# ЗАТВЕРДІННЯ СПЛАВІВ

УДК 669.715:669.179

**Т. М. Наріжна,** аспірант, e-mail: tmnarizhna@gmail.com **О. М. Доній,** канд. техн. наук, доц., e-mail: dosha@iff.kpi.ua **М. М. Ворон\*,** канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: mihail.voron@gmail.com

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», (Київ, Україна)

\*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України (Київ, Україна)

# ВПЛИВ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ СИСТЕМИ AI-Si З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ЗАЛІЗА

Проведено порівняльні дослідження кінцевої структури алюмінієвого доевтектичного силуміну марки АК7М2 з підвищеним вмістом заліза у вихідному литому стані та після впливу зовнішнього постійного магнітного поля на розплав після процесу кристалізації. Макроскопічні дослідження показали, що після кристалізації силуміну без накладання зовнішнього постійного магнітного поля в структурі сплаву утворилися газові пори як наслідок значної газомісткості самого сплаву або проникнення в сплав газів, які виділяються з ливарної форми. За допомогою металографічного якісного аналізу в мікроструктурі сплаву АК7М2, що піддавався впливу магнітного поля, виявлено залізовмісні фази зіркоподібної та ієрогліфічної форм, що рівномірно розподіляються в об'ємі закристалізованого силуміну. Спостерігається рівномірний розподіл  $\alpha$ -твердого розчину, фази AI, Fe, Si, AI, SiFe та евтектики  $\alpha$  + Si порівняно із силуміном у вихідному стані. Мікроструктурний аналіз та рентгенівський фазовий аналіз показали наявність фаз Al<sub>s</sub>SiFe і Al<sub>1s</sub>Fe<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> та відмінність їх кількості, розподілу і будови в залежності від умов кристалізації. За результатами вимірювання мікротвердості методом Вікерса виявлено, що внаслідок застосування зовнішнього постійного магнітного поля на розплав доевтектичного силуміну АК7М2 з підвищеним вмістом заліза можливо отримати вищі показники мікротвердості твердого розчину і евтектики α + Si в порівнянні з необробленим сплавом. На підставі результатів якісних і кількісних металографічних досліджень та рентгеноструктурного фазового аналізу зроблено висновки про характер впливу зовнішньої фізичної обробки на структуру сплаву АК7М2 після кристалізації.

**Ключові слова:** алюмінієвий сплав, доевтектичний силумін, магнітне поле, феромагнітні включення, макроструктура, мікроструктура, рентгеноструктурний фазовий аналіз, мікротвердість.

Силуміни володіють гарними ливарними властивостями і разом з тим вони мають задовільні характеристики міцності, що визначає їх широке застосування у фасонному литті широкого ряду деталей [1]. Однак з розвитком техніки виникає потреба в покращенні експлуатаційних характеристик матеріалу. Тому проводяться дослідження нових технологій та способів отримання сплавів з підвищеними властивостями [2–4]. Широко застосовують фізичні методи обробки металевих розплавів [5–9], які мають ряд переваг порівняно з модифікуванням чи легуванням. Особливої актуальності набуває застосування магнітного поля на розплавлений метал, за допомогою якого можна керувати процесом структуроутворення під час кристалізації виливка без зміни хімічного складу. Це є надзвичайно важливим в умовах, коли хімічний склад жорстко регламентується нормативними документами. Незважаючи на таке значення, ще недостатньо досліджено вплив фізичної обробки зовнішнього постійного магнітного поля на структуроутворення доевтектичного силуміну АК7М2. Окремим важливим питанням є визначення такого впливу на структурно-фазові характеристики виливків, особливо з підвищеним вмістом заліза в сплаві.

Мета роботи – дослідити вплив зовнішнього постійного магнітного поля під час кристалізації алюмінієвого сплаву системи AI–Si з підвищеним вмістом заліза на литу структуру в твердому стані.

Приготування сплаву проводили в лабораторній шахтній печі опору СШОЛ–1.1,6/12 в сталевому тиглі, пофарбованому дінессіліманітовою фарбою на рідкому склі. Для виготовлення дослідних зразків спочатку отримали силуміновий сплав марки АК7М2, який легували залізом в чистому виді для кращої оцінки впливу магнітного поля на розміри і розподіл залізистих фаз, після чого проводили нагрівання розплаву до температури 900 °С для забезпечення розчинення тугоплавких сполук та нівелювання структурної спадковості, перемішування та підстужування металу до температури заливки, яка складала 780–800 °С. Помітний перегрів розплаву перед заливкою був необхідний для створення умов повільної кристалізації та забезпечення більш тривалого процесу фазоутворення, що дало б змогу більш повно побачити різницю між обробленим та необробленим зразками.

Розплав заливали в графітовий кристалізатор з розмірами порожнини форми  $\emptyset = 40$  мм і h = 100 мм, який встановлено на неодимовий магніт NdFeB, N42 (намагніченість 1280–1320 мТл) дискової форми ( $\emptyset = 50$  мм, h = 30 мм) та силою утримання 120 кг. Товщина стінок кристалізатора становила 30 мм, що забезпечувало повільне тепловідведення. Між кристалізатором та магнітом розмістили тонкий шар азбокартону.

Макроструктуру досліджували візуальним методом. Визначення хімічного складу зразків проводили методом рентгенофлуорисцентного аналізу на приборі «Expert» з діапазоном вимірювання хімічних елементів від магнія (12 Mg) до урана (92 U). Відміності в мікроструктурах досліджували за допомогою оптично-світлового металографічного мікроскопу МИМ-8. Визначення якісного та кількісного фазового аналізу проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра Ultima-IV Rigaku. Вимірювання мікротвердості виконували за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3.

Зовнішній вигляд отриманих виливків в розрізі з обробкою та без неї зображено на рис. 1. У сплаві АК7М2 після застосування фізичної обробки (рис. 1, б) утворилася усадка та є наявною незначна кількість газових пор, на відміну від сплаву у вихідному стані (рис. 1, *a*), де усадкова раковина відсутня та спостерігається більша пористість.

Хімічний склад, мікроструктуру, фазовий рентгенівський аналіз та зміну мікротвердості сплаву АК7М2 досліджували на зразках, вирізаних з центральної нижньої частини виливка, де відбувався найбільший вплив зовнішнього постійного магнітного поля. Для порівняння досліджували аналогічне місце виливка сплаву АК7М2 без магнітної обробки. Результати хімічного аналізу наведено в табл. 1.

Мікроструктура закристалізованого сплаву AK7M2 у вихідному стані характеризується нерівномірно розподіленими фазами зіркоподібної форми (фаза Al<sub>5</sub>SiFe евтектичного походження) (рис. 2, *a*, *б*), розміри фаз становлять 400–500 мкм. Дендрити твердого розчину на основі алюмінію мають яскраво виражену рівномірну будову і досить крупні розміри. Темні області в них можуть відповідати частинкам фази Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Внаслідок впливу магнітного поля на структуру сплаву AK7M2 розподіл залізовмісної фази в об'ємі закристалізованого металу нижньої частини виливки стає більш рівномірним (рис. 2, *в*), а її розміри знаходяться в межах від 100 до 200 мкм.



Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваних зразків у розрізі, сплав АК7М2: *а* – у вихідному стані, б – з накладанням магнітного поля

В мікроструктурі центральної частини виливки сплаву АК7М2, що піддавався фізичній обробці (рис. 2, *г*), спостерігається нерівномірне скупчення даної фази, що виникло, ймовірно, внаслідок слабшої дії магнітного поля в цій області. В обох випадках



Рис. 2. Мікроструктура сплаву АК7М2, збільшення x100 у вихідному стані: *а* – в нижній частині виливки, б – в центральній частині виливки; після накладання зовнішнього магнітного поля: *в* – в нижній частині виливки, *г* – в центральній частині виливки

Таблиця 1

Хімічний склад зразків сплаву АК7М2, %мас. у вихідному стані

# 0,13Ъ домішки 0,14Sn 0,01 $\mathbf{Zr}$ Ga 0,01 0,61Zn га після накладанням магнітного поля хімічний склад, %мас. Хімічний елемент 2,25Cu 0,25ïŻ 2,98 $\mathbf{Fe}$ 0,41Mn 0,672Mg 7,18 S 84, 535 A Маркування зразків Ť\*

Примітка: \*1 – сплав у вихідному стані; \*\*2 – сплав після накладання магнітного поля

варто відмітити суттєву зміну морфології залізовмісних фаз та більш дрібнозернисту будову твердого розчину.

За допомогою рентгеноструктурного аналізу отримано результати якісного фазового складу зразків. Дані аналізу представлено на рис. З і в табл. 2.

З огляду на дані рентгенофазового аналізу можна стверджувати, що обробка розплаву постійним магнітним полем підчас кристалізації сприяє утворенню більш сприятливих за морфологією та розмірами залізовмісних фаз, чого не спостерігається в зразках, одержаних без подібної обробки.

Для визначення впливу зовнішнього постійного магнітного поля на структуру та розподіл компонентів у твердому розчині вимірювали мікротвердість в зразках виливка, одержаного без фізичної обробки (рис. 4, *a*) та після її застосування (рис. 4, *б*).

#### Затвердіння сплавів

S

0,05

0,06

0,07

0,09

0,01

0,01

0,58

1,63

0,17

4,0

0,69

0,121

6,84

85,581

\*\*2

AK7M2

VI

≤0,5

1,5-3

≤0,3

 $\stackrel{\leq}{\sim}$ 

0,2-0,6

0,2-0,6

6,8

основа

FOCT 2685-75



Рис. 3. Рентгенівські дифрактограми сплаву АК7М2 у вихідному стані (*a*), після накладання зовнішнього магнітного поля (б)

#### Таблиця 2 Рентгеноструктурний фазовий аналіз та кристалографічні параметри сплаву АК7М2 у вихідному стані та після накладання

Марку- вання зразків		Фаза	Група симетрії кристалічної решітки	Параметри елементарної комірки, Å		
				a	b	с
AK7M2	*1	Al	225 : Fm-3m	4.0474	4.0474	4.0474
		Al <sub>5</sub> SiFe	72 : Ibam	5.554	5.663	23.65
		Si	227 : Fd-3m	5.4201	5.4201	5.4201
	**2	Al	225 : Fm-3m	4.0384	4.0384	4.0384
		$\begin{array}{c} \mathrm{Al}_{15}(\mathrm{MnFe})_3\mathrm{Si}_2\\/\mathrm{Al}_{20}\mathrm{Fe}_5\mathrm{Si}\end{array}$	204 : Im-3	12.5209	12.5209	12.5209
		Si	227 : Fd-3m,	5.4059	5.4059	5.4059

Примітка: \*1 – сплав у вихідному стані; \*\*2 – сплав після накладанням магнітного поля.



Рис. 4. Графіки змін мікротвердості в нижній частині виливки досліджуваних зразків сплаву АК7М2 у вихідному стані (*a*), після накладання зовнішнього магнітного поля (*б*)

### Затвердіння сплавів

Вимірювання проводили в центральній частині зразка від нижнього краю виливки в глибину металу на відстань до 4000 мкм. Відстань між відбитками становила близько 200 мкм. Навантаження 50 г. Час витримки 10 с. Графіки побудовано за результатами середніх значень трьох паралельних вимірювань.

На відстань до 1800 мкм від краю нижньої частини зразка мікротвердість в обох зразках майже рівномірна. В зразку після обробки магнітним полем показники мікротвердості вищі та менш однорідні, що може свідчити про наявність в структурі первинних фаз дрібнодисперсних включень та загального більшого ступеню легованості твердого розчину. З відстані 2000 мкм значення не рівномірні, середнє значення (150–230 кгс/мм<sup>2</sup> (рис. 4, б)).

#### Висновки:

За результатами дослідження встановлено, що застосування зовнішнього постійного магнітного поля на розплавлений силумін АК7М2 під час кристалізації сприяє виходу газових пухирів з об'єму металу і формуванню усадкової раковини. Це може бути наслідком створення умов, схожих на гідростатичний тиск, при якому відбувається ущільнення металу, рух його компонентів та складових розплаву. Відомі ефекти електромагнітної обробки розплавів [9] підтверджують такий висновок, вказуючи на те, що під дією магнітного поля може відбуватися розмивання дендритів твердого розчину на основі алюмінію, зменшуватися кількість пор між їх гілками через рух рідкої евтектики, тощо.

Мікроструктура зразку, одержаного без впливу магнітного поля, має грубі включення шкідливої залізовмісної β-фази Al<sub>5</sub>SiFe великих розмірів. При цьому вмісту марганцю не достатньо для утворення фази Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>. Структура сплаву, що піддавався впливу магнітного поля під час кристалізації, складається з рівномірно розподілених та більш дрібних дендритів твердого розчину та доволі дрібних включень фази Al<sub>15</sub>(MnFe)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, розміри якої становлять 100..200 мкм. Це свідчить про помітну інтенсифікацію процесів дифузії в умовах кристалізації в магнітному полі.

Підвищення мікротвердості силуміну після фізичної обробки вказує на підвищення ступеня легованості твердого розчину та на можливу наявність первинних фаз або дрібних інтерметалідів всередині дендритів.

## Список літератури

- 1. Металлы и сплавы: Справочник. С.-Пб.: «Профессионал», 2007. С. 1092.
- 2. Гулов С. С., Ганиев И. Н., Бердиев А. Э. Влияние стронция и германия на механические свойства сплава АК7М2. Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 4 (44). С. 59–64.
- 3. Белов В. Д., Филиппова И. А., Хайченко В. Е. Исследование влияния модификаторов из быстроохлажденного сплава АК7М2 на структуру и свойства сплава АК7М2 базового состава. Наукоемкие технологии. 2014. Т. 15. № 8. С. 43–47.
- 4. Филиппова И. А., Хайченко В. Е. Исследование влияния лигатуры 50CU–50ZR на структуру и механические свойства сплава АК7М2. Главный механик. 2014. № 11. С. 35–38.
- 5. Никитин К. В., Никитин В. И., Тимошкин И. Ю., Глущенков В. А., Черников Д. Г. Обработка расплавов магнитно-импульсными полями с целью управления структурой и свойствами промышленных силуминов. Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 34–42.
- 6. Черников Д. Г., Глущенков В. А., Никитин В. И., Никитин К. В. Совершенствование способа магнитно-импульсной обработки алюминиевых расплавов. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 16, № 6, 2014.

## Затвердіння сплавів

- 7. Дубоделов В. И., Середенко В. А., Затуловский С. С., Косинская А. В. Структурообразование до- и заэвтектических сплавов AI–Ni при их затвердевании в постоянном однородном магнитном поле. Процессы литья. 2010. № 6 (84).
- 8. Проценко И. Г., Брусенцов Ю. А., Филатов И. С. Упрочнение алюминиевых жаропрочныз сплавов. Вестник ТГТУ. 2013. Том 19. № 2. Transactions TSTU. С. 436–441.
- 9. Ворон М. М., Дрозд Е. А., Берест Д. А. Структура и свойства сплавов системы Al–Si–Cu после кристаллизации в магнитном поле. Процессы литья. 2018. № 1. C. 49–55.

Надійшла 26.05.2020

## References

- 1. Afonin, V. K. (2007) Metals and alloys: Reference book. St. Petersburg.: research and production association «Professional». Solntsev Yu.P. (Ed.), 1092 p. [In Russian].
- 2. Gulov, S. S., Ganiev, I. N., Berdiev, A. Je. (2018) The effect of strontium and germanium on the mechanical properties of AK7M2 alloy. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research, 4 (44), 59–64. [In Russian].
- 3. Belov, V. D., Filippova, I. A., Hajchenko, V. E. (2014) Investigation of the effect of modifiers made of rapidly cooled AK7M2 alloy on the structure and properties of the basic composition AK7M2 alloy. High technology. Vol. 15, 8, 43–47. [In Russian].
- 4. Filippova, I. A., Hajchenko, V. E. (2014) Investigation of the effect of 50CU-50ZR ligature on the structure and mechanical properties of AK7M2 alloy. Chief mechanical engineer, 11, 35–38. [In Russian].
- Nikitin, K. V., Nikitin, V. I., Timoshkin, I. Ju., Glushhenkov, V. A., Chernikov, D. G. (2016) Processing of melts by magnetic pulse fields to control the structure and properties of industrial silumins. News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy, 2, 34–42. [In Russian].
- Chernikov, D. G., Glushhenkov, V. A., Nikitin, V. I., Nikitin, K. V. (2014) Improving the method of magnetic pulse processing of aluminum melts. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 16, no. 6. [In Russian].
- 7. Dubodelov, V. I., Seredenko, V. A., Zatulovskij, S. S., Kosinskaja, A. V. (2010) Structuring of pre- and hypereutectic Al-Ni alloys upon their solidification in a constant uniform magnetic field. Casting processes, 6 (84). [In Ukrainian].
- 8. Procenko, I. G., Brusencov, Ju. A., Filatov, I. S. (2013) Hardening of aluminum heat resistant alloys. Transactions TSTU. Vol. 19, no. 2, 436–441. [In Russian].
- 9. Voron, M. M., Drozd, Ye. O., Berest, D. A. (2018) Structure and properties of Al–Si–Cu alloys after crystallization under magnetic field. Casting processes (1), 49–55.

Received 26.05.2020

T. M. Narizhna, Postgraduate; e-mail: tmnarizhna@gmail.com

**O. M. Donii,** *PhD* (Engin.), Associate Professor; e-mail: dosha@iff.kpi.ua

M. M. Voron\*, PhD (Engin.), Senior Researcher; e-mail: mihail.voron@gmail.com

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Kyiv, Ukraine) \*Physical Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

# INFLUENCE OF EXTERNAL MAGNETIC FIELD ON STRUCTURE FORMATION OF AI-Si SYSTEM ALUMINUM ALLOY WITH HIGH IRON CONTENT

The comparative studies of the final structure of aluminum hypo-eutectic AlSi7Cu2 alloy with high iron content in the initial cast state and after the action of an external constant magnetic field on the melt after the crystallization process were studied. Macroscopic studies had shown that after the crystallization of alloy without the imposition of an external constant magnetic field in the structure of the alloy gas pores were formed as a consequence of significant gas content of the alloy or penetration into the alloy of gases which were released from the mold. With the help of metallographic analysis star-shaped phases evenly distributed in the volume of crystallized alloy were detected in the microstructure of alloy, which was exposed to a magnetic field and a uniform distribution of  $\alpha$  - solid solution and  $\alpha$  + Si eutectic compared to alloy in the initial state is observed. By the method of x-ray phase analysis, it was found that this physical treatment promotes the formation of  $AI_{1}(MnFe)_{2}Si_{2}$ phase instead of Al FeSi phase in the ingot, obtained without treatment. According to the results of Vickers microhardness measurement, it was found that the application of an external constant magnetic field to the melt of hypo-eutectic alloy AlSi7Cu2 with high iron content allows to obtain high microhardness of solid solution in comparison with untreated alloy. Based on the results of qualitative and quantitative metallographic studies and X-ray structural phase analysis, conclusions were drawn about the nature of the influence of external physical treatment on the structure of the investigated alloy after crystallization.

**Keywords:** aluminum alloy, hypo-eutectic Al–Si–Cu, magnetic field treatment, ferromagnetic inclusions in aluminum, microstructure, microhardness.