

О.В. Гресс, зав. кафедри, д.т.н., профессор
Д.О. Савинський, аспірант

МОДЕЛЮВАННЯ ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ПРОЦЕС КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗЛИВКА*

Дніпродзержинський державний технічний університет

Приведены результаты экспериментов по моделированию воздействия электрического тока различной плотности, полярности и частоты на процесс кристаллизации расплава. Предложен концептуальный механизм воздействия электрического тока на процесс кристаллизации сплавов.

Наведено результати експериментів щодо моделювання дії електричного струму різної щільності, полярності та частоти на процес кристалізації розплаву. Запропоновано концептуальний механізм дії електричного струму на процес кристалізації сплавів.

Вступ. Подальше поліпшення якості металопродукції за допомогою класично-го обладнання практично неможливе, тому усе більш часто використовують різні способи зовнішньої дії на розплав. Особливо важливе значення це набуває з точки зору рішення завдання знаходження досить недорогих, але, в той же час, ефективних заходів дії на рідкий метал з метою одержання якісних виливків. У цьому напрямі успішно використовуються ультразвукові, електродинамічні, магнітні і інші методи зовнішньої дії [1].

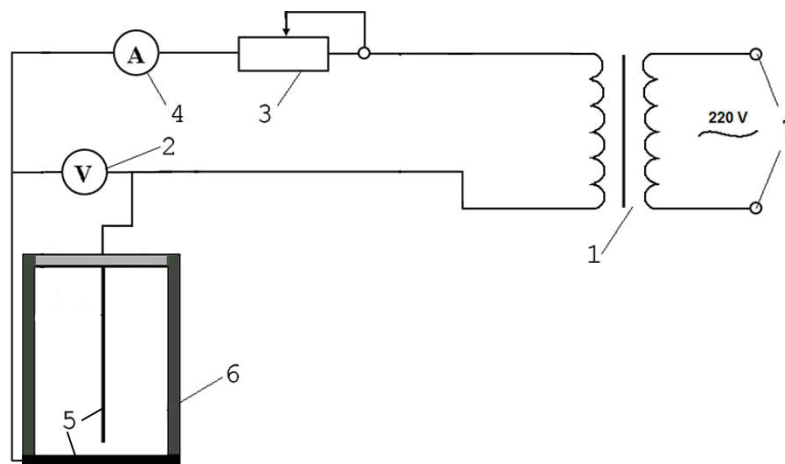
Постанова задачі. Аналіз літературних даних показав, що одним з найбільш ефективних способів впливу на розплав, що кристалізується, є накладення електричного струму. На жаль, робіт щодо вивчення дії електричного струму на кристалізацію розплавів і макроструктуру одержаних зливків небагато. Часто вони носять розрізнений й суперечливий характер. Тому потрібне подальше дослідження закономірностей формування зливків під впливом електричного струму з метою знаходження його раціональних характеристик.

Методика досліджень. При проведенні досліджень використовували методи «холодного» та «гарячого» моделювання. Під час «холодного» моделювання як моделююче середовище використовують водні й неводні розчини неорганічних і органічних речовин, а також прозорі розплави з температурою плавлення до 100 °С. У нашому випадку для рішення поставленої задачі за модельну рідину було обрано тіосульфат натрію (далі тіосульфат). Кристалізатор у такому разі представляв ємкість, що обмежена двома паралельними прозорими пластинами з органічного скла розміром 150 x 100 мм кожна. Донну частину кристалізатора виконано з алюмінієвої пластини товщиною 5 мм і шириною 10 мм, яка під час проведення експериментів виконувала функцію одного з електродів. Площа поперечного перерізу порожнини кристалізатора становила $4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

У ході експериментів на розплав тіосульфату впливали як змінним, так і постійним (різної полярності) електричним струмом. Схему установки моделювання подано на рис. 1. По закінченню тверднення одержану макроструктуру зливка фіксували на цифрову фотокамеру з наступною обробкою на комп'ютері. Час повної кристалізації робочого середовища визначали по досягненню його температури рівня температури кристалізації розплаву. Як первинний датчик використовували хромель-копеле-ву термопару,

* В роботі приймали участь асистент А.І. Кобзева та студент П.В. Бузовський

встановлену в найбільш гарячій точці кристалізатора. Під час моделювання впливу на робоче середовище постійного струму до електричної схеми додатково вводили діодний міст і фільтр.



1 - трансформатор; 2 - вольтметр; 3 - реостат; 4 - амперметр; 5 - електроди;
6 - кристалізатор з тіосульфатом; 7 - джерело струму

Рисунок 1 – Електрична схема установки «холодного» моделювання.

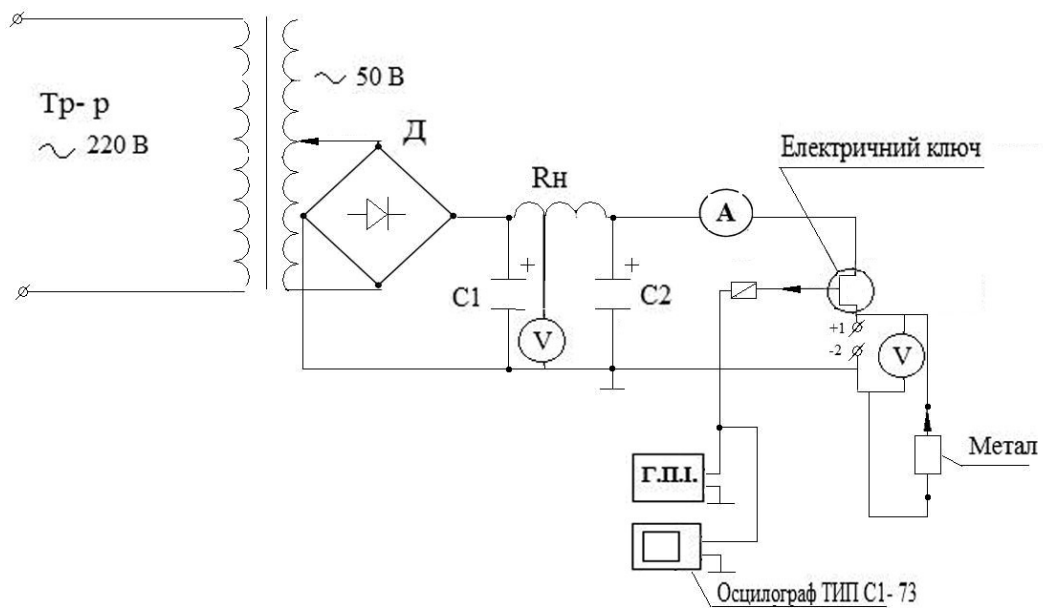
«Холодне» моделювання проводили у три етапи:

- на першому етапі експериментів (базовий варіант) зовнішній вплив на розплав, що кристалізується, не здійснювали;
- на другому етапі розплав піддавали дії постійного струму, причому на кристалізатор подавали або негативний потенціал (пряма полярність), або позитивний (зворотна полярність);
- на третьому етапі на систему подавали змінний електричний струм промислової частоти.

Для всіх експериментів з накладенням зовнішніх впливів щільність струму не перевищувала 375 A/m^2 , а напругу підтримували на рівні 12 В. Кожний експеримент повторювали не менше п'яти разів. Температура перегрівання розплаву й умови зовнішнього тепловідведення у всіх експериментах були однаковими.

При реалізації «гарячого» моделювання було розроблено досить просту за конструкцією установку, що дає змогу подавати на розплав, який кристалізується в піщано-глинистих формах, електричний струм заданої напруги, частоти, скважності, полярності та сили. Як моделююче середовище було обрано сплав алюмінію. Для розплавлення використовували електропіч СШОЛ. Температура перегрівання під час всіх досліджень була однаковою. Її вимірювали за допомогою хромель-алюмелевих термопар, встановлених у найбільш гарячих точках зразків. Для створення однакових умов кристалізації розплав одночасно заливали в контрольний і дослідний зразки циліндрової форми, що знаходилися в одній піщано-глинистій формі закритого типу та були з'єднані спільною ливниковою системою однакової довжини. Електричну схему лабораторної установки «гарячого» моделювання наведено на рис. 2.

Проведення «гарячого» експерименту складалося з трьох етапів. На першому етапі експерименту постійну позитивну напругу з витоку електричного ключа подавали на електрод, що знаходився у дослідному зразку металу в його найбільш гарячій точці (пряма полярність). Негативну постійну напругу подавали на електрод, що знаходився у найбільш холодній точці дослідного зразка. Сила струму, який подавали на дослідний зразок металу, складала 5 А, його щільність – $4 \cdot 10^4 \text{ A/m}^2$.



С1-С2 - електролітні конденсатори; R_n - резистор навантаження; Д - діодний міст;
 Тр-р - автотрансформатор типу ЛАТР-2; А - амперметр постійного струму;
 ГПІ - генератор прямокутних імпульсів з частотою 20...200 кГц;
 V - вольтметр змінного струму

Рисунок 2 – Принципова електрична схема експериментальної лабораторної установки

На другому етапі експериментів змінювали полярність постійної напруги, що подавали на дослідний зразок металу, тобто на рідкий метал подавали негативну напругу, а на тверду кірку – позитивну (зворотна полярність). Сила струму складала 5 А, щільність струму – $4 \cdot 10^4$ А/м².

На третьому етапі експериментів за допомогою ГПІ встановлювали скважність імпульсів, подаваних на електричний ключ (5 меандрів). Також під час досліджень змінювали полярність електричного струму, що подавали на зразок. Сила струму складала 3 А, його щільність – $2,4 \cdot 10^4$ А/м².

З середини виливків, одержаних під час експериментів, було відібрано темплети для дослідження мікросліфів. Шліфи досліджували за допомогою світлового мікроскопу «Neophot-2» при різному збільшенні (x 50, x 100, x 200). Структури, які спостерігали, фіксувалися на цифрову фотокамеру.

Результати досліджень. В результаті статистичної обробки одержаних даних знайдено статистичні залежності ширини зони стовпчастих кристалів ($D_{ЗСК}$, %), ширини зони рівноосних кристалів ($D_{ЗРК}$, %), тривалості процесу кристалізації ($t_{кр}$, хв.) від щільності струму (j , А/м²). Коефіцієнт довірчої ймовірності за всіма розрахунками становив 0,95 (R^2 – коефіцієнт детермінації, F – критерій Фішера, Δ – похибка оцінки).

Перший етап:

$$D_{ЗСК} = 49,62 - 7,9 \cdot 10^{-4} j^2 + 1,4 \cdot 10^{-6} j^3 + 3,26 j^{0,5}; R^2 = 0,93; \Delta = 3,00; \quad (1)$$

$$D_{ЗРК} = 36,5 - 4,03 j^{0,5} + 0,14 j; R^2 = 0,96, F(2,22) = 240,1, \Delta = 2,29; \quad (2)$$

$$t_{кр} = 39,93 + 0,91 j^{0,5} - 7,3 \cdot 10^{-5} j^2; R^2 = 0,88, F(2,22) = 77,5, \Delta = 1,27. \quad (3)$$

Другий етап:

$$D_{ЗСК} = 50,10 - 1,04 \cdot 10^{-9} j^4 + 5,7 \cdot 10^{-4} j^2 + 0,19 j; R^2 = 0,95; F(3,21) = 121,9, \Delta = 1,40; \quad (4)$$

$$D_{ЗРК} = 39,96 - 1,04 \cdot 10^{-9} j^4 + 5,7 \cdot 10^{-4} j^2 + 0,19 j; R^2 = 0,95; F(3,21) = 121,9, \Delta = 1,40; \quad (5)$$

$$t_{кр} = 39,96 + 0,78 j^{0,5} - 1,6 \cdot 10^{-7} j^3; R^2 = 0,91, F(2,17) = 94,5, \Delta = 1,78. \quad (6)$$

Третій етап:

$$D_{ЗСК} = 50,76 - 2,21 j^{0,5} + 2,4 \cdot 10^{-5} j^2; R^2 = 0,94, F(2,22) = 158,5, \Delta = 1,95; \quad (7)$$

$$D_{ЗРК} = 35,33 - 2,22 j^{0,5} + 2,4 \cdot 10^{-4} j^2; R^2 = 0,95, F(2,22) = 188,4, \Delta = 1,80; \quad (8)$$

$$t_{кр} = 39,51 + 1,3 j^{0,5} - 4,9 \cdot 10^{-10} j^4; R^2 = 0,94, F(2,17) = 165,4, \Delta = 1,66. \quad (9)$$

Більшість дослідників вважає, що найкращу якість виливків досягають за розвиненої зони рівноосних кристалів. Розв'язання задачі оптимізації функціональних залежностей товщини ЗРК від щільності струму, який накладається на розплав, котрий кристалізується, дозволило визначити, що у разі прямої полярності товщина ЗРК досягає приблизно 7 % за щільності струму $\approx 200 \text{ А/м}^2$, під час зворотної полярності – 53 % за щільності струму $180 \dots 200 \text{ А/м}^2$, а під час накладення струмів промислової частоти – 58 % за щільності струму $\approx 200 \text{ А/м}^2$.

Таким чином, встановлено, що накладення на розплав тіосульфату, що кристалізується, струму зворотної полярності та струму змінної частоти призводить до збільшення ширини зони рівноосних кристалів, а отже, до підвищення якості виробів.

З метою перевірки такого висновку проводили «гаряче» моделювання.

На всіх трьох етапах «гарячого» моделювання час, протягом якого здійснювали вимірювання температури розплавів, що кристалізувалися, складав 10 хвилин.

На першому етапі експерименту (пряма полярність) знайдено, що кристалізація дослідного зразку починалася за температури $635 \text{ }^\circ\text{C}$ і тривала 2 хвилини, тоді як контрольного зразку – починалася за температури $630 \text{ }^\circ\text{C}$ і тривала впродовж 2,5 хвилин. Починаючи з третьої хвилини процесу тверднення дослідний зразок охолоджувався дещо швидше, ніж контрольний, але після четвертої хвилини швидкості охолодження зразків практично зрівнялися.

Другий етап (зворотна полярність) показав іншу картину. Тривалість кристалізації контрольного зразку становила 2,5 хвилин, а дослідного – 3 хвилини. Відповідно, значення температурної зупинки становить приблизно 630 та $625 \text{ }^\circ\text{C}$. Як і на першому етапі, зразок з вищою температурою початку кристалізації охолоджувався спочатку дещо швидше, а потім швидкості охолодження зразків зрівнювалися.

В результаті вивчення мікрошліфів встановлено, що у структурі контрольних зразків всіх трьох етапів експериментів (рис. 3) спостерігається груба голчаста евтектика (темні видовжені голки), світле поле – чистий алюміній. Також у лівій верхній діагональній частині мікрошліфу видно дендрити пластичного альфа-твердого розчину кремнію в алюмінії.

При порівнянні структури дослідного зразка другого етапу експерименту (рис. 4,б) із структурою контрольного зразка не виявлено суттєвої різниці, але розмір структурних складових (груба голчаста евтектика, чистий алюміній, альфа-твердий розчин кремнію в алюмінії) є суттєво більшим. Це можна пояснити тим, що швидкість охолодження цього зразка була нижчою, ніж контрольного, вірогідно, завдяки виділенню джоулевої теплоти в результаті проходження електричного струму.

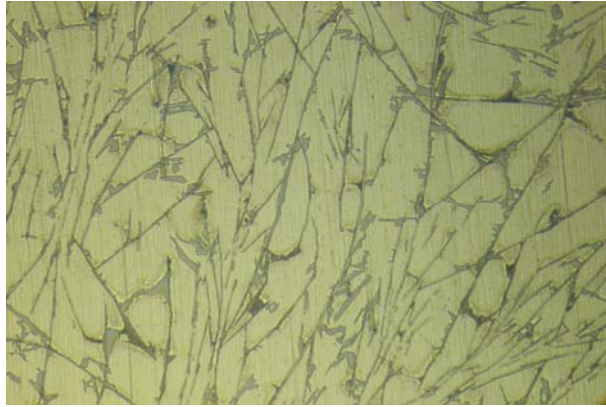


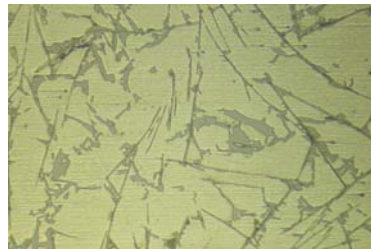
Рисунок 3 – Характерні структурні складові контрольного виливка, х 200

Результати першого та другого етапів експериментів підтвердили, що структура зразка, який оброблювали електричним струмом зворотної полярності, децю краща, ніж зразка, на який впливали струмом прямої полярності. Аналіз попередніх досліджень, виконаних за методикою третього етапу експериментів з накладенням електричного струму прямої полярності, це підтвердив. Тому в подальшому більш ґрунтовно досліджували зразки, одержані з використанням струму зворотної полярності.

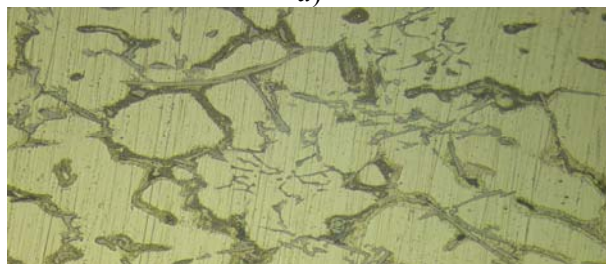
Аналіз результатів обробки експериментів третього етапу досліджень показав, що температура початку кристалізації контрольного зразку була $630\text{ }^{\circ}\text{C}$ і кристалізація продовжувалася 2,5 хвилин. Температура початку кристалізації дослідного зразку становила $637\text{ }^{\circ}\text{C}$ і кристалізація тривала $\approx 105\text{ с}$.

Порівняльний аналіз мікрошліфів дослідних зразків другого та третього етапів «гарячого» моделювання показав, що вони є подібними за структурою (рис. 4,б,в). Але зазначені зразки дуже відрізняються від описаних вище мікрошліфів контрольних зразків. У дослідних зразках зерна алюмінію (світлі ділянки) оточені мілкодисперсною евтектикою (сіре обрамлення). Подібна структура характерна для модифікованих алюмінієвих сплавів. Також знайдено, що дослідний зразок третього етапу експериментів має більш мілкозернисту структуру, ніж дослідний зразок другого етапу.

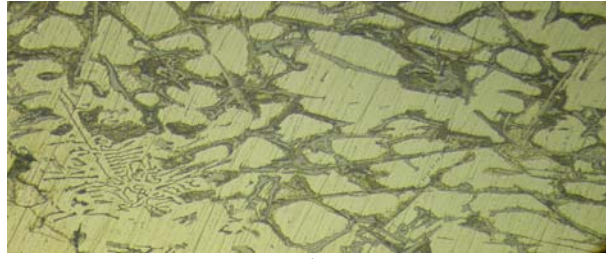
Таким чином, результати досліджень показали доцільність та ефективність дії електричного струму на покращення структури зливків. При цьому мікроструктура дослідного зразка, що оброблявся електричним струмом зворотної полярності заданої частоти та скважності, мала найліпші характеристики.



а)



б)



в)

а) перший етап; б) другий етап; в) третій етап експериментів (x 200)

Рисунок 4 – Характерні структурні складові дослідного зразка при «гарячому» моделюванні

Слід зазначити, що у літературі є практично відсутні повні та докладні дослідження впливу електричного струму на структуру металів і сплавів, які кристалізуються. Також немає єдиної теорії щодо механізму дії електричного струму на процес кристалізації. Так, загальноприйнята теорія росту кристалів, що припускає три механізми зростання кристалів (утворення зародків і їх розростання, дислокаційний механізм, нормальний механізм) не пояснює виникнення електрорушійної сили (ЕРС), зафіксованої під час проведення експериментів нами та іншими дослідниками.

На наш погляд, найбільш сучасною точкою зору щодо сил, які управляють процесом зростання кристалів, є теорія Я.І. Френкеля, що припускає наявність на границі розділу твердої та рідкої фази подвійного електричного шару, пов'язаного з енергією поверхневого натягу. Поява подвійного електричного шару пояснюється ефектами Томпсона та Пельтьє, що припускають виникнення ЕРС за наявності градієнта температур і металів з різним хімічним складом. Інакше кажучи, на процес росту кристалів впливає не тільки градієнт температур і концентрацій, але й стан подвійного електричного шару на границі розділу твердої та рідкої фази, параметрами якого можна управляти за допомогою накладення електрофізичного впливу.

Так, згідно ефекту Томпсона, за наявності градієнта температур виникає потік електронів з гарячої зони до холодної. Якщо в гарячій зоні помістити додаткове джерело електронів (зворотна полярність), то швидкість кристалізації розплаву зростає як результат змінювання параметрів подвійного електричного шару. Одночасно збільшиться кількість рівноважних і критичних центрів кристалізації. Це призведе до росту товщини ЗРК і подрібненню структури металу, що підтверджується нашими експериментами.

Імовірно, позитивний вплив змінних струмів, які накладаються на розплав, що кристалізується, пов'язаний з руйнуванням мікрогруповань атомів (так званих «кластерів») внаслідок змінювання енергії поверхневого натягу на їхніх границях. А це призведе до зменшення ліквідаційних процесів у зоні двофазного стану та збільшення центрів кристалізації. Таким чином, накладення на розплав, що кристалізується, змінних струмів заданої полярності, частоти та скважності дозволить підвищити якість металопродукції.

Висновки. В ході досліджень виявлено підвищення якості зливків під час обробки рідкого металу в процесі кристалізації електричним струмом зворотної полярності, заданих скважності, сили, щільності, частоти. Запропоновано концептуальний механізм впливу електричних струмів на процес кристалізації сплавів.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Огурцов А. П. Непрерывное литье стали / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 675 с.

Рецензент, проф. С.А.Воденніков