

УДК 621.3:519.876.5:621.74:303.732.4
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).18](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).18)

PROBLEMS OF THE METHODOLOGY OF RESEARCH OF PROCESSES AND PHENOMENA IN THE ENERGY TREATMENT OF LIQUID METAL SYSTEM

ПРОБЛЕМАТИКА МЕТОДОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ І ЯВИЩ ПРИ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ ОБРОБЦІ РІДКОМЕТАЛЕВОЇ СИСТЕМИ

Volodymyr M. Tsurkin¹
dpta@iippt.com.ua
ORCID: 0000-0003-2697-579X
Serhii V. Petrychenko¹
petrichsergey@gmail.com
ORCID: 0009-0000-1506-5219
Oleksiy S. Sadovoy²
sadovuyos@mnaeu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7369-0714

В. М. Цуркін¹,
канд. фіз.-мат. наук, пров. наук. співр.
С. В. Петриченко¹,
канд. техн. наук, пров. наук. співр.
О. С. Садовий²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*

²*Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv*

¹*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

²*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

Abstract. For foundry production, energy-based processing methods are being developed, the effect of which is based on the introduction of physical fields into the processing object, which simultaneously modify the structure, compensate for the harmful effects on the properties of some alloy elements and refine the melt. At the same time, new energy methods are being searched for that would make it possible to significantly improve the performance of the price-quality system. One of them is the simultaneous effect on the metal melt of conductive electric current treatment (CECT) and magnetic pulse treatment (MPT). Regarding the simultaneous application of CECT+MPT, the known knowledge of each of them will come in handy, but their superposition will form the basis of its own problematic. This causes difficulties in setting tasks at the design stage due to the lack of relevant scientific and technical information. Therefore, it is relevant to identify the problematic aspects of the simultaneous application of the innovative CECT+MPT method for foundry production.

The aim of the work is to outline the methodological features of designing and researching an innovative method for simultaneous treatment of a melt using conduction current and magnetic-pulse action

The paper proposes the concept of a research methodology at the design stage of the innovative CECT+MPT method. The paper presents the basic facts of the application of either CECT or MPT for melt processing as general. In addition, it is determined that for the CECT+MPT option, several problematic issues have been identified that require research at the technology design stage. The key problem of the innovative technology is the production of competitive castings. The paper presents a general approach to building a research methodology at the design stage of the method of simultaneous melt treatment by conductive current and magnetic pulse action. The material presented can be defined as intentions that will be adjusted and supplemented. Their practical significance lies in the fact that it allows researchers to more consciously formulate problem statements. And the scientific novelty is that the methodology for studying processes and phenomena in the energy treatment of the melt for the technology design stage allows laying down the basic principles for building the corresponding theory.

Key words: methodology; electric current treatment; magnetic pulse treatment; metal melt; electromagnetic field; simulation modelling; system analysis.

Анотація. Для ливарного виробництва розвиваються енергетичні методи обробки, дія яких заснована на введенні в об'єкт обробки фізичних полів, які забезпечують одночасно модифікацію структури, компенсацію шкідливого впливу на властивості деяких елементів сплаву та рафінування розплаву. При цьому ведеться пошук нових енергетичних методів, які б надали можливість суттєво покращити показники системи «ціна-

якість». Одним із них є одночасна дія на металевий розплав кондукційної електрострумової обробки (КЕСО) та магнітно-імпульсної (МІО). Щодо одночасного застосування КЕСО+МІО, то відомі знання кожного з них стануть до нагоди, але їх суперпозиція складе підстави своєї проблематики. Через це виникають складнощі при постановці задач на стадії проектування через брак відповідної науково-технічної інформації. Тому актуальним є визначення проблемних аспектів одночасного застосування новаційного методу КЕСО+МІО для ливарного виробництва.

Мета роботи – окреслити методологічні особливості проектування та досліджень новаційного методу одночасної обробки розплаву кондукційним струмом та магнітно-імпульсною дією.

Запропонована концепція методології досліджень на стадії проектування новаційного методу КЕСО+МІО. В роботі надано як загальні основні факти застосування або КЕСО, або МІО для обробки розплаву. Крім того визначено, що для варіанту КЕСО+МІО визначено декілька проблемних питань, що потребують дослідження на стадії проектування технології. Ключовою проблемою новаційної технології є отримання конкурентоспроможних виливків. У роботі представлено загальний підхід до побудови методології досліджень на стадії проектування методу одночасної обробки розплаву кондукційним струмом та магнітно-імпульсною дією. Викладений матеріал можна визначити як наміри, які будуть коригуватись та доповнюватись. Їх практична значимість полягає у тому, що дозволяє дослідникам більш свідомо формувати постановку задач. А наукова новизна полягає у тому, що методологія досліджень процесів і явищ при енергетичній обробці розплаву для стадії проектування технології дозволяє закласти базові принципи побудови відповідної теорії.

Ключові слова: методологія; електрострумова обробка; магнітно-імпульсна обробка; металевий розплав; електромагнітне поле; імітаційне моделювання; системний аналіз.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

Цикл досліджень, що визначають та розв'язують проблемні питання у матеріалознавстві, можна окреслити схемою (рис. 1). У відповідності до неї, отримати якісний матеріал виробу, який використовують у технології 2 можливо, якщо забезпечити за допомогою технології 1 відповідні позитивні перетворення структури та властивостей матеріалу заготовки. Що стосується ливарного виробництва, то для нього останні десятиріччя активно розвиваються (для технології 1) енергетичні методи обробки, дія яких заснована на введенні в об'єкт обробки полів різної фізичної природи (електромагнітних, теплових, акустичних). На відміну від реагентної обробки, коли вплив на матеріал реалізують введенням малих доз реагентів, ефект дії енергетичної обробки є інтегральним та багатоцільовим, забезпечуючи одночасно модифікацію елементів структури, компенсацію шкідливого впливу на властивості виливка деяких елементів сплаву та рафінування розплаву.

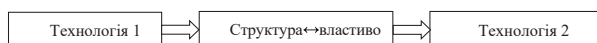


Рис. 1. Етапи послідовності обробки матеріалів

Методи енергетичної обробки можна загально визначити як електротехнології. Їх застосування у ливарному виробництві певним чином знаходить свою нішу [1].

Враховуючи складність і багатофакторність ливарного виробництва та його окрему специфіку, впевнено можна констатувати, що універсального методу обробки не існує, як і не існує універсальних принципів реалізації кожного з них. Через це не припиняються пошуки нових методів, які б надали можливість суттєво покращити співвідношення показників системи

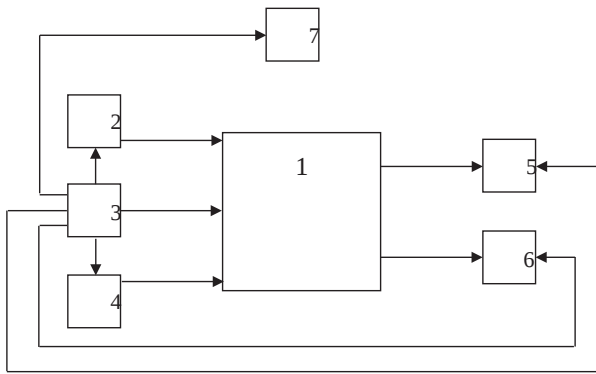
«ціна-якість». Одним із шляхів цього є одночасна дія на металевий розплав кондукційної електрострумової обробки (КЕСО) та магнітно-імпульсної (МІО). Науковий доробок щодо КЕСО та МІО має різний рівень обізнаності. Кількість наукових публікацій та патентної інформації для КЕСО суттєво перевищує аналогічні дані для МІО. Безумовно, якщо звертатись до принципу КЕСО+МІО в одному технологічному циклі, то відомі знання щодо кожного з них стануть до нагоди, але їх суперпозиція складе підстави своєї проблематики при дослідженнях на етапі проектування технологічного модуля. Тому актуальним є визначення проблемних аспектів одночасного застосування новаційного методу КЕСО+МІО для ливарного виробництва, які виникають через брак відповідної науково-технічної інформації.

Мета роботи – окреслити методологічні особливості проектування та досліджень новаційного методу одночасної обробки розплаву кондукційним струмом та магнітно-імпульсною дією.

ХАРАКТЕР ОБ'ЄКТУ ОБРОБКИ

Відповідь на те, як потрібно обробляти зовнішнім енергетичним впливом матерію, може надати природа самої матерії, та її потенційні можливості утворювати притаманну цій матерії реакцію, відповідно до її складу та стану. У цьому випадку за рахунок реакції об'єкт перебудовує свою структуру та властивості за механізмами самоорганізації [2, 3]. Зазначена фундаментальна концепція надає змогу певним чином знайти відповідну інформацію до ідеології робочого стола досліджень.

Окреслимо загальну характеристику об'єкту обробки, який знаходиться у технологічному реакторі 1 (рис. 2), у нашому випадку – це ємність із металоагрудкою, або ківш, або розливна ємність, або жолоб.



1 – технологічний реактор; 2 – основні джерела енергії; 3 – допоміжні джерела енергії; 4 – матеріальні потоки; 5 – готовий продукт; 6 – технологічні відходи; 7 – система контролю та керування

Рис. 2. Спрощена блок-схема технологічного модуля

Основні джерела енергії визначаються обраним принципом навантаження об'єкта обробки. Допоміжні забезпечують функціонування всіх елементів модуля. Матеріальні потоки можуть бути застосованими в окремих випадках. Готовий продукт – це оброблений розплав, який подається до відповідного ливарного модуля або форм. Технологічні відходи (наприклад, шлак) видаляються деякими засобами, також до відходів слід відносити непродуктивні витрати енергії. Система контролю і керування обирається та застосовується відповідно до технологічних можливостей лиття та поставлених завдань.

Спрощена блок-схема технологічного модуля дозволяє на стадії проектування технологічного методу визначити комплекс задач першого циклу досліджень, які здебільшого базуються на оцінках можливих варіантів проектних рішень щодо модуля та прогнозування сценаріїв процесів його функціонування. Експертними засобами у цьому випадку можуть виступати очікувані можливості реалізації технічних та технологічних рішень. Звісно ж, на цьому етапі їх оптимальні варіанти є недосяжними.

За визначенням у ливарному виробництві поняття «розплав» має дві ознаки: рідкометалева система (РМС), тобто розплав, що має температуру вище точки ліквідус та двофазна система (ДФС), що має ознаки як ближнього порядку, так і дальнього. Тому, з точки зору енергетичного навантаження, для перебудови структури РМС потрібно витрачати менші енергії. Крім того, саме вплив на РМС забезпечує позитивні зміни її структури та властивостей, таким чином утворюючи позитивну її підготовку до заливання та кристалізації за рахунок покращення кристалізаційної здатності. Тому, автори роботи рекомендують надавати перевагу енергетичній обробці саме РМС.

Основною характеристикою РМС є те, що вона не обмежується тільки просторовим розподілом атомів. Перш за все, її слід розглядати як відкриту термодинамічну систему, яка має такі ознаки, як нелінійна та мультифізична [4]. До цього слід додати її багатопараметричність та багатofакторність [5]. Це можливо пояснити тим, що навіть в ситуації природного стану в її об'ємі відбуваються на різних рівнях структури (макро, субмікро, атомарному) процеси перенесення матерії та тепла. За умов зовнішнього енергетичного навантаження РМС полями різної фізичної природи ці процеси суттєво ускладнюються. Тому їх аналіз спікається з певними труднощами, починаючи з постановки задач.

Особливості КЕСО та МІО

Спрощену геометричну модель принципу обробки РМС методом КЕСО+МІО представлено на рис. 3, на якому позначено, що для КЕСО можливо використовувати будь-який тип струму: постійний за амплітудою (CC), постійний за знаком (DC), змінний (AC), імпульсний (PC). Але слід зазначити, що дія CC практично обмежується тільки Джоулевым нагріванням РМС, що не сприяє зміні її кристалізаційної здатності [5, 6].



Рис. 3. Геометрична модель принципу КЕСО+МІО у рідкометалевому стані

Раніше було показано [5], що будь-який тип струму (звісно ж окрім CC) потенційно спроможний досягти бажаного результату обробки. Але кожен з них має свої функціональні можливості, тому їх неможливо ототожнювати по результатам обробки. Зазначимо, що з цього приводу у роботі [6] показана інноваційна привабливість КЕСО з одночасним застосуванням декількох струмів.

Методами фізичного експерименту та математичного моделювання отримано певний науковий доробок щодо КЕСО [5–9]. Це дає нагоду використовувати його відповідно до мети даної роботи та у подальших дослідженнях. Окреслимо основні, на наш погляд, встановлені факти.

1. Слід застосовувати стрижневі титанові електроди з ізолюваною бічною поверхнею, які є різно-рознесеними. По-перше, це дає нагоду охопити найбільш ефективно електромагнітним полем весь об'єм РМС. По-друге – мінусовий електрод біля поверхні розплаву сприяє активному газовидаленню.

2. Для оптимальної дії на РМС потрібно від джерела струму вводити визначену дозу густини енергії, яка для сплавів на основі алюмінію складає величину від $0,5 \cdot 10^8$ до $2 \cdot 10^8$ Дж/м³ [10].

3. При застосуванні РС за рахунок скінювання струму відбуваються електромагнітно-акустичні перетворення (ЕМАП), генеруючи у всьому об'ємі РМС досить потужне акустичне поле [11].

4. Сферою впливу на РМС є не струм, як стверджувалось у ранніх роботах, а ті фізичні поля, які генеруються (електричне, магнітне, теплове, акустичне) та металопотоки. Кожне з них має свої функціональні можливості, тому їх сукупна дія є багаточисловою. Тут слід зазначити, що варіант КЕСО+МІО дозволить суттєво підсилити такий ефект.

5. Вказані поля мають ознаки неоднорідності при розподілі в об'ємі РМС та нелінійні характеристики.

Що стосується МІО, то тут ми зупинились саме на принципі введення магнітного поля саме через поверхню розплаву за допомогою індуктора та імпульсного струму (рис. 3). При використанні індуктора, що розташований в об'ємі РМС, виникають проблеми його ізоляції, а для індуктора біля бічної поверхні ємності або її днища виникає серйозна проблема втрат електромагнітної енергії.

Нажаль, наш варіант, на відміну від КЕСО, досліджувався у суттєво менших обсягах [12]. Але все ж ми можемо окреслити його основні доведені факти.

1. Найбільш значущим фактором, що впливає на магнітно-імпульсний вплив, є власна частота струму, що її використано для мінімізації втрат в діапазоні від 50 до 100 кГц.

2. Амплітуду інтегрального термосилового навантаження від частоти можна апроксимувати залежністю $F_{EM} \approx 2,8 \cdot f^{0,14}$. Вона досягає насичення при частоті 75 кГц.

3. Зазор між індуктором та розплавом потрібно мінімізувати до величини 3 мм.

4. Ефекти та процеси перетворення енергії у поверхневому шарі РМС є неоднорідні, нелінійні та мультифізичні.

5. Для генерування у розплаві акустичного поля при МІО слід враховувати дві умови. Перша – це співвідношення атмосферного тиску $P_{ат}$ та магнітного P_m

на поверхні РМС $P_{ат} \leq P_m$. Друга – це співвідношення протяжності імпульсу тиску L та висоти стовпа рідини $L \leq H$.

Якщо друга умова реалізується без проблем, то попередні розрахунки показують, що простий індуктор у вигляді спіралі надає можливість забезпечити $P_m \geq P_{ат}$ тільки, якщо амплітуда струму буде не менше 3 кА. А це уводить нас до застосування високовольтного джерела струму. Тому потрібно шукати якісь технічні рішення, що нададуть змогу перейти до низьковольтного діапазону генератора імпульсного струму.

Проблематика досліджень щодо КЕСО+МІО

Метод КЕСО+МІО, як зазначалось, пропонується для застосування у ливарному виробництві. Але тут слід позначити основне завдання щодо розвитку цієї новачки до рівня інновації. Тобто – потрібно визначити умови та фактори, за яких ця новачка стане конкурентоспроможною. Це можливо досягти тільки коли застосування методу по своїм показникам (технологічним, технічним, економічним та екологічним) перевищить такі показники, що вони притаманні відомим методам обробки розплаву. Коротко це можна сформулювати таким чином. Новачки потрібно мати такі якості, що спроможні суттєво покращити співвідношення показників системи «ціна-якість» виробу до рівня його конкурентоспроможності.

Звісно ж, для першого етапу досліджень на стадії проектування технології актуальним постає визначення системи проблематики, яку потрібно досліджувати. Це складе фундаментальні засади побудови відповідної технології, яка об'єднає предметне пізнання (базовий науковий доробок), філософську рефлексію (когнітивний принцип, за яким вирішення завдань здійснюється уявою та логікою) та математичного моделювання [3].

Для уточнення та визначення проблематики цих досліджень перш за все потрібно окреслити – якої наукової інформації бракує. Але перед тим як надати такий перелік та підкреслити його актуальність, зробимо деякі пояснення.

Енергетичний вплив на РМС (з урахуванням КЕСО+МІО) будемо кваліфікувати в залежності від його функціональних можливостей як формуючий, ініціюючий та активуючий. Для першого величина густини енергії дорівнює відповідній енергетичній характеристиці РМС, наприклад величині густини енергії кристалізації (для $Al \approx 10^9$ Дж/м³). Для другого та третього – вона на порядки менша, наприклад для алюмінію енергія активації самодифузії $\approx 10^6$ Дж/м³. У нашому випадку енергетичний вплив спроможний забезпечити дію всіх трьох складових одночасно, створюючи сукупний термосиловий вплив на РМС.

Як зазначалось, сферою впливу на РМС є сукупність полів, що генеруються. Їх амплітудно-частотні характеристики визначаються зовнішніми

показниками – параметрами та характеристиками джерел живлення та типами електродних систем. Ці показники об'єднує їх електромагнітна природа. У той же час важливо підкреслити, що задля перебудови структури РМС потрібно впливати певним чином на енергетичні зв'язки її елементів. Для металевих систем вони визначені як металеві та ковалентні, що також мають електромагнітну природу. Таким чином, електричне та магнітне поля спроможні безпосередньо впливати на енергетичні зв'язки елементів РМС. У той самий час, вторинні поля додають свою лепту у термосилове навантаження. Важливим аспектом цієї дії є реакція РМС через підсилення енергетичних флуктуацій, активацію дифузії та утворення хаосу, біфуркацій та зростання ентропії в окремих зонах РМС, що сприяє формуванню дисипативних структур. Вони для відкритої термодинамічної системи надають умови для прояви автоколивальних ефектів [14]. Але, безпосередня дія електричного та магнітного полів складає базову енергетичну основу генерування у РМС комплексу мультифізичних явищ, що системно змінюють кристалізаційну здатність РМС.

Викладене показано схематично на рис. 4 та 5.

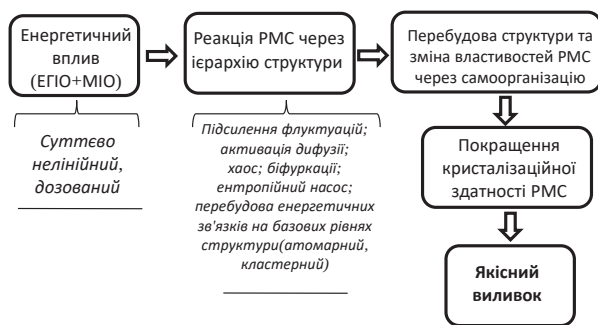


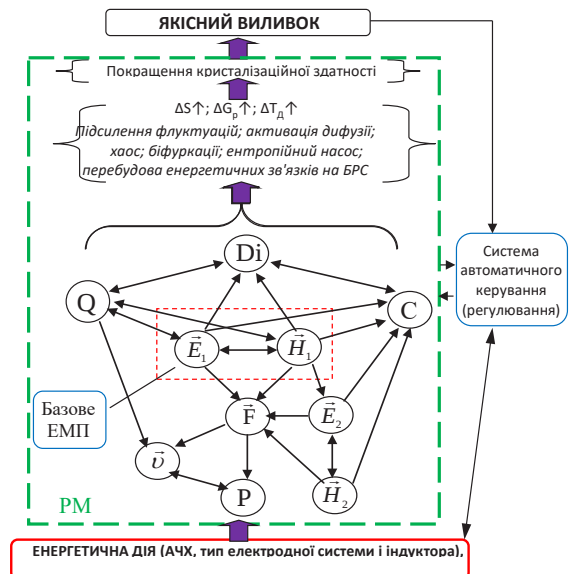
Рис. 4. Фундаментальний принцип послідовності етапів енергетичної обробки РМС

З цього приводу окреслимо загальну проблематику досліджень КЕСО+МІО.

1. Проблема потоку енергії в системі “джерело живлення – електродні системи – об’єкт обробки”.
2. Проблема суперпозиції характеристик полів при КЕСО+МІО та визначення функціональних можливостей методу.
3. Проблема енергетичної реакції РМС на зовнішній вплив, яка враховує відкритість термодинамічної системи.
4. Проблема мультифізичності процесів і явищ при КЕСО+МІО.
5. Проблема формалізації процесів та явищ.
6. Проблема системності досліджень.
7. Проблема керування якістю.

Додамо деякі пояснення щодо 5 та 6 пунктів. Для формалізації мультифізичних процесів і явищ за допомогою методів математичного моделювання потрібно

застосовувати модельні уявлення електротехніки, електродинаміки, фізики атомарної рідини, квантової фізики, акустики, теплофізики. Такий набір (навіть не повний) потребує для методу аналізу та синтезу системного підходу [15]. Але його застосування, через брак експериментальних даних, поки що може перебувати на стадії намірів, хоча й можливе з різним ступенем деталізації при постановці задач для того, щоб скоригувати наступні дослідження у першу чергу для відповідного збалансування енергетичних характеристик дії та реакції РМС.



$\vec{E}_1, \vec{H}_1$ – первинні ЕМП; $\vec{E}_2, \vec{H}_2$ – вторинні ЕМП; $\vec{v}$ – акустичне поле та металопотоки; $\vec{F}$ – силове поле; Q – теплове поле; Di – дифузія; P – поле тиску; C – концентрація складових елементів; $\Delta S \uparrow$ – експорт ентропії; $\Delta G_p \uparrow$ – підвищення величини енергії Гіббса рідини; $\Delta T_d \uparrow$ – утворення додаткового (штучного) переохолодження за рахунок $\Delta G_p \uparrow$.

Рис. 5. Орграф причинно-наслідкової структуризації передачі інформації при застосуванні КЕСО+МІО

Що стосується проблематики № 7, то проблема забезпечення якості не обмежується тільки системами автоматичного керування. Її база закладається саме на стадії проектування технології, коли вирішуються позитивно перші шість пунктів переліку.

Аналіз результатів

Запропонована в роботі концепція методології досліджень на стадії проектування новаційного методу КЕСО+МІО дозволить визначати основні умови та фактори позитивної зміни кристалізаційної здатності РМС, підготовленої до заливання у форму. Зазначимо, що при цьому слід очікувати результати, які можуть вступити у протиріччя з традиційними поняттями та визначеннями. Постановку задач досліджень слід націлювати не на те, як зовнішня енергетична дія впливає на елементи структури РМС, а на те, як змінити їх енергетичні зв'язки. Такий постулат

є основою системного аналізу, за яким саме зміна енергетичних зв'язків (інформаційних) елементів системи змінює алгоритми функціонування системи. Таким чином і потрібно орієнтувати функцію керування системою [15].

Ключовою проблемою, яка закладе відповідну базу для досліджень, є ретельне вивчення розподілу та характеристик полів, що генеруються у РМС та визначають її реакцію, що утворює самоорганізацію.

ВИСНОВКИ

1. У роботі представлено загальний підхід до побудови методології досліджень при проектуванні

новаційного методу одночасної обробки розплаву у ливарному виробництві кондукційним струмом та магнітно-імпульсною дією. Він дозволить більш свідомо визначати постановки задач досліджень.

2. Основною проблематикою при проектуванні методу є визначення умов та факторів, які дозволять отримати конкурентоспроможний виливок.

3. Представлені у роботі положення не претендують на те, щоб всебічно описати можливий генезис енергетичної дії на об'єкт обробки та відповідну реакцію об'єкту обробки. Викладений матеріал скоріше за все можливо визначити як наміри, які будуть коригуватись та доповнюватись.

REFERENCES

- [1] Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018). Application of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena for intensification of effect on metallic systems: World and Ukrainian experience. In: *Science of Materials. Achievements and Prospects*. Vol.2, pp. 24–50, Kyiv, Akadempriodyka [in Ukrainian].
- [2] Haken, H. (1983). *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*. Springer Berlin, Heidelberg. 371 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45553-7>
- [3] Starish, O.H. (2005). *Sistemolohiia [Sytemology]*. Kyiv. 232 p. [in Ukrainian].
- [4] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences. 305 p.
- [5] Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, New York: Nova Science Publishers, pp. 1–114.
- [6] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 1(60), pp. 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [7] Choi, S.J., Kim, D., La, M. *et al.* (2023). Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y>
- [8] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Materials Science and Technology*, no. 4(38), pp. 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [9] Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y. *et al.* (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [10] Ivanov, A.V., Tsurkin, V.M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V., Degtev, Yu.N. (2023). Method of processing a metal melt of an aluminum-based alloy (UA Patent No UA153619U).
- [11] Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V. (2022). Functional Capabilities of Electromagnetic-acoustic Transformations in Current Mode in the Metal Melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 3(58), pp. 239–247. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030139>
- [12] Cherepovskiy, S.S., Ivanov, A.V., Tsurkin, V.M. (2017). Method of metal melt processing (UA Patent No UA114760C2)
- [13] Maksymchuk, I. M., Khriplyviy, A. O., Friezel, V. V., Romanko, P. M. (2020). Features of Crystallization, Formation of Phase Composition and Morphology of Al–7Si–4Fe Alloy Structural Units under Magnetic-Pulse Melt Processing. *Metallophysics and Advanced Technologies*, no. 10(42), pp. 1373–1386. [in Ukrainian], <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1373>
- [14] Zasimchuk, E. E., Zasimchuk, V. I., Turchak, T. V. (2020). Conditions of Self-Organization of Dissipative Modulated Structures in a case of Vacancies Distribution in Cylindrical Sample. *Metallophysics and Advanced Technologies*, no. 10(42), pp. 1455–1466. [in Ukrainian], <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1455>
- [15] Mesarovic, M.D., Macko, D., Takahara, Y. (1970). *Theory of hierarchical, multilevel systems*. Academic Press: New York and London. 294 p.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Дубоделов, В.І., Горюк, М.С. (2018). Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. Т.2, С. 24–50. Київ, Академперіодика
- [2] Haken, H. (1983). *Advanced Synergetics: Instability Hierarchies of Self-Organizing Systems and Devices*. Springer Berlin, Heidelberg. 371 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45553-7>
- [3] Старіш, О.Г. (2005). *Системологія*. Київ: Центр навчальної літератури. 232 с.

- [4] Подольцев, О.Д., Кучерява, І.М. (2015). *Мультифізичне моделювання в електротехніці*. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. 305 с.
- [5] Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, New York: Nova Science Publishers, pp. 1–114.
- [6] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 1(60), pp. 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [7] Choi, S.J., Kim, D., La, M. *et al.* (2023). Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y>
- [8] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Materials Science and Technology*, no. 4(38), pp. 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [9] Zhang, Y.H., Xu, Y.Y., Ye, C.Y. *et al.* (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [10] Іванов, А.В., Цуркін, В.М., Жданов, О.О., Честних, М.В., Дьогтев, Ю.Н. (2023). Спосіб обробки металевого розплаву сплаву на основі алюмінію (патент України №153619).
- [11] Tsurkin, V.N., Ivanov A.V. (2022). Functional Capabilities of Electromagnetic-acoustic Transformations in Current Mode in the Metal Melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 3(58), pp. 239–247. <https://doi.org/10.3103/S1068375522030139>
- [12] Череповський, С.С., Іванов, А.В., Цуркін, В.М. (2017). Спосіб обробки розплаву металу (патент України № 114760).
- [13] Максимчук, І.М., Хриплий, А.О., Фрізель, В.В., Романенко, П.М. (2020). Особливості кристалізації, формування фазового складу і морфології структурних складових стопу Al-7Si-4Fe у разі магніто-імпульсної обробки розтопу. *Металофізика та новітні технології*. № 10(42). С. 1373–1386. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1373>
- [14] Засімчук, О.Е., Засімчук, В.І., Турчак, Т.В. (2020). Умови самоорганізації дисипативних модульованих структур у разі розподілу вакансій у середині циліндричного зразка. *Металофізика та новітні технології*. №10(42). С. 1455–1466. <https://doi.org/10.15407/mfint.42.10.1455>
- [15] Mesarovic, M.D., Macko, D., Takahara, Y. (1970). *Theory of hierarchical, multilevel systems*. Academic Press: New York and London. 294 p.

© Цуркін В. М., Петриченко С. В., Садовий О. С.
Дата надходження статті до редакції: 25.10.2024
Дата затвердження статті до друку: 09.11.2024