

УДК 669.183

Гресс О. В., Кобзева А. І., Кенарейкін С. А.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ПРОЦЕС
КРИСТАЛІЗАЦІЇ ЗЛИВКА***

Для забезпечення постійно зростаючих вимог до якості литих деталей необхідно вдосконалювати існуючі й створювати нові ливарні технології. Рішення цієї задачі багато в чому визначає технологічний прогрес у всіх галузях машинобудування.

У роботі [1] було показано, що фізичні методи обробки розплавів мають істотні переваги в порівнянні з традиційними технологіями плавки та лиття. Так, фізичні методи обробки розплавів сприяють одержанню дрібнозернистої структури й підвищених техніко-експлуатаційних властивостей виливків, не забруднюючи при цьому хімічний склад ливарних сплавів небажаними домішками при подальших переплавах.

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 структуру одержаних зливків небагато [2–5]. Часто вони носять розрізнений та суперечливий характер.

Метою роботи є подальше дослідження закономірностей формування зливків під впливом електричного струму з метою знаходження його раціональних характеристик.

При проведенні досліджень використовували методи «холодного» та «гарячого» моделювання. Під час «холодного» моделювання в якості моделюючого середовища було обрано тіосульфат натрію (далі тіосульфат). Кристалізатор представляє ємкість, що обмежена двома паралельними прозорими пластинами з органічного скла розміром 150×100 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 $4 \cdot 10^{-4}$ м².

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 ним температури кристалізації розплаву. Як первинний датчик використовували хромель-копелеву термопару, встановлену в найбільш гарячій точці кристалізатора. Під час моделювання впливу на робоче середовище постійного струму до електричної схеми додатково вводили діодний міст і фільтр.

«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 А/м², 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.

* В роботі приймали участь А. І. Кобзева, Д. О. Савинський

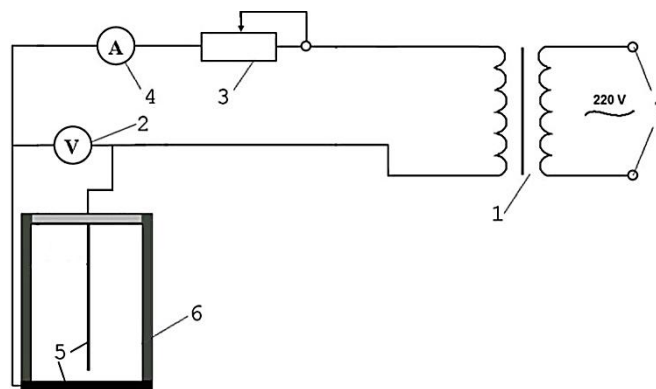


Рис. 1. Електрична схема установки «холодного» моделювання:

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

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:

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

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

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

Другий етап:

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

$$D_{ЗРК} = 35,91 - 5,7 \cdot 10^{-4} j^2 + 0,19j + 1,04 \cdot 10^{-9} j^4, \quad R^2 = 0,95, \quad F(3,21) = 121,9, \quad \Delta = 1,40; \quad (5)$$

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

Третій етап:

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

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

$$t_{кр} = 39,51 + 1,3\sqrt{j} - 4,9 \cdot 10^{-10} j^4, \quad R^2 = 0,94, \quad F(2,22) = 165,4, \quad \Delta = 1,66. \quad (9)$$

Більшість дослідників вважає, що найкращу якість виливків досягають при розв'язанні зони рівноосних кристалів. Рішення задачі оптимізації функціональних залежностей товщини ЗРК від щільності струму, який накладається на розплав, що кристалізується, дозволило визначити, що у разі прямої полярності товщина ЗРК досягає приблизно 7 % за щільності струму ≈ 200 А/м², під час зворотної полярності – 53 % за щільності струму 180–200 А/м², а під час накладення струмів промислової частоти – 58 % за щільності струму ≈ 200 А/м².

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. При реалізації «гарячого» моделювання було розроблено досить просту за конструкцією установку, що дає

змогу подавати на розплав, який кристалізується, електричний струм заданої напруги, частоти, скважності, полярності та сили. За моделююче середовище було обрано сплав алюмінію. Для розплавлення використовували електрод 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 формі та були з'єднані спільною ливниковою системою однакової довжини (рис. 2). Після заливання форми поверхню розплаву теплоізолювали. Електричну схему лабораторної установки «гарячого» моделювання наведено на рис. 3.

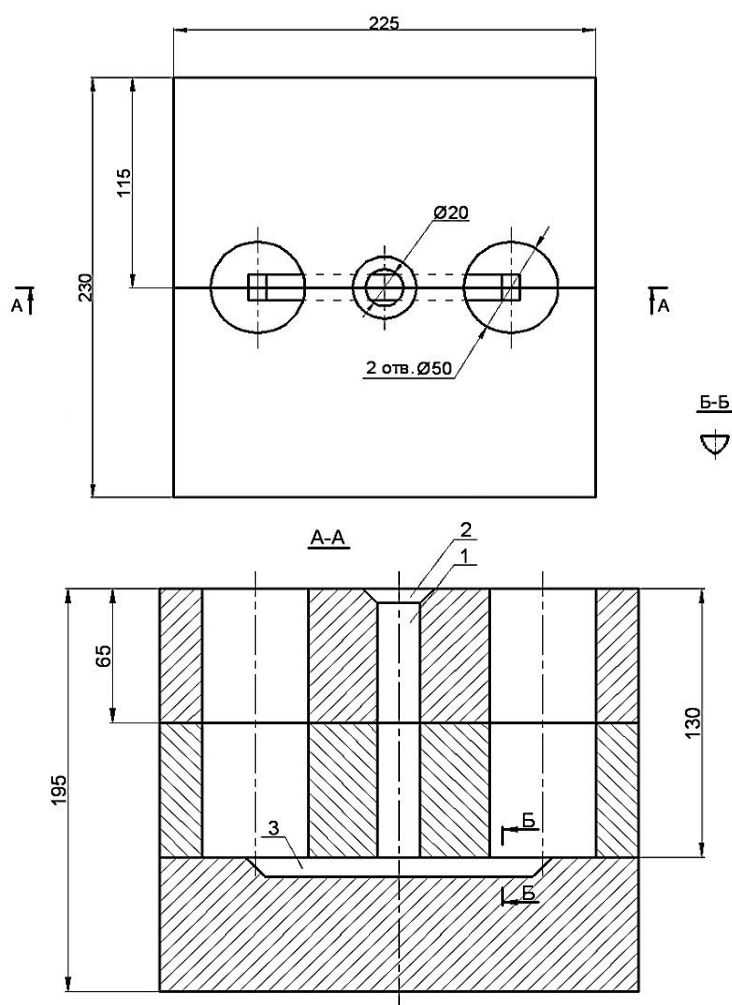


Рис. 2. Ескіз ливарної форми:

1 – стояк; 2 – ливникова воронка; 3 – живильник

Проведення «гарячого» експерименту складалося з трьох етапів.

На першому етапі експерименту постійну позитивну напругу з виток 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 – $4 \cdot 10^4$ А/м².

На другому етапі експериментів змінювали полярність постійної напруги, подаваної 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.

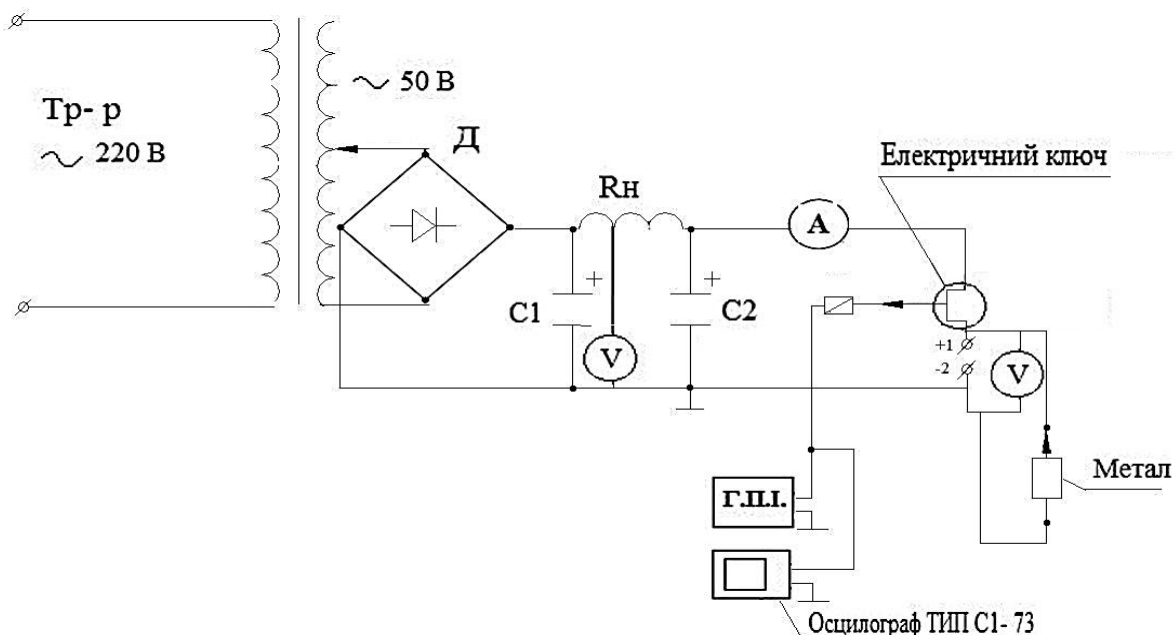


Рис. 3. Принципова електрична схема експериментальної лабораторної установки:

C1-C2 – електролітні конденсатори; R_n – резистор навантаження; Д – діодний міст; Tr-p – автотрансформатор типу ЛАТР-2; А – амперметр постійного струму; Г.П.І. – генератор прямокутних імпульсів з частотою 20–200 кГц; V – вольтметр змінного струму

На третьому етапі експериментів за допомогою Г.П.І. встановлювали скважність імпульсів, поданих на електронний ключ (2 та 5 меандрів). Також під час досліджень змінювали полярність електричного струму, що подавали на зразок. Сила струму складала 2 та 3 А, його щільність, відповідно, $1,6 \cdot 10^4$ та $2,4 \cdot 10^4$ А/м².

З середини виливків, одержаних під час експериментів, було відібрано темплети для дослідження мікрошліфів. Шліфи досліджували за допомогою світлового мікроскопу Neophot-21 при різному збільшенні ($\times 50$, $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$). Структури, які спостерігали, фіксувалися на цифрову фотокамеру.

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 °С і тривала 2 хвилини, тоді як контрольного зразку починалася за температури 630 °С 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 зрівнювалися.

Другий етап (зворотна полярність) показав іншу картину. Час кристалізації контрольного зразку становив 2,5 хвилин, а дослідного – 3 хвилини. Відповідно, значення температурної зупинки становило приблизно 630 та 625 °С. Як і на першому етапі, зразок з вищою температурою початку кристалізації охолоджувався спочатку дещо швидше, а потім швидкості охолодження зрівнювалися.

В результаті вивчення мікрошліфів встановлено, що у структурі контрольних зразків всіх трьох етапів експериментів спостерігається груба голчаста евтектика та чистий алюміній. Також спостерігалися дендрити пластичного альфа-твердого розчину кремнію в алюмінії. Структура всіх виливків характерна для литого технічного алюмінію зі складом: Al 98 %, Fe 1 %, Si 1 %. Шкідливих домішок не виявлено. Залізо майже практично не розчинне в алюмінії, тому навіть при низькому вмісті заліза створюється евтектика Al + Al₃Fe.

Вона має тільки 1,7 % Fe (або 7 % Al_3Fe). З-за малого вмісту заліза в евтектиці при мікроспостереженні типова структура евтектики не спостерігається – вона коалесцується. Структура сплавів Al-Fe складається із алюмінію і темних включень Al_3Fe .

При порівнянні структури дослідного зразка другого етапу експерименту (рис. 4) 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.

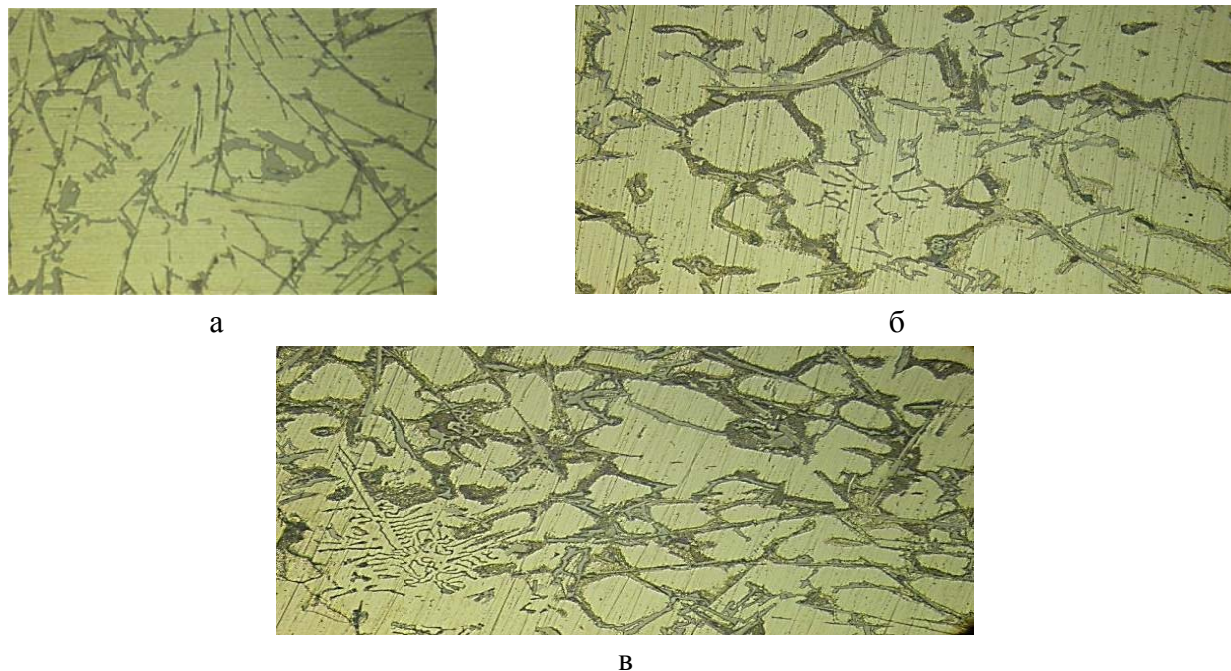


Рис. 4. Характерні структурні складові дослідного зразка при «гарячому» моделюванні ($\times 200$): а – перший етап; б – другий етап; в – третій етап експериментів

Результати першого та другого етапів експериментів підтвердили, що структура зразка, який оброблювали електричним струмом зворотної полярності, дещо 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 зразка була $630\text{ }^\circ\text{C}$ і кристалізація продовжувалася 2,5 хвилини. Температура початку кристалізації дослідного зразка 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 (див. 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 дослідні зразки третього етапу експериментів мають більш дрібнозернисту структуру, ніж дослідні зразки другого етапу. Найбільше зниження розміру зерна (до 5 балів, ГОСТ 21073.1-75) було отримано на зразку, що був оброблений електричним струмом зворотної полярності силою 3 А при скважності 2 меандру.

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

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 росту 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. Це призведе до зменшення ліквідаційних процесів у зоні двофазного стану і збільшення центрів кристалізації. Таким чином, накладення на розплав, що кристалізується, змінних струмів заданої сили, полярності, 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 та щільності. Запропоновано концептуальний механізм впливу електричних струмів на процес кристалізації сплавів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Огурцов А. П. *Непрерывное литье стали* / А. П. Огурцов, А. В. Гресс. – Днепропетровск : Системные технологии, 2002. – 675 с.
2. Килин А. В. Влияние электрического тока на дегазацию и модифицирование металлических расплавов // *Литейное производство*. – 2002. – № 5. – С. 18–19.
3. Кольчурина И. Ю. Влияние внешних воздействий на микроструктуру кристаллизующегося сплава / И. Ю. Кольчурина, И. Ф. Селянин // *Литейное производство*. – 2009. – № 8. – С. 13–15.
4. Беляев А. П. Влияние внешних условий на механизмы кристаллизации расплава Sn-Pb эвтектического состава / А. П. Беляев, В. П. Рубец // *Физика твердого тела*. – 2005. – Т. 47, вып. 2. – С. 193–195.
5. Деев В. Б. Исследование влияния электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов с различным содержанием железа / В. Б. Деев, Н. В. Башмакова, О. Г. Приходько, И. Ф. Селянин. // *Ползуновский альманах*. – 2008. – № 3. – С. 77–81.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2011 р.