

PACS numbers: 61.25.Mv, 61.72.Mm, 75.50.Mm, 81.30.Fb, 81.40.Ef, 81.40.Rs, 83.60.Np

## **Застосування індукційного топлення та постійного магнетного поля для впливу на перерозподіл компонентів з різними магнетними властивостями в зернах стопу на основі Al–Cu–РЗМ**

О. В. Середенко, В. О. Середенко

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,  
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,  
03142 Київ, Україна*

Розроблення новітніх композицій і технологій виробництва стопів на основі алюмінію з рідкісноземельними металами (РЗМ) створює конкуренцію матеріалам на основі більш важких і тяжкотопких (залізо), а також дорогих металів (мідь, титан). Під час витоплення в умовах звичайних перегрівів до 100 К і охолодження з невисокими швидкостями  $v \cong 1\text{--}10$  К/с ускладнено формування дрібного зерна ( $\cong 10$  мкм). Застосування індукційного стоплення в магнетодинамічній установці основи стопу Al–Cu з подальшим перетопленням у печі електроопору та додаванням РЗМ дало змогу використовувати невисокі перегріву. За  $v = 4, 10$  і  $30$  К/с у стопі утворилися зерна з розміром 36,0, 17,1 і 11,6 мкм відповідно. Накладання постійного магнетного поля на розтоп під час охолодження та твердіння уможливило одержати зерно з розміром у 11,0 мкм за  $v = 10$  К/с. На ньому досліджено вплив поля на кількість компонентів у зернах, діяпазон вмісту елементів у мікрооб'ємах, різницю концентрації між центром і периферією зерна. Встановлено, що вплив поля на перерозподіл у парамагнетній основі (Al) діамагнетних Cu, Zn, Pb, парамагнетних Sn, Mn, Zr, Ce, La, Nd, Pr та феромагнетного Fe пов'язаний з їхнім вмістом у стопі, магнетною сприйнятливістю, атомовими радіусом і масою. Під впливом

Corresponding author: Olena Volodymyrivna Seredenko  
E-mail: mhdptima@gmail.com

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of N.A.S. of Ukraine,  
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: O. V. Seredenko and V. O. Seredenko, Application of Induction Melting and Constant Magnetic Field to Influence the Redistribution of Components with Different Magnetic Properties in Alloy Grains Based on Al–Cu–REM, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 46, No. 3: 235–250 (2024) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.46.03.0235](https://doi.org/10.15407/mfint.46.03.0235)

поля в об'ємі зерен відбулося пониження вмісту Pb, — компонента з найменшою магнетною сприйнятливістю серед компонентів стопу, — та підвищення вмісту Fe — компонента з найбільшою магнетною сприйнятливістю. Вплив поля на інші компоненти стопу мав складний характер. В результаті дії поля збільшився вміст Cu і Fe в зернах, а в їхніх мікрооб'ємах зросла кількість Ce, La і Nd. Було усунуто ліквіацію Sn і Pb на периферії зерен.

**Ключові слова:** стоп Al–Cu–РЗМ, зерно, індукційне топлення, твердіння, магнетики, магнетне поле.

Development of the advanced compositions and technologies for the production of alloys based on aluminium with rare-earth metals (REM) creates competition for materials based on heavier and more refractory (iron) as well as expensive metals (copper, titanium). When alloy melting under conditions of ordinary overheating up to 100 K and its cooling at low rates  $v \cong 1-10$  K/s, the formation of fine grain ( $\cong 10 \mu\text{m}$ ) is complicated. Use of induction melting in the magnetodynamic aggregate of the Al–Cu-alloy base, followed by remelting in an electric-resistance furnace with the addition of rare-earth metals, made it possible to use low overheating. At  $v = 4, 10,$  and  $30$  K/s, grains with a size of 36.0, 17.1 and 11.6  $\mu\text{m}$ , respectively, were formed in the alloy. The imposition of a constant magnetic field on the melt during its cooling and solidification made it possible to obtain a grain with a size of 11.0  $\mu\text{m}$  at  $v = 10$  K/s. These are investigated: the effect of the field on the concentration of components in the grains, the range of the content of elements in the microvolumes of the grain, the difference in concentration between the centre and the periphery of the grain. As found, the effect of the field on the redistribution in the paramagnetic base (Al) of diamagnetic Cu, Zn, Pb, paramagnetic Sn, Mn, Zr, Ce, La, Nd, Pr and ferromagnetic Fe is associated with their content in the alloy, magnetic susceptibility, atom radius and mass. Under the influence of the field in the volume of grains, there are both the decrease in the content of Pb, which has the lowest magnetic susceptibility among the alloy components, and the increase in the content of Fe, which is a component with the highest magnetic susceptibility. The effect of the field on the rest of the alloy components is complex. Because of the action of the field, the content of Cu and Fe in the grains is increased, and the amount of Ce, La and Nd in their microvolumes is increased. The segregation of Sn and Pb at the grain periphery is eliminated.

**Key words:** Al–Cu–REM alloy, induction-melting, grain, solidification, magnetic, magnetic field.

*(Отримано 31 липня 2021 р.; остаточн. варіант — 7 травня 2023 р.)*

## 1. ВСТУП

Обсяги використання стопів на основі алюмінію у сучасній техніці різноманітного призначення постійно зростають, а їхня номенклатура розширюється. Розробка новітніх композицій і технологій ви-

робництва стопів на основі алюмінію з додаванням рідкісноземельних металів (РЗМ) створює конкуренцію матеріалам на основі більш важких, тяжкотопких (залізо) і дорогих металів (мідь, титан) [1, 2].

Властивості стопів визначаються розмірами та морфологією фаз, розподілом і розчинністю леґувальних елементів у структурних складових. Підвищення механічних і спеціальних властивостей стопів забезпечується, передусім, дрібнозернистою структурою. Згідно з класифікацією зерен за середнім розміром у стопах (ГОСТ 5639-82): дуже дрібні — 4–8 мкм, дрібні — 11 мкм, середні — 15 мкм, крупні — 22–125 мкм.

Застосування нових технологічних прийомів істотно знижує витрати виробництва стопів з підвищеними властивостями [1]. У стопах алюмінію В95, АМг5, Д16, АД35, охолоджених із 2–8 К/с, формується зерно у 120–200 мкм, а за 1000 К/с — у 10–40 мкм [3]. Дрібне зерно у виливку, одержаному за охолодження із 3–15 К/с, досягається спеціальними режимами деформації та термічного оброблення [4].

Розтопи — мікронеоднорідні, і вплив на це температурного та часового чинників обмежений потужністю топильного обладнання, недостатньою стійкістю футеровки, економічними умовами та ін. [5]. За подібних обмежень перспективним є застосування дії зовнішніх впливів на розтоп. Ефективні термічна та гідродинамічна дії реалізуються у магнетодинамічних установках — індукційних канальних печах з електромагнетом [6].

Сучасним методом впливу на литу структуру стопів є постійне магнетне поле. Значення енергії, що надається одному атому за дії магнетного поля з індукцією у 1 Тл, складає  $\cong 10^{-4}$  еВ, силового поля за деформації на 1% —  $\cong 10^{-3}$  еВ, а теплового впливу під час нагрівання на 100 К —  $\cong 10^{-2}$  еВ [7]. Постійні магнетні поля діють на структуру та властивості матеріалів різної магнетної природи (дія-, пара- і феромагнетики). Вивчення такої дії є актуальним, оскільки вона ефективна та низьковитратна, але складна, з не повністю встановленими механізмами.

Постійне магнетне поле сприяє існуванню тієї фази, чия магнетна сприйнятливість більше [8]. За відповідних індукцій поля зерна подрібнюються або збільшуються в порівнянні зі структурою стопу, не підданому впливу магнетного поля [9]. Подібно поле подіяло на розчинність компонента (Pb) в основі стопу (Sn), що є діамагнетиком [10]. Збільшення розчинності діамагнетного Cu в Al (парамагнетику) у магнетному полі пов'язується зі зміною коефіцієнта дифузії Купруму [11].

Під час твердіння стопів Al у постійному магнетному полі виявлено зв'язок між кількістю добавки (Cu) в стопі та впливом поля на його структуру [12]. Збільшення швидкості охолодження зменшує

вплив поля [10]. Виявлено протилежність реакції дія- та парамагнетних компонентів стопу на вплив поля під час зародження, росту кристалів і їх формування. Діамагнетик сформував подовжені зерна, а парамагнетик — рівновісні [13]; під дією поля вміст Cu в зернах Al збільшився, а парамагнетика Mg — зменшився [14].

Таким чином, досягнення більшої однорідності в макро- й мікрооб'ємах розтопу та підвищеної швидкості його приготування є актуальним і може бути забезпечено за допомогою магнетодинамічних установок. Подрібненню зерна сприяє постійне магнетне поле, накладене на розтоп, що твердне. Але його дія має складний характер, що залежить від багатьох чинників, основним з яких, вірогідно, є магнетна сприйнятливості компонентів. Ці чинники не в повній мірі виявлено на даний час; їхні взаємозв'язки з дією магнетного поля встановлено не повністю.

Мета представленої роботи полягала у вивченні дії постійного магнетного поля на розмір зерен стопу Al з 3,7% мас. Cu і 13,7% мас. РЗМ, основу якого — Al-Cu було одержано під впливом змінних електромагнетних полів за індукційного топлення з керованим перемішуванням і подальшим електроперетопленням з додаванням РЗМ, охолодженням і твердінням зі швидкостями у 4, 10 і 30 К/с, а також у виявленні впливу постійного магнетного поля на перерозподіл компонентів з різною магнетною сприйнятливостю в зернах стопу, одержаного із 10 К/с.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Стоп алюмінію для проведення досліджень містив легувальні компоненти у кількості: 3,7% мас. Cu (1,86% ат.), 13,7% мас. РЗМ (Ce, La, Nd і Pr; 3,08% ат.). Модифікатори в стопі були присутні у пониженої кількості по відношенню до інтервалу, встановленому ДСТУ 1583-93 для ливарних стопів системи Al-Cu (в 1,1–3,0 рази): 0,33% мас. Mn (0,16% ат.), 0,14% мас. Ti (0,04% ат.). В складі стопу була мала кількість до 0,005% мас. Zn (до 0,001% ат.) і до 0,005% мас. Zr (0,002% ат.). Також у стопі містилися домішки у сумарній кількості 0,52% мас. елементів Fe, Si, Pb, Sn (0,31% ат.). Рекомендована температура одержання легованих стопів алюмінію становить 1273 К [15], а температура їхньої гомогенізації сягає 1753 К [16]. Для пониження енерговитрат одержання стопу системи Al-Cu-РЗМ було проведено у 2 етапи. На 1-му етапі в магнетодинамічній установці (МДН-6) витолено базовий стоп Al-Cu за температури у 1023 К, який використано в якості шихти для одержання стопу системи Al-Cu-РЗМ. На 2-му етапі основу стопу було розтоплено у печі електроопору; до неї додано РЗМ; після розчинення їх здійснено перемішування розтопу та нагрівання до 1093 К. Розтоп було перемішано та витримано 10 хв. за даної температури. З одержаного

стопу виготовлено виливки без (контрольний стоп) та під дією постійного магнетного поля. Величина впливу магнетного поля на розтоп під час охолодження та твердіння характеризувалася числом Гартмана ( $Ha$ ), що визначає співвідношення магнетної дії на метал і його густини та в'язкості [17]. Для контрольного стопу  $Ha = 0$ , а під впливом поля  $Ha = 13,6$ . Метал охолоджувався зі швидкостями ( $v$ ) у 4, 10 і 30 К/с.

Середній розмір зерен було визначено згідно з ГОСТ 5639-82. Аналізу впливу магнетного поля на перерозподіл компонентів у зернах основи виконано на стопі, одержаному із  $v = 10$  К/с. Для аналізу переріз зерен, що відповідав середньому значенню розміру, видимому на поверхні шліфа, було розділено на 2 зони — центральну та периферійну. Периферійна зона охоплювала центральну та мала товщину у 3 мкм від межі зерна.

Компоненти стопу були розділені на групи дія-, пара- та феромагнетиків в залежності від величини їхньої магнетної сприйнятливості для твердого стану з метою виявлення особливостей впливу магнетного поля на перерозподіл елементів у зонах зерна. Розтопи Al з РЗМ зберігають парамагнетні властивості завдяки мікроагрегуванню. Тобто речовина, яка мала парамагнетні властивості за кімнатної температури, зберегла парамагнетизм у мікроагрегуванні в розтопі навіть за перегрівів до 1900 К [16]. Дані по магнетних властивостях елементів у рідкому стані вельми обмежені. Тому для оцінки впливу магнетного поля на перерозподіл компонентів у розтопі, що охолоджується і твердне, були використані значення магнетної сприйнятливості ( $\chi$ ) компонентів для кімнатної температури з [18] (Si — [19]). Для Fe, що є феромагнетиком за кімнатної температури та парамагнетиком за температур вище точки Кюрі,  $\chi$  за кімнатної температури взято з [20], а за 1273 К — з [21]. Залізо у парамагнетному стані має сприйнятливості, яка значно перевищує цю характеристику інших компонентів стопу, і тому воно відділено в окрему групу від парамагнетиків. Магнетні властивості компонентів оцінювалися через мольну магнетну сприйнятливості, значення якої взято безпосередньо з джерела або зведено до неї згідно з формулами [18]. Крім розподілу за магнетизмом, компоненти були відокремлені за характером вмісту їх у зонах зерна: перша група — ті, що утворювали розчин в Al в усьому об'ємі зони зерна, а друга — такі, що виявлялися тільки в локальних об'ємах (протяжністю у  $\approx 1$  мкм)  $\alpha$ -твердого розчину Al.

Магнетне поле, як зазначено в [11], впливає на коефіцієнт дифузії компонента в стопі, що охолоджується та твердне. Той, згідно з відомою формулою Стокса–Айнштайна, залежить від радіуса атома компонента, а радіус атома пов'язаний з атомовою масою [22]. Тому вірогідно, дія магнетного поля може бути зв'язана з радіусом атома та його масою. Як відзначено в [12], ефективність впливу по-

ля залежить від кількості добавки в стопі. Зв'язок між впливом магнетного поля на компоненти стопу і їхніми магнетними сприйнятливостями, атомовими масами й радіусами та кількістю в стопі було проаналізовано за допомогою оцінки пониження або підвищення вмісту компонента стопу в усьому об'ємі зерна. Цю оцінку засновано на кількісних даних мікрорентгеноспектральної аналізи вмісту компонентів у зонах зерна. Дані по значеннях радіусів атомів і їхніх мас взято з [23]. Характер розподілу компонентів, що утворювали розчин в Al, в об'ємі зони зерна між центром зерна та його периферійною зоною було оцінено за величиною градієнту концентрації:  $\Delta C/l$  [% ат./мкм], де  $\Delta C$  — різниця між середніми значеннями вмісту компонента в центрі зерна та на його периферії [% ат.],  $l$  — віддаль, на якій відбулася зміна концентрації компонента (приблизно 1/2 середнього розміру зерна) [мкм].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В структурі литих стопів, одержаних за всіх швидкостей охолодження без і під дією постійного магнетного поля, спостерігалися зерна  $\alpha$ -твердого розчину Al, первинні інтерметаліди й евтектична складова. Зі зростанням швидкості охолодження зразків контрольного стопу середній розмір зерна зменшився (рис. 1, табл. 1). З таблиці 1 видно, що із  $v = 4$  К/с в структурі стопу утворилися крупні зерна, із збільшенням швидкості охолодження у 2,5 рази (10 К/с) середній розмір зерна зменшився у 2,1 рази і відповідав рівню середніх за розміром зерен згідно з ГОСТ 5639-82. Подальше зростання  $v$  у 3 рази (30 К/с) забезпечило формування дрібних зерен зі зменшенням їхнього розміру в 1,5 рази.

Застосування в даній роботі модифікаторів у зменшеній кількості сумісно з впливом спеціально організованого в магнетодинамічній установці змінного електромагнетного впливу уможливило одержати зерна порядку 10–40 мкм (див. табл. 1).

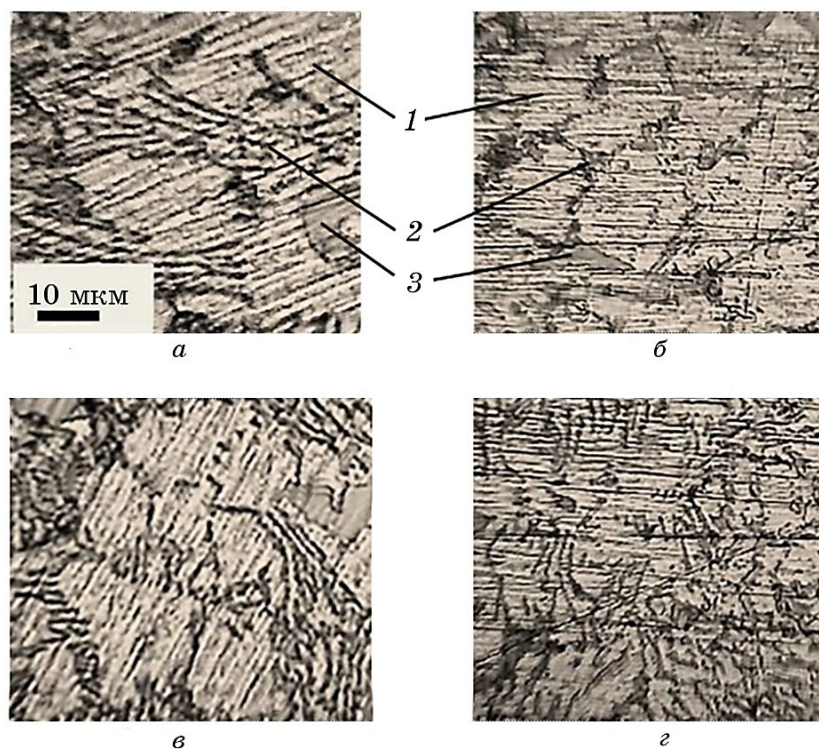
**ТАБЛИЦЯ 1.** Вплив швидкості охолодження та постійного магнетного поля на розмір зерен  $\alpha$ -твердого розчину Al як основи стопу системи Al–Cu–РЗМ.

**TABLE 1.** The effect of a cooling rate and a constant magnetic on the sizes of  $\alpha$ -Al solid-solution grains, which are a base of Al–Cu–REM-system alloy.

| $v$ , К/с | Розмір зерен, мкм |                |
|-----------|-------------------|----------------|
|           | $H_a = 0$         | $H_a = 13,6$   |
| 4         | $36,0 \pm 2,9$    | $22,8 \pm 2,1$ |
| 10        | $17,1 \pm 1,6$    | $11,5 \pm 1,0$ |
| 30        | $11,6 \pm 1,3$    | $11,0 \pm 1,8$ |

Накладання постійного магнетного поля на розтоп під час його охолодження та твердіння уможливило зменшити середній розмір зерна із  $v = 4$  і  $10$  К/с в порівнянні з контрольним стопом за аналогічних умов в 1,6 і 1,5 рази відповідно. Зі збільшенням швидкості охолодження до  $30$  К/с ефект подрібнення зерен у магнетному полі був значно меншим — 1,1 рази (див. рис. 1 і табл. 1). Так, за застосування дії магнетного поля забезпечується подрібнення крупних зерен і наближення їхніх розмірів до рівня середніх та одержання дрібних зерен в стопі за швидкості охолодження, в 3 рази меншій у порівнянні з контрольним стопом. З таблиці 1 випливає, що дія постійного магнетного поля на крупні зерна близька до ефекту від збільшення швидкості охолодження до  $10$  К/с.

Аналіза центральної зони зерен показала ідентичність хемічного складу цих об'ємів контрольного й обробленого металів (табл. 2).



**Рис. 1.** Структура стопу на основі Al-Cu-РЗМ, одержаного в умовах:  $v = 4$  К/с —  $Ha = 0$  (а),  $Ha = 13,6$  (б);  $v = 10$  К/с —  $Ha = 0$  (в),  $Ha = 13,6$  (г); 1 — зерна  $\alpha$ -твердого розчину Al, 2 — евтектика, 3 — інтерметалід.

**Fig. 1.** Structure of the Al-Cu-REM-based alloy obtained in conditions:  $v = 4$  K/s— $Ha = 0$  (a),  $Ha = 13.6$  (б);  $v = 10$  K/s— $Ha = 0$  (в),  $Ha = 13.6$  (г); 1— $\alpha$ -Al solid-solution grains, 2—an eutectic, 3—an intermetallic compound.

**ТАБЛИЦЯ 2.** Особливості розподілу компонентів ступу системи Al–Cu–РЗМ в зернах його основи —  $\alpha$ -твердого розчину Al, одержаного без та під дією магнетного поля із  $v = 10$  К/с.

**TABLE 2.** The distribution features of the Al–Cu–REM-system alloy components in the  $\alpha$ -Al solid-solution grains, which are the base of the alloy, obtained with and without magnetic-field action at  $v = 10$  K/s.

| Характер розподілу  | Компоненти  | Діапазон концентрації, % ат. |              |
|---|-------------|------------------------------|--------------|
|   |             | $H_a = 0$                    | $H_a = 13,6$ |
| Центральна зона зерна $\alpha$ -твердого розчину Al                         |             |                              |              |
| Утворюють розчин в Al об'єму зони зерна                                     | Cu          | 0,38–0,66                    | 0,35–3,59    |
|   | Mn          | 0,17–0,23                    | 0,05–0,21    |
|   | Fe          | 0,005–0,060                  | 0,019–0,140  |
| Містяться у локальних мікрооб'ємах $\alpha$ -твердого розчину Al зони зерна | Pb          | 0,022–0,023                  | 0,009–0,094  |
|   | Zn          | –                            | 0,009–0,07   |
|   | Sn          | 0,017–0,045                  | 0,016–0,021  |
|   | Zr          | 0,01–0,014                   | –            |
|   | La          | –                            | –            |
|   | Pr          | 0,001–0,007                  | –            |
|   | Nd          | –                            | 0,001–0,063  |
| Ce  | 0,001–0,024 | 0,001–0,160                  |              |
| Периферійна зона зерна $\alpha$ -твердого розчину Al                        |             |                              |              |
| Утворюють розчин в Al об'єму зони зерна                                     | Cu          | 0,50–0,67                    | 0,50–1,17    |
|   | Mn          | 0,14–0,18                    | 0,17–0,21    |
|   | Fe          | 0,001–0,066                  | 0,02–0,102   |
|   | Pb          | 0,011–0,035                  | –            |
|   | Sn          | 0,018–0,040                  | –            |
| Містяться у локальних мікрооб'ємах $\alpha$ -твердого розчину Al зони зерна | Pb          | –                            | 0,001–0,061  |
|   | Zn          | 0,001–0,023                  | 0,001–0,012  |
|   | Sn          | –                            | 0,015–0,020  |
|   | La          | –                            | 0,001–0,046  |
|   | Pr          | –                            | –            |
|   | Nd          | 0,001–0,009                  | 0,004–0,022  |
| Ce  | 0,001–0,047 | 0,001–0,125                  |              |

Розосереджені по усьому об'єму компоненти (Al, Cu, Mn і Fe) відносилися до I групи. Дана зона контрольного ступу містила також у локальних мікрооб'ємах, крім вказаних елементів, Pb, Sn, Zr, Pr і



Ce (II група). В обробленому магнетним полем метали ці локальні об'єми додатково містили Zn і Nd за відсутності Zr і Pr. Периферійна зона контрольного стопу складалася з I групи елементів і ще Pb та Sn. Ця зона теж мала локальні мікрооб'єми, що містили у складі додатково Zn, Nd і Ce. В стопі, підданому дії поля, Pb і Sn перейшли до II групи елементів — у локальні об'єми  $\alpha$ -твердого розчину Al, які додатково містили La (див. табл. 2).

Як свідчать дані табл. 2, магнетне поле складним чином подіяло на компоненти стопу: для одних діапазон концентрації розширилося, для інших — звузився. Присутності Si та Ti в зернах всіх зразків стопу не виявлено. Ці елементи знаходилися в інтерметалідах.

З урахуванням даних табл. 2, для кожного з елементів, що містилися у зернах дослідного стопу (основа зерна Al — парамагнетик,  $\chi = 16,7 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кмоль), було дано оцінку зміни їхньої кількості в об'ємі зерна в цілому за розташування елементів у порядку зростання  $\chi$ . На цей ряд було накладено характеристики їхніх атомів —  $M_a$  і  $r_a$ , а також концентрацію компонента в стопі (табл. 3). Відомо,

**ТАБЛИЦЯ 3.** Оцінка впливу постійного магнетного поля на зміну вмісту компонентів у зернах  $\alpha$ -твердого розчину Al — основи стопу системи Al–Cu–РЗМ в залежності від фізичних характеристик компонентів за одержання стопу в умовах  $\nu = 10$  К/с.

**TABLE 3.** Assessment of a constant magnetic-field effect on the change in the content of components in the grains of the  $\alpha$ -solid solution of Al, which are the base of the Al–Cu–REM-system alloy, depending on the components' physical characteristics, under alloy preparation at  $\nu = 10$  K/s.

| Магнетики | Компонент | Вміст у стопі, % ат. | $\chi \cdot 10^9$ , м <sup>3</sup> /кмоль | $M_a$ , а.о.м. | $r_a \cdot 10^{-12}$ , м | Зміна кількості компонента в зерні |
|-----------|-----------|----------------------|---|----------------|--------------------------|------------------------------------|
| дія-      | Pb        | 0,016                | -24,9                                     | 207            | 175                      | понизилася                         |
|           | Zn        | 0,002                | -10,3                                     | 65             | 139                      | підвищилася                        |
|           | Cu        | 1,860                | -5,4                                      | 64             | 128                      | підвищилася                        |
|           | Sn        | 0,001                | -3,7                                      | 119            | 158                      | понизилася                         |
| пара-     | La        | 0,770                | 112                                       | 139            | 187                      | підвищилася                        |
|           | Zr        | 0,001                | 121                                       | 91             | 160                      | понизилася                         |
|           | Mn        | 0,189                | 549                                       | 55             | 130                      | понизилася                         |
|           | Ce        | 1,782                | 2427                                      | 140            | 183                      | підвищилася                        |
|           | Pr        | 0,172                | 5323                                      | 141            | 182                      | понизилася                         |
| феро-     | Nd        | 0,360                | 5640                                      | 144            | 185                      | підвищилася                        |
|           | Fe        | 0,166                | 3582                                      | 56             | 126                      | підвищилася                        |
|           | за 1273 К |                      | 12860                                     |                |                          |                                    |

що діамагнетики виштовхуються з магнетного поля, а парамагнетики втягуються у нього. Зерна основи стопу мають невисокі парамагнетні властивості, що сприяло деякому підсиленню зовнішнього магнетного поля під час охолодження та твердіння розтопу. Як видно з даних табл. 3, магнетне поле викликало пониження вмісту Pb, що характеризується найбільшим діамагнетизмом серед усіх компонентів стопу. Вміст Fe як найбільш сильного магнетика підвищився в зернах основи під впливом магнетного поля. Для інших компонентів стопу, що за своєю магнетною сприйнятливістю розташовані між цими елементами, дія магнетного поля на їхній вміст в зернах стопу є складною. Діамагнетики Cu і Zn мають вельми близькі значення  $M_a$  і  $r_a$ , які відповідно в 3 і 1,3 рази менші за показники Pb. В магнетному полі зміна їхнього вмісту в зернах стопу є протилежною. Вплив магнетного поля на Sn був аналогічним Pb. Магнетна сприйнятливість Sn перевищує цей показник Pb в 6,7 рази, атомова маса менше в 1,7 рази, а атомовий радіус близький — співвідношення значень  $r_a$  Pb до Sn складає 1,1. Серед парамагнетних компонентів стопу виділилися групи елементів, у яких вміст у зернах стопу зменшився; це — Zr, Mn і Pr; у решти елементів — La, Ce і Nd — підвищився. Елементи, чий вміст у зернах зменшився, були присутні в стопі у кількості до 0,2 % ат., а тих, що збільшився, кількість у стопі була до 2,0 % ат.

Компоненти Zr і Mn мають менші магнетні сприйнятливості, атомову масу та радіус у групі парамагнетиків порівняно з Ce і Nd, чий вміст у зернах збільшився. В групах компонентів з різними змінами вмісту в зернах стопу були присутні компоненти La і Pr, які за їхніми характеристиками мали знаходитись у протилежних об'єднаннях. Для La є незбіг по  $\chi$ , а для Pr — як по  $\chi$ , так і по  $M_a$  і  $r_a$ . Вірогідно, у випадку La підвищення його кількості зумовлене тим, що його атомові маса та радіус у 1,2–2,5 рази і 1,2–1,4 рази відповідно перевищують аналогічні показники Zr і Mn і є на рівні Ce і Nd.

Компонент Pr характеризується малим вмістом у стопі та за високих значень  $\chi$ ,  $M_a$  та  $r_a$  його вміст у зернах стопу зменшився. Крім того, як показали результати мікрорентгеноспектральної аналізи первинних інтерметалідів, що утворилися під час охолодження та твердіння в стопі, під дією магнетного поля кількість La в них зменшилась, а Pr — підвищилась, і, відповідно, в зернах стопу ця тенденція була протилежною.

Стосовно компонентів Ti та Si, яких не було виявлено в зернах стопу, можна зробити припущення, що, якщо в ряду парамагнетних компонентів Ti розташувався між Zr і Mn по  $\chi$  ( $161 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кмоль) і  $r_a$  ( $146 \cdot 10^{-12}$  м), а по  $M_a$  (48 а.о.м.) — прилеглий до них, то, вірогідно, дія магнетного поля на нього була аналогічна цим компонентам. У разі відсутності Ti в зернах контрольного стопу під дією магнетного поля там його вміст за незначної концентрації в

стопі (0,094% ат.) підвищитися не зміг. За впливом магнетного поля на Si ситуація неоднозначна. За своєю магнетною сприйнятливістю ( $-3,9 \cdot 10^{-9}$  м<sup>3</sup>/кмоль),  $r_a$  ( $134 \cdot 10^{-12}$  м) і вмістом у стопі (0,125% ат.) цей компонент розташований між Sn і Cu, чия кількість у зернах стопу змінюється протилежно під впливом магнетного поля, а по  $M_a$  (28 а.о.м.) — прилеглий до Cu. В зернах контрольного стопу Si не було, і за дії магнетного поля він не був виявлений у зерні. Для виявлення особливостей перерозподілу Si потрібне врахування та подальше дослідження інших особливостей цього елемента, наприклад зміни його електричних властивостей: напівпровідник у твердому стані та провідник у рідкому.

Визначення градієнту концентрації компонентів, що утворюють розчин в об'ємі зон зерен, — Cu, Mn і Fe, — як контрольного металу, так і обробленого полем, і мають близькі значення  $M_a$  і  $r_a$  та дуже різняться по  $\chi$  (див. табл. 2) показало, що у контрольному металі градієнти розподілу діаманетика Cu і феромагнетика Fe мають протилежний знак відносно парамагнетика Mn (табл. 4).

За оброблення розтопу магнетним полем під час охолодження та твердіння відбулася зміна напрямків градієнтів концентрацій діаманетика та парамагнетика на протилежні. Після цього градієнти концентрації пара- та феромагнетного компонентів у магнетному полі стали однаковими за напрямком і величиною. Різниця між величинами градієнтів концентрації контрольного стопу й обробле-

**ТАБЛИЦЯ 4.** Вплив постійного магнетного поля на перерозподіл компонентів, що містяться в об'ємі зон зерен  $\alpha$ -твердого розчину Al стопу системи Al–Cu–PЗМ, охолодженого із  $v = 10$  К/с.

**TABLE 4.** The effect of a constant magnetic field on the redistribution of the components, containing in a zones' volume of  $\alpha$ -Al solid-solution grains of Al–Cu–REM-system alloy solidified at  $v = 10$  K/s.

| Компоненти   |      | Cu    | Mn    | Fe    |
|--|------|-------|-------|-------|
| Магнетики  |      | діа-  | пара- | феро- |
| Середня концентрація компонента в центрі зерна, % ат.                  |      |       |       |       |
| <i>Na</i>  | 0    | 0,53  | 0,19  | 0,03  |
|  | 13,6 | 0,95  | 0,16  | 0,04  |
| Середня концентрація компонента на периферії зерна, % ат.              |      |       |       |       |
| <i>Na</i>  | 0    | 0,57  | 0,16  | 0,04  |
|  | 13,6 | 0,85  | 0,19  | 0,07  |
| Градієнт концентрації компонента в зернах $\times 10^{-3}$ , % ат./мкм |      |       |       |       |
| <i>Na</i>  | 0    | 4,7   | -3,5  | 1,2   |
|  | 13,6 | -16,0 | 4,8   | 4,8   |

**ТАБЛИЦЯ 5.** Вплив постійного магнетного поля на діпазон концентрацій компонентів, що містилися в локальних мікрооб'ємах зон зерен  $\alpha$ -твердого розчину Al стопу системи Al-Cu-РЗМ, охолодженого із  $v = 10$  К/с.

**TABLE 5.** The effect of a constant magnetic field on a rate of the components, containing in a local microvolume of the of  $\alpha$ -Al solid-solution grains' zones of Al-Cu-REM-system alloy solidified at  $v = 10$  K/s.

| Компоненти  | Pb   | Zn   | Sn    | Zr    | Ce    |       |
|---|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Магнетики   | діа- |      |       | пара- |       |       |
| Ріжниця вмісту компонента між його максимальним і мінімальним значеннями (за даними табл. 2) в центральній зоні зерна, % ат.  |      |      |       |       |       |       |
| <i>Na</i>   | 0    | 0,01 | 0     | 0,028 | 0,013 | 0,023 |
|   | 13,6 | 0,09 | 0,061 | 0,005 | 0     | 0,159 |
| Ріжниця вмісту компонента між його максимальним і мінімальним значеннями (за даними табл. 2) в периферійній зоні зерна, % ат. |      |      |       |       |       |       |
| <i>Na</i>   | 0    | 0    | 0,022 | 0     | 0     | 0,046 |
|   | 13,6 | 0,06 | 0,011 | 0,05  | 0     | 0,124 |

ного полем збільшилася для всіх типів магнетиків в 3,4 рази для дія-, в 1,4 рази для пара- і в 4,0 рази для феромагнетика відповідно (див. табл. 4).

Порівнянням різниці між максимальною і мінімальною концентраціями компонентів, що містились у локальних зонах  $\alpha$ -твердого розчину Al у центральній і периферійній зонах зерна (див. табл. 2) виявлено, що під впливом поля найбільші значення різниці концентрацій були у Pb і Ce. Серед всіх компонентів другої групи Pb має найменшу  $\chi$  та найбільші  $M_a$  і  $r_a$ . Церій характеризувався високими вмістом у стопі,  $\chi$ ,  $M_a$  і  $r_a$  (табл. 5 і див. табл. 2).

Як видно з табл. 5, під впливом магнетного поля діпазони концентрацій у центральній зоні зерна розширились у порівнянні з контрольним стопом, крім Zr, оскільки поле сприяло зменшенню його вмісту в зерні (див. табл. 2). У периферійній зоні зерна тенденція розширення діпазону концентрацій Pb, Sn і Ce збереглась, а Zn — звузилась, оскільки його основна кількість була зосереджена у мікрооб'ємах центральної зони зерна.

#### 4. ВИСНОВКИ

Показано, що із застосуванням звичайних швидкостей охолодження у 1–10 К/с одержання дрібного зерна основи стопу та вплив на розподіл компонентів є ускладненими. Застосування спеціально

організованого змінного електромагнетного поля під час індукційного топлення й оброблення розтопу у магнетодинамічній установці є ефективним засобом дії на розтоп за температур, значно нижчих за рекомендовані температури. Постійне магнетне поле сприяє істотному подрібненню зерен і впливає на вміст компонентів у них. Дія поля є складною і недостатньо вивченою.

Встановлено, що одержання стопу системи Al–Cu–PЗМ у два етапи: 1) — витопка основи стопу (системи Al–Cu) у магнетодинамічній установці під дією спеціально організованих змінних електромагнетних полів і 2) — додавання PЗМ до основи стопу за перетоплення у печі електроопору, дало змогу вести топлення на 1-му етапі за звичайних перегрівів розтопу, а на 2-му — понизити температуру оброблення розтопу на  $\approx 180$  К у порівнянні з рекомендованою для легованих стопів алюмінію. Застосування магнетогідродинамічного оброблення розтопу сприяло одержанню за низьких швидкостей охолодження у 4, 10 і 30 К/с зменшений розмір зерна (36,0, 17,1 і 11,6 мкм відповідно) із пониженим вмістом модифікаторів. Накладання постійного магнетного поля на розтоп, що охолоджувався та тверднув, уможливило одержати структуру стопу, яка характеризувалася розміром зерен у 11,0 мкм за швидкості охолодження у 10 К/с.

З'ясовано, що постійне магнетне поле складним чином впливає на вміст компонентів в об'ємі зерен стопу, характер їхнього розподілу між центром і периферією зерна, діяпазон концентрацій у локальних мікрооб'ємах зерен, досліджених на стопі за швидкості його охолодження у 10 К/с. Вміст одних компонентів поле понижувало, інших — підвищувало.

Знайдено, що під впливом магнетного поля вміст Pb, — діямагнетного елементу з найменшою магнетною сприйнятливістю серед компонентів стопу, — понижувався в об'ємі зерен  $\alpha$ -твердого розчину Al, які мають слабкі парамагнетні властивості. Вміст Fe, що має найбільшу магнетну сприйнятливість, підвищувався. Для решти компонентів, які за своїми магнетними сприйнятливостями розташовані між Pb і Fe, характер зміни вмісту в зернах стопу був складним і пов'язаним з їхньою кількістю у складі стопу, магнетними сприйнятливостями, атомовими масами й радіусами. В результаті в стопі, що охолоджувався та тверднув у постійному магнетному полі збільшилися легованість Купрумом зерен стопу та вміст La, Nd і Ce в їхніх локальних мікрооб'ємах, була відсутня ліквідація по периферії зерен легкотопких Pb і Sn.

Встановлено, що під впливом постійного поля зростає градієнт концентрації в зернах стопу для компонентів, що утворюють твердий розчин в об'ємі зерен основи. Ці компоненти є дуже близькими за величинами їхніх атомових радіусів і мас (Cu, Mn і Fe) і представляють різні типи магнетиків. Напрямок градієнту для дія- (Cu) і

ферромагнетика (Fe) в стопі, який не оброблено полем, був однако-вим і протилежним парамагнетиком (Mn). Під дією поля напрямом ґрадієнту концентрацій для дія- і парамагнетика змінився на протилежний. В результаті феро- та парамагнетик набули однаковий напрямом ґрадієнту, що був протилежним діямагнетиком.

Розширення діяпазону концентрації металів, що містилися в локальних мікрооб'ємах зерен основи стопу найбільшим чином відбулося для Pb — діямагнетика, що мав найменшу магнетну сприйнятливість і найбільші атомові масу й радіус серед компонентів стопу, а також для парамагнетика Ce — компонента з найвищим вмістом у стопі та високими величинами магнетної сприйнятливості, атомових мас і радіусів.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Y. A. Gorbunov, *J. of Siberian Federal Univ., Ing. and Techn.*, **5**, No. 8: 636 (2015).
2. В. А. Гнатуш, В. С. Дорошенко, *Металл и литье Украины*, **3–4**: 25 (2019).
3. О. В. Ноговіцин, В. Л. Лахненко, І. Р. Баранова, *Металознавство та обробка металів*, **1**: 3 (2021).
4. А. Д. Котов, *Разработка алюминиевого сплава повышенной прочности, обладающего высокоскоростной сверхпластичностью* (Дисертація... канд. техн. наук) (Москва: МИСиС: 2013).
5. П. С. Попель, В. Е. Сидоров, И. Г. Бродова, М. Кальво-Дальборг, У. Дальборг, *Расплавы*, **1**: 3 (2020).
6. В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн, В. И. Дубоделов, В. К. Погорский, В. А. Трефняк, *Магнитодинамические насосы для жидких металлов* (Київ: Наукова думка: 1989).
7. А. В. Комшина, А. С. Помельникова, *Наука и образование. Электронный науч.-техн. журнал*, **9**: 463 (2012).
8. G. Kirste, G. G. F. Blum, J. Freudenberger, S. Wurmehl, and B. Buchner, *Proc. the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Riga, Latvia: 2021), p. 48.
9. Y. Dong, S. Suai, J. Yu, W. Xuan, Z. Zhang, J. Wang, and Z. Ren, *J. of Alloys and Comp.*, **749**: 978 (2018).
10. D. Du, Y. Fautrelle, Z. Ren, R. Moreau, and X. Li, *ISIJ Int.*, **57**, No. 5: 833 (2017).
11. S. He, C. Li, R. Guo, W. Xuan, Z. Ren, X. Li, and Y. Zhang, *ISIJ Int.*, **58**, No. 5: 899 (2018).
12. X. Li, Z. Ren and Y. Fautrelle, *Proc. the 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Dresden, Germany: 2009), p. 761.
13. Q. Wang, E.-D. Wang, and J.-C. He, *Proc. the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Lyon, France: 2003), p. B1.6.1.
14. H. J. Pang, C. J. Wang, Q. Wang, and Y. Q. Wang, *Acta Phys. Sin. — Chinese Addition*, **55**, No. 10: 5129 (2006).
15. Ф. М. Котлярский, В. И. Белик, *Литейное производство*, **6**: 9 (1985).
16. В. А. Быков, *Магнитная восприимчивость разбавленных сплавов Al–Ce, Al–Dy, Al–Yb при повышенных температурах* (Дисертація... канд. техн.

- наук) (Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН: 2007).
17. Ю. М. Гельфгат, О. А. Лиелаусис, Е. В. Щербинин, *Жидкий металл под воздействием электромагнитных сил* (Рига: Зинатне: 1975).
  18. О. А. Шматко, Ю. В. Усов, *Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов* (Киев: Наукова думка: 1987).
  19. П. И. Баранский, В. П. Клочков, И. В. Потыкович, *Полупроводниковая электроника* (Киев: Наукова думка: 1975).
  20. Н. И. Кузнецов, *Международная система единиц СИ* (Минск: Высшая школа: 1965).
  21. Г. Н. Еланский, В. А. Кудрин, *Вестник ЮУрГУ. Сер. Металлургия*, **15**, № 3: 11 (2015).
  22. А. С. Казаченко, Н. Н. Шилов, *Науч. журнал Куб ГАУ*, **133**: 9 (2017).
  23. Н. Л. Глинка, *Общая химия: Учебное пособие для вузов* (Ленинград: Химия: 1979).

## REFERENCES

1. Y. A. Gorbunov, *J. of Siberian Federal Univ., Ing. and Techn.*, **5**, No. 8: 636 (2015) (in Russian).
2. V. A. Gnatush and V. S. Doroshenko, *Metall i Lit'yo Ukrainy.*, **3–4**: 25 (2019) (in Russian).
3. A. V. Nogovitsyn, V. L. Lakhnenko, and I. R. Baranov, *Metalozn. Obrobka Met.*, **1**: 3 (2021) (in Ukrainian).
4. A. D. Kotov, *Razrabotka Alyuminiyevogo Splava Povyshennoy Prochnosti, Obladayushchego Vysokoskorostnoy Sverkhplastichnostyu* [Development of High-Strength Aluminum Alloy with High-Speed Superplasticity] (Thesis of Disser. for Cand. Techn. Sci.) (Moscow: MISiS: 2013) (in Russian).
5. P. S. Popel, V. Ye. Sidorov, I. G. Brodova, M. Calvo-Dalborg, and U. Dalborg, *Rasplavy*, **1**: 3 (2020) (in Russian).
6. V. P. Polishchuk, M. R. Tsin, R. K. Gorn, V. I. Dubodelov, V. K. Pogorskiy, and V. A. Trefnyak, *Magnitodinamicheskie Nasosy dlya Zhidkikh Metallov* [Magnetodynamic Pumps for Liquid Metals] (Kiev: Naukova Dumka: 1989) (in Russian).
7. A. V. Komshina and A. S. Pomel'nikova, *Nauka i Obrazovaniye. Elektronnyy Nauch.-Tekhn. Zhurnal*, **9**: 463 (2012) (in Russian).
8. G. Kirste, G. G. F. Blum, J. Freudenberger, S. Wurmehl, and B. Buchner, *Proc. the 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Riga, Latvia: 2021), p. 48.
9. Y. Dong, S. Suai, J. Yu, W. Xuan, Z. Zhang, J. Wang, and Z. Ren, *J. of Alloys and Comp.*, **749**: 978 (2018).
10. D. Du, Y. Fautrelle, Z. Ren, R. Moreau, and X. Li, *ISIJ Int.*, **57**, No. 5: 833 (2017).
11. S. He, C. Li, R. Guo, W. Xuan, Z. Ren, X. Li, and Y. Zhang, *ISIJ Int.*, **58**, No. 5: 899 (2018).
12. X. Li, Z. Ren and Y. Fautrelle, *Proc. the 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Dresden, Germany: 2009), p. 761.
13. Q. Wang, E.-D. Wang, and J.-C. He, *Proc. the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Electromagn.* (Lyon, France: 2003), p. B1.6.1.
14. H. J. Pang, C. J. Wang, Q. Wang, and Y. Q. Wang, *Acta Phys. Sin. — Chinese*

- Addition*, **55**, No. 10: 5129 (2006).
15. F. M. Kotlyarskiy and V. I. Belik, *Liteynoe Proizvodstvo*, **6**: 9 (1985) (in Russian).
  16. V. A. Bykov, *Magnitnaya Vospriimchivost' Razbavlennykh Splavov Al-Ce, Al-Dy, Al-Yb pri Vysokikh Temperaturakh* [Magnetic Susceptibility of Dilute Al-Ce, Al-Dy, Al-Yb Alloys at High Temperatures] (Thesis of Dissert. for... Candidate of Technical Sciences) (Ekaterinburg: Institut Metallurgii UrO RAN: 2007) (in Russian).
  17. Yu. M. Gel'fgat, O. A. Lielausis, and E. V. Shcherbinin, *Zhidkiy Metall pod Deistviem Ehlektromagnitnykh Sil* [Liquid Metal under the Influence of Electromagnetic Forces] (Riga: Zinatne: 1975) (in Russian).
  18. O. A. Shmatko and Yu. V. Usov, *Ehlectricheskie i Magnitnyye Svoistva Metallov i Splavov* [Electrical and Magnetic Properties of Metals and Alloys] (Kiev: Naukova Dumka: 1987) (in Russian).
  19. P. I. Baranskiy, V. P. Klochkov, and I. V. Potykovich, *Poluprovodnikovaya Elektronika* [Semiconductor Electronics] (Kiev: Naukova Dumka: 1975) (in Russian).
  20. N. I. Kuznetsov, *Mezhdunarodnaya Sistema Yedinit SI* [International System of Units SI] (Minsk: Visshaya Shkola: 1965) (in Russian).
  21. G. N. Yelanskiy and V. A. Kudrin, *Vestnik YUUrGU. Ser. Metallurgiya*, **15**, No. 3: 11 (2015) (in Russian).
  22. A. S. Kazachenko, N. N. Shilov, *Nauch. Zhurnal Kub GAU*, **133**: 9 (2017) (in Russian).
  23. N. L. Glinka, *Obshchaya Khimiya: Uchebnoye Posobie dlya Vuzov* [General Chemistry: Textbook for Universities] (Leningrad: Khimiya: 1979) (in Russian).