdot S(T_M - T_B) = q \cdot S', \text{ кВт} \quad (2.53)$$

де S – площа поверхні, через яку йде теплопередача (м^2); T_M – температура металу, $^{\circ}\text{C}$; T_B – температура охолоджувача, $^{\circ}\text{C}$; q – тепловий потік через один шар футеровки, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_B} + \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{l_i} + \frac{1}{a_{BH}}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}) \quad (2.54)$$

де a_B – коефіцієнт теплопередачі від нагрітої стінки в повітря, $(\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град})$; a_{BH} – коефіцієнт теплопередачі від металу до внутрішньої стінки ($a_{BH} \approx \infty$), $(\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град})$; l_i – коефіцієнт теплопровідності i -того шару футеровки, $(\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град})$; D_i – товщина i -го шару футеровки, м.

Товщина та склад окремих частин тигля і каналу різна, тому розраховуватимемо тепловий потік для кожної частини установки окремо.

Для визначення теплового потоку необхідно вирішити систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \frac{T_M - T_1}{D_1} l_1(T) = (T_M - T_1) \cdot \left(a_1 + b_1 \cdot \frac{T_M + T_1}{2} \right) \cdot \frac{1}{D_1}; \\ q_2 = \frac{T_1 - T_2}{D_2} l_2(T) = (T_1 - T_2) \cdot \left(a_2 + b_2 \cdot \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \cdot \frac{1}{D_2}; \\ q_i = \frac{T_{i-1} - T_i}{D_i} l_i(T) = (T_{i-1} - T_i) \cdot \left(a_i + b_i \cdot \frac{T_{i-1} + T_i}{2} \right) \cdot \frac{1}{D_i}; \\ q_n = \frac{T_{n-1} - T_n}{D_n} l_n(T) = (T_{n-1} - T_n) \cdot \left(a_n + b_n \cdot \frac{T_{n-1} + T_n}{2} \right) \cdot \frac{1}{D_n}; \\ q = a_B (T_n - 20^0) \end{array} \right. \quad (2.55)$$

Теплові втрати випромінюванням із зливального носка міксера-дозатора:

$$P_{K.M.} = k_H \cdot S_{H.K.} \cdot \left[\left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right] \cdot t, \text{ кВт} \quad (2.56)$$

2.3.3. Методика розрахунку основних технологічних параметрів установки МДН-6А

Електромагнітний тиск, створюваний в робочій зоні:

$$p_e = \frac{I_B \cdot B_1 \cdot c \cdot \cos j}{b_1}, \text{ Па} \quad (2.57)$$

де c – коефіцієнт використання струму в робочій зоні; j – кут зсуву фаз між струмом в металі і магнітним полем.

Підйом металу під дією створюваної в робочій зоні електромагнітної сили (електромагнітний напір):

$$H = \frac{p_e \cdot K_{OC}}{r_M g}, \text{ м} \quad (2.58)$$

де K_{OC} – коефіцієнт ослаблення.

Продуктивність по перегріву металу на $DT = 100^\circ \text{C}$:

$$\Pi = \frac{P_{ab} - P_{T.Л}}{C_M DT}, \text{ кг/с} \quad (2.59)$$

де $P_{T.Л.}$ – тепловтрати, кВт; C_M – питома теплоємність алюмінію, Дж/(кг·°C).

2.4. Методика експериментальної оцінки теплової роботи установки МДН-6А

Мета цієї частини досліджень полягала в розробці раціонального експериментального методу визначення потужності теплових втрат в діючій установці МДН-6А, що містить рідкий алюмінієвий сплав [54].

Рідкометалевий об'єм, що знаходиться в установці, умовно розділено на дві частини: 1 – невитратну, що заповнює порожнину каналу та зумпф і залишається в установці протягом всієї кампанії її функціонування до планового чи екстреного ремонту; 2 – витратну, що витрачається на виливки.

Перша частина має незмінну площу контакту з футеровкою, а друга частина в міру витрати металу змінює площу контакту зі стінками тигля. Враховуючи це, потужність теплових втрат першої частини прийнято незмінною для обраного інтервалу регулювання температури, а другу прийнято змінною та пропорційною площі контакту з розплавом.

Ідея методу полягає у використанні наявної в схемі управління установкою МДН-6А двопозиційної системи регулювання температури. Процес зміни температури між нижньою і верхньою межами заданого температурного інтервалу схематично зображений на рис. 2.5.

Підвищення температури розплаву відбувається при включенні двох індукторів (перша позиція). При досягненні t_{max} один індуктор автоматично відключається (друга позиція) і відбувається зниження температури до значення t_{min} , після чого знову включається другий індуктор і цикл «нагріван-

ня/охолодження» розплаву в заданому інтервалі температур повторюється. Оскільки різниця $t_{max} - t_{min}$ зазвичай не перевищує 15-20 °C та задається автоматично через відповідні мікроконтролери в САУ, то прийнято, що зміна температури між нижньою і верхньою межами в даному разі інтегрально не впливає на потужність тепловтрат.

Необхідно зареєструвати проміжки часу: $t_1, t_2 - t_1, t_3 - t_2, \dots, t_n - t_{n-1}$ за умови, що n парне число і відповідає кінцю одного повного циклу «нагрівання-охолодження». Одночасно реєструємо значення активної потужності $P_1, P_2, \dots, P_n$ відповідне кожному з цих інтервалів.

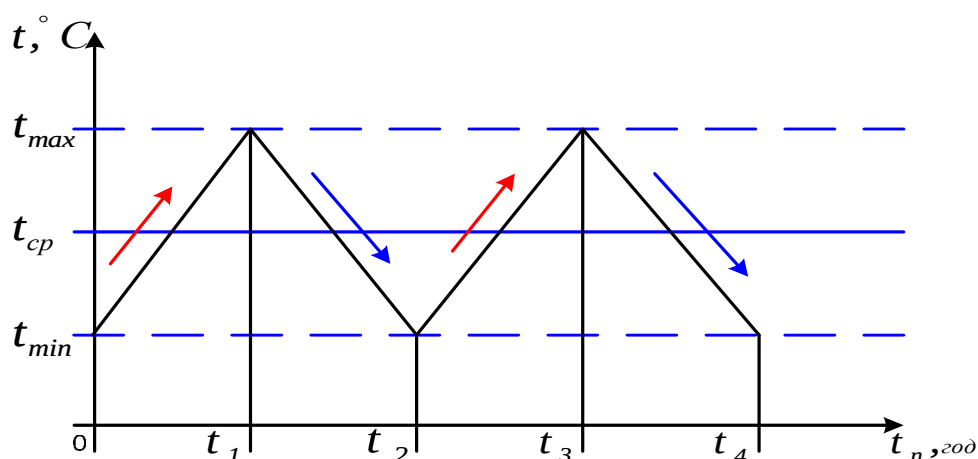


Рис. 2.5.Схема зміни у часі температури при двопозиційному регулюванні: t_{max} та t_{min} - верхня та нижня межі регулювання температури розплаву; t_{cp} - середня температура розплаву (оптимальна температура заливки); $t_1 \dots t_n$ – інтервали часу зростання та зменшення температури розплаву

Позначимо через $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ кількість теплової енергії переданої в рідкометалевий обсяг за відповідний інтервал часу: $Q_1 = P_1(t_1), Q_2 = P_2(t_2 - t_1), \dots, Q_n = P_n(t_n - t_{n-1})$, а потім визначаємо середню потужність установки за n циклів за формулою:

$$P_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^n Q_n}{t_n} \quad (2.60)$$

де t_n – час від нуля до кінця останнього циклу, годин; Q_n – кількість теплової енергії, кВт год.

Оскільки методика є новою, то на першому етапі проводили її відпрацювання з урахуванням інерційності термопар. Необхідність цього полягає в тому, що чим вища напруга, тим коротший один цикл регулювання температури, однак при цьому через інерційність термопар перемикання відбуватимуться пізніше, ніж температура розплаву досягне верхньої або нижньої межі. При меншій напрузі інерційність відіграє меншу роль, проте зростає тривалість циклу регулювання і як наслідок збільшується тривалість експерименту.

Для вимірювання та реєстрації експериментальних даних, було використано:

- електровимірювальний комплект (К505);
- трансформатори струму (УТТ-5М);
- термопар (типу К (ХА), 0 ... 1000 °С);
- прилад для вимірювання температури (OMRON E5CN-R2TCDC-100-240AC).

Інерційність термопар визначено наступним чином: у момент, коли спрацьовує регулятор, вимірювали температуру розплаву термопарою без чохла, а потім порівнюємо з температурою, яку показує регулюючий прилад.

Таким чином на першому етапі:

- визначено інерційність термопар ($\pm 1,6$ °С/хв);
- вибрано напругу, що подається на індуктори (47-53 В);
- відпрацьована операція реєстрування необхідних параметрів;
- визначено необхідну кількість циклів регулювання для реєстрації (не менше 4 циклів).

На другому етапі визначено P_{cp} : при повному тиглі; при невитратному заповненні тигля МДУ та при проміжних рівнях. Дослідження проводились з

встановленою на тиглі МДУ кришкою. Різниця між P_1 та P_2 відповідає тепловим втратам витраченої маси розплаву через бічні стінки тигля. Різниця між поточними значеннями дозволить визначити, чи теплові втрати через бічні стінки прямо пропорційні площі контакту витраченої маси з футеровкою.

2.5. Методика дослідження витратних характеристик МДУ в різних технологічних режимах

З метою вивчення залежностей витратних характеристик у різних режимах роботи МДУ від напруги, що подається, проведено експериментальні дослідження на фізичній моделі.

Розроблено нове технічне рішення для заливальної установки з вагодозуючим похилим жолобом традиційної конструкції [55], що ґрунтується на передачі електромагнітним способом сили, пропорційної миттєвому значенню маси розплаву на жолобі, що дає можливість зменшити кількості тензорезисторних силових датчиків для вимірювання миттєвої маси розплаву, з чотирьох, що встановлені під тиглем до одного – безпосередньо під жолобом.

Задача методики: визначення ефективності нового технічного рішення при його реалізації.

Об'єкт дослідження: фізична модель заливальної установки з вагодозувальним зливним жолобом традиційної конструкції.

Обладнання для проведення досліджень: ємність з моделюючою рідиною, що встановлена на нерухому основу; насос з електроприводом; похилий жолоб; електромагніт; тензометричний датчик (з системою вимірювання сигналу вихідного датчика); електронні ваги класу 0,03(НПВ – 6 кг) типу ВВ (зав. №200335); ПК; індикаторна головка годинникового типу (зав. № 457642); набір зразкових гир IV розряду (важками 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 кг); блок управління; блок живлення; прийомна ємність.

Перед проведенням експериментальних досліджень необхідно виконати підготовчі операції:

- перевірити правильність з'єднань всіх елементів схеми електричної принципової дозатора згідно зі схемою з'єднань;
- заземлити механічну конструкцію дозатора та прилади;
- подати напругу на пульт управління та перевірити роботу елементів схеми на функціонування;
- перевірити та налаштувати (при необхідності) вимірювальну схему дозатора;
- налаштувати ваговимірювальну схему в цілому та виконати тарування дозатора в діапазонах 1, 2, 10 кг. У кожному діапазоні провести по 5 вимірювань.

Експериментальні дослідження проводились на розробленій та виготовленій фізичній моделі заливальної установки, структурно-функціональна схема якої наведена на рис. 2.6.

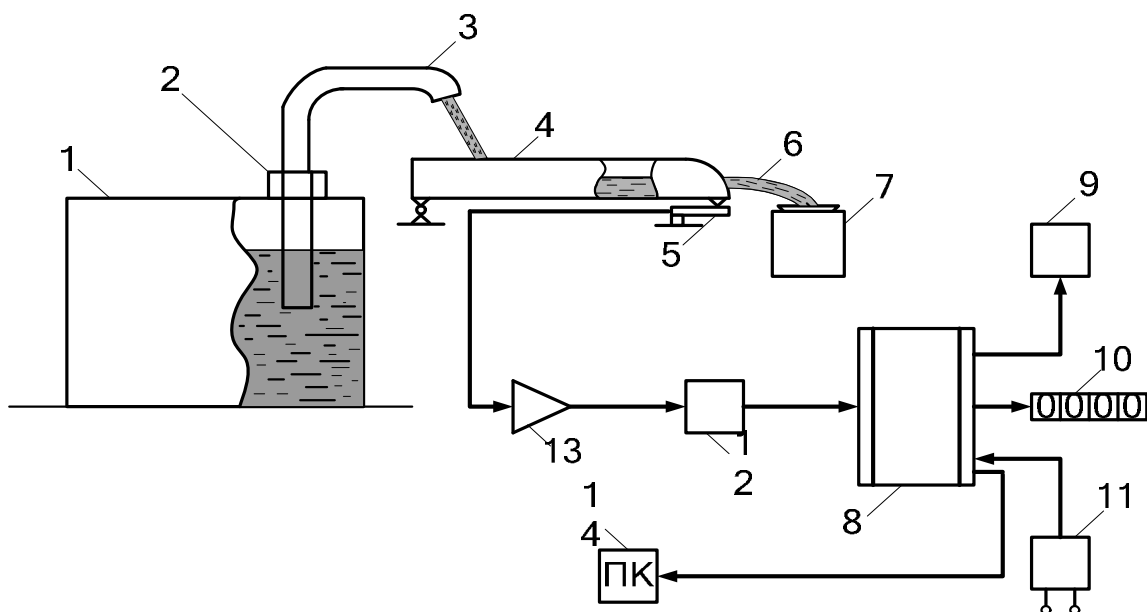


Рис. 2.6. Структурно-функціональна схема фізичної моделі заливальної установки з похилим зливним жолобом: 1 – ємність з моделюючою рідиною; 2 – насос з електроприводом; 3 – випускний трубопровід; 4 – зливний жолоб; 5 – тензорезисторний датчик; 6 – моделююча рідина; 7 – прийомна ємність; 8 – мікропроцесорний блок управління процесом дискретного дозування; 9 – блок управління; 10 – цифровий індикатор; 11 – блок живлення; 12 – аналого-цифровий перетворювач; 13 – підсилювач; 14 – персональний комп'ютер (ПК)

Ємність, що заповнена моделюючою рідиною, встановлена на нерухомій основі та оснащена насосом з електроприводом, що підключено до блоку управління. Випускний трубопровід насоса розташовано над зливним жолобом, один кінець якого шарнірно закріплено на нерухомій основі, а інший спирається на несилловий вхід тензо-резисторного датчика подвійного вигину, також встановленого на нерухомій основі. Вихід датчика через підсилювач та аналого-цифровий перетворювач підключено до мікропроцесорного блоку управління процесом дискретного дозування моделюючої рідини в прийомну ємність. Живлення системи управління процесом дозування здійснюється від блоку живлення, який підключено до мережі змінного струму напругою 220В. Управління насосом здійснюється від блоку управління, що підключено до блоку. Індикація величини дози здійснюється за допомогою цифрового індикатора. До складу фізичної моделі також входить ПК, що використовується для дослідження динаміки процесу дозування.

Фізична модель працює наступним чином. У вихідному стані ємність заповнена моделюючою рідиною, система управління підключена до мережі та знаходиться в режимі очікування, а на індикаторі висвічуються нулі у всіх розрядах. За командою з блоку управління включається привід насоса та моделююча рідина по трубопроводу починає поступати на зливний жолоб, а з нього у прийомну ємність. При цьому на силовому вході датчика з'являється сигнал U_m , що пропорційний миттєвому значенню маси m моделюючої рідини на жолобі. Сигнал U_m інтегрується у мікропроцесорному блоці та по досягненню зливої маси рідини у приймальну ємність заданого значення m_0 привод насоса вимикається. Послідуючі дози рідини заливаються аналогічно.

На підставі спостереження за гідравлікою струменя моделюючої рідини на фізичній моделі визначалася оптимальна напруга, виходячи з того, що дозу з високою точністю можна залити тільки при постійній витраті, а відповідно, за умови близького до ламінарного режиму течії струменя на зливному жолобі.

2.6. Висновки по розділу 2

1. Розглянуто лабораторну дослідну магнітовагову установку, основним елементом якої є МДН-6А, що оснащена системою контролю температури, маси та масової витрати відповідно до керуючих параметрів електромагнітних систем. Для САУ МДУ основним інформативним параметром обрано масу. Це обґрунтовано тим, що вона безпосередньо впливає на основні параметри МДУ – потужність індукторів і електромагніта, що визначають температурні та витратні характеристики процесу одержання лиття.

2. Для комплексного аналізу взаємозв'язків технологічних та експлуатаційних параметрів МДУ розроблено методику експериментального дослідження залежностей електромагнітних силових взаємодій МДН-6А з використанням інтегрованої ваговимірювальної системи (ІВВС), що безпосередньо входить до її складу.

3. Адаптовано методику розрахунку МДУ у методику розрахунку основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів та подальшому пов'язаних з ними основних технологічних характеристик і режимів роботи установки.

4. Уточнено розрахунковий метод дослідження теплових втрат МДН-6А з метою вибору раціональних техніко-економічних показників МДУ з багатшаровою футеровкою та каналом складної конфігурації.

5. Розроблено раціональний експериментальний метод визначення потужності теплових втрат у діючій установці МДН-6А, що містить рідкий алюмінієвий сплав, з використанням наявної в схемі управління установкою двопозиційної системи регулювання.

6. Розроблено методику експериментальних досліджень на фізичній моделі заливальної установки з розробленим вагодозуючим похилим зливним жолобом, оснащеним тензорезисторним силовим датчиком, для дослідження залежностей витратних характеристик у різних режимах роботи МДУ від напруги, що подається.

7. Розроблені моделі, методики та допоміжні пристрої використані у подальших дослідженнях для вирішення поставлених задач та досягнення мети роботи.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВИХ, ГІДРОДИНАМІЧНИХ ТА МАГНІТОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ МДУ

3.1. Дослідження електромагнітних силових взаємодій в МДУ за допомогою створення математичних моделей та натурних досліджень

МДУ з IBBC є концептуальним технічним продовженням модернізації магнітодинамічної установки типу МДН-6А, з можливістю безперервного контролю поточного значення маси розплаву, що знаходиться в тиглі і каналах МДУ, реєстрації та управління процесом дискретного дозування відкритим струменем.

В ході дослідно-промислової перевірки функціонування МДУ з IBBC, поряд з контролем поточного значення маси розплаву в тиглі і каналі МДУ, були встановлені можливості реєстрації в реальному режимі часу силових електромагнітної взаємодії рідкометалевого витка зі струмом і конструкцією тигля та каналу МДУ – $F_{\text{реак.констр.}}$ при протіканні в ньому струмів підвищеної щільності, створюваних в робочій зоні електромагнітних сил – $F_{\text{ем.сил}}$, а також сил, що виникають в результаті взаємодії індукторів з рідкометалевим витком у зведеному Ш-подібному каналі – $F_{\text{рад.сил}}$, і силового еквівалента взаємодії змінного електричного струму на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу МДУ в околиці р.з. з магнітопроводом електромагніту – $F_{\text{ем.взаємод.}}$.

Відмінність функціональних можливостей МДУ з платформною ваговимірювальною системою (BBC) і МДУ з IBBC можна показати шляхом порівняння балансу сил.

Для випадку МДУ з платформеними вагами, рівняння балансу сил виглядає наступним чином:

$$(m_{\text{мет.}} + m_{\text{конструкції}}) \cdot g = F(m_{\text{BBC}}) \quad (3.1)$$

де $m_{мет.}$ – маса розплаву в тиглі та каналі МДУ (30-630 кг), кг; $m_{констр.}$ – загальна маса конструкції МДУ без металу, кг, яка складається з: $m_{конструкції} = (m_t + m_k + m_\phi + m_{м.п.} + m_{ш} + m_{ем.сист.})$, кг, у т. ч. m_t – маса метало-конструкції тигля, кг; m_k – маса металоконструкції каналу, кг; m_ϕ – маса футеровки, кг; $m_{м.п.}$ – маса металопровода, термопари, інших пристосувань, змонтованих на МДУ, кг; $m_{ш}$ – маса шасі МДУ, кг; $m_{ем.сист.}$ – маса електромагнітних систем МДУ, кг; g – прискорення вільного падіння $9,8 \text{ м}^2/\text{с}$; $F(m_{BVC})$ – величина, що вимірюється ВВС у ваговому еквіваленті, Н. Діапазон варіації величини $F(m_{BVC})$ для даного випадку залежить від місткості використовуваної моделі МДУ і становить у ваговому вимірі еквівалент масі (4000-5500) кг.

Для випадку МДУ з IBVC, датчики установки встановленою безпосередньо під тиглем установки, рівняння балансу сил не має складової маси шасі та електромагнітних систем ($m_{ш} + m_{ем.сист.} = 0$), але при роботі МДУ в режимах створення електромагнітного тиску має додаткові «нормальні» складові вищевказаних силових електромагнітних взаємодій:

$$(m_t + m_\phi + m_k + m_{м.п.}) \cdot g - (F_{ем.сил.} + F_{реак.констр.} + F_{ем.взаємод.} + F_{рад.сил.}) = F(m_{IBVC}) \quad (3.2)$$

де $F(m_{IBVC})$ – величина, яка вимірюється IBVC, перетворена в силу, пропорційну ваговому еквіваленту, Н. Її ваговий еквівалент коливається в діапазоні мас (1500-2500) кг, що у 2-3 рази менше за масу, що необхідно вимірювати за допомогою платформених вагів. Це спрощує умови роботи обладнання та підвищує ефективність функціонування системи управління, зокрема, створює передумови для підвищення точності дозування.

Слід також враховувати широкі можливості МДУ по створенню різних режимів руху розплаву в системі «канал – тигель», які забезпечуються завдяки численним варіантам включення електромагнітних систем установки (рис. 3.1, 3.2).

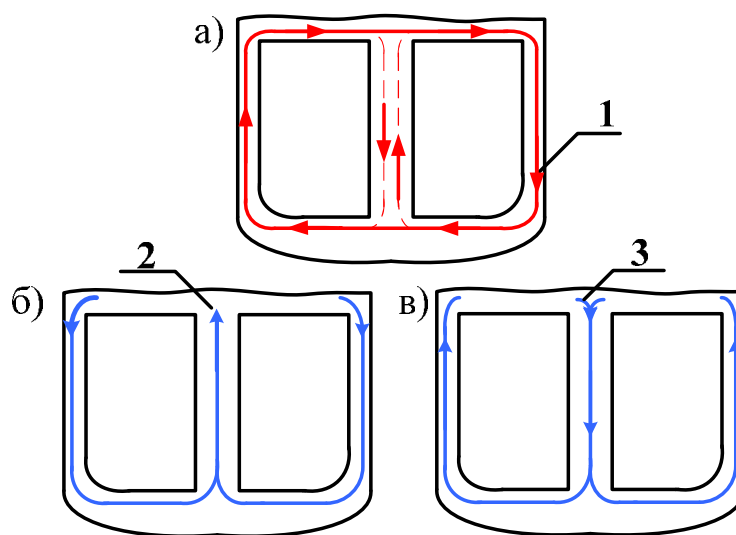


Рис. 3.1. Протікання електричного струму (а) та відповідні варіанти руху розплаву в МДУ (б – нагнітання, в – всмоктування) при синфазному включенні індукторів (режим «насос»)

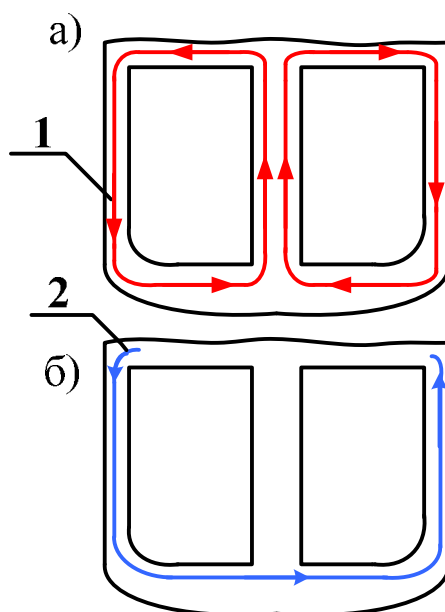


Рис. 3.2. Протікання електричного струму (а) та рух розплаву в МДУ (б – бокове перемішування) при протифазному включенні індукторів (режим «піч»)

Так, при синфазному включенні котушок індукторів (наприклад, фази АВ-АВ, рис. 3.1) струм в індукційному каналі протікає за напрямком 1 (рис. 3.1,

а). Такий режим називають «насос», і в ньому залежно від полярності включення електромагніта можна реалізувати два варіанти руху розплаву: нагнітання у центральний канал через робочу зону за напрямком 2 (рис. 3.1, б) або всмоктування з тигля у центральний канал у напрямку р. з. за напрямком 3 (рис. 3.1, в).

При протифазному включенні котушок індукторів реалізується режим «піч» (рис. 3.2), якому відповідає протікання струму за напрямком 1 (рис. 3.2, а) та рух розплаву за напрямком 2 (або у зворотній бік) – бокове перемішування (рис. 3.2, б).

На першому етапі досліджували залежність нормальної складової сумарних електромагнітних силових взаємодій ($\sum F_{em} = f(U_{ind}, U_{em})$) МДУ з ІВВС при включенні індукторів МДУ в режим «насос» на ступені 1, 3 і 5 (відповідно 42, 60 і 80 В на кожну) і варійованих значеннях напруги, що подається на електромагніт, від 40 до 80 В (ступені 1, 2, 3, 4, 5). Отримані експериментальні дані показані на рис. 3.3.

Експериментальні залежності ($\sum F_{em} = f(U_{ind}, U_{em})$) (рис. 3.3) можна інтерполювати до лінійної кореляційної математичної моделі, – поліному 1-го або 2-го ступеню.

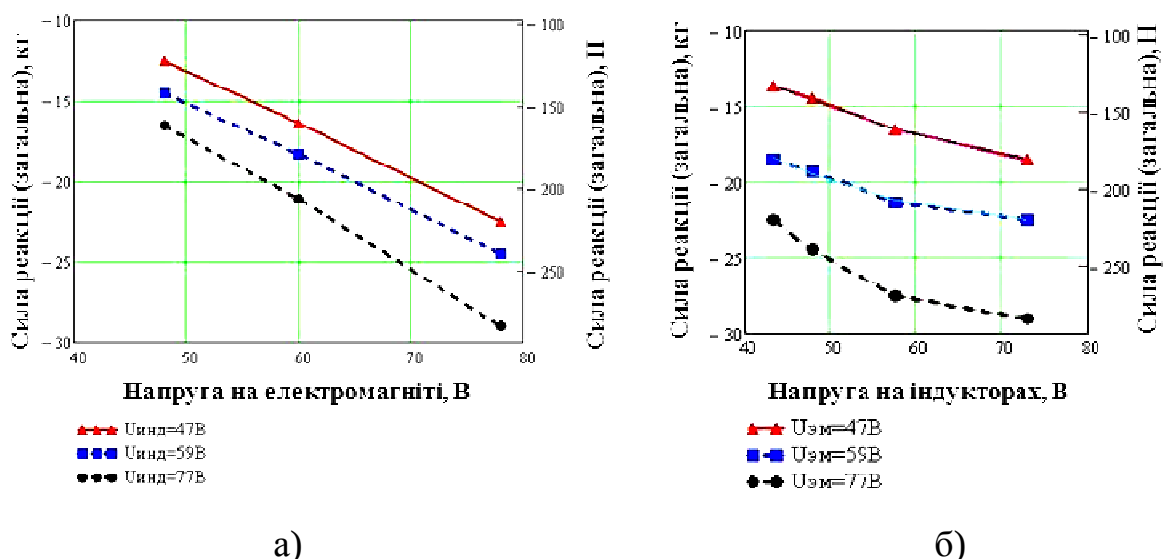


Рис. 3.3. Експериментальні залежності сумарних електромагнітних сил при роботі МДУ в режимі «насос» від напруги, що подається на електромагніт (а) і на індуктори (б)

Первинна інтерполяція (кореляційний аналіз) експериментальних залежностей показала, що за умови використання для інтерпретації поліноміальних законів від 1-го до 3-го ступеня, коефіцієнти 2-го і 3-го ступеня, ($k_2 \cdot x^2$ та $k_3 \cdot x^3$), мають значення порядків 10^{-3} і 10^{-5} , знаходяться у діапазоні похибок вимірювань експериментальних величин. Найбільш прийнятним для аналізу (рис. 3.3, а) $(\sum F_{em} = f(U_{em}))$ прийнятий тип кореляційної залежності лінійного рівняння 1-го ступеня типу $(y(x) = k \cdot x + c)$.

Аналітичний вид залежності $(\sum F_{em} = f(U_{em}))$ (рис. 3.3(а)) від напруги, що подається на обмотки електромагніту $(U_{em}(40 \div 80 B) - var)$ для 4-х значень на індукторах $U_{ind}(43,52,58,73 B) = const$ має вигляд:

$$\begin{aligned} \sum F_{em}(U_{ind=43,4}, U_{em}) &= (-0,309224 \cdot U_{em} + 0,729145) \cdot g, R = 99.15\% \\ \sum F_{em}(U_{ind=52,0}, U_{em}) &= (-0,325305 \cdot U_{em} + 0,589465) \cdot g, R = 99.69\% \\ \sum F_{em}(U_{ind=57,5}, U_{em}) &= (-0,364912 \cdot U_{em} + 0,857896) \cdot g, R = 99.82\% \\ \sum F_{em}(U_{ind=73,0}, U_{em}) &= (-0,350877 \cdot U_{em} - 1,57895) \cdot g, R = 99.95\% \end{aligned} \quad (3.3)$$

Встановлені залежності (3.3) можуть бути використані для управління електромагнітним тиском МДУ в режимі «насос» шляхом регулювання напруги (U_{em}) незалежно від параметрів роботи індукторів U_{ind} (напруги на індуктори МДУ), що дозволить реалізувати незалежне управління режимом нагріву розплаву при його електромагнітному розливанні [56].

Аналіз залежностей впливу напруги живлення індукторів $(\sum F_{em} = f(U_{ind}))$ інтерпольовано до поліному 2-го ступеня (рис. 3.3(б)). Аналітичний вид залежностей від напруги, що подається на індуктори $(U_{ind}(40 \div 80 B) - var)$, при незмінних значеннях напруги на електромагнітній $(U_{em}(43,52,58,73 B))$ має вигляд (3.4):

$$\begin{aligned}
\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em=48}) &= (2,1855 \cdot 10^{-3} \cdot U_{ind}^2 - 0,419108 U_{ind} + 0,456612) \cdot g, R = 99.7\% \\
\sum F_{em}(U_{ind=58}, U_{em=60}) &= (3,86597 \cdot 10^{-3} \cdot U_{ind}^2 - 0,589209 U_{ind} - 0,106744) \cdot g, R = 99.47\%, \text{ Н} \quad (3.4) \\
\sum F_{em}(U_{ind=73}, U_{em=78}) &= (8,70144 \cdot 10^{-3} \cdot U_{ind}^2 - 1,23261 U_{em} + 14,6097) \cdot g, R = 99.99\%
\end{aligned}$$

У приведенні до двофакторної залежності ($\sum F_{em} = f(U_{ind}, U_{em})$) отриманих експериментальних даних (рис. 3.3 (а, б)) до виду: 1 – простої лінійної площини ($\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) = k_1 \cdot U_{ind} + k_2 \cdot U_{em} + c$); 2 – білінійної сідлової функції ($\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) = k_1 \cdot U_{ind} + k_2 \cdot U_{em} + k_3 \cdot U_{ind} \cdot U_{em} + c$); 3 – квадратичного полінома ($\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) = k_1 \cdot U_{ind} + k_2 \cdot U_{em} + k_3 \cdot U_{ind} \cdot U_{em} + k_4 \cdot U_{ind}^2 + k_5 \cdot U_{em}^2 + c$) 2-го ступеня, такі залежності набувають вигляду (3.5):

$$\begin{aligned}
1 - \sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) &= (-0,09229 \cdot U_{ind} - 0,3456 \cdot U_{em} + 6,2683) \cdot g, R = 89\% \\
2 - \sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) &= \begin{pmatrix} -0,01126 \cdot U_{ind} - 0,2743 \cdot U_{em} - \\ -0,001404 \cdot U_{ind} \cdot U_{em} + 2,1729 \end{pmatrix} \cdot g, R = 95.7\% \quad , \text{ Н} \quad (3.5) \\
3 - \sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}) &= \begin{pmatrix} -0,001093 \cdot U_{ind}^2 - 0,000794 \cdot U_{em}^2 - \\ + 0,065497 \cdot U_{ind} - 0,22967 \cdot U_{em} - \\ -0,0006 \cdot U_{ind} \cdot U_{em} - 0,950214 \end{pmatrix} \cdot g, R = 99.47\%
\end{aligned}$$

Рівняння 3 з виразу (3.5) більш повно відображає характер нелінійності впливу електромагнітних взаємозв'язків індукованих у Ш-подібному каналі МДУ струмів (з щільністю 3000-8000 А/мм²) з магнітними полями електромагніту (0,05-0,3 Тл) може справедливо використовуватися в якості математичної моделі для розрахунку електромагнітних сил в р.з. МДУ і для подальшого теоретичного обґрунтування МГД-впливів. Для випадку практичного застосування в САУ на базі мікропроцесорної техніки прийнятно використовувати рівняння 1 та 2 з виразу (3.5).

Аналіз отриманих виразів (3.5), з точки зору співвідношення регресійних коефіцієнтів $-k_1/k_2$ (рис. 3.4), дозволяє оцінити роль та ступінь участі індукованих у рідкометалевому витку в Ш-подібному каналі МДУ струмів (I) і магні-

тного поля (B), а саме – участь складової струму в індукції магнітного поля для створення електромагнітної сили в р.з. МДУ, що становить – $k1/k2 = [U_{ind} / U_{em}] = 1 / (3,7 \div 3,5) = 0,27 \div 0,29$. Співвідношення коефіцієнтів нелінійності 2-го порядку $k4/k5 = [U_{ind}^2 / U_{em}^2] = 1,375/1$ характеризує зниження ступеня впливу величини напруг живлення індукторів при створенні максимальних значень електромагнітних сил та електромагнітного тиску (до 30 кПа).

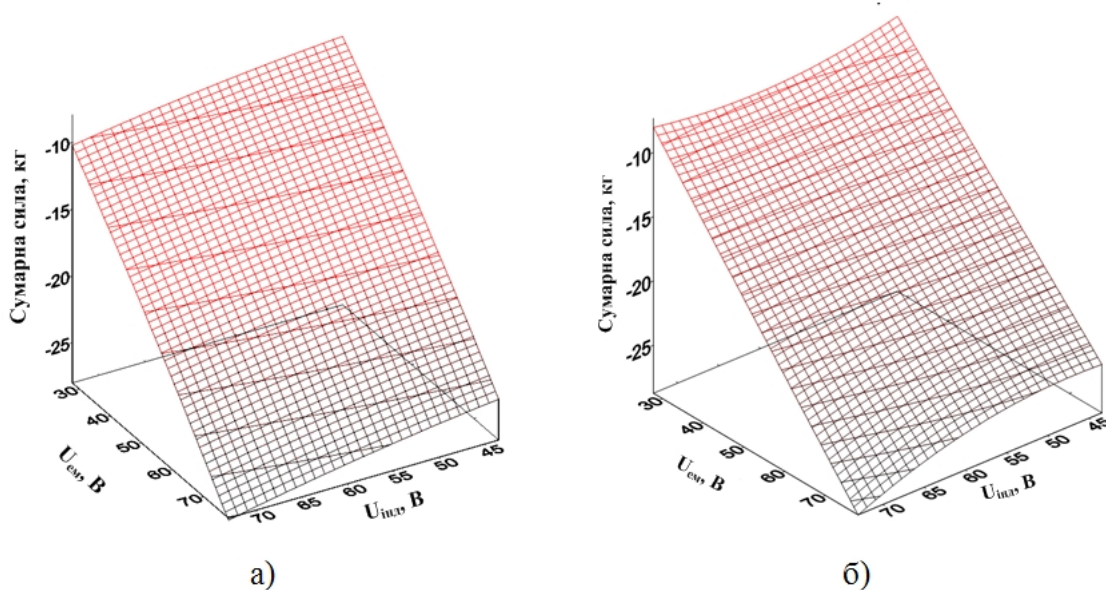


Рис. 3.4.Тривимірний (3D) вигляд кореляційної моделі $(\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}))$ (а – лінійного типу (1-й тип 3.5-(1)) та б – квадратичного полінома (2-й тип 3.5-(3)), створюваної в МДУ сумарної електромагнітної сили (у кг), від напруги, що подається на обмотки індукторів (U_{ind}) і електромагніту (U_{em})

Для перетворення вимірюваних за допомогою ІВВС сумарних електромагнітних сил $(\sum F_{em}(U_{ind}, U_{em}))$ у створюваний в р.з. МДУ електромагнітний тиск (p_{em}) та для його порівняння з напорними характеристиками, слід взяти до уваги, що на створення власне гідравлічного напору в центральному трубопроводі Ш-подібного каналу МДУ за межами р.з. МДУ діє лише частина нормальної складової сили f . Вона проектується на переріз випускного патрубку трій-

никової р.з. – $S_{nat. p.z.}$. За межами такої р.з. на розплав не діють об'ємні односпрямовані електромагнітні сили ($F_{em} = df_{em}/dV$) [16], тому можна зробити перетворення отриманих залежностей (3.3-3.5) до виду $-(h = f(p_{em}) \equiv f(f_{em}))$:

$$h(f_{em}) = (f_{em}/S_{nat.p.z.})/(r \cdot g) = k \cdot f_{em}, \text{ м} \quad (3.6)$$

де f_{em} – величина електромагнітної сили, Н; $S_{nat.p.z.}$ – площа перерізу випускного патрубку трійникової р.з. МДУ ($S_{nat.p.z.} = (7,85 \div 9,42) \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$); r – густина алюмінієвого розплаву, кг/м^3 (для сплаву АК7 при температурі 700°C $r \approx 2450 \text{ кг/м}^3$); k – коефіцієнт перетворення проекцій електромагнітних сил на випускний патрубок трійникової р.з. ($k \approx 0,0441 \div 0,053 \text{ с}^2/\text{кг}$).

Поряд з цим, при створенні максимального електромагнітного тиску в МДУ ($p_{em} = 30 \text{ кПа}$) в р.з. за виразом (3.6), виникає «ефективна» електромагнітна сила ($f_{em}^* = 23,55 \div 31,84$, Н), що створює напір стовпа алюмінієвого розплаву в металопроводі вище рівня розплаву в тиглі ($h = 23,55 \cdot 0,053 \approx 31,84 \cdot 0,0441 \approx 1,250 \text{ м}$).

Однак, порівняння величин ефективної е.м.с. f_{em}^* та виміряної за допомогою ІВВС $\sum F_{em}$ (рис. 3.3 та 3.4) показало, що їх величини відрізняються на порядок (більш ніж в 10 разів) (наприклад для $p_{em} = 30 \text{ кПа}$, $f_{em}^* = (23,55-31,84 \text{ Н}) \ll \sum F_{em} (284,5 \text{ Н})$), а відношення масових еквівалентів при цьому становить 2,4-3,25 кг до 29,5 кг.

Для перетворення встановлених експериментально силових закономірностей (3.3-3.5) до гідравлічної ефективної е.м.с., що створює гідравлічний тиск в розплаві поза р.з. – f_{em}^* , представимо її співвідношення до $\sum F_{em}$ з коефіцієнтом k_{emp} , що характеризує сукупні втрати в р.з. МДУ:

$$k_{emp} = \frac{f_{em}^*}{\sum F_{em}} = \frac{(23,55 \div 31,84)}{284,50} = (0,08278 \div 0,1112) \quad (3.7)$$

Таким чином, реально встановлене значення ефективності дії (фактично коефіцієнт корисної дії – ККД) електромагнітних сил у трійниковій р. з. існуючої МДУ для створення гідравлічного тиску становить від 8,3 до 11,1%.

З огляду на вищезазначене, вираз (3.6) з урахуванням (3.7) має вигляд:

$$h(\sum F_{em}) = k_{emp} \cdot \frac{\sum F_{em} / S_{nam.p.z.}}{r \cdot g} = k_{emp} \cdot k \cdot \sum F_{em} = (0,0036 \div 0,0059) \cdot \sum F_{em}, \text{ м} \quad (3.8)$$

Згідно з (3.8), теоретично розрахований напір складатиме від 1 до 1,68 м. що в цілому відповідає заявленим технічним характеристикам існуючої МДН-6А. У даному випадку, вираз (3.8) є закономірністю перетворення вимірюваних за допомогою ІВВС і створюваних у р.з. МДУ об'ємних електромагнітних сил до величини створюваного в МДУ електромагнітного напору (тиску), а математична кореляційна модель залежності напірних характеристик МДУ від напруги живлення індукторів і електромагніту з урахуванням (3.5) і (3.8) має вигляд (3.9):

$$h(U_{ind}, U_{em}) = -(0,0036 \div 0,0059) \cdot \left(\begin{aligned} &-0,001093 \cdot U_{ind}^2 - 0,000794 \cdot U_{em}^2 - \\ &+ 0,065497 \cdot U_{ind} - 0,22967 \cdot U_{em} - \\ &- 0,0006 \cdot U_{ind} \cdot U_{em} - 0,950214 \end{aligned} \right) \cdot g, \text{ м} \quad (3.9)$$

Перевірка адекватності математичної моделі (3.9), її відповідності реальним експериментальним залежностям напірних характеристик (отриманих за методикою вимірювання реального перепаду рівнів металу в тиглі МДУ та металопроводі [57]) у залежності від напруги живлення електромагніту (від 35 до 75В) і для 3-х значень напруги, що подається на обмотки індукторів (44, 58 і 73 В), підтвердила відповідність математичної моделі (3.9) (рис. 3.5). Девіація ма-

тематичної моделі напору в МДУ з урахуванням сукупної похибки експериментальних вимірювань напруги і напірних характеристик $\pm 2,5\text{-}3\%$ склала не більше $\pm 7\%$ ($R = 0,9$).

Однак у результаті перевірки адекватності (рис. 3.5) добуток коефіцієнтів втрат і перетворення проектування електромагнітних сил на випускний парубок трійникової р.з. показав більш вузький зон ($k_{втр} \cdot k = 0,00439 \div 0,004935$) (рис. 3.6) і відповідно дещо менше верхнє значення реального напору – 1,4 м алюмінієвого стовпа. Обґрунтування причин нелінійності може полягати в особливостях процесів перерозподілу щільності струму в проекції трійникової р. з., а також наявних у ній МГД-явищ [58].

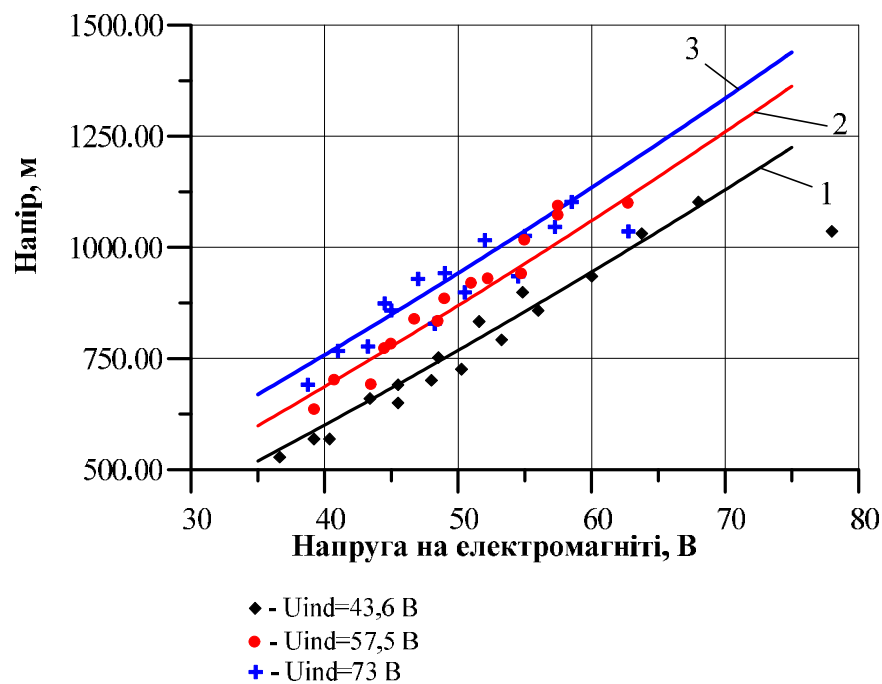


Рис. 3.5. Порівняння розрахункових і експериментальних значень напірних характеристик МДУ (адекватність математичної моделі)

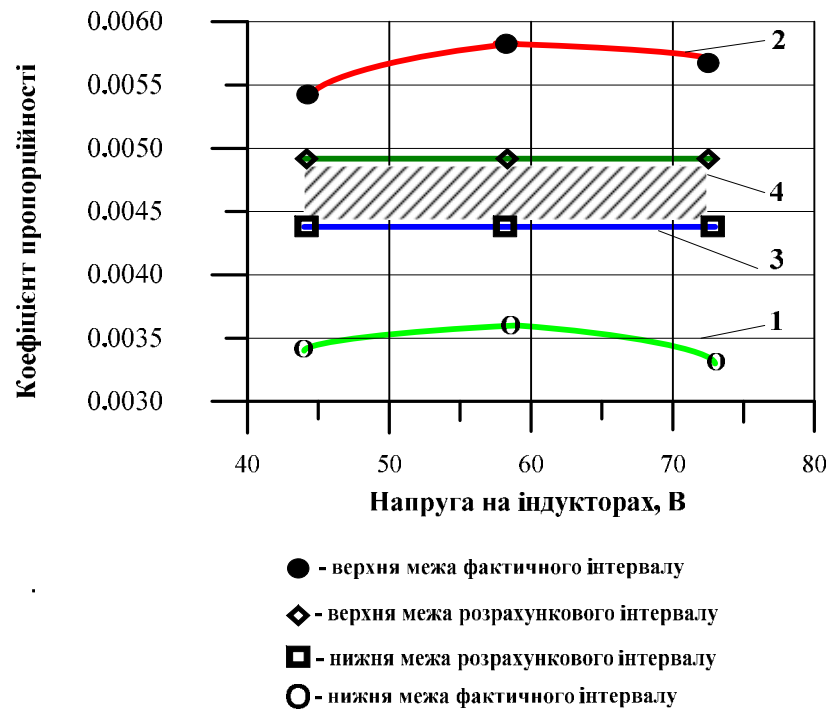


Рис. 3.6. Нелінійність залежності коефіцієнта пропорційності (втрат) від напруги, що подається на обмотки індукторів

Реальний коефіцієнт втрат ($k_{втр}$) для виразу (3.9) виявився дещо більше передбачуваного діапазону варіації (рис. 3.6 – 3, 4). Фактична залежність коефіцієнта ($K^* = k_{втр} \cdot k \cdot f(U_{інд})$) при цьому має нелінійний характер (рис. 3.6 – 1, 2), і може бути представлена як функція від напруги, що подається на індуктори МДУ:

$$K^* = k_{ном} \cdot k \cdot f(U_{інд}) = -9,54 \cdot 10^{-7} \cdot U_{інд}^2 + 0,000118 \cdot U_{інд} + 0,0019 \quad (3.10)$$

В цьому випадку, вирази (3.8) та (3.9) мають вигляд:

$$h^*(U_{інд}, U_{ем}) = (0,00525 \div 0,0055) \cdot \left(-9,54 \cdot 10^{-7} \cdot U_{інд}^2 + 0,000118 \cdot U_{інд} + 0,00191 \right) \times \\ \times \left(\begin{array}{l} -0,001093 \cdot U_{інд}^2 - 0,000794 \cdot U_{ем}^2 - \\ + 0,065497 \cdot U_{інд} - 0,22967 \cdot U_{ем} - \\ - 0,0006 \cdot U_{інд} \cdot U_{ем} - 0,950214 \end{array} \right) \cdot g, \mathcal{M} \quad (3.11)$$

А залежність напірних характеристик для МДУ від сумарних електромагнітних сил (3.8), має вигляд:

$$h(\sum F_{em}) = K * \sum F_{em} = (0,00525 \div 0,0055) \cdot \sum F_{em}, \text{ м} \quad (3.12)$$

Встановлені закономірності є дуже інформативними з точки зору систематизації залежностей взаємного впливу на створення в МДУ електромагнітної сили, величину ефективної електромагнітної сили, що створює електромагнітний тиск та власне напір, як основну експлуатаційну характеристику роботи МДН-6А в залежності від напруги, що подається на індуктори і електромагніт в режимі «насос».

Поряд з цим, отримані закономірності можна використовувати в якості основних законів при створенні САУ МДУ. До таких можна віднести виділення складових ефективної роботи МДУ, взаємозв'язків режимів роботи систем індуктування електричних струмів і створення зовнішнього магнітного поля, як в комплексі, так і окремо. Створена математична модель може бути використана для незалежного управління режимами нагріву розплаву в МДУ (шляхом варіювання напруги, що подається на індуктори в залежності від маси розплаву, необхідних режимів нагріву та підтримки заданого значення температури розплаву) в режимі «насос», і забезпечення досягнення затребуваної величини електромагнітного тиску. Іншим аспектом аналізу залежності електромагнітних сил від напруги, що подається на індуктори і електромагніт, є можливість встановлення закономірності їх взаємного впливу при створенні електромагнітної сили.

Також за допомогою проведеного аналізу вперше встановлено реальне значення гідродинамічного ККД трійникової р. з. МДН-6А, що знаходиться в діапазоні 8-11% від величини, відповідної значенню ефективної електромагнітної сили, генерованої у трійниковій р. з. МДУ.

У розглянутій вище математичній (регресійній) моделі, в якості аргумента, що вимірюється за допомогою ІВВС, було використано сумарну величину електромагнітних сил.

Для виділення чистої (ефективної) складової електромагнітної сили ($f_{ем.сил.}^*$), що характеризує основну експлуатаційну характеристику МДН-6А – напір, в роботі були проведені експериментальні дослідження залежностей складових радіальних сил ($F_{рад.сил.}$), електромагнітних взаємодій з конструкцією МДУ ($F_{реак.конст.р.}$), складової ($F_{ем.взаємод.}$) та аналіз їх ролі в реєстрованій за допомогою ІВВС величини сумарних електромагнітних сил.

Залежність і величину складової $F_{ем.взаємод.}$ визначали експериментально шляхом вимірювання силової взаємодії за допомогою ІВВС при включенні МДН-6А в режим «насос», при різних значеннях напруги, що подається на обмотки індукторів у симетричному режимі, відповідно ($U_{інд}$) = 43, 53, 57, 65 та 73 В. Для виділення чистої складової силової взаємодії з С-подібним магнітопроводом, обмотки електромагніту відключали ($U_{ем} = 0$). Маса алюмінієвого розплаву марки АК7 в експериментах варіювалась від 50 до 150 кг. Подальший аналіз даних показав, що зміна маси розплаву в тиглі МДУ не впливає на вимірювану величину. Для встановлення впливу температурного фактору, дослідження величини втягування проводили при температурах від 680 до 740°C. Зі зниженням температури розплаву, сила втягування виявилась трохи вищою. Даний ефект пов'язаний зі зміною абсолютного значення індукції магнітного поля, індукованої поблизу С-подібного електромагніту, і власне значенням сили струму (I) на горизонтальній ділянці каналу МДУ, що є залежною величиною від електропровідності розплаву в каналах МДУ, яка з підвищенням температури збільшується та навпаки (рис. 3.7).

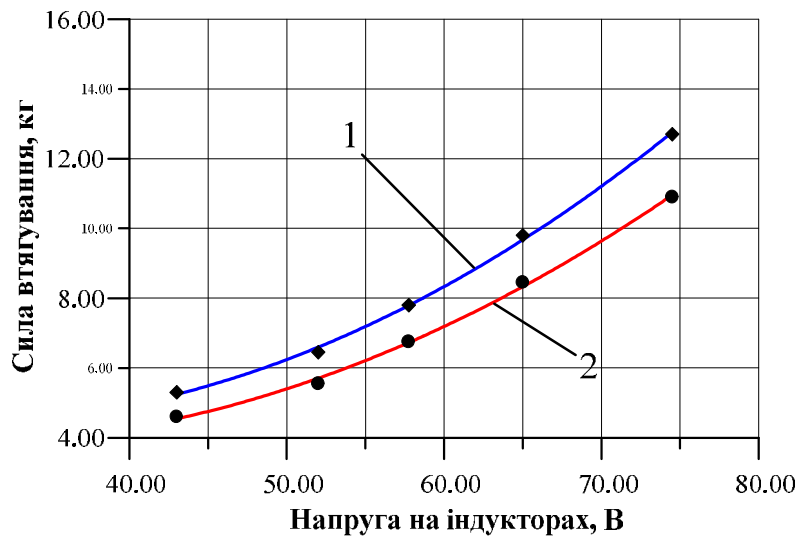


Рис. 3.7. Залежність силової взаємодії струмів, індукованих на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу МДУ з магнітопроводом С-подібного електромагніту від напруги, що подається на обмотки індукторів, де:

- 1 – температура розплаву – 670-680 °C;
- 2 – температура розплаву – 740-750 °C

Кореляція отриманих експериментальних залежностей (див. рис. 3.7) у вигляді математичного виразу має вид:

$$F_{ем.взаємод}(U_{інд}) = \left((0,003298 \div 0,003913) \cdot U_{інд}^2 - (0,1839 \div 0,2213) \cdot U_{ем} + (6,35226 \div 7,521) \right) \cdot g, R = 99,8\%, H, (3.13)$$

Також теоретичний та практичний інтерес отриманих залежностей полягає в можливості визначення фактичного значення сили струму, індукованого на горизонтальній ділянці Ш-подібного каналу в режимі роботи МДУ «насос».

Використовуючи раніше встановлені експериментальні дані залежностей сили струму в обмотках індукторів, з урахуванням розсіювання, безповоротних втрат і дійсного значення $\cos f = 0,65 - 0,75$, для реальної системи індуктування електричних струмів у Ш-подібному каналі МДУ, при виділенні активної скла-

дової струмів, можна привести вираз (3.13) до залежності від величини сили струму ($I_{кан}$):

$$F_{ем.взаємод.}(I_{кан}) = \left((6,8 \div 8,257) \cdot 10^{-8} \cdot I_{кан}^2 - (0,000147 \div 0,00023) \cdot I_{кан} + (1,705 \div 2,1986) \right) \cdot g, H \quad (3.14)$$

$$R = 99,97\%$$

де R – коефіцієнт регресії (співпадіння розрахункових та фактичних даних).

З урахуванням температурного фактору (зміни питомого опору алюмінієвого розплаву в МДУ) вираз (3.14) має вид:

$$F_{ем.взаємод.}(I_{кан}, T^{\circ}C) = f(T^{\circ}C, I_{кан}) + f(I_{кан}) \cdot g, H, \quad (3.15)$$

де $f(T^{\circ}C, I_{кан}) = 0,0102 \cdot (T^{\circ}C - 640^{\circ}C) \cdot (0,0002138 \cdot I_{кан} - 0,9776)$, H – складова поправки залежності (3.14) з урахуванням впливу температури розплаву і сили струму.

Після корекції вираз (3.15) має вид:

$$F_{ем.взаємод.}(I_{кан}, T^{\circ}C) = \left(0,0102 \cdot (T^{\circ}C - 640^{\circ}C) \cdot (0,0002138 \cdot I_{кан} - 0,9776) + \left((6,8 \div 8,257) \cdot 10^{-8} \cdot I_{кан}^2 - (0,000147 \div 0,00023) \cdot I_{кан} + (1,705 \div 2,1986) \right) \cdot g \right) \cdot g, H \quad (3.16)$$

З урахування напруги, що подається на обмотки індукторів:

$$F_{ем.взаємод.}(U_{інд}, T^{\circ}C) = \left(0,0102 \cdot (T^{\circ}C - 640^{\circ}C) \cdot (0,035055 \cdot U_{інд} - 0,8889) + \left((0,003298 \div 0,003913) \cdot U_{інд}^2 - (0,1839 \div 0,2213) \cdot U_{ем} + (6,35226 \div 7,521) \right) \cdot g \right) \cdot g, R = 98\% \quad (3.17)$$

Діапазон зміни величини $F_{ем.взаємод.}(U_{інд}, T^{\circ}C)$, в залежності від напруги, що подається на обмотки електромагніту та температури розплаву, у силовому еквіваленті при цьому склав від 45 до 126 Н (від 4,6 до 12,7 кг).

Як наслідок, сила втягування становить від 40 до 60% по відношенню до сумарної величини електромагнітних сил, що створюються в МДУ, та даних, зафіксованих за допомогою IBVC.

Залежність і величину складової $F_{\text{реак.конст. р.}}$, визначали експериментально шляхом вимірювання силової взаємодії за допомогою IBVC, при включенні електромагніта в режим «насос» та живленні його обмоток напругою $U_{\text{ем}} = 48, 53, 60, 68$ і 78 В. Для виключення впливу радіальних електромагнітних сил у Ш-подібному каналі МДУ, індуктори установки відключали $U_{\text{інд}} = 0$ (табл. 3.1). Встановлену залежність наведено на рис. 3.8.

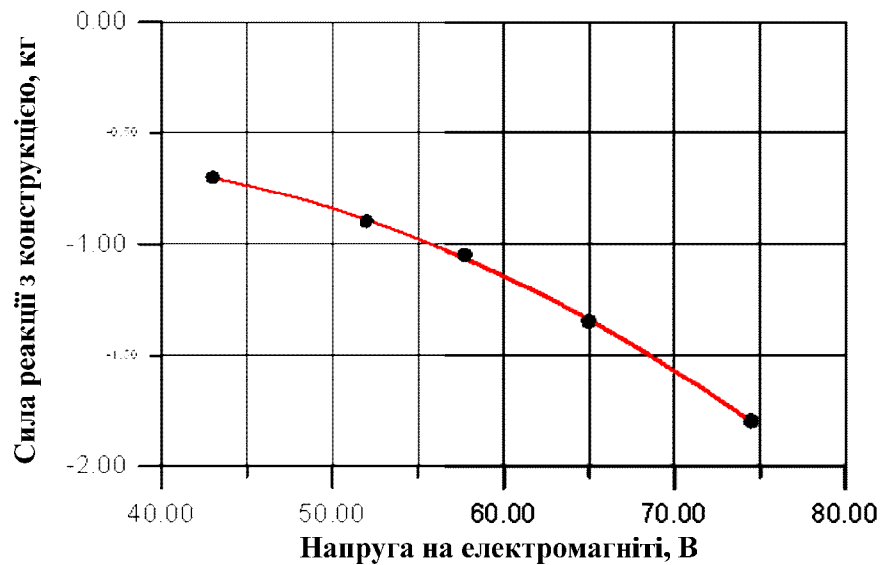


Рис. 3.8. Залежність силової взаємодії зовнішнього магнітного поля з конструкцією Ш-подібного каналу МДУ від напруги, що подається на електромагніт

Кореляція отриманої експериментальної залежності у вигляді виразу:

$$F_{\text{реак.констр.}}(U_{\text{ем}}) = (-0,00061 \cdot U_{\text{ем}}^2 + 0,0373 \cdot U_{\text{ем}} - 1,1687) \cdot g, H \quad (3.18)$$

Таблиця 3.1

Залежність силових електромагнітних взаємодій в МДУ

Режим «насос»	дрос 1		$F_{ем.сил.}$	$F_{ем.сил.}$	$F_{реак.конст.р.}$	$F_{рад.сил.}$	$F_{ем.взаємод.}$
Напруга на обмотках індукторів, $U_{інд}$ В/(ступень)	Напруга на обмотках електромагніта, $U_{ем}$ В/(ступень)		Сумарна сила реакції, кг	Сумарна сила реакції, кг	Сила реакції магнітного поля електромагніта з конструкцією Ш-подібного каналу, кг	Радіальна сила, кг ($U_{ем}=0$)	Сила електромагнітної взаємодії електричного струму в каналі з магнітопроводом електромагніта, кг ($U_{ем}=0$)
	$U_{ем}$ (1 дрос)	$U_{ем}$ (4дрос)	$U_{ем}$ (1 дрос)	$U_{ем}$ (4 дрос)			
43,4/(1)	36,6	48,0	-7,7	-13,7	-0,7	6,7	4,6/5,5
-	40,4	53,3	-8,8	-15,8		6,3	
-	45,5	60,0	-9,95	-18,5		7,85	
-	51,6	68,0	-11,4	-21,0		8,9	
-	59,3	78,0	-13,4	-25,5		11,4	
52,0/(2)	36,6	48,0	-8,35	-14,5	-0,9	5,25	5,55/-
-	40,4	53,3	-9,3	-17,0		6,8	
-	45,5	60,0	-10,6	-19,3		7,8	
-	51,6	68,0	-12,4	-22,5		9,2	
-	59,3	78,0	-14,5	-26,0		10,6	
57,5/(3)	36,6	48,0	-14,5	-16	-1,05	0,45	6,75/8,35
-	40,4	53,3	-	-		-	
-	45,5	60,0	-18,25	-18,7		0,6	
-	51,6	68,0	-	-		-	
-	59,3	78,0	-24,9	-24,5		1,45	
65,0/(4)	36,6	48,0	-	-	-1,35	-	8,45/-
-	40,4	53,3	-	-		-	
-	45,5	60,0	-	-		-	
-	51,6	68,0	-	-		-	
-	59,3	78,0	-	-		-	
73,0/(5)	36,6	48,0	-16,5	-16,5	-1,8	-1,8	10,9/13,8
-	40,4	53,3	-	-		-	
-	45,5	60,0	-21,1	-21,1		-1,8	
-	51,6	68,0	-	-		-	
-	59,3	78,0	-29	-29		-1,8	

При цьому, дослідження силової взаємодії магнітного поля С-подібного електромагніту з конструкцією каналу МДУ здійснювали без розплавленого металу, задля виключення впливу МГД-силових взаємодій на розплав.

Науковий і практичний інтерес в цьому випадку полягає в можливості реалізації низки заходів з діагностики стану Ш-подібного каналу МДУ. Зокрема, аналіз перерозподілу щільності струмів в проекції трійникової р. з. дозволяє оцінити ступінь заростання індукційного каналу. Також можна виявити взаємний зв'язок і вплив індукційного струму в каналі МДУ та зовнішнього магнітного поля, встановити характерні закономірності перебігу МГД-явищ з метою подальшого удосконалення електромагнітних систем МДУ і підвищення її ККД.

Діапазон зміни величини $F_{\text{реак.констр.}}(U_{\text{ем}})$, в залежності від напруги, що подається на обмотки електромагніту, склав від -7 до -18 Н (від -0,7 до -1,8 кг). В даному випадку знак «-» дослідженої величини пояснюється особливістю взаємодії зовнішнього магнітного поля в міжполюсному зазорі С-подібного електромагніту з конструкцією каналу МДУ, а саме трійниковою р. з. Як результат, має місце утворення електрично замкнутих контурів, що створюють реактивний опір.

Сила реакції з конструкцією каналу МДУ становить від 5 до 6% по відношенню до сумарної величини електромагнітних сил, створених в установці та реєстрованих за допомогою ІВВС. Напрямок $F_{\text{реак.констр.}}$ співпадає з напрямком електромагнітних сил, генерованих в р. з. МДУ, тобто залежить від полярності підключення електромагнітних систем і суперпозиції індукційного струму та змінного зовнішнього магнітного поля.

З точки зору розробки САУ, досліджена величина може бути використана для виділення складової електромагнітних сил, що розвиваються в рідкому металі та окремо силового впливу на нього. При цьому фактична сила реакції з конструкцією каналу МДУ сама по собі відноситься до безповоротних втрат, що не створюють силовий вплив на розплав.

Сукупність реалізованих в цьому дослідженні підходів щодо контролю та управління технологічними і експлуатаційними характеристиками роботи МДУ дозволяє надалі розробити ряд спеціальних, високоточних методів визначення властивостей і характеристик розплаву в процесі його комплексної електрофізичної обробки МДУ. Поряд з цим, систематизація електромагнітних взаємодій в МДУ дозволить, окрім оптимізації технологічних процесів обробки і лиття алюмінієвих сплавів, також створювати високоточні адекватні комп'ютерні моделі МДУ і на їх основі сформулювати концептуальні підходи щодо вдосконалення існуючого та розробки МГД-обладнання нового покоління.

3.2. Розрахунок основних параметрів МДУ для алюмінієвих сплавів

3.2.1. Розрахунок основних електричних параметрів електромагнітних систем установки МДН-6А

Для розрахунку було взято алюмінієвий сплав АК7(ГОСТ1583-93)[59]. Його питомий електричний опір при температурі 700 °С складає $7,3 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [8, 50], а глибина проникнення електромагнітної хвилі з частотою 50 Гц у алюмінієвий розплав, згідно з [8, 50, 51] становить близько 0,02 м.

Параметри вторинної обмотки трансформаторів АОЕС3-180/420 для живлення МДУ наведені у табл. 3.2.

Параметри системи індуктування струму в рідкому металі дослідної магнітодинамічної установки МДН-6А місткістю 630 кг рідкого алюмінієвого сплаву наведено у табл. 3.3.

Згідно з методикою (див. пп. 2.3.1), індукційний канал з металом для зручності розрахунку електричних параметрів системи «індуктор – виток розплаву» розбито на 7 ділянок (рис. 3.9), з яких ділянки №№ 3, 6 є радіальними, а інші – прямолінійні (геометричні характеристики ділянок наведені у табл. 3.4). При цьому a_{xi} – довжина ділянки витка, м; l_{xi}, b_{xi} – розміри перерізу витка на

ділянках завдовжки a_{xi} (l_{xi} – розмір у напрямку проникнення електромагнітної хвилі, м).

Таблиця 3.2

Паспортні характеристики холостого ходу вторинної обмотки силових трансформаторів для живлення індукторів та електромагніта дослідної магнітодинамічної установки МДН-6А

Параметр / Ступені	1	2	3	4	5
<u>Індуктор</u>					
Напруга U_{mp2} , В	52	58	65	78	89
Струм I_{mp2} , А	2	9	22	43	95
<u>Електромагніт</u>					
Напруга U_{mp2} , В	27	32	35	40	46
Струм I_{mp2} , А	300	320	380	435	500

Таблиця 3.3

Параметри котушки індуктора

Число витків	$W_u = 30$
Переріз профільованої трубки, мм ²	$18 \times 2,5$
Висота обмотки (без урахування фланців), мм	$b_u = 144$
Товщина обмотки, мм	$l_u = 16$

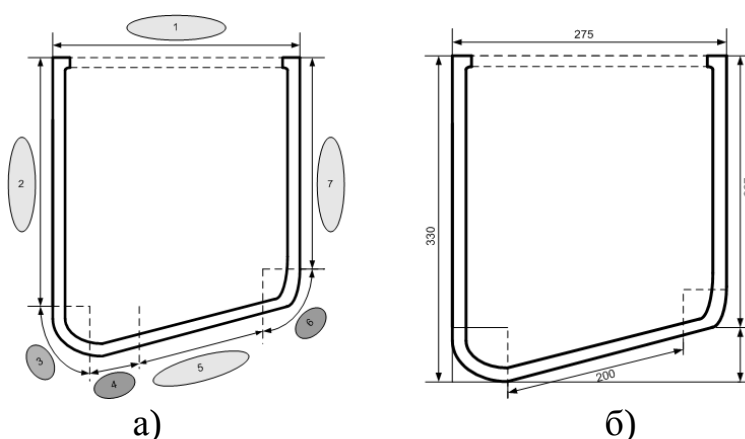


Рис. 3.9. Половина індукційного каналу системи «індуктор – виток розплаву»: а – розбиття на ділянки для розрахунку активного опору (R_b), б – ескіз з основними розмірами

Параметри, необхідні для розрахунку активного опору
рідкометалевого витка

№ ділянки каналу	b_{xi} , М	l_{xi} , м	a_{xi} , м	$\frac{2l_{xi}}{h_e}$	$R_{\text{вн}}$, м	R_n , М	$\frac{R_{\text{вн}}\sqrt{2}}{h_e}$	$\frac{R_n\sqrt{2}}{h_e}$	F_{xi}
1 (у тиглі)	0,05	0,280	0,09	5,1	—	—	—	—	0,993
2	0,025	0,275	0,09	2,55	—	—	—	—	0,959
3	0,025	0,141	0,09	—	0,06	0,075	4,33	5,4	1,48
4	0,03	0,045	0,09	3,06	—	—	—	—	0,919
5	0,015	0,06	0,06	1,53	—	—	—	—	1,37
6	0,040	0,875	0,03	—	0,025	0,040	1,8	2,88	1,89
7	0,035	0,255	0,035	3,57	—	—	—	—	0,925

Розрахунок проведено згідно з методикою (див. пп. 2.3.1) за формулами (2.1-2.52). Результати розрахунку представлено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Основні електричні параметри електромагнітних систем установки МДН-6А

Параметр	Умовне позначення	Розрахункове значення
Активний опір індуктора, Ом	$R_{\text{с}}$	$3,28 \cdot 10^{-4}$
Індуктивний опір, Ом	$x_{\text{с}}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$
Повний опір, Ом	$z_{\text{с}}$	$6,042 \cdot 10^{-4}$
Електрорушійна сила (ЕРС), створювана індуктором у витку рідкого металу, В	E_{ei}	3,94
Максимальна індукція в залізі магнітопровода індуктора, Тл	B_{Fei}	0,616
Електричний струм в рідкому металі, А	$I_{\text{с}}$	6567
Активна потужність, що виділяється у витку, кВА	$P_{\text{ас}}$	25,9
Коефіцієнт потужності витка	$\cos j_{\text{с}}$	0,54

Електричний струм в індукторі, А	I_i	219
Вага сталі магнітопровода, кг	G_{Fei}	59,2
Втрати потужності в сталі магнітопровода, кВт	P_{Fei}	24,3
Активна складова струму холостого ходу індуктора, А	I_{oa}	187
Магніторушійна сила (МРС), А·вит	$(IW)_m$	356
МРС в повітряних проміжках заліза магнітопровода, А·вит	$(IW)_3$	0,377
Реактивна складова струму холостого ходу, А·вит	$(IW)_{op}$	733
Струм холостого ходу індуктора, А	I_{oi}	24,4
Максимальний струм в обмотці індуктора, А	I_i	605
Активний опір обмотки індуктора, Ом	R_i	$2,64 \cdot 10^{-3}$
Втрати потужності в обмотці індуктора, кВт	P_{Cui}	0,125
Активна потужність індуктора, кВт	P_{ai}	25,25
Повна потужність індуктора, кВА	P_{si}	28,5
Реактивна потужність індуктора, кВА	P_{pi}	26,5
Коефіцієнт потужності індуктора(фактично його $\frac{1}{2}$)	$\cos j_i$	0,89
Потужність конденсаторів, кВА	P_{Cu}	13,25
Втрати потужності в конденсаторах, кВт (при $U_i = 380 В$) / (при $U_i = 349 В$)	P_{aCu}	0,1325 / 0,11
Максимальна потужність, споживана в системі «індуктор – виток рідкого металу», кВт	P_i	51,09
Струм після компенсації реактивної потужності, А	$I_{mp(max)}$	963
Електричний ККД системи індукції струму	h_{el}	0,51
ЕРС на виток котушки електромагніта, В	E_e	19,74
Максимальна індукція в магнітопроводі електромагніту, Тл	B_{Fee}	1,56
Магнітна індукція в центрі полюса електромагніту, Тл	B_n	0,24
Активний опір обмотки електромагніту, Ом	R_e	$3,35 \cdot 10^{-3}$
Активна потужність електромагніту, кВт	P_{ae}	33,4
Повна потужність електромагніту, кВА	P_{se}	425,6
Реактивна потужність електромагніту, кВА	P_{pe}	424,28
Коефіцієнт потужності електромагніту	$\cos j_e$	0,078
Ємність батареї конденсаторів. мкФ	C_e	9357

Одержані дані були в подальшому використані в розрахунку технологічних характеристик дослідної установки МДН-6А.

3.2.2. Розрахунок теплових параметрів установки МДН-6А

Розрахунок проведено згідно з методикою (див. пп. 2.3.2) за формулами (2.53-2.56). Розраховано загальні теплові втрати установки. Результати розрахунку представлено у табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Теплові втрати установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів

Обчислювані поверхні установки	Коефіцієнт теплопере- дачі k , Вт/(м ² ·°C)	Ефективна площа S_e , м ²	Температура стінки T_{cm} , °C	Тепловий потік через футеровку q , кВт/м ²	Теплові втрати P , кВт
Тигель установки					
Бокові стінки тигля	0,73	1,63	70,1	0,5	0,8
Дно тигля	1,74	0,7	105	1,13	0,8
Кришка тигля	30	0,45	400	10,7	4,8
Загальні теплові втрати тигля установки: <u>6,4 кВт</u>					
Канал установки					
Бокові стінки каналу:					
Ділянка 1(1/2)	33,32	0,093	400	9,9	2,7
Ділянка 2(1/2)	17,34	0,06	335	7,2	
Центральна частина:					0,5
Ділянка 1	20,1	0,018	354	7,9	
Ділянка 2	11,1	0,0071	280	5,2	
Ділянка 3	15,87	0,0087	324	6,8	
Нижня частина:					1,3
Ділянка 1	16,5	0,0143	330	6,9	
Ділянка 2	17,5	0,02	325	7,5	
Ділянка 3	21,5	0,011	363	8,3	
Ділянка 4	14,6	0,062	302	6,5	
Загальні теплові втрати каналу установки: <u>4,5 кВт</u>					

Таким чином, загальні теплові втрати дослідної установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів з закритою кришкою складають:

- теплові втрати з тигля та каналу $P_{т.л.} = 6,4 + 4,5 = 10,9 \text{ кВт}$;

- невраховані втрати (20%) – $2,18 \text{ кВт}$

Сумарні теплові втрати з закритою кришкою:

$$\sum P_{\text{втр}} = 10,9 + 2,18 = 13,08 \text{ кВт}.$$

Відповідно, максимальна потужність індуктора в режимі зберігання металу ($T=720^\circ\text{C}$) з урахуванням електричного ККД системи індукції струму становить $P_{I \min} = P_{ab} + \sum P_{\text{втр}} = 39 \text{ кВт}$.

3.2.3. Розрахунок основних технологічних параметрів установки МДН-6А

Розрахунок проведено згідно з методикою (див. пп. 2.3.3) за формулами (2.57-2.59) для ступеня 3 живлення індукторів – 65 В (при максимальній можливій напрузі 89 В, яка відповідає ступеню 5 – див. табл. 3.2). Відповідно основні технологічні параметри дослідної установки МДН-6А для такого підключення становлять:

- тиск, створюваний в робочій зоні: $p_e = 18,2 \text{ кПа}$;
- підйом металу під дією створюваної в робочій зоні електромагнітної сили (електромагнітний напір): $H = 0,594 \text{ м}$;
- продуктивність по перегріву металу на $T = 100^\circ\text{C}$ дорівнює: $\Pi = 0,11 \text{ кг/с}$

Розраховані технологічні параметри МДН-6А можуть бути використані для модернізації дослідної установки, а також враховані при проектуванні технологій з використанням МДУ.

3.2.4. Експериментальна оцінка потужності теплових втрат МДУ для алюмінієвих сплавів експериментальним методом

В даній роботі дослідження проводили згідно з розробленою методикою (див. пп. 2.4), використовуючи наявну схему управління установки МДН-6А. Встановлено, що для стабільності спрацьовування основного приладу двопозиційної системи регулювання температури розплаву в установці (OMRON E5CN-R2TCDC-100-240AC) має пройти два повних циклу «нагрівання-охолодження» (див. табл. 3.7).

Зареєстровано проміжки часу: $t_1; t_2 - t_1; t_3 - t_2; \dots; t_n - t_{n-1}$ за умови, що n парне число і відповідає кінцю одного повного циклу «нагрівання-охолодження». Одночасно реєстрували значення активної потужності $P_1, P_2, \dots, P_n$ відповідне кожному з цих інтервалів. Отримані експериментальні дані наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Визначення зміни у часі температури при двопозиційному регулюванні

№ Цикла	Температура, °C	Тривалість циклу, год	Активна потужність., кВт (інд. 1)	Активна потужність., кВт (інд.2)	U_{i1} , В	I_{i1} , А	U_{i2} , В	I_{i2} , А	Q , кВт·год
1	730	1,00	20	-	59,5	220	28	0	-
2	710	0,05	14	26	59	320	58	360	2,00
3	714	0,17	9,5	19,5	47	260	52	300	4,93
4	730	0,28	14,5	-	48	200	24	0	4,06
5	710	0,25	9,5	20	47	265	52,5	310	7,38
6	730	0,26	14,5	-	48	200	23	0	3,75
7	710		9,5	19,5	47	265	52,5	310	—
8	730	—	—	—	—	—	—	—	—

Встановлено, що швидкість зміни температури розплаву (як при нагріванні, так і при охолодженні) в «коридорі» системи регулювання у діапазоні 710-730 °C складає (2,5-3)°C/хв; параметри нагріву розплаву визначалися при його регулюванні одним індуктором, двома індукторами та при їх почерговому включенні.

Відповідно експериментальним даним визначено потужність теплових втрат установки в режимі «зберігання» з закритою кришкою (маса розплаву 133,5 кг) – 20 кВт (див. рис. 3.10). У перерахунку (рядки 3-4 табл. 3.7) на цикл нагрів/охолодження протягом 27 хв, надлишкова електрична потужність індукторів склала 8,99 кВт.

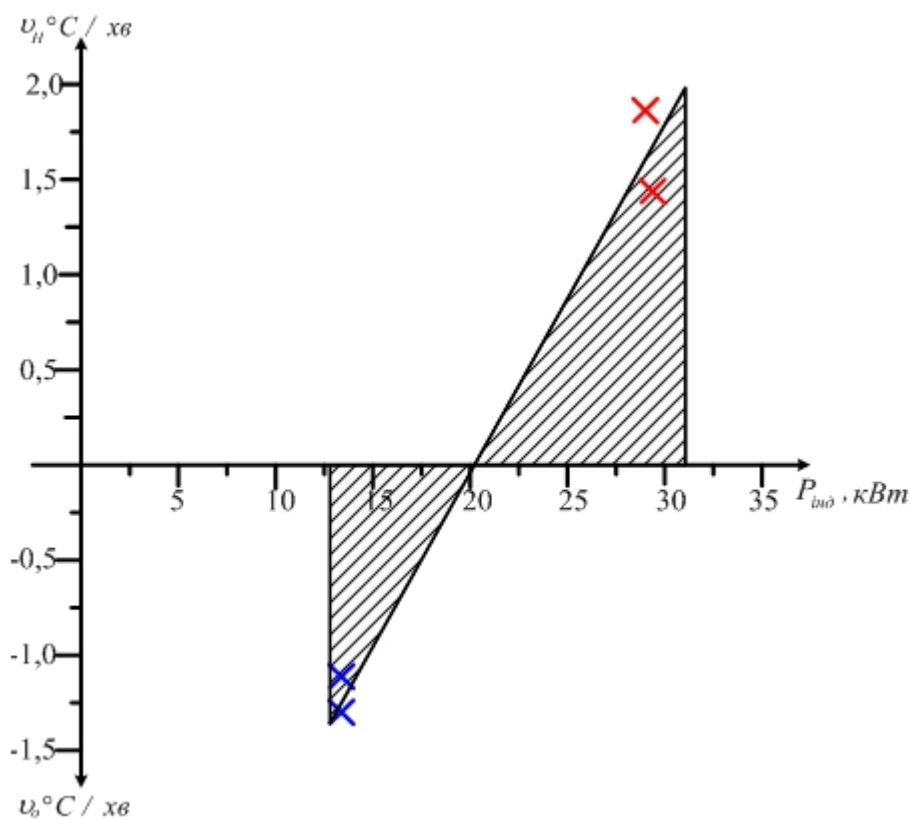


Рис. 3.10. Швидкість зміни температури розплаву залежно від потужності індукторів МДУ

Таким чином, встановлено, що застосування наявної дискретної двопозиційної системи управління потужністю індукторів, в основі якої лежить періо-

дичне перемикання ступенів живлення автотрансформатора, спричиняє надмірне споживання електроенергії у обсязі 19,98 кВт·год, що у питомому виразі становно до маси розплаву у МДУ складе 0,15 кВт·год/кг.

Очевидно, що застосування досліджуваної аналогової САУ дозволить забезпечити суттєве енергозаощадження. Наприклад, для МДУ місткістю 630 кг рідкого алюмінієвого сплаву добова економія електроенергії при роботі в режимі зберігання розплаву складе 480 кВт·год.

3.3. Експериментальне дослідження витратних характеристик МДУ за допомогою фізичного моделювання

Керуючим параметром при дозуванні є напруга, тому задачею даного дослідження було визначення її раціонального інтервалу. Для цього на фізичний моделі, шляхом експериментальних досліджень, використовуючи розроблену методику (див. пп.2.5), були отримані та зафіксовані дані, з урахуванням спостереження за гідравлікою струменя моделюючої рідини, що наведено в табл. 3.8. Цей підхід обґрунтовано тим, що дозу з високою точністю можна залити лише при постійній витраті та, відповідно, при ламінарній течії струменя на зливному жолобі.

Всі дані зафіксовано за інтервал часу 6 с, та в інтервалі напруги U від 10 до 20,5 В (по три запуски фізичної моделі на кожне вибране значення U). Для кожного значення напруги U розраховано витрату моделюючої рідини Q за формулою:

$$Q = \frac{m_{\partial}}{t} \quad (3.19)$$

де m_{∂} – маса дози моделюючої рідини за інтервал часу t .

Дослідження витратних характеристик МДУ

U , В	Q , г/с			$Q_{\text{середн.}}$, г/с	s	n , %	k	m_{vis}
	1	2	3					
10	65,19	65,91	65,03	65,38	0,46	0,7	1,98	0,033
12,3	84,28	80,68	80,35	81,77	2,17	2,6	2,23	0,036
14	100,44	99,88	99,77	100,03	0,35	0,3	2,19	0,045
14,5	109,28	106,78	105,39	107,15	1,97	1,8	2,24	0,048
16,3	118,43	118,58	112,75	116,59	3,32	2,8	2,26	0,051
16,5	122	115,21	112,41	116,54	4,9	4,2	2,03	0,057
18,5	136,94	134,61	132,67	134,74	2,13	1,6	2,35	0,057
20,2	148,91	145,9	140,89	145,23	4,05	2,7	1,77	0,079
20,5	148,28	147,49	146,09	147,29	1,1	0,7	2,27	0,066

де: $Q_{\text{середн.}}$ – середня масова витрата моделюючої рідини, г/с; s – середньоквадратичне відхилення; n – коефіцієнт варіації, %; m_{vis} – миттєве значення маси; k – коефіцієнт залежності миттєвої витрати моделюючої рідини від миттєвого значення її маси.

Далі, для визначення оптимальної напруги було виділено три залежності досліджуваних параметрів напруги від наступних критеріїв:

- миттєвого значення маси m_{vis} ;
- миттєвого значення масової витрати моделюючої рідини Q ;
- для третьої залежності було розраховано коефіцієнт k , що показує чисельну залежність миттєвої витрати від миттєвого значення маси:

$$k = \frac{Q}{m_{\text{vis}}} \quad (3.20)$$

Далі, за допомогою графічного аналізу з почерговим вводом критеріїв було визначено раціональний інтервал напруги. На рис. 3.11, де показана залежність зміни миттєвого значення маси моделюючої рідини на жолобі від подаваної напруги, видно, що зі збільшенням напруги від 10 до 18,5 В миттєве значення маси зростає поступово.

Для уточнення раціональної напруги, при розгляді залежності масової витрати моделюючої рідини від подаваної напруги (рис. 3.12), встановлено, що плавне зростання витрати виникає при меншому інтервалі напруги – від 10 до 16,5 В відповідно.

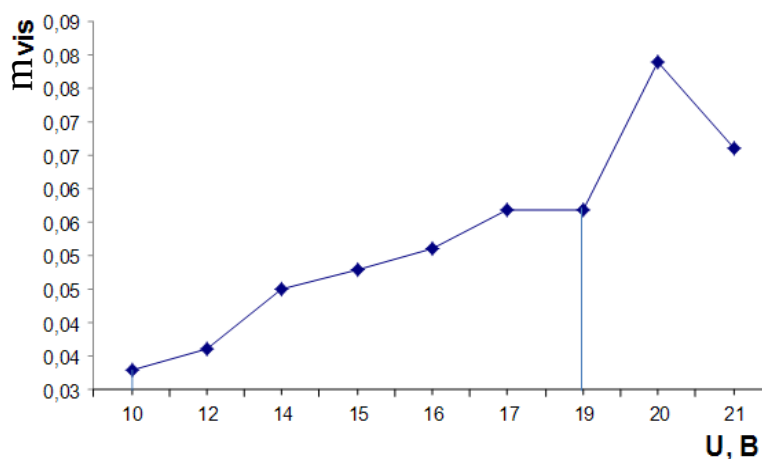


Рис. 3.11. Залежність зміни миттєвого значення маси моделюючої рідини на жолобі від подаваної напруги

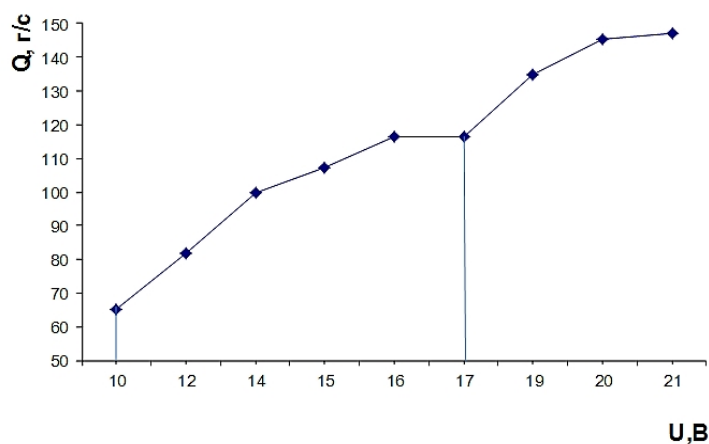


Рис. 3.12. Залежність масової витрати моделюючої рідини від подаваної напруги

На третьому етапі, при введенні коефіцієнта, що показує залежність масової витрати від миттєвого значення маси до подаваної напруги (рис. 3.13), раціональний діапазон зміни k становить від 2,2 до 2,25, про що свідчить мінімізація впливу пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди при заливці доз масою 1,5-3 кг.

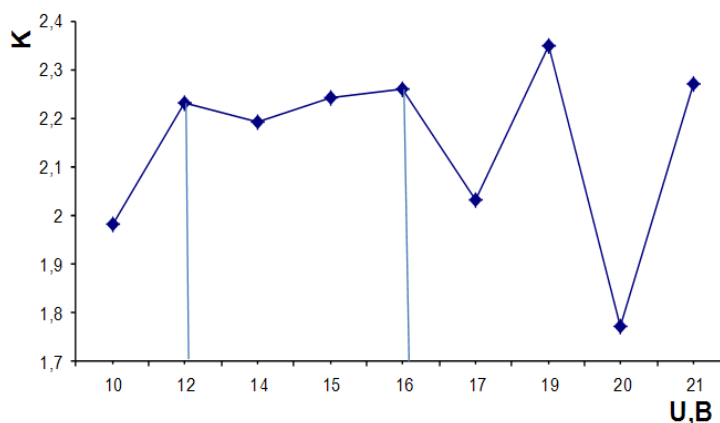


Рис. 3.13. Залежність масової витрати від миттєвого значення маси до напруги, що подається

Шляхом експериментальних досліджень на фізичній моделі МДН-6А встановлено, що визначений діапазон зміни k відповідає діапазону напруги живлення електромагніта $U = 12,3 \div 16,3$ В.

3.4. Висновки по розділу 3

1. Показана відмінність функціональних можливостей МДУ з платформною ваговимірювальною системою (ВВС) і МДУ з інтегрованою ваговимірювальною системою (ІВВС) шляхом порівняння балансу сил. Діапазон у ваговому вимірі еквівалента маси для ІВВС становить 1500-2500 кг, що у 2-3 рази менше за масу, вимірювану за допомогою платформених вагів і, відповідно, спрощує умови роботи обладнання та підвищує ефективність функціонування

системи управління, зокрема, створює передумови для підвищення точності дозування.

2. Досліджено залежність нормальної складової сумарних електромагнітних силових взаємодій МДУ з ІВВС при включенні індукторів МДУ в режим «насос» на ступені 1, 3 і 5 (відповідно 42, 60 і 80 В на кожному) і варійованих значеннях напруги, що подається на електромагніт, від 40 до 80 В (ступені 1, 2, 3, 4, 5).

3. За допомогою співвідношення регресійних коефіцієнтів та оцінена роль та ступінь участі індукованих у рідкометалевому витку в Ш-подібному каналі МДУ струмів і магнітного поля, що показано з використанням тривимірного моделювання у вигляді кореляційної моделі. Встановлено участь складової струму в індукції магнітного поля для створення електромагнітної сили в р. з. МДУ, що характеризує зниження ступеня впливу величини напруг живлення індукторів при створенні максимальних значень електромагнітних сил та електромагнітного тиску.

4. Встановлено реально значення ефективності дії (фактично коефіцієнт корисної дії – ККД) електромагнітних сил у трійниковій р. з. існуючої МДУ, який для створення гідравлічного тиску становить від 8,3 до 11,1%. При усуненні безповоротних втрат енергії, ККД р. з. може бути суттєво підвищений. Також для цього випадку теоретично розраховано створюваний у МДУ напір, який становить від 1 до 1,68 м та загалом відповідає заявленим технічним характеристикам існуючих моделей магнітодинамічної установки МДН-6А.

5. З урахуванням залежності перетворення вимірюваних за допомогою ІВВС і створюваних у р. з. МДУ об'ємних електромагнітних сил до величини створюваного в МДУ електромагнітного напору (тиску), отримано математичну кореляційну модель залежності напірних характеристик МДУ від напруги живлення індукторів і електромагніту. Перевірка адекватності математичної моделі, її відповідності реальним експериментальним залежностям напірних характеристик (отриманих за методикою вимірювання реального перепаду рівнів металу в тиглі МДУ та металопроводі у залежності від напруги живлення

електромагніту (від 35 до 75В) і для 3-х значень напруги, що подається на обмотки індукторів (44, 58 і 73 В), підтвердила відповідність математичної моделі. Девіація математичної моделі напору в МДУ з урахуванням сукупної похибки експериментальних вимірювань напруги і напірних характеристик $\pm 2,5\text{-}3\%$ склала не більше $\pm 7\%$ ($R = 0,9$).

6. Експериментально встановлено залежність і величину складової сили реакції конструкції шляхом визначення силової взаємодії за допомогою ІВВС. Визначено особливості взаємодії зовнішнього магнітного поля в міжполюсному зазорі С-подібного електромагніту з конструкцією каналу МДУ, а саме трійниковою р. з. Як результат, має місце утворення електрично замкнутих контурів, що створюють реактивний опір. Сила реакції з конструкцією каналу МДУ становить від 5 до 6% по відношенню до сумарної величини електромагнітних сил, створених в установці та реєстрованих за допомогою ІВВС. Напрямок співпадає з напрямом електромагнітних сил, генерованих в р. з. МДУ, тобто залежить від полярності підключення електромагнітних систем і суперпозиції індукційного струму та змінного зовнішнього магнітного поля.

7. З точки зору розробки САУ, досліджена величина може бути використана для виділення складової електромагнітних сил, що розвиваються в рідкому металі та окремо силового впливу на нього. При цьому фактична сила реакції з конструкцією каналу МДУ сама по собі відноситься до безповоротних втрат, що не створюють силовий вплив на розплав.

8. Встановлено, що загальні втрати тепла дослідної установки МДН-6А для алюмінієвих сплавів з багат шаровою футеровкою, що відбуваються за рахунок теплопровідності і теплової конвекції складають 13,08 кВт.

9. Встановлено, що застосування наявної дискретної двопозиційної системи управління потужністю індукторів, в основі якої лежить періодичне перемикання ступенів живлення автотрансформатора, спричиняє надмірне споживання електроенергії у обсязі 19,98 кВт·год, що у питомому виразі стосовно до маси розплаву у МДУ складе 0,15 кВт·год/кг. Очевидно, що застосування досліджуваної аналогової САУ дозволить забезпечити суттєве енергозоща-

дження. Наприклад, для МДУ місткістю 630 кг рідкого алюмінієвого сплаву добова економія електроенергії при роботі в режимі зберігання розплаву складе 480 кВт·год.

10. Експериментальним шляхом на фізичній моделі установки досліджено витратні характеристики МДУ. Встановлено, що при заливці доз масою 1,5-3 кг раціональний діапазон напруги на електромагніті складає 12,3-16,3 В.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ МДУ

4.1. Практичні приклади застосування систем динамічного контролю технологічних параметрів роботи МДУ

З огляду на обґрунтування динамічного контролю основних параметрів роботи МДУ, у т. ч. в режимі розливання (див. пп. 1.3), розглянемо процес дозування алюмінієвого розплаву з МДУ в ливарну форму. Реєстрація зміни маси розплаву, що надходить у ливарну форму, реалізовувалась з використанням ІВВС, на яку встановлена МДУ. Експериментальна закономірність зміни у часі маси розплаву при дозуванні порції масою $m_{\text{дози}} = 2,0 \text{ кг}$ протягом часового інтервалу $t_{\text{розлив}} = 2,5 \text{ с}$, із середньою масовою витратою $Q = 0,8 \text{ кг/с}$ показана на рис. 4.1.

Залежність зміни маси розливаної порції у часі можна розділити на декілька проміжків, а саме: 1 – вмикання МДУ у режим розливання (насос); 2-3 розгін розплаву у металопроводі та вихід на стабільний процес розливання; 3-4 – сталий (за величиною масової витрати) процес розливання; 4-5 – інерційне зливання розплаву після вимкнення МДУ. Ділянка 5-6 характеризує зливання залишків розплаву із системи подачі розплаву у ливарну форму (жолоб). Також метал, який перебував у зливному металопроводі МДУ та не дійшов на момент закінчення розливання до точки незворотного переливу на жолоб, стікає назад у МДУ.

Ділянка 2-3 характеризує процес наростання масової витрати і є дуже важливою для дозування за методом контролю у часі. Ділянка 3-4 важлива з точки зору забезпечення технологічних вимог по підтриманню заданого значення масової витрати та характеризується абсолютним значенням параметрів осциляції. Щодо ділянки 4-5 (заклучний етап), то її тривалість залежить від поточного значення масової витрати (на момент вимкнення електромагнітного тиску)

та в'язкості розплаву, а також від геометричних особливостей металопроводу, гідравлічних опорів та власне інерційності системи, що подає розплав із МДУ у ливарну форму.

Особливий інтерес, з точки зору реалізації динамічного контролю, у даному випадку має закономірність зміни у часі значення масової витрати та спосіб її визначення.

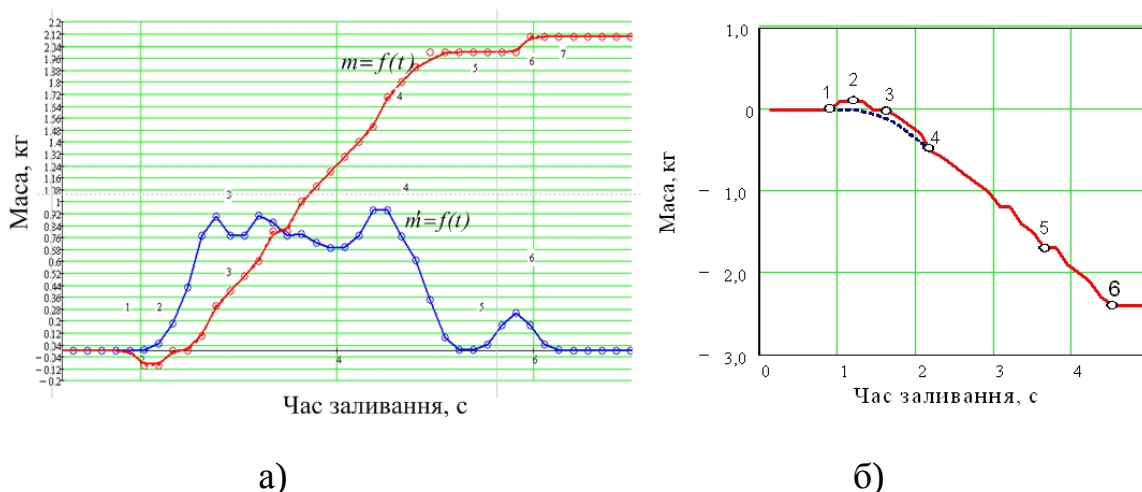


Рис. 4.1. Зміна маси розливаного розплаву $m = f(t)$ та масової витрати $m' = f'(t)$ у часі (а) при дозуванні порції $m_0 = 2 \text{ кг}$ алюмінієвого розплаву та характеристика від'єднання маси порції від маси МДУ при розливанні (б)

Залежність $m' = f'(t)$ (перша похідна зміни величини маси у часі), визначена шляхом перерахунку зміни параметру маси $(m_{i+1} - m_i)$ за відповідний інтервал часу $(t_{m_{i+1}} - t_{m_i}) = 0,5 \text{ с}$, $- Q_i = m'_i = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i})$ (рис. 4.1).

Зокрема, параметр величини часового проміжку $t_i = (t_{m_{i+1}} - t_{m_i})$ коригується у відповідності до параметрів роботи ваговимірювальної системи, блока реєстрації миттєвого значення маси розплаву, що заливається, та особливо до співвідношення між масою порції і масовою витратою $c = m_{\text{доз}} / Q_{\text{зал}}$, що для більшості типових процесів розливання із забезпеченням достатнього рівня точності (не більше 2%), що корелюється, як процес заливання протягом часу — $t \geq 2c$.

Ці обмеження відповідають параметрами роботи IBVC, що встановлюються частотою опитування датчиків ваги (50 Гц), та відповідністю швидкості реакції IBVC від величини швидкості навантаження/розвантаження. Графічні залежності таких параметрів IBVC, що використовуються у МДУ, показані на рис. 4.2.

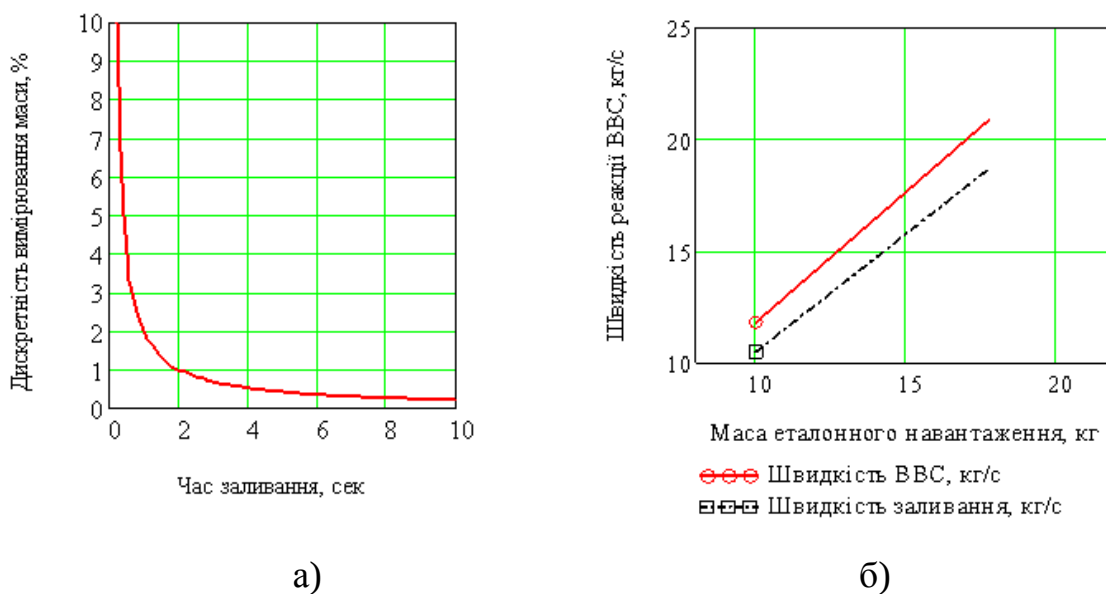


Рис. 4.2. Залежність дискретності зміни маси від часу заливання для IBVC з частотою опитування датчиків 50 Гц (а) та границь відповідності швидкості реакції IBVC та швидкостей заливання металу із МДУ (б)

Аналітичний огляд параметрів взаємозв'язків апаратних та технологічних (контрольованих) параметрів вказує на необхідність розробки на базі алгоритмів обчислювальної частини програми, яка б дала можливість здійснювати адаптивний метод обчислення масової витрати розплаву зі змінним значенням Dt , в залежності від масової витрати, що задається, та у кореляції до фактичного її значення у процесі заливання. Зокрема, такий підхід стосується процесу дозованого розливання, у якому головним фактором, що формує похибку, є значення маси інерційного зливу у заключній частині розливання.

Чинником підвищення похибки дозування у цьому випадку є тривалість перехідних процесів (розгону, стабілізації, інерційного зливу), що у даному ви-

падку (див. рис. 4.2) становить 0,5-1,0 с, та силовим впливом імпульсу, що реєструється на початку дозування, і відтворюється у процесі інерційного зливу (див. пп. 1.3 формула (1.7)). Це характеризує кількість алюмінієвого розплаву, що зливається під дією сил інерції у кінці заливання:

$$j_m = \frac{m \cdot Q \cdot u_m}{S_m \cdot r_{Al}}, \quad (4.1)$$

де m – маса розплаву, що знаходиться у системі тигель-канал-металопровід, кг; миттєве значення масової витрати Q , кг/с; u_m – лінійна швидкість руху розплаву у металопроводі, м/с; S_m – площа поперечного перерізу металопроводу, м²; r_m – густина алюмінієвого розплаву, кг/м³.

Згідно з виразом (4.1), величина миттєвого значення масової витрати є найвагомішим аргументом, що впливає на масу інерційного зливу та, власне, похибку при дозованому розливанні, тому для усунення негативного неконтрольованого процесу дозування і здійснення можливості упереджуючого екстраполювання режиму розливання у заключному періоді слід здійснювати високо-точне вимірювання (пряме чи непряме) миттєвого значення масової витрати $Q(t)$ з метою швидкісного коригування величини електромагнітного тиску, що створюється у МДУ, шляхом управління параметрами живлення електромагнітних систем такого обладнання, для реалізації операцій доливання тощо [65].

Додатково, величина масової витрати розплаву може контролюватися шляхом дублюючого розрахунку масової витрати розплаву $Q(H)$, що зливається із металопроводу, за умови сталих параметрів системи тракту металопроводу, по якому здійснюється подача розплаву у ливарну форму, з урахуванням створюваного електромагнітного напору (H), який також може бути обчислений або виміряний напряму з використанням IBBC.

У такому разі, система динамічного контролю масової витрати може бути записана у вигляді взаємодоповнюючої сукупності рівнянь (4.2), які можуть бути запрограмовані у вигляді алгоритмів у мікропроцесорному блоці та обчислюватися у процесі лиття в реальному масштабі часу:

$$\left. \begin{aligned} Q(m) &= m'_i = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i}) \\ Q(H) &= r \cdot e_g \cdot e \cdot j \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot (H - L_{мет-пров} + h_{yp})^{\frac{3}{2}} \\ Q(v_{мет})^* &= v_{мет} \cdot S_{мет} \cdot r_{Al} \end{aligned} \right\} (4.2)$$

де $Q(v_{мет})^*$ – компонента рівняння, яка може бути виміряна з використанням допоміжних пристроїв, що можуть входити до комплекту обладнання МДУ з IBBC.

Для коригування контрольованого параметру, має здійснюватися безперервне обчислення головних параметрів роботи МДУ за рівняннями (4.2). У такому разі процес двостадійного дискретного розливання відкритим струменем [45] може бути здійснений за скоригованим алгоритмом (рис. 4.3).

Приклад реалізації методу динамічного контролю (у випадку застосування алгоритму відстеження динаміки зміни у часі масової витрати, що реалізується за алгоритмом п'ятистадійного визначення величини) наведений на рис. 4.4. Аналіз залежності (рис. 4.4) показав, що для створення алгоритму системи відстеження безперервного коригування масової витрати слід використовувати першу складову $(i+1)-i$, у якості сигналу старту відпрацьовування режиму корекції, та п'яту складову $\sum_{n=4} [(i+n)-i]/n$, як вихідну величину коригування.

Аналогічний підхід для здійснення прямого (чи непрямого) динамічного контролю технологічних параметрів може бути застосований у багатьох ливарних технологіях, зокрема ЛЕМТ. Щодо реалізації технологій ЛЕМТ, головною є задача прямого контролю процесу заповнення порожнини ливарної форми та витримки за заданим значенням надлишкового електромагнітного тиску.

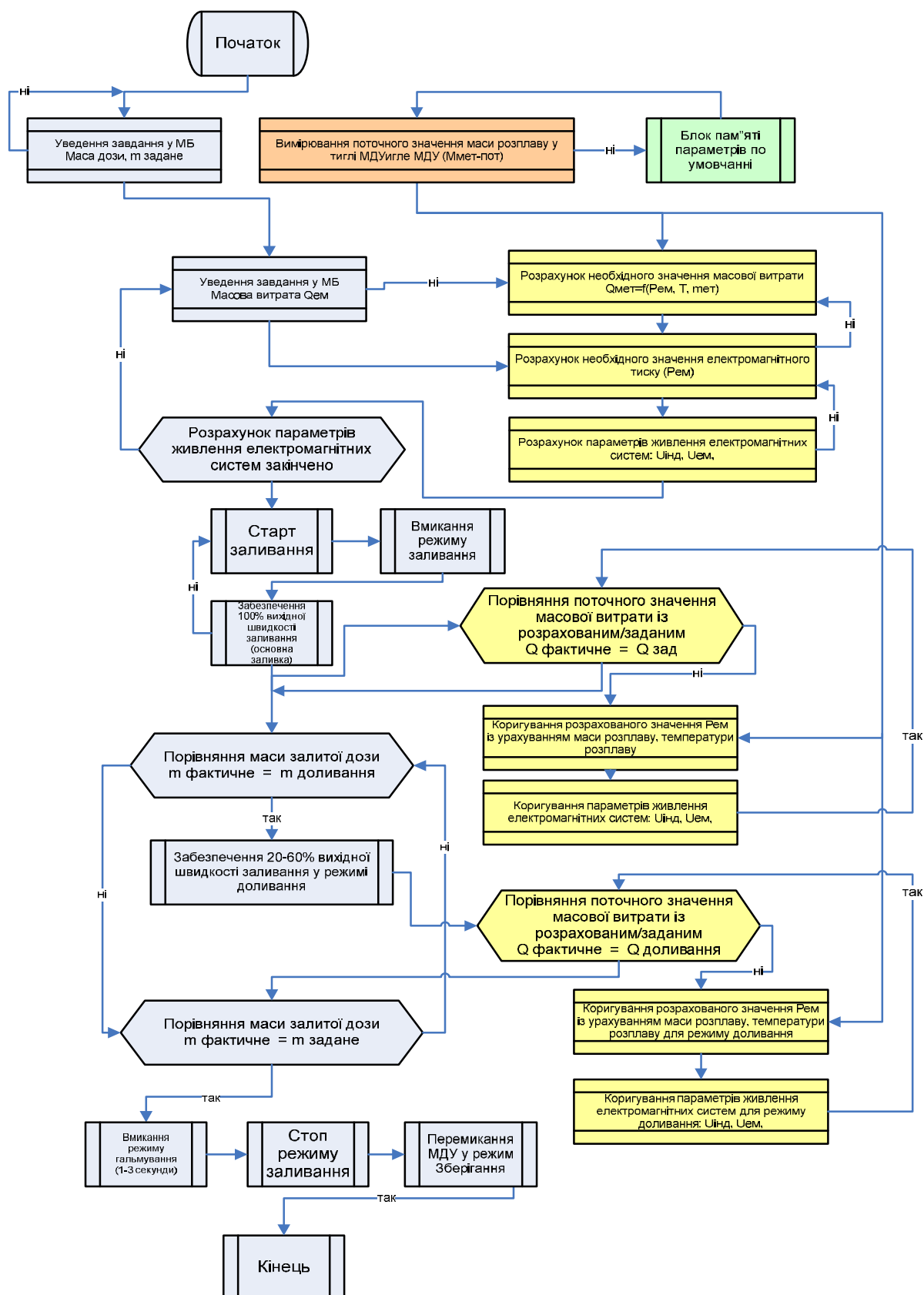


Рис. 4.3. Скоригований алгоритм роботи системи управління, що реалізує режим доливання з гальмуванням у заключній фазі дозування та блоком системи відстеження динаміки зміни масової витрати у часі

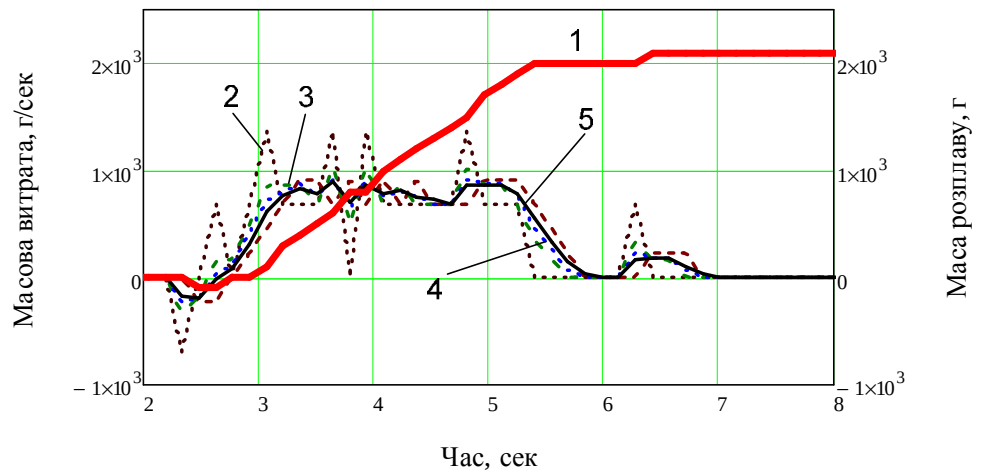


Рис. 4.4. Залежність зміни у часі масової витрати, що визначається динамічною системою відстеження за алгоритмом інтервального обчислення: 1 – маса розплаву, г; 2 – $Q_{i,i+1} = (m_{i+1} - m_i) / (t_{m_{i+1}} - t_{m_i})$; 3 – $Q_{i,i+2} = (m_{i+2} - m_i) / (t_{m_{i+2}} - t_{m_i})$; 4 – $Q_{i_3} = \sum_{n=3} Q_{i,i+n} / n$; 5 – $Q_{i_4} = \sum_{n=4} Q_{i,i+n} / n$

Серед перспективних та таких, що несуть практичну цінність розробок, спрямованих на створення систем динамічного контролю, є розробка математичних моделей, які відображають реальну сутність тих чи інших технологічних процесів, зокрема при приготуванні, обробці та розливанні алюмінієвих сплавів.

Серед математичних моделей можуть бути такі, які отримані, у першу чергу, регресійними методами статистичного аналізу [66] у прив'язці до конкретних технологічних процесів і перевірені з точки зору їх адекватності та відтворюваності.

Здійснення динамічного контролю масової витрати та температури розливаного розплаву є доцільним для суттєвого підвищення точності дозування до рівня, що відповідає точності роботизованих систем дозування (не більше 1% у діапазоні доз від 0,1 до 100 кг), відтворення адаптивного регулювання параметра масової витрати розплаву у періоди початку розливання, при розливанні та при доливанні заданої дози, створення систем динамічного регулюван-

ня процесів заповнення ливарної форми для технологій ЛЕМТ, РОЗЛИВ-ЛЕМТ.

На базі аналізу основних технологічних можливостей магнітодинамічного обладнання обґрунтовано застосування систем динамічного контролю технологічних параметрів роботи МДУ для стабілізації величини масової витрати (від 0,3 до 10 кг/с $\pm 1\%$), напірних характеристик (до 1250 мм $\pm 1\%$), температури ($\pm 1,5\%$).

Розроблено алгоритм динамічного контролю для застосування відстеження динаміки зміни у часі масової витрати, що реалізується за алгоритмом п'ятистадійного визначення величини.

Теоретично показано, що розроблений метод динамічного контролю шляхом безперервного визначення величини масової витрати по першій складовій $(i+1)-i$, у якості сигналу старту відпрацьовування режиму корекції, та п'ятій складовій $\sum_{n=4} [(i+n)-i]/n$, може бути використано у створенні системи автоматичної корекції. Це забезпечить відтворення адаптивного регулювання параметра масової витрати розплаву.

4.2. Особливості САУ для процесів безперервного розливання

На сьогодні технології безперервного розливання сталі посідають одне з чільних місць з точки зору підвищення ефективності металургійного виробництва і забезпечення високої якості металопродукції. Тому наукові та прикладні дослідження процесів, що супроводжують безперервну розливку сталі, є надзвичайно актуальними і перспективними та інтенсивно проводяться у провідних промислово розвинених країнах світу. Основними проблемами, що вирішуються в межах зазначених досліджень, є передусім покращення структури та властивостей безперервнолитих заготовок, якості їх зовнішньої поверхні, а також збільшення продуктивності виробництва.

Безперечною перевагою існуючих технологій є їх розповсюдженість, ґрунтовне відпрацювання всіх операцій. Однак у цьому і полягає їх головний недолік – можливості вдосконалення існуючих технологій за рахунок більш повної реалізації закладених в них наукових ідей та інженерних розробок майже вичерпані. Подальший розвиток відбувається лише за рахунок підвищення культури виробництва, застосування нових матеріалів, комп'ютерної техніки та удосконалення конструкції окремих вузлів.

Одна з головних проблем полягає в тому, що при безперервній розливці сталі на всіх стадіях процесу слід забезпечити широкодіапазонне малоінерційне управління тепловим та гідродинамічним станом рідкого металу. Бажано також забезпечити проведення перерахованих операцій в одному багатофункціональному агрегаті.

Стабільність процесу безперервного розливання металевих розплавів, а отже і якості одержуваних заготовок, багато в чому визначається технологічними параметрами в ланцюгу: «сталерозливальний ківш – проміжний ківш – кристалізатор». Підтримання постійного рівня розплаву в кристалізаторі може бути забезпечене лише при наявності швидкодіючих органів управління, які дозволяють регулювати витрату розплаву з потрібною точністю. Крім того, зважаючи на високу динаміку процесу безперервного розливання, актуальною також є задача суворого додержання заданої температури розплаву. За це також має відповідати система управління, що ґрунтується на контролі маси та/або рівня рідкометалевої ванни у промковші і відповідного регулювання потужності нагріву.

Тому одним з перспективних напрямків досліджень є розробка наукових основ створення нових вискоєфективних мультифункціональних проміжних ковшів для процесів безперервного лиття. Такі унікальні агрегати мають бути інтегровані в структуру машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ), забезпечити перенесення до промковша операцій з позапічної обробки розплаву, які зазвичай реалізуються в агрегатах типу «піч-ківш».

Ефективність індукційного нагріву, в порівнянні з широкозастосовуваними у промковшах електродуговими та плазовими джерелами з тепловим та електричним ККД на рівні 0,55-0,75, становить 0,80-0,85 [50]. Тому корпорацією Kawasaki Steel був розроблений індукційний проміжний ківш місткістю 5 тонн для технології безперервного розливання слябів з високоякісної нержавіючої сталі [67, 68]. Така розробка дозволила практично повністю виключити дефекти безперервнолитих заготовок, що пов'язані з нестабільністю теплових режимів розливання. Так, розливання сталі з традиційного промковша супроводжується досить значним падінням температури розплаву (більше 10 °C) за порівняно тривалий, з огляду на динаміку процесу, період (3-6 хв). Тому на певних стадіях процесу розливання (старт розливання, зміна сталь-ковша та ін.) слід вводити в розплав значну електричну енергію – на рівні 300-500 кВт (залежно від маси металу в промковші).

Однак такий унікальний агрегат не знайшов широкого застосування у промисловості, що пояснюється в першу чергу недосконалістю системи управління подачею розплаву в кристалізатор МБЛЗ. Така система заснована на застосуванні недостатньо надійних, контактуючих з рідкої сталлю стопорних або шибєрних затворів. Спроби створити безконтактний електромагнітний затвор увінчалися успіхом тільки для модельних речовин типу сплаву Вуда [68]. Через незадовільні електричні властивості сталі, великі немагнітні зазори, обмеженість простору в місці установки затвора, такий пристрій на сьогодні не може бути створений для реальних виробничих процесів безперервного розливання сталі на промислових МБЛЗ.

Для нагріву металу і видалення неметалевих включень (НВ) пропонується застосувати проміжні ковші, у тому числі двокамерні, з додатковими електромагнітними системами, у першу чергу індукторами [69-72]. Так, відомий оснащений індукційної одиницею промківш, в якому, крім індукційного нагріву рідкої сталі, забезпечується видалення неметалевих включень з неї за рахунок використання явища пінч-ефекту та різних електричних властивостей металу і НВ [71, 72].

Інша конструкція так званого двокамерного відцентрового проміжного ковша передбачає відділення за допомогою перегородок частини порожнини промковша, в яку надходить рідкий метал зі сталерозливального ковша. Ця порожнина охоплена напівкільцевим індуктором обертового магнітного поля, що створює обертовий рух розплаву в ній і виключає потрапляння НВ у ванну промковша та далі у кристалізатор МБЛЗ [73]. Однак ефективна робота такої системи залежить від співвідношення висоти індуктора та рівня розплаву у промковші, щоб запобігти замішуванню шлаку з поверхні вглиб рідкометалевої ванни.

Крім того, всі без винятку розглянуті пристрої мають суттєві недоліки [74, 75]. По-перше, це вже згадуване використання стопорних та шибєрних затворів, які схильні до заростання та руйнування. По-друге, такі промковші забезпечують розливання металу під значним металостатичним напором, що обумовлює високу лінійну швидкість розплаву (3-5 м/с), який надходить до кристалізатора МБЛЗ, та пов'язані з цим дефекти структури. Також слід відзначити проблеми стабільності процесу розливання (захоплення плівок, НВ, газів в тіло заготовки, глибока рідкометалева лунка, розмивання кірки та збільшення небезпеки її прориву тощо). Для запобігання таких негативних наслідків застосовують спеціальні дорогі пристрої електромагнітного гальмування високошвидкісних потоків сталі у кристалізаторі МБЛЗ типу EMBR (Electromagnetic Brake) [76-78].

Тому можна з впевненістю констатувати, що розробки для удосконалення процесів безперервного розливання переживають певний науковий та технологічний застій. Причина полягає у вичерпанні можливостей існуючого обладнання та відсутності нових підходів, які дозволили б кардинально поліпшити техніко-економічні показники процесу. Аналогічні дослідження, у тому числі такі, де проміжний ківш як технологічна одиниця набирає все більшої функціональної ваги, проводяться і за кордоном [79, 80].

Метою дослідження є розробка теоретичних принципів і підходів для удосконалення процесів безперервного розливання сплавів, зокрема, з викорис-

танням оригінального обладнання і сучасних засобів контролю та управління основними технологічними параметрами. Це дасть можливість створити передумови поліпшення якості литої металопродукції та підвищення техніко-економічних показників технологій лиття.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- на основі проведеного аналізу існуючих технологій безперервного розливання сплавів та обладнання для їх реалізації, запропонувати нові зразки металургійного обладнання з удосконаленою конструкцією та розширеними функціональними можливостями;
- сформулювати основні принципи організації та практичної реалізації досліджуваного технологічного процесу з застосуванням запропонованого новітнього обладнання;
- розробити загальну схему управління досліджуваним технологічним процесом на основі контролю температурних і витратних характеристик.

В якості вищезазначеного автономного багатофункціонального пристрою, здатного оперативно та ефективно управляти тепловими та гідродинамічними параметрами при безперервному розливанні сталі, пропонується використати магнітодинамічний проміжний ківш (МД-ПК). Такий агрегат розроблено на базі магнітодинамічного міксера-дозатора для перегрівання і розливки чавуну та сталі конструкції Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної Академії наук України [81]. Подібні МГД-агрегати мають розширені функціональні можливості щодо підігріву рідкого металу, усереднення його температури та хімічного складу, можливості позапічної обробки розплаву, що забезпечує покращення якості безперервнолитої заготовки і ефективності процесу розливання.

Створюваний МД-ПК має в своїй конструкції (рис. 4.5): тигель, індукційний канал та розливальну частину. До складу індукційної частини входять: прямокутний у перерізі індукційний канал U-подібної, Ш-подібної або більш складної форми; від одного до трьох індукторів; один або два електромагніти та зливальних носки.

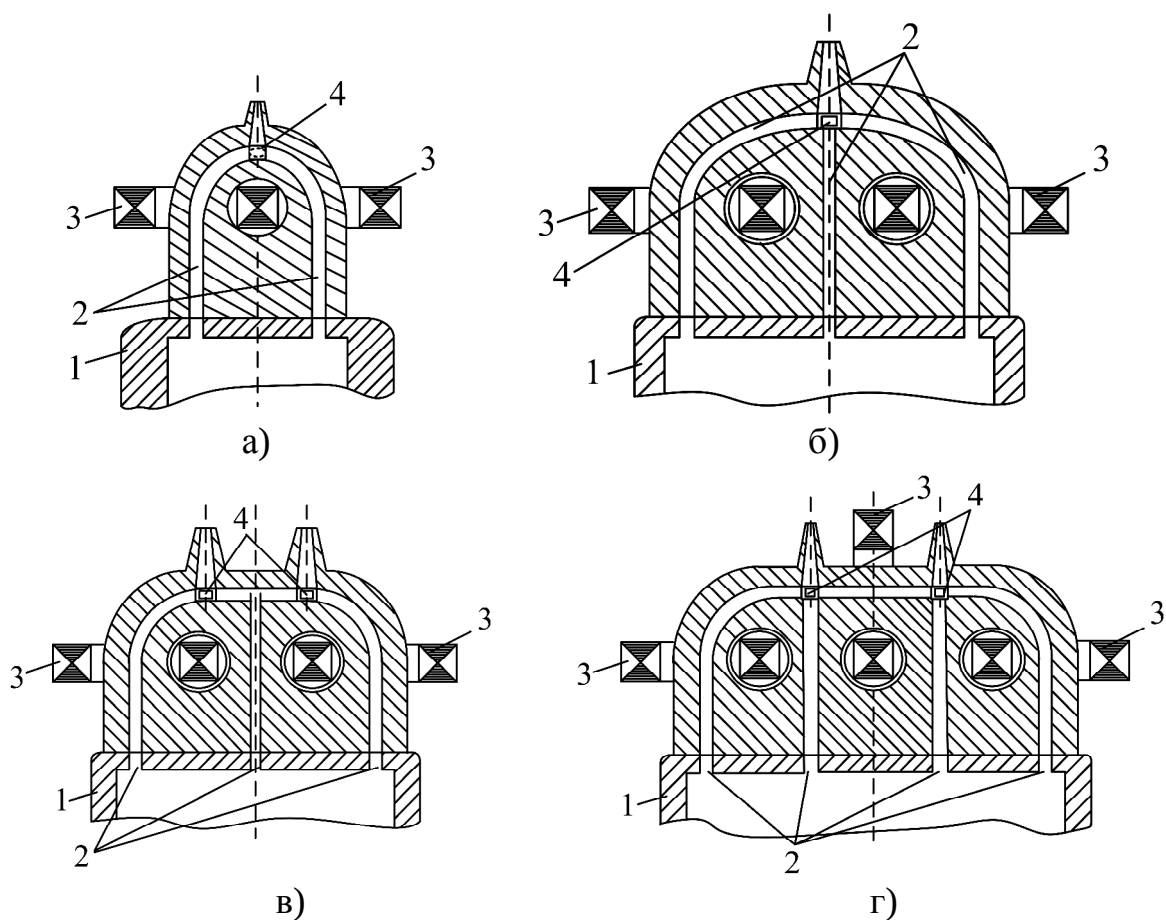


Рис. 4.5. Варіанти виконання конструкції індукційної частини магнітодинамічного міксера-дозатора (горизонтальне розташування, вид зверху): а – одноіндукторне виконання; б, в – двоіндукторне виконання з різною кількістю електромагнітів і зливних носків; г – триіндукторне виконання; 1 – тигель; 2 – гілки індукційного каналу; 3 – індуктор; 4 – робоча зона

Головними рисами магнітодинамічного міксера-дозатора та, відповідно, створюваного МД-ПК є:

1) наявність двох автономних електричних систем – індуктора й електромагніта. Індуктор слугує для нагріву металу, а електромагніт створює на певній ділянці каналу (у робочій зоні) змінне магнітне поле, яке взаємодіє з електричним струмом у каналі. Результируюча електромагнітна сила приводить розплав у рух. Таке технічне рішення дозволяє незалежно керувати режимами нагріву і розливки розплаву за рахунок регулювання тепловиділення в металі та його руху під дією електромагнітних сил;

2) горизонтальне розташування індукційної частини. Завдяки такій конструкції полегшується експлуатація агрегату, а відбір металу на розливу здійснюється із зони нагріву. Таким чином, можна витримувати розплав у тиглі при зниженій температурі та перегрівати метал до температури розливу безпосередньо під час його видачі з міксера, що дозволяє значно скоротити енерговитрати процесу;

3) можливість розливання розплаву з малим металостатичним напором.

Аналіз роботи проміжних ковшів МБЛЗ традиційної конструкції показав [69, 75, 82], що середня висота рівня розплаву в них протягом циклу розливання становить 0,7-1,1 м. У разі заміни сталерозливного ковша після переливу усієї маси розплаву з нього у проміжний ківш, до надходження нового ковша відбувається суттєве зниження рівня, тобто має місце періодично повторюваний процес зменшення/зростання рівня розплаву H у промковші протягом часу розливання τ_n (рис. 4.6).

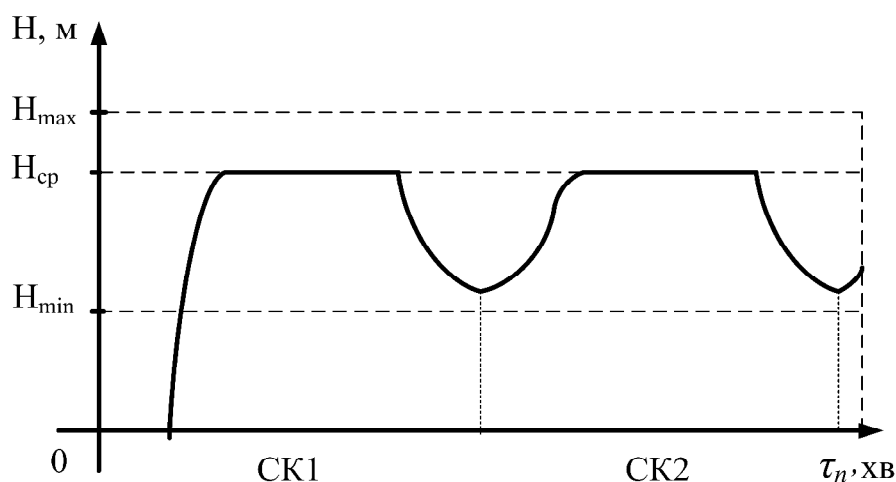


Рис. 4.6. Характер зміни рівня розплаву у промковші при безперервному розливанні та періодичному поповненні з нового сталерозливного ковша: СК1, СК2 – час переливу розплаву зі сталерозливних ковшів 1 та 2 до МД-ПК

При цьому не слід допускати зменшення рівня нижче за $\sim 0,4$ м, оскільки в такому разі над зонами видачі рідкого металу (над вихідним отвором сталерозливного стакану, який занурений під рівень розплаву в кристалізаторі МБЛЗ)

внаслідок дії ряду гідродинамічних чинників формується воронка [75]. Це призводить до захоплення шлаку з поверхні рідкометалевої ванни і повітря над дзеркалом металу. Як наслідок, неметалеві включення та гази потрапляють до кристалізатора МБЛЗ та спричиняє виникнення дефектів у тілі безперервнолитої заготовки.

Зазначені переваги МД-ПК дозволили проаналізувати його роботу щодо забезпечення стабільності процесу в режимі безперервного розливання металу і раціоналізувати енергетичні і технологічні параметри. При цьому має бути додержаний тепловий баланс між тепловмістом рідкого металу, який у кожний момент часу перебуває у МД-ПК, надходить до нього зі сталерозливного ковша і зливається з МД-ПК у кристалізатор. За умов періодичного поповнення МД-ПК розплавом, баланс описується закономірністю:

$$h_{ел} \cdot h_{тепл} \cdot P_{інд} \cdot (t_p + t_{p+\partial}) + (M \cdot t - Q_{розл} \cdot t_p \cdot t_{розл} - M_{дол} \cdot Dt') \cdot c = 0 \quad (4.3)$$

У виразі (4.3) частина складових описують параметри МД-ПК: $h_{ел}$ та $h_{тепл}$ – відповідно електричний і тепловий коефіцієнт корисної дії МД-ПК; $P_{інд}$ – потужність індуктора МД-ПК, кВт; M – маса металу в МД-ПК, кг. Інші складові пов'язані з температурними, часовими та витратними показниками власне технологічного процесу розливання. Серед часових параметрів наявні: t_p – час, протягом якого відбувається лише видача розплаву з МД-ПК в прийомний пристрій, с; $t_{p+\partial}$ – час, протягом якого одночасно відбуваються розливання металу з МД-ПК та доливання в нього нової порції розплаву, с. Виключно теплові чинники процесу: t – температура металу в МД-ПК, °С; $t_{розл}$ – задана температура розливання, °С; c – теплоємність розплаву, Дж/(кг·°С); Dt' – величина необхідного перегріву розплаву в МД-ПК, °С: $Dt' = t_{розл} - t_{дол}$, °С. Масові та витратні показники наступні: $Q_{розл}$ – масова витрата металу при розливанні, кг/с; $M_{дол}$ – маса порції металу, що доливається в МД-ПК, кг.

Для повністю безперервних процесів (безперервне доливання розплаву в МД-ПК і безперервна видача металу з нього в приймальний пристрій) умова (4.3) набуває вигляду:

$$h_{ел} \cdot h_{тепл} \cdot P_{ind} - (Q_{розл} \cdot t_{розл} + Q_{дол} \cdot Dt') \cdot c = 0, \quad (4.4)$$

де $Q_{дол}$ – масова витрата металу при доливці в МД-ПК, кг/с.

Для реалізації такого режиму керування процесом безперервного розливання було запропоновано двокамерний МД-ПК. Управління витратою металевого розплаву відбувається шляхом контролю маси розплаву та його рівня в камерах МД-ПК і кристалізаторі МБЛЗ [83, 84].

Запропоновано нове технічне рішення для управління потоком розплаву від розливального ковша до кристалізатора, яке засноване на використанні двокамерного МД-ПК з магнітоваговим управлінням витратою розплаву (рис. 4.7).

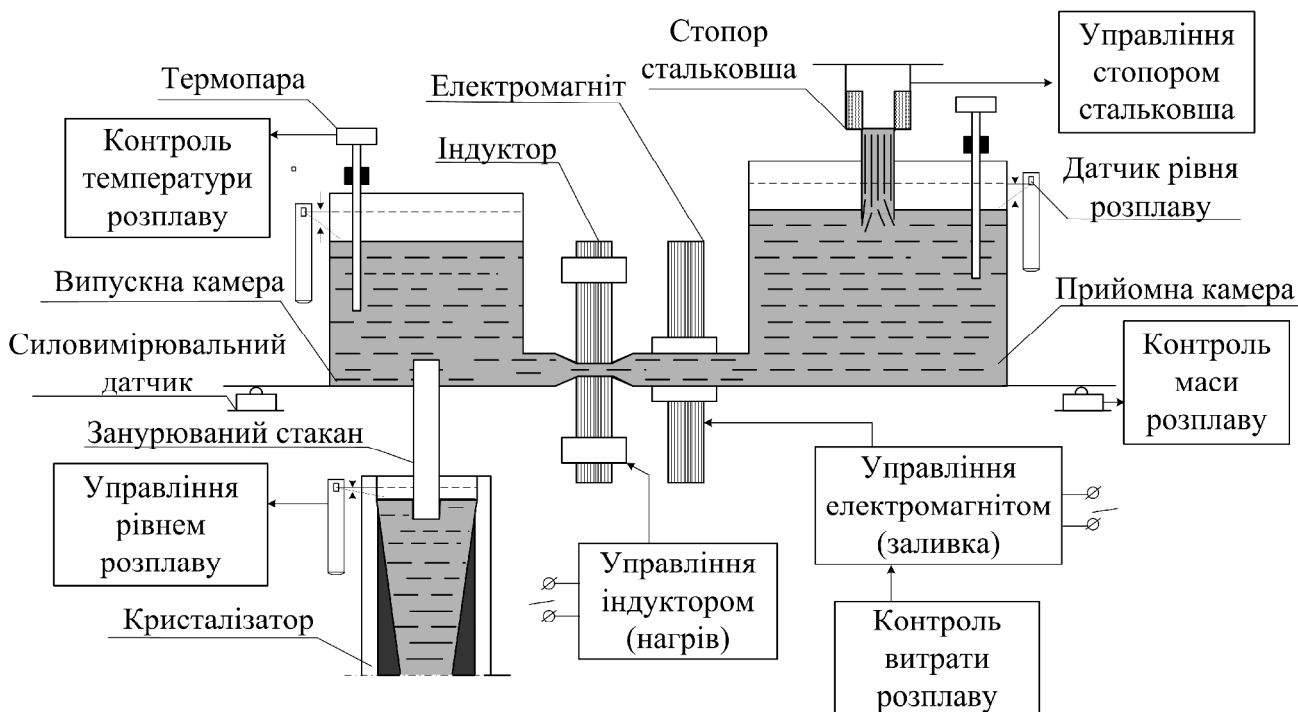


Рис. 4.7. Конструктивно-функціональна схема САУ МД-ПК для процесів безперервного розливання розплавів

Двокамерний МД-ПК має в своєму складі: прийомну та випускную камери, що являють собою сполучені ємкості, з'єднані індукційним каналом. Відбувається постійний регульований індукційний нагрів рідкого металу, що безпосередньо надходить на розливання, оскільки розплав з випускної камери безперервно подається до кристалізатора. Величина такого перегріву в процесі розливання залежить від геометрії індукційного каналу та потужності індуктора. Дослідно-промислова перевірка запропонованого рішення щодо нагріву розплаву безпосередньо в процесі його розливання була свого часу проведена в умовах ливарного цеху на діючому магнітодинамічному міксері-дозаторі для чавуну та сталі [81]. Індукційна частина міксера була виконана як представлено на рис. 4.5 (б). Повна місткість міксера-дозатора складала 4 тонни залізовуглецевого розплаву, сумарна максимальна потужність двох індукторів 300 кВт. Геометричні розміри центральної гілки індукційного каналу, через яку під дією електромагнітних сил проходить метал з тигля на зливний носок, складали: довжина – 1,1 м; переріз – прямокутний, $0,12 \times 0,09$ м. Було досліджено перепад температур рідкого металу між тиглем і зливним носком міксера-дозатора, що забезпечується нагрівом розплаву в процесі його руху. Встановлено [81], що в залежності від режимів руху розплаву і потужності індукторів величина перегріву складає не менше $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в умовах періодичного заливання виливків на ливарному конвеєрі). Процес безперервного розливання відзначається масовими швидкостями руху металу у 3–5 разів більшими, ніж при дозуванні в умовах ливарного цеху. Тому потужність індукторів для забезпечення співставних теплових параметрів слід збільшувати.

Крім того, індуктор бере участь у створенні електромагнітної сили. Додатковий електромагніт на певній ділянці індукційного каналу створює зовнішнє змінне магнітне поле. Створене поле взаємодіє з індукційним струмом у каналі та внаслідок суперпозиції полів генерується об'ємна електромагнітна сила, яка забезпечує рух розплаву між камерами. Залежно від режимів включення індуктора та електромагніта, може відбуватись контрольоване гальмування або при-

скорення руху розплаву у напрямку випускної камери (тобто може здійснюватись активне управління масовою витратою при розливанні).

Загалом рівень розплаву у камерах МД-ПК (див. рис. 4.7) за умови відсутності зовнішніх фізичних дій буде однаковим. Однак можливе конструктивне виконання випускної камери з піднятим рівнем донної частини відносно рівня дна впускної камери. У такому разі сполучні індукційні канали між камерами мають бути підняті на відповідний рівень або виконані похилими у напрямку підйому від впускної камери до випускної. При цьому відносна висота рівня розплаву у впускній камері стає суттєво меншою, ніж у випускній. Також при включенні електромагніта в режимі гальмування потоку з випускної камери рівень розплаву у випускній камері буде меншим.

Відомо [85], що лінійна швидкість витікання розплаву з ємкості залежить від поточного рівня рідини H (м) у цій ємкості:

$$u = m\sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \text{ м/с} \quad (4.5)$$

де m – коефіцієнт гідравлічного опору при витіканні рідини з ємкості, звичайно $m = (0,60...0,95)$; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,8$.

Тому при зниженні рівня розплаву у випускній камері МД-ПК у 2-2,5 рази порівняно з традиційними проміжними ковшами (з $\sim 1,0$ м до 0,4-0,5 м) згідно з (4.5) вертикальна складова лінійної швидкості розплаву у кристалізаторі зменшується у 1,4-1,6 рази. Тобто, суттєво поліпшуються умови приготування заготовки у кристалізаторі МБЛЗ. По-перше, перегріта сталь не так глибоко проникає у тіло заготовки, розмиваючи затверділу частину. По-друге, захоплені неметалеві та газові включення залишаються головним чином у зоні кристалізатора і не потрапляють у зону вторинного охолодження і фінального тверднення заготовки.

Проміжний ківш встановлений на чотирьох силовимірjuвальних датчиках(по два на кожній стороні ковша), закріплених на нерухомій основі. Виходи

датчиків підключені до суматора у блоці вимірювання маси. В схемі також передбачено блок завдання миттєвого значення маси розплаву у промковші. Виходи обох блоків підключені до нуля-органа у блоці управління стопором (затвором) розливающего ковша, з'єднаного з приводом. Крім того, виходи пари датчиків, розташованих зі сторони випускної камери, підключені разом з виходом блока управління тиском через блок корекції напруги живлення до блоків управління індуктором і електромагнітом. Стакан випускної камери входить у кристалізатор МБЛЗ. Розплав надходить із розливающего ковша через стопор з приводом у впускну камеру промковша, а з неї через стакан у кристалізатор.

Контроль температури розплаву у впускній і випускній камерах промковша здійснюється за допомогою датчиків температури і, відповідно, підключених до термоконтролера з цифровим індикатором температури.

Контроль рівня розплаву у прийомній та випускній камерах промковша і кристалізаторі здійснюється за допомогою датчиків рівня, підключених до блока управління рівнем розплаву.

Індуктори і електромагніт підключені до блока живлення, з'єднаного через шафу управління з пультом управління. Мікропроцесорні блоки вимірювання маси, тиску і витрати розплаву підключені до відповідних цифрових індикаторів, що дає змогу контролювати, при необхідності, різні параметри.

Розроблювана САУ МД-ПК передбачає два режими роботи: без стабілізації масової витрати та зі стабілізацією. У будь-якому разі, процес безперервного розливання розплаву відбувається наступним чином. У вихідному стані промківш порожній (тобто індикатор маси розплаву обнулений) і перебуває в режимі очікування. При цьому, електричне живлення індуктора та електромагніта відсутнє. За командою оператора з пульта управління, спрацьовує стопор (затвор) розливающего ковша і розплав починає надходити у впускну камеру МД-ПК. Після заповнення індукційного каналу вмикається індуктор. Коли миттєве значення маси розплаву у промковші досягне розрахункового значення, спрацьовує нуль-орган у блоці вимірювання маси розплаву, і його витрата у впускній камері стабілізується. При цьому рівень розплаву у випускній камері також

стабілізується для забезпечення необхідної сталої масової витрати при розливанні та постійного рівня розплаву у кристалізаторі МБЛЗ. Для забезпечення заданих витратних параметрів може вмикатися електромагніт.

Дослідна перевірка запропонованого способу управління масовою витратою була проведена в умовах експериментально-технологічної дільниці відділу магнітної гідродинаміки ФТІМС НАН України. В якості прототипу (фізичної моделі) МД-ПК була використана магнітодинамічна установка МДН-6А для алюмінієвих сплавів місткістю до 630 кг розплаву. Установку додатково було оснащено тензорезисторним силовим датчиком для контролю миттєвого значення маси розплаву m_{vis} безпосередньо на зливному металопроводі. Ця величина залежить від рівня розплаву в установці і величини створюваної електромагнітної сили, що при сталому живленні індуктора визначається в першу чергу напругою на електромагніті. Слід зазначити, що процес розливання, внаслідок дії ряду гідродинамічних чинників, супроводжується пульсаціями струменя розплаву. При безперервному розливанні відкритим струменем з проміжного ковшу у кристалізатор МБЛЗ це призводить до розбризкування та вторинного окислення металу. У разі розливання з використанням занурюваного під рівень розплаву в кристалізаторі стакану, відбувається розмивання його порожнини, що також погіршує якість заготовки. Тому в експерименті для зменшення впливу пульсацій струменя на процес розливання було застосовано безрозмірний критерій k від 2,2 до 2,25 за виразом (3.20). Додержання цього показника при дискретному розливанні розплаву порціями масою 1,8 кг забезпечило високу точність дозування (рис. 4.8). Похибка склала до 1,5% від маси дози. Для порівняння, при дозованому розливанні порцій до 3 кг, наприклад, в технологіях лиття під тиском, без застосування магнітодинамічного обладнання та запропонованої магнітовагової системи похибка може сягати 5% [86].

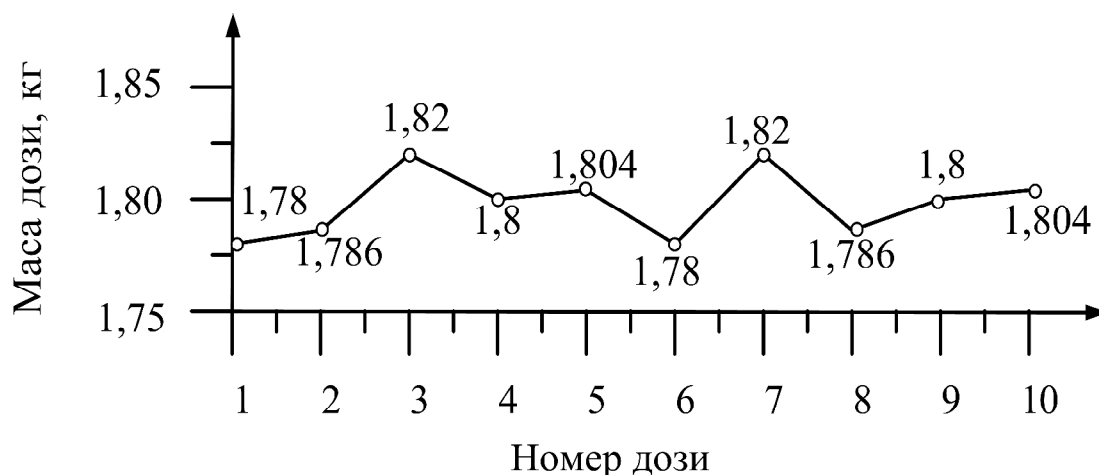


Рис. 4.8 Дискретне дозування алюмінієвого розплаву порціями масою 1,8 кг за допомогою магнітодинамічної установки, що оснащена ваговимірним тензорезисторним датчиком

Таким чином, реалізація розробленого магнітовагового способу управління безперервним розливанням розплаву забезпечує стабільність процесу, що підтверджено вищенаведеними результатами експериментальних досліджень на діючому та модельному магнітодинамічному обладнанні. Зокрема, активне управління тепловим станом розплаву у МД-ПК скорочує ймовірність виникнення дефектів, пов'язаних з несприятливим температурним режимом розливання. Управління витратними характеристиками забезпечить збільшення виходу придатного лиття та продуктивність процесу.

Порівняння розробленої САУ МД-ПК з традиційними технологіями управління безперервним розливанням (рис. 4.9, табл. 4.1) свідчить про наступне. Існуючі типи технологічного обладнання не завжди добре адаптуються один до одного, синхронізуються між собою, не є взаємозамінними та важко інтегруються до єдиної системи. Запропонований спосіб і агрегати дозволяють скоротити кількість взаємопов'язаних агрегатів і створити належні передумови для розвитку процесу та поліпшення його техніко-економічних показників.

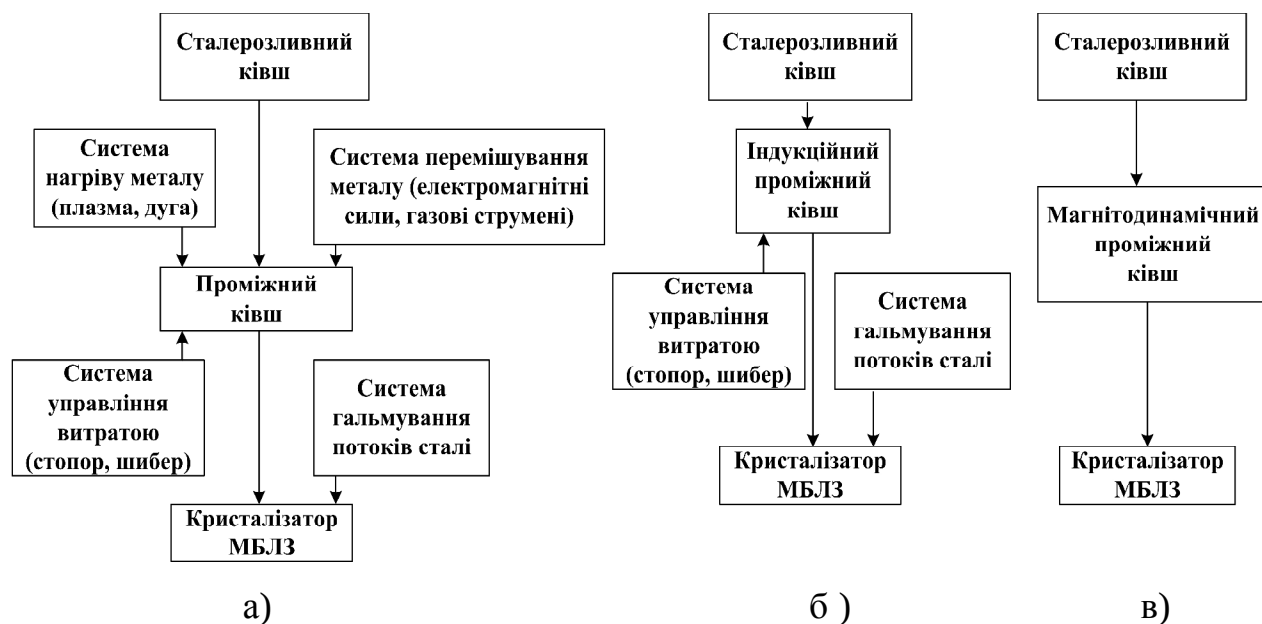


Рис. 4.9. Порівняння схем процесу безперервної розливки сталі: а – технологія з використанням традиційного проміжного ковша; б – технологія з використанням індукційного проміжного ковша; в – технологія з використанням магнітодинамічного проміжного ковша

Таблиця 4.1

Порівняння характеристик проміжних ковшів різної конструкції

Характеристика	Традиційний проміжний ківш	Індукційний проміжний ківш	Магнітодинамічний проміжний ківш
Відносна простота конструкції	+++*	+	+
Відпрацювання операцій	++	+	+
Новизна технічних рішень	-	+	++
Ефективний підігрів металу без застосування додаткових систем	-	+	+
Перемішування розплаву без застосування додаткових систем	-	+	++
Можливість інтенсифікації процесів позапічної обробки металу	-	+	+

Можливість розливання розплаву без застосування механічних пристроїв	-	-	+
Стабільність витікання струменя сталі із промковша у кристалізатор	+	+	++
Можливість малонапорного розливання та зниження динамічного впливу струменя сталі	-	-	+
Можливість ефективного управління процесом безперервного розливання та зменшення ймовірності проривів	-	+	++
Можливість поліпшення умов розподілу металу по ширині кристалізатора	-	-	++
Відсутність необхідності застосування інертних газів для захисту елементів стопорних та шибєрних систем	-	-	+
Підвищення якості продукції	-	+	++
Матеріало- та енергозбереження	-	+	++

Примітка: * Оцінки: «-» посередньо; «+» добре; «++» дуже добре.

Виходячи з аналізу наявної інформації та наведених результатів досліджень, можна сформулювати загальні рекомендації до створюваного зразка МД-ПК:

- місткість – 3-10 тонн рідкої сталі;
- сумарна електрична потужність індукторів – 300-600 кВт;
- система управління – інтегрована ваговимірювальна з використанням тензорезисторних датчиків, а також з можливістю додаткового застосування сучасних датчиків рівня розплаву;
- області застосування – безперервне лиття тонкого слябу, пряме одержання з розплаву листової металопродукції литтям-прокатування у двовалковий кристалізатор, одержання сортової заготовки в умовах металургійних міні- та мікровиробництв.

Подальший розвиток проведених досліджень має здійснюватись за двома основними напрямками.

По-перше, слід ґрунтовно відпрацювати часові, температурні та витратні співвідношення на всіх ланках технологічного процесу – від плавильного агрегату до кристалізатора МБЛЗ – в реальних виробничих умовах.

По-друге, необхідна адаптація розроблених підходів обладнання і систем до найбільш перспективних технологій безперервного розливання сплавів. На сьогодні такими є одержання тонкого слябу, пряме виготовлення сталевих листів з розплаву за технологією розливання у двовалковий кристалізатор, а також випуск сортової заготовки в умовах малих металургійних виробництв.

За результатами натурних і модельних експериментів, запропонована розробка забезпечить: керований індукційний перегрів розплаву безпосередньо перед видачею до кристалізатора МБЛЗ. Також реалізується безконтактне управління рухом рідкого металу (його перемішування та видача до кристалізатора МБЛЗ) під дією електромагнітних сил. Крім того, стає можливим малонапірне розливання сплавів із регульованою масовою витратою і підведення розплаву по всій ширині кристалізатора МБЛЗ.

Очікувані економічні переваги застосування МД-ПК і запропонованої САУ полягають у зменшенні кількості технологічних переливів розплаву і пов'язаною з цим енергоекономією стабілізації роботи МБЛЗ, поліпшенні якості безперервнолитих заготовок, збільшенні виходу придатного лиття і підвищенні продуктивності процесу.

4.3. Техніко-економічні переваги технологічних ливарно-металургійних процесів з використанням МДУ при застосуванні розроблених принципів і засобів управління основними робочими параметрами

В рамках даної роботи, за допомогою проведення експериментальних досліджень, фізичного та математичного моделювання, використання інженерних

розрахунків було досліджено та покращено техніко-економічні показники ливарно-металургійних процесів з використанням МДУ.

Освоєння досліджень проведено без конструкційних змін існуючого технологічного обладнання та з використанням його загальноприйнятих функціональних можливостей, за допомогою уточнення залежностей його основних робочих параметрів як один від одного, так і від режимів роботи МДУ.

Нижче представлений оціночний розрахунок економічного ефекту від застосування розроблених принципів і засобів управління основними робочими параметрами. Статті економії включають:

1) зменшення витрати розплаву на 1 т придатного лиття за рахунок підвищення точності дозування.

За допомогою вивчення та систематизації гідродинамічних, електромагнітних та силових взаємодій, що виникають між рідким металом та електромагнітними системами МДУ, з використанням наявної у складі її конструкції ІВВС, була вирішена задача безперервного (як статичного, так і динамічного) контролю фактичної маси розплаву, що знаходиться в тиглі та каналах МДУ та, порівняно з наявною САУ МДУ, зменшена похибка дозування з 2% до 1,5% для виливків масою до 400 кг. Втрата 2% від 1 т зменшена до 1,5% від 1 т, що відповідно на 5 кг менше. Середня вартість литих виробів з алюмінієвого сплаву становить 4700 \$/т (4,7 \$/кг).

У грошовому перерахунку, економія під час отримання 1 т придатного лиття: $5 \times 4,7 = 23,5$ \$.

Витрата електроенергії на плавлення 1 т алюмінієвого сплаву становить у середньому не менше 400 кВт/год (наприклад, при плавленні в індукційній тигельній печі), відповідно на додатковий повторний переплав 5 кг зворотного сплаву витрачається не менше 2 кВт/год, що у грошовому перерахунку, при нинішній вартості електроенергії для підприємств 2,3 грн/(кВт/год), складає:

$$2 \times 2,3 = 4,6 \text{ грн (0,17 \$)}.$$

$$\text{Загальна економія по данній статті: } 23,5 + 0,17 = \mathbf{23,67 \$}.$$

2) зменшення капітальних витрат на конструкцію МДУ і ваговимірну вальну систему

За рахунок зменшення кількості тензорезисторних силових датчиків для вимірювання миттєвої маси розплаву, яка здійснюється безпосередньо на зливному жолобі, при вартості одного тензодатчика 190 \$:

У грошовому перерахунку при зменшенні з 4 тензодатчиків до використання одного: $4 \times 190 - 1 \times 190 = 570$ \$.

3) можливість скорочення витрат електроенергії, за рахунок аналогового управління живлення електромагнітних систем у порівнянні зі ступінчастою схемою регулювання.

В даному разі, слід враховувати, що разові капітальні витрати на перехід від дискретного управління з використанням автотрансформаторів до аналогової системи управління, наприклад, на базі тиристорного перетворювача будуть дещо вищими (орієнтовно на 10-15% в залежності від типу і моделі обладнання). Однак встановлено, що застосування наявної дискретної двопозиційної системи управління потужністю індукторів, спричиняє надмірне споживання електроенергії у обсязі 19,98 кВт·год, що у грошовому перерахунку, при нинішній вартості електроенергії для підприємств 2,3 грн/(кВт/год):

Економія за 1 год: $19,98 \times 2,3 = 45,95$ грн. Відповідно добова економія складе: $45,95 \times 24 = 1102,8$ грн (**42 \$**).

Загальний економічний ефект при виготовленні 1 т лиття, без урахування зазначених статей капітальних витрат, складе не менше:

$23,67 + 42 = 65,67$ \$/1 т виливків.

Як наслідок, впровадження у виробництво розроблених наукових принципів та реалізованих на їх основі технічних рішень щодо підвищення ефективності багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання за рахунок удосконалення системи автоматичного управління його роботою при додержанні заданих показників якості литих виробів забезпечить:

– стабілізацію технологічного процесу лиття і підвищення його продуктивності на 10-15%;

- зменшення впливу людського фактору на техніко-економічні показники виготовлення литої металопродукції;
- скорочення шкідливого впливу на довкілля (передусім пов'язаного з тепловим і хімічним факторами) та відповідне поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу і загалом екології на виробництві;
- створення передумов для подальшого розвитку ливарних технологій та розробки новітнього обладнання для їх реалізації.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання щодо підвищення ефективності багатофункціонального ливарного магнітодинамічного обладнання. Це забезпечує збільшення виходу придатного лиття, енерго- та матеріалоозаощадження, покращення контрольованості методів управління рухом розплаву при його транспортуванні та підвищення точності дозованого розливання металу відкритим струменем, що досягнуто шляхом встановлення раціональних інтервалів основних параметрів МДУ. Результати роботи в подальшому дають змогу створити на базі цих розробок систему адаптивного інтелектуального автоматичного управління процесами лиття для технології електромагнітного розливання.

Основні наукові та теоретичні результати роботи:

1. За результатами аналізу аналогічних за технологічними можливостями агрегатів, які застосовуються у світі, встановлено, що для додержання сучасного рівня конкурентоспроможності МДУ в технологіях приготування та розливання алюмінієвих розплавів, слід забезпечити відповідність ряду технологічних параметрів, зокрема, належну місткість агрегату (наприклад, для технологій лиття під тиском – не менше 250 кг), високу точність дозування, особливо для малих порцій металу (похибка дозування – не більше 2% від маси порції), напірні характеристики МДУ як насоса – більше 1 м алюмінієвого стовпа, а також розширення діапазону масової витрати при розливанні як у бік малих значень (менше наявних 0,3 кг/с), так і великих значень (до 10 кг/с і більше, що необхідно для технологій безперервного розливання металів та одержання відповідальних крупногабаритних виливків складної конфігурації).

2. З урахуванням світового досвіду управління технологічними процесами лиття на основі контролю маси розплаву у агрегаті під час приготування та розливання рідкого металу і експлуатації раніше створених МДУ з платфор-

мною ваговимірювальною системою, шляхом порівняння балансу сил показано, що більш перспективною та прогресивною є інтегрована ваговимірювальна система (IBVC), оскільки вона забезпечує діапазон вимірювання еквівалента маси у 2-3 рази менший, ніж платформна система (відповідно 1500-2500 кг проти 4800-5200 кг).

3. З використанням IBVC досліджено процеси перетворення електромагнітної сили (що вимірюється прямим шляхом), генерованої у робочій зоні МДУ, в ефективну електромагнітну силу. Встановлено, що для створення електромагнітного тиску на рівні 30-35 кПа, який на 10-20% вище від паспортних даних існуючих серійних МДУ і є мінімально необхідним для подальшого розвитку одержання виливків за технологіями ЛЕМТ та РОЗЛИВ-ЛЕМТ, ефективна електромагнітна сила складає 23,55-31,84 Н.

4. З використанням розроблених математичних і фізичних моделей та натурних експериментів на діючому магнітодинамічному обладнанні досліджено супутні пондеромоторні взаємодії у МДУ – моторний ефекту, реакцію магнітного поля з конструкцією МДУ та взаємодії з осердям електромагніту, що дозволяє встановити рівень безповоротних втрат енергії, а також здійснювати періодичний або безперервний контроль стану окремих вузлів МДУ і коефіцієнта їх корисної дії. Це дає змогу в перспективі при створенні нових магнітодинамічних агрегатів враховувати особливості конструкції як окремих вузлів, так і всього пристрою в цілому, для підвищення ефективності безпосередньо обладнання та реалізованих з його застосуванням технологій.

5. Експериментально встановлено залежність і величину складової сили реакції конструкції шляхом визначення силової взаємодії за допомогою IBVC. Визначено особливості взаємодії зовнішнього магнітного поля в міжполюсному зазорі С-подібного електромагніту з конструкцією каналу МДУ, а саме трійниковою р. з. Як результат, має місце утворення електрично замкнутих контурів, що створюють реактивний опір. Сила реакції з конструкцією каналу

МДУ становить від 5 до 6% по відношенню до сумарної величини електромагнітних сил, створених в установці та реєстрованих за допомогою IBBC. Напрямок співпадає з напрямом електромагнітних сил, генерованих в р. з. МДУ, тобто залежить від полярності підключення електромагнітних систем і суперпозиції індукційного струму та змінного зовнішнього магнітного поля.

6. Встановлено реальне значення ефективності дії (фактично коефіцієнт корисної дії – ККД) електромагнітних сил у трійниковій р. з. існуючої МДУ, який для створення гідравлічного тиску становить від 8,3 до 11,1%. При усуненні безповоротних втрат енергії, ККД р. з. може бути суттєво підвищений. Також для цього випадку теоретично розраховано створюваний у МДУ напір, який становить від 1 до 1,68 м та загалом відповідає заявленим технічним характеристикам існуючих моделей магнітодинамічної установки МДН-6А.

7. Розраховано основні електричні параметри електромагнітних систем магнітодинамічної установки МДН-6А-0,63М для розливання алюмінієвих сплавів та визначено двома методами (розрахунковим та експериментальним) потужність теплових втрат у МДУ. За допомогою експериментального методу, що не був застосований для МДУ раніше, визначено: швидкість зміни температури розплаву в «коридорі» системи регулювання (710-730 °С); встановлено параметри нагріву розплаву при його регулюванні одним індуктором, двома індукторами та при їх почерговому включенні; теплові втрати МДУ в режимі «зберігання» з закритою кришкою тигля при постійному рівні розплаву (масою 133,5 кг) склали $P=21,92$ кВт. Стало можливим замінити дискретне (на базі ступінчатих автотрансформаторів) управління роботою електромагнітних систем МДУ на аналогове (наприклад, на основі тиристорних регуляторів), що дозволить суттєво скоротити енерговитрати при виготовленні лиття.

8. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні та відповідний інтервал напруги живлення електромагніта МДУ, що дозволяє конт-

ролювати витрату рідини на вагодозувальному жолобі, з метою мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування за рахунок зменшення їх амплітуди. Похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози при розливанні малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг).

9. Розроблено принципову схему новітньої САУ МДУ для приготування і розливання алюмінієвих сплавів на основі безперервного контролю за допомогою ІВВС динамічних характеристик процесу лиття для підвищення якості литої металопродукції та загалом техніко-економічних показників ливарних і металургійних технологій.

10. Запропоновано принципову схему САУ для безперервного розливання металевих розплавів на основі створюваного двокамерного магнітодинамічного проміжного ковша, що забезпечить: керований індукційний перегрів розплаву безпосередньо перед видачею до кристалізаторів машин безперервного лиття заготовок (МБЛЗ); безконтактне управління рухом рідкого металу (його перемішування та видача до кристалізатора МБЛЗ) під дією електромагнітних сил; можливість малонапірного розливання сплавів із регульованою масовою витратою і підведення розплаву по всій ширині кристалізатора МБЛЗ.

11. Порівняння розроблених елементів САУ МДУ з традиційними технологіями управління приготуванням та розливанням сплавів свідчить, що запропонований спосіб і агрегати для його реалізації дозволяють за рахунок скорочення кількості різних окремих видів технологічного обладнання (які не завжди добре адаптуються один до одного і синхронізуються між собою, не є взаємозамінними та важко інтегруються до єдиної системи) забезпечити розвиток сучасних процесів лиття. При цьому загальний очікуваний економічний ефект від застосування запропонованих розробок складе у середньому 65,6 \$ на 1 т лиття з алюмінієвих сплавів (при середній вартості 1 т якісного алюмінієвого лиття у розмірі 4700 \$), у т. ч. за рахунок збільшення виходу придатного лиття у розмірі 23,67 \$/1 т, за рахунок скорочення енерговитрат – до 42 \$/1 т. Додат-

кова економія може бути досягнута за рахунок вказаних статей і окремих статей капітальних витрат, зокрема, при скороченні числа тензометричних датчиків (з чотирьох до одного, що змонтовано під зливним жолобом) у складі ІВВС та/або при заміні дискретної системи управління МДУ на аналогову.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Курланов С.А. Выбор присадочных материалов для сварки алюминия // Тр. международной конференции и выставки «Современные алюминиевые конструкции в транспорте». 5–7 декабря 2017. – М.: НП АПРАЛ, 2017.
2. World Aluminium. World Aluminium, n.d. Web. 09 Mar. 2017. <http://www.world-aluminium.org/statistics/massflow//>.
3. Kirchner G., Bertman M. Aluminium Recycling on the Global Level // Proc. of the XVI International Symposium ISCOBA. November, 28–30, 2005. Nagpur, India: ISCOBA. 2005. P. 462–468.
4. Алюминиевые сплавы (свойства, обработка, применение): справ./Пер. с нем. под ред. Дрица М.Е. и Райтбарга Л.Х. – М: Металлургия, 1979. – 678 с.
5. Гогин В.Б., Макаров Г.С., Палий Р.И. Современное оборудование цехов заготовительного литья для приготовления алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. 1981. № 7. С. 74–89.
6. Шмитц К. Рециклинг алюминия. Справ. рук-во / Пер. с англ. под ред. Макарова Г.С. – М.: АЛЮСИЛ МВиТ. 2008. – 528 с.
7. Горюк М.С. Разработка энергосберегающей технологии перегрева чугуна при электромагнитной разливке: Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – Киев, 2000. – 114с.
8. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. –М.: Металлургия, 1968. – 496с.
9. ГОСТ 30573-98. «Оборудование литейное. Установки заливочные для алюминиевых сплавов. Общие технические условия».
10. ГОСТ 26354-84. «Установки заливочные магнитодинамические».
11. ГОСТ 30647-99 Машины для литья под низким давлением.
12. Специальные способы литья: Справочник / В. А. Ефимов, Г. А. Анисович, В. Н. Бабич и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 436 с.

13. Верте Л. А. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1975. – 288 с.
14. Повх И.Л., Капуста А.Б., Чекин Б.В. Магнитная гидродинамика в металлургии. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.
15. Повх И., Баринберг А., Баринберг В. Профессии магнитной гидродинамики // Наука и жизнь. – 1977. – № 6. – С. 40-46.
16. Полищук В.П., Цин М.Р., Горн Р.К. и др. Магнитодинамические насосы для жидких металлов // – Киев: Наук. Думка, 1989. – 256 с.
17. Дубоделов В.И. Разработки ФТИМС НАН Украины в области магнитной гидродинамики и их применение в литейных и металлургических технологиях / В сб. «50 лет в Академии наук Украины: ИЛП, ИПЛ, ФТИМС». – Киев: ФТИМС НАН Украины (редакция журнала «Процессы литья»), 2008. – С. 126-149.
18. Белик В.И., Фикссен В.Н., Скоробагатько Ю.П. Рафинирование и модифицирование алюминиевого сплава АД31 в магнитодинамической установке // Процессы литья. – 2004. – № 3. – С. 20-24.
19. Электрофизическая обработка сплавов системы алюминий-кремний в магнитодинамических установках / Дубоделов В.И., Скоробагатько Ю.П., Фикссен В.Н. и др. // Процессы литья. – 2009. – № 6. – С. 35-43.
20. Проспект ABB “Induktiv beheizte Gießöfen PRESSPOUR[®] und MINIPOUR[®], Typ OCC, für Grau-, Temper- und Kugelgraphitguß”, D IND/G 0012 94 E.
21. Проспект ABB № DME/D109989E «Индукционные канальные накопительные печи типа LFR/IRT для чугуна».
22. Нидермайер Ф. // Цветные металлы, 2008, №1, с.79-86.
23. Kraly A.,Hartlieb E., Jansen O. et al. // Aluminium World, 2003, v.3, issue 1, p. 69-72.
24. Nussbaum A.I. // Light Metal Age, 1997, August, p. 10-18.
25. В.Н.Фикссен. Тенденция к применению электромагнитных насосов для литья алюминиевых сплавов под низким регулируемым давлением // Металл и литье Украины. – 2004. – № 1-2. – С. 27-30.

26. Патент України №113617. Магнітодинамічна установка для лиття під електромагнітним тиском // Фікссен В.М. (ФТІМС НАН України) // МПК (2016.01) B22D 35/00, B22D 39/00, B22D 27/02, F27D 11/00, H05B 6/02, H05B 6/34. – Заявл. 06.10.2016 р. № u 2013 04794. – Опубл. 27.02.2017, Бюл. № 4.

27. Фикссен В.Н. Перспективы расширения области применения магнитодинамических установок в литейных технологиях // Процессы литья. – 2015. – № 4. – С. 31-39.

28. Патент України № 108335 МПК B22D35/00, B22D39/00, F27D11/00, H05B6/02, H05B6/34. Заливальний пристрій магнітодинамічного типу / В.М. Фікссен. – Опубл. 10.04. 2015, Бюл. № 7.

29. Патент № 69647А Україна, МПК 7 B22D39/00. Спосіб лиття під електромагнітним тиском / Фікссен В.М., Дубодєлов В.І., Горшков А.О., Слажнев М.А. (ФТІМС НАН України (UA)). – № 20031110086; Заявл. 10.11.2003 р. – Рішення про видачу деклараційного патенту на винахід від 15.09.2004 р. – Опубл. 15.09.2004 р., Бюл. № 9.

30. Повышение добавочной стоимости производимого продукта за счет отливки слитков с точно заданным составом сплавов // Aluminium International Today (выпуск на рус. языке), 2005, ноябрь, с.6-10.

31. *Benedyk J.C.* // Light Metal Age, 2002, August, p. 28-34.

32. Слажнев Н.А., Дубодєлов В.И., Богдан К.С Магнитовесовая установка с микропроцессорным контролем и управлением дозированной разливкой алюминиевых расплавов. Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 1 (27) – С. 36-41.

33. Шехтер Е.Ю. Принципы дозирования жидких металлов. – Рига : ЛатИНТИ, 1969. – 57с.

34. Лиелаусис О.А. Гидродинамика жидкометаллических МГД-устройств. – Рига : Зинатне, 1967. – 240с.

35. Самсоник В.А., Цин М.Р. Автоматизация процесса дозирования металла магнитодинамическими установками // МДНЛП. – С. 34-39.

36. Поліщук В.П., Цин М.Р., Самсонік В.А. Вплив гідравлічних факторів на точність автоматичного дозування рідкого металу магнітодинамічними дозаторами // Вісн. АН УРСР. – 1984. – № 11. – С. 51 – 58.

37. А. с. 793719 СССР, МКИ³ В22 D 39/00. Устройство для управления процессом дозирования жидких металлов / Ю.Н. Войтенко, В.А. Трефняк, Ю.С. Шумков и др. – Опубл. 07.01.81, Бюл. № 1.

38. А. с. 916083 СССР, МКИ³ В22 D 39/00. Устройство для управления процессом дозирования жидкого металла / В.П. Полищук, В.А. Трефняк, М.Р. Цин и др. – Опубл. 30.03.82, Бюл. № 12.

39. А. с. 1026955 СССР, МКИ³ В22 D 39/00. Устройство для управления процессом дозирования жидких металлов / В.А. Трефняк, М.Р. Цин, Ю.Н. Войтенков и др. – Опубл. 07.07.83, Бюл. № 25.

40. Кирко И.М., Лиелпетер Я.Я. Дозирование жидкого металла при помощи электромагнитных индукционных насосов // Прикладная магнитная гидродинамика : Тез. Докл. – Рига, 1961. – С. 155 – 169.

41. А. с. 688281 СССР, МКИ² В 22 D 17/30. Способ дозирования с использованием инерционного периода движения металла / М.Ф. Гольберг, В.П. Полищук, В.А. Трефняк. – Опубл. 30.09.79, Бюл № 36.

42. Рабинович Б.В. Особенности процессов заливки в условиях современных автоматических формовочных линий // ЛП. – 1983. – № 4. – С. 30 – 31.

43. Слажнев Н.А. Система коррекции расходных характеристик магнитовесовой установки при переменном уровне расплава в тигле // Металл и литье Украины. – 2011. – № 8. – С. 34-40.

44. В.И. Дубоделов, М.С. Горюк, В.Н. Фикссен, Н.А. Слажнев, Ю.П. Скоробагатько, А.В. Ященко. Электротехнологические установки магнитодинамического типа для плавки, внепечной обработки и электромагнитной разливки жидких металлов // Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». – Київ, НТУУ «КПІ», 15 квітня 2014 р. – С. 341-355.

45. Дубоделов В.И., Моисеев Ю.В., Слажнев Н.А., Богдан К.С. и др. Влияние магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики. Процессы литья. – 2013. - №3. – С. 64-73.
46. Дубоделов В.И. Магнитодинамические насосы и установки для литейных и металлургических технологий // Металл и литье Украины. – 1998. – № 9-10. – С. 27-30.
47. Патент України № 66908 на корисну модель. Магнітовагова ливарна установка / Слажнев М.А., Дубоделов В.І., Богдан К.С., Санкін А.О. МПК (2011.01) B22D 13/00, G01G 19/12 (2006.01), опубл. 25.01.2012. – Бюл. № 2.
48. Слажнев Н.А., Дубоделов В.И., Богдан К.С. Магнитовесовая установка с микропроцессорным контролем и управлением дозированной разливкой алюминиевых расплавов // Металлургические процессы и оборудование. – 2012. – № 1 (27) – С. 36-41.
49. Дубоделов В.И., Погорский В.К. и др. Расчет электрических и тепловых параметров установки МДН-6ч-3,0-1. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1991. – 25 с.
50. Альтгаузен [и др.]. Электротермическое оборудование: справочник / Сост. А. П. Альтгаузен; Под ред. А. П. Альтгаузена. - Москва: Энергия, 1980, 303 с.
51. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М. Госэнергоиздат, 1960. – 456 с.
52. Холоднокатанные электротехнические стали: Справ. изд. / Молотиллов Б.В., Миронов Л.В. и др. – М.: Металлургия, 1989. – 168 с.
53. ГОСТ 21427.1-83. «Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия».
54. А.Ю. Семенко. Визначення потужності теплових втрат у магнітодинамічній установці для алюмінієвих сплавів// «Литво. Металургія 2018»: Матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (22-24 травня 2018р., м. Запоріжжя, Україна). – С. 173-174.

55. Кремлевский П.П. Расходомеры и счётчики количества: Справочник. – 4-е изд. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989. – 701 с.
56. Патент України № 54799 на корисну модель. Магнітоваговий дозатор дискретної дії для металевих розплавів / Богдан К. С., Дубодєлов В. І., Моїсєєв Ю. В., Слажнєв М. А., Санкін А. О., Фікссєн В. М. МПК (2009) B22D 13/00, G01G 19/00 (2010.05), опубл. 25.11.2010. – Бюл. № 22, 2010 р.
57. Патент України № 66908 на корисну модель. Магнітовагова ливарна установка / Слажнєв М. А., Дубодєлов В. І., Богдан К. С., Санкін А. О. МПК (2011.01) B22D 13/00, G01G 19/12 (2006.01). Опубл. 25.01.2012; Бюл. № 2.
58. Дубодєлов В.И. Влияние магнитогидродинамических процессов в рабочей зоне магнитодинамических установок на их эксплуатационные характеристики / В. И. Дубодєлов, Ю. В. Моїсєєв, Н. А. Слажнєв, К. С. Богдан, Н. А. Кудрявченко, В. К. Погорский, А. О. Горшков // Процессы литья. – 2013. – № 3. – С. 64-73.
59. ГОСТ 1583-93. «Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия».
60. Вайнберг А.М. Индукционные плавильные печи. М. Госэнергоиздат, 1960. – 456 с.
61. С.А. Фарбман, И.Ф. Колобнев. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Metallurgizdat, 1958. – 407 с.
62. Дубодєлов В.И., Погорский В.К. и др. Расчет электрических и тепловых параметров установки МДН-6-ЗЧ. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1991. – 25 с.
63. Холоднокатанные электротехнические стали: Справ. изд. / Молотиллов Б.В., Миронов Л.В. и др. – М.: Metallurgiya, 1989. – 168 с.
64. Трофимов М.Г. Футеровка индукционных печей. М.: Metallurgizdat, 1972. – 288 с.
65. Дубодєлов В.И., Богдан К.С., Фикссєн В.Н. Дискретное дозирование расплавов магнитовесовым методом //Заготовительные производства в машиностроении.-2009.-№5.-С.8-13.

66. Математический анализ /И.И. Ляшко, А.К. Боярчук, Я.Г. Гай, А.Ф. Калайда.-Киев.: "Вища школа", 1983.
67. Automatic Control of Molten Steel Temperature in Tundish and Application to Stainless Steel Casting / M.Mabuchi, Yu.Yoshii, Ts.Nozaki a. o. // Kawasaki Steel Giho. 1985. V. 14, No.4. P. 365–371.
68. Applied MHD in the Process of Continuous Casting / E.Takeuchi, M.Zeze, T.Toh, Sh.Mizoguchi // Proceedings of Symposium “Magnetohydrodynamics in Process Metallurgy” (during the TMS Annual Meeting). San Diego, California, March 1-5, 1992. P. 189–202.
69. Qiang W., Baokuan L., Fumitaka T. Modeling of a Thermo-Electromagneto-Hydrodynamic Problem in Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating. ISIJ International. 2014. Vol. 54, No. 2, P. 311–320.
70. Haiyan T., Luzhao G., Guanghui W. a. o. Hydrodynamic Modeling and Mathematical Simulation on Flow Field and Inclusion Removal in a Seven-Strand Continuous Casting Tundish with Channel Type Induction Heating. Metals. 2018. Vol. 8. P 374–398.
71. Taniguchi S., Brimacombe J. K. Separation of nonmetallic inclusions from liquid metal by pinch force // Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 1994”. October 25-28, 1994., Nagoya, Japan. P. 429–434.
72. Танигучи С., Бримакомб Дж. Извлечение немаetalлических включений из металла силой пинча // Магнитная гидродинамика. 1996. № 2. С. 158–163.
73. Yu.Miki. Applications of MHD to continuous casting of steel // Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”. October 23-27, 2006. Sendai, Japan. P. 26–30.
74. T. Toh, E. Takeuchi, T. Matsumiya. Recent advances in MHD applications to steelmaking processes // Proceedings of the 5th International

Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”. October 23-27, 2006. Sendai, Japan. P. 21–25.

75. Дубоделов В.И., Смирнов А.Н., Ефимова В.Г., Кравченко А.В., Верзилов А.П. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литья стали. Киев: Наукова думка, 2018. 264 с.

76. Cho S.-M., Kim S.-H., Thomas B. Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part I. Measurements and Modeling of Two-phase Flow. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, No. 4, P. 845–854.

77. Cho S.-M., Kim S.-H., Thomas B. Transient Fluid Flow during Steady Continuous Casting of Steel Slabs: Part II. Effect of Double-Ruler Electro-Magnetic Braking. *ISIJ International*. 2014. Vol. 54, No. 4, P. 855–864.

78. Wang E. Progress of some techniques on electromagnetic metallurgy // *Proceedings of the 8th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2015”*. October 12-16, 2015. Cannes, France. P. 3–6.

79. Kekkonen M. Active tundish metallurgy/ M. Kekkonen, L. Holappa, S. Louhenkilpi, C. Schröder, T. Rodríguez Durán, J. Ciriza Corcuera, M. Serna, K. Välimaa // *European Commission Research Fund for Coal and Steel*. 2013. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 140 P.

80. Yue, Q., Zhang, C.B., Pei, X.H. Magnetohydrodynamic flows and heat transfer in a twin-channel induction heating tundish. *Ironmak. Steelmak.* 2016, 44, 227–236.

81. V.Dubodelov, A.Smirnov, V.Pogorsky, M.Goryuk. The magnetodynamic tundish for continuous casting of steel // *Proceedings of the 5th International Symposium on Electromagnetic Processing of Materials “EPM 2006”*. – October 23-27, 2006. – Sendai, Japan. – P. 114–119.

82. Wang G., Yun M., Zhang Ch., Xiao G. Flow Mechanism of Molten Steel in a Single-Strand Slab Caster Tundish Based on the Residence Time Distribution Curve and Data. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55, No. 5, P. 984–992.

83. Патент України на винахід № 66035, МПК7 B22D11/10. Проміжний ківш машини безперервного лиття заготовок / Дубодєлов В. І., Богдан К. С., Фіксен В. М., Погорський В. К, Горюк М. С., опубл. 15.08.2005 р. Бюл. № 8.

84. Патент України на винахід № 67965А, МПК7 B22D11/10 Спосіб управління витратою металевого розплаву /Дубодєлов В. І., Богдан К. С., Фіксен В. М., Погорський В. К., Горюк М. С., опубл. 15.04.2004. – Бюл. № 7.

85. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: «Машиностроение», 1975. 560 с.

86. Ефимов В. А., Анисович Г. А., Бабич В. Н. и др. Специальные способы литья: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 436 с.

ДОДАТКИ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ФТІМС НАН України,
член-кореспондент НАН України

А.В. Нарівський

«17» 09 2018 р.
м. Київ

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на систему автоматичного управління
пілотним зразком магнітодинамічного проміжного ковша
для технологій безперервного та напівбезперервного лиття,
у т. ч. в умовах металургійних мікровиробництв

Тема НДР (відомча) III-09-17-671

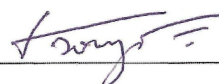
«Розробка наукових основ створення нових
високоєфективних мультифункціональних магнітодинамічних проміжних ковшів
для процесів безперервного лиття»

Державний реєстраційний номер роботи 0117U002689 від 21.03.2017 р.

Виконується за Постановою Бюро Відділення ФТПМ НАН України
від 8.11.2016 р., протокол № 15

РОЗРОБИЛИ:

Ст. наук. співроб. відділу МГД,
докт. техн. наук

 К.С. Богдан

Мол. наук. співроб. відділу МГД

 А.Ю. Семенко

Київ – 2018

Дане технічне завдання відноситься до розробки наукових основ створення нових високоефективних мультифункціональних магнітодинамічних проміжних ковшів (МД-ПК) для процесів безперервного лиття. Такі МГД-агрегати мають розширені функціональні можливості щодо підігріву розплаву, усереднення його температури та хімічного складу, можливості рафінування, що забезпечить покращення якості безперервнолитої заготовки і ефективності процесу розливання.

Базою для виготовлення даного пристрою є магнітодинамічна установка МДУ-26-С-6,3-2 (МДУ), що є прототипом магнітодинамічного проміжного ковша (Патент України № 66035). Зокрема, для реалізації використовується спосіб управління витратою металевого розплаву із двокамерного МД-ПК у кристалізатор МБЛЗ шляхом регулювання маси розплаву (Патент України № 67965), та спосіб контролю рівня розплаву в камерах МД-ПК та кристалізаторі.

Система автоматичного управління реалізована на базі магнітодинамічних установок МДН-6А-0,25 та МДН-6А-0,63-М.

Для здійснення процесу електромагнітного розливання до інтерфейсу ваговимірюючого індикатора та датчиків рівня розплаву підключаються органи контролю та управління процесів розливання та роботи ваговимірювальної системи та системи контролю рівня розплаву в камерах та кристалізаторі, а також системи аналогового виходу сигналу, що пропорційний фактичному значенню маси та рівня розплаву:

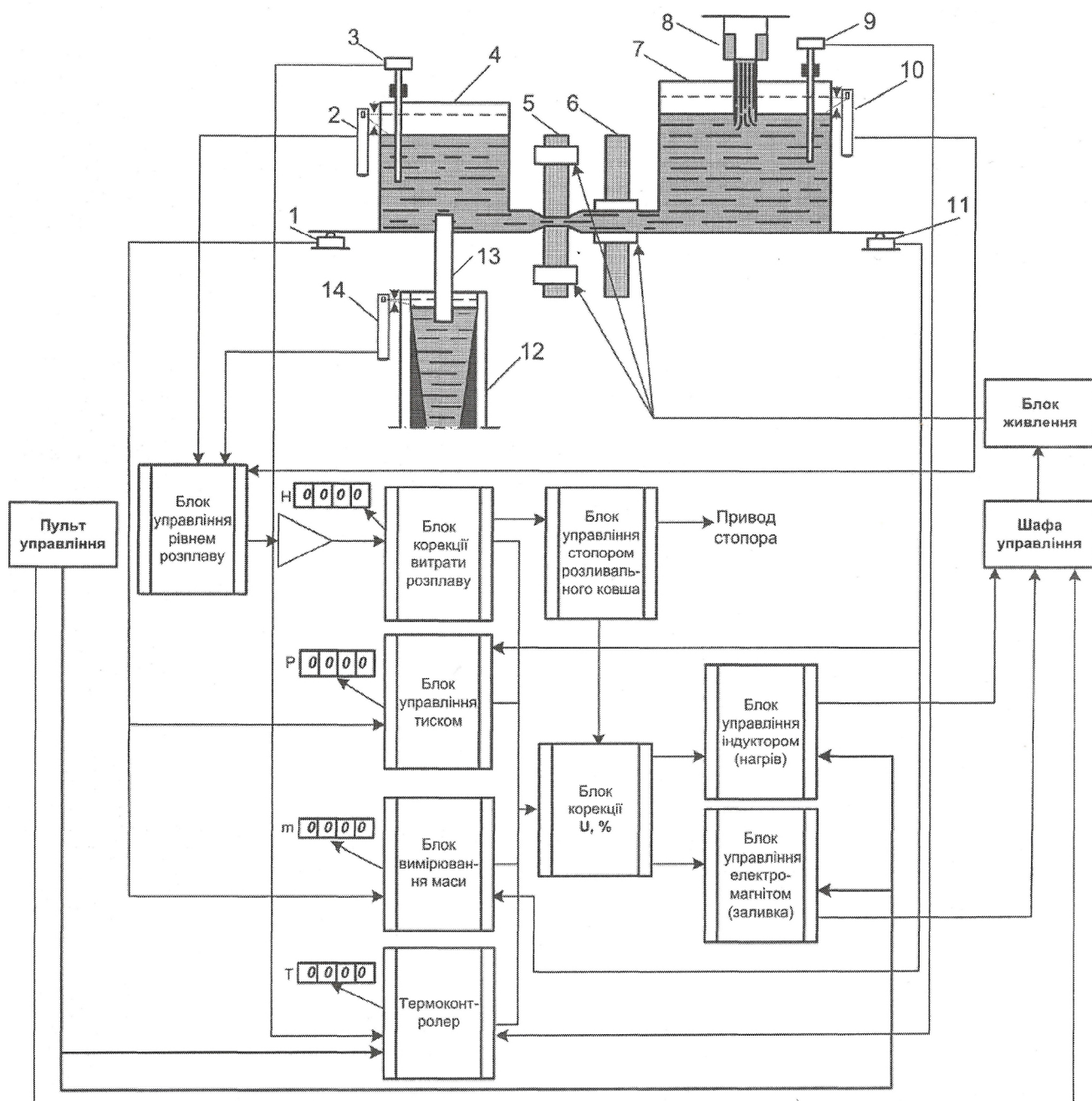
1. Кнопка «СТАРТ заливки»;
2. Кнопка «СТОП заливки»;
3. Сигнальна лампа наявності певного рівня розплаву в МД-ПК – дозвіл для розливання;
4. Сигнальна лампа стабілізації ваговимірюючої системи – дозвіл заливки;
5. Реле включення режиму заливки;
6. Реле включення 2-ї стадії заливки;
7. Реле включення 3-ї стадії заливки;
8. Плата аналогового виходу сигналу, пропорційного фактичному значенню маси у відповідності з діапазоном ваго вимірювання.

Основні елементи управління та регулювання:

1. Регулювання та управління процесом дозування розплаву по масі;
2. Регулювання витратних характеристик:
 - а) в залежності від фактичного рівня розплаву в прийомній камері (К1) МД-ПК;
 - б) в залежності від фактичного рівня розплаву у випускній камері (К2) МД-ПК;
 - в) в залежності від фактичного рівня розплаву у кристалізаторі МД-ПК;
 - г) в залежності від об'єднаного розрахунку системою управління компенсації зниження швидкості розливи.
3. Регулювання витратних характеристик в залежності від фактичної температури у випускній камері (корекція напруги (тиску) в залежності від в'язкості розплаву.
4. Регулювання температури розплаву в камерах МД-ПК.
5. Регулювання роботи привода стопора стальковша.

Склад САУ:

1. Мікроконтролер Мітсубіші ALFA AL2-14 MRD
2. Базовий блок AL2-14MR-D-R
3. Інтерфейсний модуль AS AL2-ASI-BD
4. Дискретний модуль розширення AL2-4EX
5. Аналоговий модуль розширення AL2-2TC-ADP
6. Модуль блоку живлення напругою 24В.
7. Модуль розширення.
8. Програмне забезпечення для програмування мікроконтролерів серії Alfa (SW0D5-ALVLS-EUL Версія 2.50).
9. Програми для реалізації стабілізації витратних характеристик.
10. Програми для реалізації напірних характеристик.



Структурно-функціональна схема САУ МД-ПК для безперервного розливання сплавів:

1, 11 – силовимірювальні датчики; 2 – електромагнітний датчик рівня розплаву у розливальній камері; 3, 9 – термопари; 4 – випускна камера; 5 – індуктор; 6 – електромагніт; 7 – приймальна камера; 8 – стопор стальковша; 10 – електромагнітний датчик рівня розплаву у приймальній камері; 12 – кристалізатор; 13 – занурюваний стакан; 14 – електромагнітний датчик рівня розплаву в кристалізаторі МБЛЗ.

Для досягнення максимальної рівномірності хімічного складу використовується електромагнітне перемішування розплаву в камерах проміжного ковша та циркуляція рідкого металу між ними. Високу інтенсивність руху розплаву слід підтримувати на заданому рівні для запобігання уникнення застійних зон (з низькою швидкістю руху потоків розплаву), що призводять до суттєвого охолодження розплаву в них і погіршує стабільність процесу безперервного розливання та якості литої металопродукції. Зокрема, для боротьби з такими явищами використовують зовнішні силові дії – наприклад, організацію перемішування за допомогою продувки інертним газом, а також змінюють геометрію порожнини промковша шляхом встановлення перегородок і бар'єрів з вогнетривів. Для оптимізації цих процесів всі миттєві значення основних параметрів МД-ПК проходять через блок корекції напруги, подальший сигнал з якого іде на індуктори (нагрівання) або електромагніт (заливання).

Розроблена САУ передбачає два режими роботи: без стабілізації масової витрати та зі стабілізацією. Перший режим передбачений для реалізації ручного управління витратними характеристиками за командою оператора шляхом переключення 4-х позицій регулювання напруги на електромагніті. Другий режим призначено для автоматичного безперервного регулювання та підтримки витратних характеристик у заданому інтервалі в залежності від миттєвого значення рівня розплаву в камерах промковша та кристалізаторі. Включення режиму автоматичної стабілізації витратних характеристик реалізується за допомогою пакетного перемикача, що розташований на пульті управління.

Створюваний МД-ПК має у своєму складі приймальну та розливальну камери, що з'єднані каналом, індуктори та електромагніт, який створює електромагнітну силу гальмування чи прискорення потоку розплаву в каналі. МД-ПК встановлено на силовимірювальні датчики, що закріплені на нерухомій основі. Точність підтримання витрати розплаву реалізується завдяки забезпеченню постійного гідростатичного тиску у розливальній камері МД-ПК шляхом регулювання миттєвого значення маси розплаву у ній. Регулювання фактичних рівнів розплаву у приймальній та розливальній камерах та кристалізаторі МБЛЗ здійснюється за допомогою електромагнітних датчиків рівня, принцип роботи яких полягає у фіксуванні положення рівня за допомогою радіоактивного чи електромагнітного випромінювання, що передає сигнал на привод переміщення стопора.

Аналіз роботи проміжних ковшів МБЛЗ традиційної конструкції показав, що середня висота рівня розплаву в них протягом циклу розливання складає в середньому 0,7-1,1 м, а в разі заміни сталерозливного ковша після його випорожнення до надходження нового відбувається суттєве зниження рівня, тобто має місце періодично повторюваний процес зменшення/зростання рівня розплаву у промковші. При цьому не можна допускати зменшення рівня нижче за ~0,4 м, оскільки в такому разі над зонами видачі рідкого металу (над вихідним отвором сталерозливного стакану, який занурений під рівень розплаву в кристалізаторі МБЛЗ) внаслідок дії ряду гідродинамічних чинників формується воронка, яка захоплює шлак з поверхні рідкометалевої ванни і повітря над дзеркалом металу, сприяє їх потраплянню до кристалізатора МБЛЗ та спричиняє виникнення дефектів – неметалевих включень і газової пористості – у тілі безперервнолитої заготовки.

Зважаючи на середні показники рівня розплаву у промковші, результуюча лінійна швидкість рідкометалевого струменя досягає 3-4 м/с, що спричиняє формування глибокої рідкометалевої лунки в тверднучій заготовці, потраплянню до неї газових та неметалевих включень. Для запобігання таким небажаним явищам у світовій практиці пропонується застосовувати спеціалізовані електромагнітні гальмівні пристрої або зміну режиму розливання на малонапорний.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ТОВ «ВТОРТЕХ»

О.І. Верхогляд
201 8 р.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор ФТІМС НАН України,
член-кореспондент НАН України

А.В. Нарівський
«4» 201 8 р.

АКТ дослідної перевірки

Ми, що нижче підписалися, представники ТОВ «ВТОРТЕХ» та ФТІМС НАН України, склали цей Акт про наступне:

В рамках спільних досліджень та технологічних випробувань магнітодинамічної установки МДН-6А місткістю 250 кг алюмінієвого розплаву проводилось відпрацювання режимів роботи установки при індукційному нагріванні, тривалому витримуванні, дозованому електромагнітному розливанні алюмінієвого сплаву АК7ч.

В результаті проведених робіт встановлено:

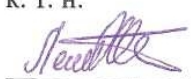
1. Обсяги перетворення електромагнітної енергії, генерованої електромагнітними системами установки, складають: - теплова корисна (виділена в рідкому металі) – 65-80%; - гідродинамічна (рух розплаву) – 8-11%; - силова реакція з конструкцією установки (безповоротні втрати) – 5-6%. Залишок генерованої електромагнітної енергії складають теплові втрати, які залежать від кількості металу в установці, технологічного режиму її роботи та застосованої системи управління живленням електромагнітних систем установки. Зокрема, застосування аналогового управління роботою індукторів дозволяє скоротити теплові втрати до 2 разів і збільшити швидкість нагрівання розплаву в 1,5 рази порівняно з традиційною системою дискретного ступінчатого управління.

2. Для створення електромагнітного тиску на рівні 30-35 кПа, який на 10-20% вище від паспортних даних існуючих серійних МДУ і є мінімально необхідним для подальшого розвитку одержання виливків за технологіями ЛЕМТ та РОЗЛИВ-ЛЕМТ, прорахована ефективна електромагнітна сила, що складає 23,55-31,84 Н.

3. Визначено раціональний інтервал співвідношення маси розливаної порції металу та миттєвого значення масової витрати при її розливанні та відповідний інтервал напруги живлення електромагніта МДУ, що дозволяє контролювати витрату рідини на вагодозувальному жолобі, з метою мінімізувати вплив пульсацій струменя на точність дозування, за рахунок зменшення їх амплітуди. При цьому похибка дозування не перевищує 1,5% від маси дози при розливанні малих порцій розплаву (маса 1,5-3 кг).

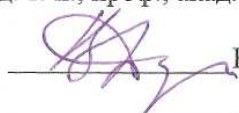
Від ТОВ «ВТОРТЕХ»:

Головний інженер,
К. Т. Н.


Ю.П. Ленда

Від ФТІМС НАН України

Зав. відділом МГД,
д. т. н., проф., акад. НАН України


В.І. Дубодєлов
м. н. с. відділу МГД


А.Ю. Семенко