ШИФР: «Elektromehanichna obrobka»

# КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Всеукраїнський конкурс студентських робіт з галузі знань «Матеріалознавство»

## **3MICT**

ВСТУП
1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЯВИЩ В
ОБРОБЛЮВАНОМУ РОЗПЛАВІ 4
1.1. Електродна система «Вістря – площина» 6
1.2. Електродна система «Вістря – вістря»
1.3. Електродна система «Вістря - стінки ковша» 12
2. РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ
ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ, ЩО КРИСТАЛІЗУЮТЬСЯ 16
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ
УСТАНОВКИ НА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ, СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ 19
3.1. Результати обробки алюмінію технічної чистоти 19
3.2. Результати обробки сплаву АК7ч 21
3.3. Результати обробки сплаву АК7
ВИСНОВКИ
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ
ДОДАТКИ

#### ВСТУП

Підвищення сроку служби деталей с.-г. машин – це одна з головних задач, що стоять перед інженерами агропромислового комплексу. Одним із способів вирішення цієї задачі є розробка нових сплавів і вдосконалення існуючих. Існують багато методів покращення якості литого металу. Функціональні можливості цих методів багатопланові і багатоцільові. Але немає єдиного універсального методу, здатного однаково ефективно впливати на метал. Сучасний стан цього питання розвивається як у напрямі вдосконалення кожного традиційного методу, так і у напрямі пошуку альтернативних технологічних прийомів обробки. Одним з таких нових методів є обробка рідкого металу, що кристалізується, електроімпульсним розрядом. Попередні дослідження показали, що така обробка має достатньо високу ефективність. В той же час вона залишається інноваційною і на даний момент недостатньо дослідженою.

Метою даного дослідження є розробка комбінованого методу електромеханічної обробки металів та сплавів.

Щоб досягти поставленої задачі в роботі було проаналізовано сучасний стан позапічної обробки струмом металів і сплавів в розплаві і на стадії кристалізації, проведено моделювання електророзрядних процесів обробки металів і сплавів імпульсним струмом високої напруги на стадії кристалізації, розроблено електромеханічне обладнання для реалізації технології позапічної обробки металів і сплавів, на стадії кристалізації та виконано експериментальне дослідження впливу параметрів електророзрядної установки на процес кристалізації, структуру і властивості алюмінієвих сплавів.

## 1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЯВИЩ В ОБРОБЛЮВАНОМУ РОЗПЛАВІ

Тривалість експериментальних досліджень процесів, що вивчаються, не дозволяє їх проаналізувати в усьому різноманітті варійованих параметрів. Ефективнішим в цьому плані є чисельний експеримент. Отримані таким чином дані дозволяють підійти до розуміння механізмів електроімпульсної обробки рідкого розплаву, які безпосередньо пов'язані з електромагнітними явищами, що виникають в розплаві при прикладенні електричного потенціалу і проходженні розрядного струму [1]. Розглянемо різні варіанти електродних систем (рис.1), застосування яких найймовірніше на практиці:

- 1) вістря площина;
- 2) вістря вістря;
- 3) вістря стінки ковша [2].

Г



Рис. 1 – Електродні системи для експериментальних досліджень: а, б, в – для обробки розплаву, що кристалізується; а, г, д – для обробки рідкого металу

Д

Моделювання електромагнітних процесів в рідкому металі при макроскопічному підході виконується шляхом рішення рівнянь Максвелла з певними граничними умовами. Доцільно використовувати систему рівнянь Максвелла, записаних в диференціальній формі, оскільки це дозволяє нам використовувати для вирішення чисельні кінцево-різницеві методи [3].

У загальному випадку для квазістаціонарних полів ця система рівнянь записується таким чином:

$$\nabla \times H = J = \sigma(E + v \times B) + J^e, \qquad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t},\tag{2}$$

$$\nabla \times B = 0, \tag{3}$$

$$\nabla \times D = 0, \tag{4}$$

$$\nabla \times J = 0, \tag{5}$$

де  $\nabla$  – оператор набла; *H* – напруженість магнітного поля в розплаві, А/м; *J* – густина струму, А/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – питома електрична провідність, См/м; *E* – напруженість електричного поля, А/м; *v* – швидкість об'єкту, м/с, *v*=0; *B* – індукція магнітного поля в розплаві, Тл; *J<sup>e</sup>* – густина наведених (сторонніх) струмів, А/м<sup>2</sup>; *D* – електрична індукція, Кл/м.

Інвертуємо тензор провідності. Тоді рівняння (1) можна записати у вигляді:

$$E = \sigma^{-1} (\nabla \times H - J^e) + v \times B$$
(6)

Замінимо *Е* згідно із законом Фарадея, підставивши найзагальніше рівняння для магнітної індукції:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r, \tag{7}$$

де  $B_r$  – індукція стороннього магнітного поля, Тл;  $\mu_0$  – магнітна постійна,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність,  $\mu_r = 1$ .

Отримаємо загальне рівняння для квазистаціонарного електромагнітного поля:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0\mu_rH + B_r) + \nabla \times (\sigma^{-1}(\nabla \times H - J^e) - \nu \times (\mu_0\mu_rH + B_r)) = 0, \qquad (8)$$

Для того, щоб врахувати проблеми, що виникають в областях з нульовою провідністю,  $\mu_r$  та  $B_r$  представимо функціями від напруженості магнітного поля, узявши часткові похідні за часом. Отримаємо:

$$\left(\mu_{0}H\frac{\partial\mu_{r}}{\partial H}+\mu_{0}\mu_{r}+\frac{\partial B_{r}}{\partial H}\right)\frac{\partial H}{\partial t}+\nabla\times\left(\sigma^{-1}(\nabla\times H-J^{e})-\nu\times\left(\mu_{0}\mu_{r}H+B_{r}\right)\right)=0,\quad(9)$$

Для вирішення цього рівняння скористаємося програмним середовищем (системою) *Femlab*, зокрема, її модулем *Quasi-static fields/ Meridional Currents/Transient analys*, який дозволяє аналізувати процеси, що змінюються в часі, шляхом рішення диференціальних рівнянь методом кінцевих різниць.

Оскільки ємність з алюмінієвим розплавом має циліндричну форму, те рішення зручно шукати в циліндричній системі координат (*Z*, *r*,  $\varphi$ ). Розміри провідника (розплаву) – радіус  $R_0 = 45 \cdot 10^{-3}$  м; висота  $H_{\kappa} = 90 \cdot 10^{-3}$  м.

Розрахунки проведемо, використовуючи для прикладу наступні параметри розрядного контура (які застосовувалися для обробки) –  $U_0 = 31$  кB; L = 1,787 мкГн; C = 1 мкФ.

### 1.1. Електродна система «Вістря – площина»

Електродна система "Вістря - площина" відповідає випадку, коли розплав знаходиться в ємності з футерованими (непровідними) стінками, а як протиелектрод виступає нефутероване сталеве днище [4]. Геометрична модель провідника представлена на (рис.2).

Приймемо, що вісь Z співпадає з віссю ковша, кут  $\phi = 0$ . Магнітне поле в об'єкті залежить від кута  $\phi$ , а струм і електричне поле залежать від *r* і Z.

Приймемо, що струм від позитивного електроду *E* стікає в області 5 на негативному електроді.

Запишемо рівняння магнітного поля в ковші з розплавом відносно змінної  $H_{q}$ . Оскільки відсутнє джерело стороннього магнітного поля, то  $B_{r} = 0$ .

$$\mu_0 \mu_r \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial t} + \nabla \times (\sigma^{-1} (\nabla \times H_{\varphi} - J^e) - \nu \times (\mu_0 \mu_r H_{\varphi}) = 0, \qquad (10)$$

де  $H_{\omega}$  – напруженість магнітного поля в об'єкті, А/м.



Рис. 2 – Геометрія провідника для електродної системи "Вістря - площина"

Якщо рівняння (10) вирішується для розплаву, то в нього підставляється *σ* для рідкого алюмінію. Відповідно, якщо електромагнітне поле описується всередині електроду, в рівняння (10) підставляється значення *σ*, що характеризує тверду сталь.

Приймемо, що початкова швидкість розплаву v=0 і густина сторонніх струмів  $J^e = 0$ . Допустимо, що на осі  $Z = H_{\varphi} = 0$ . Задамо початкові умови:  $H_{\varphi}|_{t=0} = 0$  та  $I|_{t=0} = 0$ .

Граничні умови:

- Для області 1:  $H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r},$  (11)
- Для області 2:  $H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0},$  (12)
- Для області 3:  $H_{\varphi} = 0,$  (13)
- Для області 4:  $H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2},$  (14)
- Для області 5:  $H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot (r R_0 + \Delta_{cki\mu})}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Delta_{cki\mu}}, \qquad (15)$

Залежність *I*(*t*) може бути задана аналітично, або ж, як в нашому випадку, чисельно, шляхом оцифровування експериментально отриманої амплітуднотимчасової залежності розрядного струму. Лінії струму в даному випадку будуть розподілені, як показано на (рис. 3), а на (рис. 4) приведений розподіл амплітуди магнітного поля в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму.



максимальній амплітуді розрядного струму

а – дзеркало розплаву; б –  $H_{\kappa} = 88 \cdot 10^{-3}$  м; в –  $H_{\kappa} = 45 \cdot 10^{-3}$  м; г – дно ковша

Використовуємо рівняння для знаходження  $P_{em}$ :

$$P_{em} = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2},$$
 (16)

де  $P_{em}$  – магнітний тиск, Па.

Отримаємо розподіли амплітуди магнітного тиску (рис. 5).



Рис. 5 – Розподіл магнітного тиску в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму

## 1.2. Електродна система «Вістря – вістря»

Цей випадок описує циліндричний ківш з розплавом, через дзеркало якого введений електрод-токовід [5]. Сам ківш повністю футерований, проте по центру даної частини є круглий протиелектрод, діаметр якого дорівнює діаметру електрода-струмопровода (рис. 6).



Рис. 6 – Геометрія провідника для електродної системи "Вістря - вістря"

M – рідкий циліндричний провідник (алюмінієвий розплав) радіусом  $R_0$ ; E – електрод радіусом  $R_e$ ; 1 – дзеркало розплаву; 2 – бічна стінка; 3 – дно ковша; 4 – переріз електроду; 5 – протиелектрод; 6 – товщина скін-шару  $\Delta_{cкін}$ 

Використовується той же модуль і рівняння, що і для електродної системи "Вістря - площина". На осі  $Z H_{\varphi} = 0$ . Початкові умови:  $H_{\varphi}|_{t=0} = 0$  та  $I|_{t=0} = 0$ .

Граничні умови:

Для області 1: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2\pi r}, \qquad (17)$$

Для області 2: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot R_0},$$
 (18)

- Для області 3:  $H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r},$  (19)
- Для області 4:  $H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2},$  (20)

# Для області 5: $H_{\varphi} = 0,$ (21)

Для області 6: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot (r - R_0 + \Delta_{\mathsf{скін}})}{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \Delta_{\mathsf{скін}}},$$
(22)

Лінії струму в даному випадку будуть розподілені, як показано на (рис. 7).



Рис. 7 – Розподіл ліній струму в розплаві

Розподіл амплітуди магнітного поля в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму приведений на (рис. 8), розподіл магнітного тиску в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму на (рис. 9).



Рис. 8 – Розподіл магнітного поля в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму



Рис. 9 – Розподіл магнітного тиску в різних перерізах ковша при максимальній амплітуді розрядного струму

### 1.3. Електродна система «Вістря - стінки ковша»

Електродна система "Вістря - стінки ковша" складається з електродаструмопідвода, зануреного в розплав, ковша з алюмінієвим розплавом, в якому дно футеровано [6].

Оцінки показують, що при температурі більше 650 °C величини електроопору (провідність) матеріалу стінок ковша і розплаву практично однакові, то межа 2 є прозорою для електромагнітних полів, і ми її не враховуємо.

Використовується той же модуль і рівняння, що і раніше. На осі  $Z H_{\varphi} = 0$ . Початкові умови:  $H_{\varphi}|_{t=0} = 0$  і  $I|_{t=0} = 0$ .

Граничні умови:

Для області 1: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot r},$$
 (23)

Для області 3:  $n \times E = 0$ , (24)

Для області 4: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2},$$
 (25)

Для області 5: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t)}{2 \cdot \pi \cdot (R_0 + \square)},$$
 (26)

Для області 6: 
$$H_{\varphi} = \frac{I(t) \cdot (r - (R_0 + \square) + \Delta_{\mathsf{скін}})}{2 \cdot \pi \cdot (R_0 + \square) \cdot \Delta_{\mathsf{скін}}}, \quad (27)$$

Вираз (23) враховує так звану "магнітну ізоляцію", тобто на межі 3 нормальна складова магнітного поля дорівнює нулю.

На приведених рисунках видно, як електричний струм і магнітне поле витісняється до поверхні провідника (розплаву). Це призводить до того, що магнітний тиск в ковші розподіляється непотенційно (істотно нерівномірно). Також встановлена істотна концентрація електромагнітного поля і тиску в приелектродних зонах, що може бути причиною збудження вихрових потоків, характер руху яких буде визначаться геометрією електродної системи і характером відхилення ліній електричного струму від прямолінійного шляху (мірою скінування)(рис. 10).



Рис. 10 – Геометрія ковша з розплавом для електродної системи "Вістря - стінки ковша"

M – рідкий циліндричний провідник (алюмінієвий розплав) радіусом  $R_0$ ; E – електрод радіусом  $R_e$ ; Ш – стінка ковша шириною 0,005 м; 1 – дзеркало розплаву; 2 – бічна стінка; 3 – дно ковша; 4 – переріз електроду; 5 – протиелектрод; 6 – товщина скін-шару Д<sub>скін</sub>

Струм в даному випадку протікатиме по дзеркалу розплаву і нефутерованим сталевим стінкам, а лінії струму (рис. 11) в даному випадку будуть розподілені. Оскільки основна частина струму тече в області дзеркала розплаву, то обмежимося розподілами магнітного поля і тиску тільки в цій області (рис. 12).



Рис. 11 – Розподіл ліній струму в розплаві



Рис. 12 – Розподіл магнітного поля і тиску по дзеркалу розплаву а – розподіл магнітного поля по дзеркалу розплаву; б – розподіл магнітного тиску по дзеркалу розплаву

Результати розрахунків також показали, що у разі електродних систем "Вістря - площина" і "вістря - вістря" при максимальній амплітуді розрядного струму  $I_{\text{макс}}$ = 22 кА тиск в пристіночній області розплаву не перевищує декількох кПа, що не може істотно вплинути на стан розплаву. У разі електродної системи "Вістря - стінки ковша" електромагнітне поле проникає у відкриту сталеву стінку ковша, тут же знаходиться скін-шар, а магнітний тиск на бічній поверхні розплаву дорівнює нулю [7]. Між тим експериментальне застосування такої електродної системи дозволило отримати позитивні зміни структури і властивостей металу. Цю розбіжність можна пояснити тим, що в провідність розрахунках приймалася для чистого алюмінію. Для високотемпературних алюмінієвих розплавів (сплавів) такі довідкові дані відсутні, але очевидно, що провідність для сплавів буде менше, а співвідношення провідності розплаву і сталевої стінки змінюватиметься по мірі охолодження. Таким чином, реальний розподіл струму при використанні електродної системи "Вістря - стінка ковша" в різні моменти часу міг відрізнятися від приведеного на (рис. 11), що безумовно потрібно буде враховувати при моделюванні фізичних процесів в розплаві, що твердне (що кристалізується).

# 2. РОЗРОБКА КОМБІНОВАНОГО МЕТОДУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ, ЩО КРИСТАЛІЗУЮТЬСЯ

Енергетичним джерелом для високовольтної електроімпульсної обробки розплаву є Генератор імпульсного струму (ГІС), який є батареєю паралельно заряджених конденсаторів, число, напруга і ємність яких визначають його енергію. Енергія в батареї накопичується відносно тривалий інтервал часу і виділяється за коротший проміжок часу в розплаві [8].



Рис. 13 – Структурна схема ГІС

ЗП – зарядний пристрій; КБ – конденсаторна батарея; СК – система комутації; К – колектор; ПБС – пристрій блокування і синхронізації; Н – навантаження; ЗЕ – з'єднувальні елементи

Розрахунки основних параметрів ГІС проводились за наступними формулами.

Енергія конденсаторної батареї, що запасається *W*<sub>0</sub>:

$$W_0 = \frac{C \cdot U_0^{2}}{2},$$
 (28)

де *С* – ємність конденсаторної батареї, Ф; *U*<sub>0</sub> – напруга, до якої заряджаються конденсатори, В.

Середня потужність на виході генератора  $P_{cp}$  рівна:

$$P_{cp} = W_0 \cdot f , \qquad (29)$$

де f – частота дотримання розрядних імпульсів, Гц.

Середній струм заряду конденсаторної батареї І ... :

$$I_{cp} = C \cdot U_0 \cdot f , \qquad (30)$$

Споживана потужність зарядного пристрою  $P_{nom}$  рівна:

$$P_{nom} = \frac{P_{cp}}{\eta}, \qquad (31)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії зарядного контура (в нашому випадку приймаємо значення  $\eta$  від 0,7 до 0,8).

Виходячи з середнього струму зарядки конденсаторної батареї  $I_{cp}$  і споживаній потужності  $P_{nom}$  вибирається стандартний трансформаторвипрямляч, на базі якого йде компонування ГІС.

Для оцінки електричних характеристик ГІС при розряді необхідно розглядати перехідний процес розряду накопичувача ємності на рідкий метал [9]. Оскільки повний розрахунок перехідних процесів в ГІС надзвичайно громіздкий, обмежимося спрощеною еквівалентною схемою розрядного контура, представленого на (рис. 14), яка, дозволяє, виконати розрахунок необхідних розрядних характеристик високовольтного устаткування.

Оскільки конденсаторна батарея працюватиме на індуктивне навантаження в режимі коливального розряду, так як розплав є середовищем з високою провідністю, залежність розрядного струму від часу *I(t)* може бути представлена у вигляді затухаючої синусоїди:

$$I(t) = \frac{I'}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \cdot exp(-\gamma \cdot t) \cdot sin(\sqrt{1 - \gamma^2} \cdot t), \qquad (32)$$

$$I' = U_0 \cdot \sqrt{C/L} , \qquad (33)$$

$$\gamma = 0, 5 \cdot R \cdot \sqrt{C/L} , \qquad (34)$$

де R – активний опір розрядного контура, Ом.  $R=R_{dw}+R_p+R_{posn}+R_{np}$  – активний опір накопичувача, розрядника, розплаву і сполучних проводів, Ом;

L – індуктивність розрядного контура, Гн.  $L=L_{dw}+L_{p}+L_{posn}+L_{np}$  – внутрішня індуктивність накопичувача, індуктивність розрядника, власна індуктивність розплаву і сполучних проводів.



Рис. 14 – Еквівалентна схема розрядного контура ГІС

БВК – батарея високовольтних конденсаторів;  $L_{6bk}$  – внутрішня індуктивність накопичувача;  $R_{6bk}$  – активний опір накопичувача; Р – повітряний іскровий розрядник;  $L_p$  – індуктивність розрядника;  $R_p$  – активний опір розрядника;  $L_{po3n}$  – власна індуктивність розплаву;  $R_{po3n}$  – опір розплаву;  $L_{np}$  – індуктивність сполучних проводів;  $R_{np}$  – активний опір сполучних проводів.

Максимально можлива амплітуда струму при розряді Імакс:

$$I_{MAKC} = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}},\tag{35}$$

Максимальну потужність  $P_{_{Maxc}}$ , що розвивається в навантаженні до моменту максимуму струму визначаємо з виразу:

$$P_{\text{\tiny Make}} = 2 \cdot U_0 \cdot I \cdot \gamma \cdot \exp\left(\frac{-2 \cdot \gamma}{\sqrt{1 - \gamma^2}} \cdot \arcsin\sqrt{1 - \gamma^2}\right), \quad (36)$$

# 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОЇ УСТАНОВКИ НА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ, СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

### 3.1. Результати обробки алюмінію технічної чистоти

З використанням в алюмінію технічної чистоти було проведено дослідження на можливість пригнічення транскристалізації (проростання стовпчастих зерен від периферії до центру по усьому перерізу зливка або відливання) за рахунок обробки розплаву в твердо-рідкому стані. У цій температурній області починається процес утворення і зростання зародків твердої фази. Особливість утворення стовпчастих структур полягає в тому, що процес зародження кристалів починається на більше охолодженій поверхні, а процес зростання йде в напрямі, протилежному до тепловідводу, тобто від стінки форми до центру зливка [10]. Як уже згадувалося, чистий алюміній сам по собі схильний до транскристалізації. Для стабільнішої реалізації цього явища в ході експерименту спрямоване відведення тепла від розплаву, що кристалізується, створювалося штучно. По-перше, розплав переливався в холодні форми (без попереднього прогрівання до 450 °C), по-друге, ємність з розплавом поміщалася на масивну мідну платформу, яка служила і негативним електродом і холодильником. Роль другого холодильника виконував верхній електрод, поміщений в розплав (електродна система № 1).

Ідея цього дослідження полягала в тому, що зародження кристалів починається в тонкому приповерхневому шарі розплаву, по якому через скінефект протікає імпульс розрядного струму. Через виділення Джоуля тепло в цьому шарі передбачалося надати процесу кристалізації об'ємний характер за рахунок теплової взаємодії струму з кристалами, що вже утворилися, і зменшення температурного градієнта по перерізу зливка (модель термостата).

На (рис. 15) приведена крива охолодження алюмінію біля дна форми, з якої виходить, що процес кристалізації протікає досить швидко, а область твердо-рідкого стану займає від 50 до 55 с. Керуючись цими даними, варіювали

тривалість обробки t, при постійних енергетичних параметрах BEO – C=1 мк $\Phi$ ;  $U_0 = 7$  кB; f = 2 Гц;  $W_0 = 25$  Дж; T = 9 мкс;  $I_{Makc} = 5$  А. Тривалість BEO представлена в таблиці 1, а температурний інтервал – точками на (рис. 15).

Макроструктура отриманих зливків характеризується наявністю чітко вираженої нижньої зони стовпчастих кристалів і менш вираженої верхньої зони. Центральна частина зразків є зоною рівноосного зерна. ВЕО сприяє звуженню нижньої стовпчастої зони і подрібненню макроструктури хоча повністю подавити спрямоване зростання зерна не вдалось.



Рис. 15 – Крива охолодження алюмінію поблизу дна форми (біля мідного холодильника)

## Таблиця 1

Тривалість ВЕО на різних температурних інтервалах

№ зразка	1	2	3	4
τ, c	40	80	60	100
Температурний інтервал (рис. 14)	AB	AC	DB	DC

Макроструктура покращується у міру розширення інтервалу обробки, коли ВЕО починається трохи вище за температуру плавлення і частково захоплює область твердого стану. Це цілком доказово, оскільки процес кристалізації нерівноважний і істинний стан металу може не відповідати свідченням температури.

Аналіз експериментальних даних показує, що для повного запобігання стовпчастій кристалізації необхідно підвищувати потужність дії не лише за рахунок сили струму, але, передусім, за рахунок частоти дотримання імпульсів струму, порівнюючи її з лінійною швидкістю росту міжфазної поверхні. Іншими словами, частота дотримання імпульсів має бути такою, щоб кожен наступний імпульс "підплавляв" тонкі підстави кристалів, що виникають на стінках форми, перешкоджаючи їх закріпленню і зростанню.

Таблиця 2

№ зразка	контрольний	1	2	3	4
Висота зони					
стовпчастих	35	30	22	21	22
кристалів, мм					
Діаметр стовпчастих	5.6	4.7	4.3	3.7	3.7
зерен, мм	0,0	.,,	.,.	2,7	2,1
Діаметр рівноосних				3.6	2.7
зерен в центрі, мм	5,7	4,7	4,2	(дендрити)	(дендрити)
				(A	( <b>A</b> •••• <b>A</b> •••••)

Показники макроструктури алюмінію

### 3.2. Результати обробки сплаву АК7ч

Обробка сплаву АК7ч проводилась, з використанням високовольтного джерела ГІС 12-18/0,25 та двох електродних систем: електродна система № 1 і № 2. Щоб визначити час зняття перегрівання розплаву і температурно-часовий інтервал обробки, заздалегідь реєстрували криві охолодження розплаву. На (рис. А.1 Додаток А) представлені термограми, зняті в центрі і біля стінки форми, які дозволяють бачити, що температурний градієнт по перерізу зливка, що кристалізується, складає всього декілька градусів, тобто розплав кристалізувався як єдине ціле. Виходячи з кривої охолодження, за початок обробки вибрана температура 620  $^{0}C$  і тривалість  $\tau = 5$  хв., що відповідало інтервалу кристалізації первинної а-фази. Проведення попереднього термографічного аналізу дозволило встановити також хімічний склад сплаву: 6,71 % *Si*; 0,14 % *Mg*; <0,2% *Mn*; 0,11 % *Cu*; 0,26 % *Zn*; <0,1 % *Ni*; < 0,1 *Fe*.

Параметри ВЕО, приведені в таблиці 3, дозволяють відмітити використання невеликої сили струму, що пропускається через розплав, і незначне зменшення (до 0,7 мм) товщини скін-шару.

Таблиця 3

№ зразка	1	2	3	4
Ємність <i>С</i> , мкФ	0,25	0,25	0,25	0,25
Напруга U <sub>0</sub> , кВ	12	12	12	12
Частота дотримання імпульсів f, Гц	1	6	1	6
Енергія, що запасається W <sub>0</sub> , Дж	18	18	18	18
Період розрядного струму Т, мкс	5	5	5	5
Амплітуда розрядного струму І <sub>тах</sub> , кА	4	4	4	4
№ електродної системи	2 1			

Параметри ВЕО сплаву АК7ч

Структура зливків, отриманих в результаті ВЕО, щільна, дендритна. Результати металографічного аналізу (таблиця. 4.) показують, що ВЕО розплаву, що кристалізується, на відміну від обробки в квазідвофазній області, чинить позитивний вплив на усі структурні складові вже при такій малій енергії в імпульсі як  $W_0 = 18$  Дж (відповідно, невеликій силі струму). Структура зливків щільна, по усьому перерізу дендритна. Проте після ВЕО спостерігається тенденція до утворення більше дисперсного і менш орієнтованого дендриту. Після обробки подрібнюються також частки крихкої евтектики, голки залізистих фаз трансформуються.

## Таблиця 4

	•	•	
Гараметри	MIKNOCTNVKTVNU	2D32KID CHU3DV	$\Delta K'/T$
Tapamerph	minpoorpyni ypn	Spaskib clinaby	$I \mathbf{M} / \mathbf{I}$

№ зразка	Розмір зерна, мкм	Об'єм евтектики, %	Довжина часток <i>Si</i> у евтектиці, мкм	Залізиста фаза
Контрольний	170	19	108	голки завдовжки 100 мкм
1	166	22	97	голки завдовжки 60 мкм
2	133	21	87	включення компактної форми діаметром 36 мкм
3	138	21	95	включення компактної форми діаметром 50 мкм
4	133	20	76	включення компактної форми діаметром 85 мкм

## 3.3. Результати обробки сплаву АК7

Обробку сплаву АК7 проводили, використовуючи в якості високовольтного джерела ГІС і три різні електродні системи (таблиця. 5). Окрім цього варіювалися сила струму і частота дотримання імпульсів. Виходячи з

кривих охолодження (рис. 16) за початок обробки, як і для сплаву АК7ч, приймалася температура 620 <sup>0</sup>C і тривалість складала  $\tau = 5$  хв. Використання лабораторного ГІСа дозволило досліджувати вплив більш енергетичних режимів ВЕО на структуру і властивості сплаву. Проведення хімічного аналізу сплаву (7,0 % *Si*; 0,23 % *Mg*; 0,22 % *Mn*; 1,45 % *Cu*; 0,34 % *Zn*; 0,04 % *Ni*; 0,68 % *Fe*) дозволило визначити декілька більший вміст заліза і підвищений вміст міді. З одного боку, склад цих елементів задовольняє вимогам ДСТУ 2839-94, з іншого боку вищий вміст заліза дозволив детальніше вивчити вплив ВЕО на шкідливі залізисті фази.

Таблиця 5

No 2nazra	Параметри обробки							
nº spaska	С, мкФ	<i>U</i> <sub>0</sub> , кВ	<i>f</i> , Гц	<i>W</i> <sub>0</sub> , Дж	Т, мкс	<i>I<sub>max</sub>, кА</i>		
Електродна система № 1								
контрольний	—	_	_	_	—	-		
1	1	7	2	25	9	5		
2	1	7	6	25	9	5		
3	1	20	2	220	9	16		
		Електродн	а система	Nº 2				
контрольний	_	_	_	_	_	-		
4	1	7	2	25	9	5		
5	1	7	6	25	9	5		
6	1	20	2	220	9	16		
Електродна система № 3								
контрольний	_	_	_	_	_	_		
7	1	7	2	25	9	5		
8	1	7	6	25	9	5		
9	1	20	2	220	9	16		

## Параметри ВЕО сплаву АК7

24



Рис. 16 – Криві охолодження сплаву АК7: 1, 2, 3 - електродні системи № 1; № 2; №3 відповідно

На (рис. 17) представлені діаграми, що дозволяють проаналізувати вплив параметрів обробки і електродних систем на зернисту структуру. Видно, що контрольні зливки по усьому перерізу містять велике, практично рівноосне зерно. Підвищення потужності струмової дії на метал, що кристалізується, в порівнянні з ВЕО сплаву АК7ч, де міра подрібнення зерна склала 1,3 разів, призвело до подрібнення зернистої структури від 1,5 до 3 разів. Причому, найбільш ефективною в цьому відношенні являється електродна система № 2 – два занурених в розплав електроду. Слід зазначити також, що, не дивлячись на те, що глибина занурення електродів складала всього 5 мм, зміни в структурі спостерігаються по усьому перерізу зливка. Із збільшенням потужності дії міра змін в структурі росте. Проте розділити на цьому етапі вклад частоти дотримання імпульсів і сили струму не вбачається можливим,

оскільки зразкам № 4 і № 5 відповідає одна і та ж потужність і, як бачимо, міра зміни структури однакова.











Рис. 17 – Вплив ВЕО на макроструктуру сплаву АК7: а, б, в - електродні системи № 1; № 2; № 3 відповідно

#### ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих наукових робіт, патентів і літератури в галузі позапічної обробки металів дозволяє виділити декілька основних напрямів, серед яких найменш дослідженим і перспективним є обробка імпульсно-періодичним струмом.

2. Досліджені електричні характеристики імпульсу розрядного струму в двох фазових станах: рідкому і рідко-твердому. Виявлений частотний діапазон (від 85 до 115 кГц), в якому зосереджений максимум спектральної густини. Встановлено, що з пониженням температури розплаву максимум спектральної густини зміщується в область нижчих частот і змінюється реактивна складова опору.

3. Високовольтна електроімпульсна обробка розплаву в інтервалі кристалізації в порівнянні з обробкою в рідкому стані чинить значний вплив на структуру алюмінію технічної чистоти, що твердіє в умовах спрямованого тепловідводу. При ВЕО з використанням  $I_{макс}$ = 5 кА и f = 2 Гц досягнуте зниження зони стовпчастих кристалів в 1,5 разу і подрібнення рівноосного дендриту в 2 рази. При ВЕО металу, що твердне, спостерігається стійка залежність параметрів структури і властивостей від потужності дії: з підвищенням потужності дії на сплави Ак7ч і Ак7, що тверднуть, подрібнюється зерниста структура, росте міра дезорієнтації дендриту і міра компактизації крихких складових, збільшується пластичність.

Переважною для BEO металу, що твердне, є схема обробки двома зануреними електродами.

Запропонований метод високовольтної електроімпульсної обробки, ефективний при обробці металу, що кристалізується, з яким можна зв'язати основний вклад в зміну стану розплаву, структури і властивостей металу, а саме дія ВЕО на швидкість утворення центрів кристалізації та розроблено електромеханічне устаткування для здійснення цього механізму.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Электротехнический комплекс для разрядно-импульсного синтеза углеродных наноматериалов с различными магнитными свойствами / Л. З. Богуславский, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова, Д. В. Винниченко, В. В. Диордийчук // Техн. електродинамика. - 2012. - № 3. - С. 107-108.

2. Исследование процессов взаимодействия мощного электроразрядного импульса тока с жидкой металлической средой: отчет о НИР (промежуточ.): № IV-11-07/ ИИПТ НАН Украины; рук. В.Н.Цуркин; исполн.: А.В.Синчук - Николаев, 2007.- 39 с.- №ГР 0107U004479.- Инв. № 993 – НС.

3. Якухин В. Г. Высокотехнологичные методы обработки: учебник / под ред. д-ра техн. наук, проф. О. В. Таратынова. – Москва : МГИУ, 2011. – 362 с.

4. Башмакова, Н.В. Исследование влияния электрического тока на кристаллизацию и свойства алюминиевых сплавов с повышенным содержанием железа: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 02.16.04 "Литейное производство"/Н.В. Башмакова. – Новокузнецк, 2007. – 16 с.

Дорофеев, А.В. Обработка алюминиевых расплавов электротоком / А.В.Дорофеев, А.Б.Килин, А.С.Тортишников // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С.19 – 21.

 Деев, В.Б. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо/ В.Б.Деев, И.Ф.Селянин, Н.В.Башмакова // Литейщик России. – 2007. -№ 8. – С. 12-15.

7. Xiliang Liaoa. The refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum / Xiliang Liaoa, Jun Luoa, Wenjie Chena, Yongyong Gong // School of Materials Science and Engineering.–2006.— № 4.— P. 32–35.

8. Електротехнічний комплекс струмового захисту в високовольтних генераторах імпульсних струмів / Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова, І. Л. Вінниченко, Ю. О. Адамчук // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 2. – С. 54-58.

9. Chunyan Ban. Influence of pulse electric current on solidification structure of Al-Si alloy / Chunyan Ban, Yi Han, Qixian Ba, Jianzhong Cui //Electromagnetic Processing of Material. -2007.  $- N_{2} 1$ . - P. 34-37.

Зарембо, В.И. Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов/ В.И.Зарембо [и др.] // Металлургия машиностроения.
 – 2003. – № 1. – С. 11-15.



