

УДК 669.714

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.230419.61.295

## ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИТИХ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ АК7ч ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСНОЇ ОБРОБКИ

ФРОЛОВ Р. О.<sup>1\*</sup>, аспірант,  
ВОЛЧОК І. П.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
МІТЯЄВ О. А.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
ЛУКІНОВ В. В.<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-83-51, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9967-0220

<sup>2</sup> Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 769-83-51, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

<sup>3</sup> Кафедра «Композиційні матеріали, хімія та технології», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (061) 769-83-51, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

<sup>4</sup> АТ «Мотор Січ», вул. Моторобудівників, 15, 69068, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (061) 720-48-83

**Анотація. Мета.** Формування розрізної недендритної структури та підвищення механічних властивостей деталей типу «диск» із сплаву АК7ч. **Методика.** Матеріалом для даного дослідження обрано сплав АК7ч. Частина шихти була замінена на дрібнокристалічний переplав. Експериментальні плавки за трьома різними технологічними варіантами проводили в газовій печі. Дослідження структури здійснювали на поперечних шліфах деталей типу «диск», контроль механічних властивостей здійснювали на зразках, виготовлених відповідно до ГОСТ 1497-84 після термічної обробки по режиму Т5. **Результати.** Проведені дослідження показали, що комплексне застосування модифікувальної обробки і дрібнокристалічного переplаву, здатне значно підвищити механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів. **Наукова новизна.** Вперше в умовах виробництва була застосована технологія комплексної обробки розплаву модифікувальним комплексом та дрібнокристалічним переplавом. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють підвищити якість литих деталей.

*Ключові слова:* алюміній; інтерметалідні фази; структура; пластичність; модифікувальна обробка; шихта

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА АК7ч С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ

ФРОЛОВ Р. А.<sup>1\*</sup>, аспірант,  
ВОЛЧОК І. П.<sup>2</sup>, д. т. н., проф.,  
МІТЯЄВ О. А.<sup>3</sup>, д. т. н., проф.,  
ЛУКІНОВ В. В.<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup>Кафедра «Композиционные материалы, химия и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9967-0220

<sup>2</sup> Кафедра «Композиционные материалы, химия и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

<sup>3</sup> Кафедра «Композиционные материалы, химия и технологии», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, 69063, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

<sup>4</sup> АО «Мотор Сич», ул. Моторостроителей, 15, 69068, Запорожье, Украина, тел. +38 (061) 720-48-83

**Аннотация. Цель.** Формирование разрозненной не дендритной структуры и повышение механических свойств деталей типа «диск» из сплава АК7ч. **Методика.** Материалом для данного исследования выбран сплав АК7ч. Часть шихты была заменена на мелкокристаллический переplав. Экспериментальные плавки по трем различным технологическим вариантам проводили в газовой печи. Исследование структуры проводили на поперечных шлифах деталей типа «диск», контроль механических свойств осуществляли на образцах, изготовленных согласно ГОСТ 1497-84 после термической обработки по

режиму T5. **Результати.** Проведені дослідження показали, що комплексне застосування модифікуючої обробки та мелкокристалічного переплаву здатно значно підвищити механічні властивості вторинних алюмінієвих сплавів. **Научна новизна.** Вперше в умовах виробництва була застосована технологія комплексної обробки сплаву модифікуючим комплексом та мелкокристалічним переплавом. **Практична значимість.** Отримані результати дозволяють підвищити якість литих деталей.

*Ключові слова:* алюміній; інтерметалідні фази; структура; пластичність; модифікуюча обробка; шихта

## FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST DETAILS WITH AK7ч ALLOY USING COMPLEX TREATMENT

FROLOV R.A.<sup>1\*</sup>, *Postgraduate Student,*  
VOLCHOK I.P.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*  
MITYAYEV A.A.<sup>3</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*  
LUKINOV V.V.<sup>4</sup>

<sup>1\*</sup> Department of «Composite materials, chemistry and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, 64, Zhukovskiy str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9967-0220

<sup>2</sup> Department of «Composite materials, chemistry and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, 64, Zhukovskiy str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-1580-0556

<sup>3</sup> Department of «Composite materials, chemistry and technologies», Zaporizhzhia National Technical University, 64, Zhukovskiy str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 769-82-71, e-mail: [tmzntu@gmail.com](mailto:tmzntu@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-9034-1359

<sup>4</sup> JSC «Motor Sich», 15, Motorostroiteley str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine, tel. +38 (061) 720-48-83

**Abstract. Purpose.** Formation of a separate non-dendritic structure and increasing of mechanical properties of “disk” -type parts from AK7ch alloy. **Methodology.** Material for this study were alloy AK7ch. Part of the charge was replaced by fine-crystalline remelt. Experimental melting in three different technological variants was carried out in a gas furnace. The study of the structure was carried out on transverse sections of “disk”-type parts, the control of mechanical properties was carried out on samples made according to GOST 1497-84 after heat treatment according to T5 mode. **Findings.** Studies have shown that the integrated application of modifying treatment and melted crystalline melt can significantly improve the mechanical properties of secondary aluminum alloys. **Originality.** For the first time in the production conditions, the technology of complex processing of the melt with a modifying complex and fine-crystalline remelting was applied. **Practical value.** The results obtained can improve the quality of cast parts.

*Keywords:* aluminum; intermetallic phases; structure; plasticity; modifying treatment; charge

### Вступ

Алюмінієвий ливарний сплав АК7ч, завдяки своїм гарним механічним та технологічним властивостям, широко використовується для виготовлення фасонних виливків різними методами: у пісчаній формі, за витоплюваними моделями, у кокіль та методом лиття під тиском [1]. Даний сплав відрізняється високою герметичністю та задовільною оброблюваністю різанням, що зумовлює його широке використання для виготовлення корпусних деталей. На якість литих деталей із алюмінієвих сплавів у значній мірі впливає спадковість шихти, тобто структура та механічні властивості шихти в певній мірі зберігаються у вилівку [2; 3].

Іншим важливим фактором, що впливає на якість литих деталей, є концентрація сторонніх домішок та розчинених газів. Сторонні домішки у сплаві (зокрема, залізо) утворюють з Al та Si складні інтерметаліди, що знижують міцність та пластичність, а розчинені гази при кристалізації призводять до підвищення балу пористості [4]. Тому останнім часом використовують різні методи комплексної обробки розплаву, особливо під час рециклінгу відходів виробництва.

### Мета

Основною метою даного дослідження було формування розрізної недендритної структури та підвищення механічних властивостей деталі типу «диск» із сплаву АК7ч за допомогою обробки модифікуювальним комплексом МК-1[5] та заміни частини шихти на дрібнокристалічний переплаву (ДКП)[6].

### Матеріали та методи

У якості матеріалу для виготовлення деталей типу «диск» (рис.1) використовувався сплав АК7ч (табл. 1).

Згідно з планом дослідження 100 кг сплаву АК7ч у газовій печі довели до температури 710...720 °С під покривним флюсом 50 % NaCl + 50 % KCl, після чого у підігрітій кокіль відлили першу партію деталей типу «диск» та відбрали зразки для механічних випробувань. Потім до печі завантажили заздалегідь підготовлений та просушений ДКП у кількості 35 % маси. Після досягання температури розплаву 720 °С було виготовлено другу партію деталей та зразків. На останньому етапі розплаву обробили модифікуювальним комплексом МК-1 за допомогою

«дзвоника» у кількості 0,05 % мас., після чого було виготовлено третю партію деталей та зразків для механічних випробувань. Термообробку дисків та зразків проводили за режимом Т5 згідно ГОСТ 1583-93. Шліфи для вивчення макро- та мікроструктури виготовляли на поперечному перетині деталей. Для вивчення мікроструктури використовували оптичний мікроскоп ММ-700 при збільшеннях  $\times 200$  та  $\times 500$ . Механічні випробування проводили за ГОСТ 1497-84.



Рис. 1. Вид деталей типу «диск» / Fig. 1. View details of type "disk"

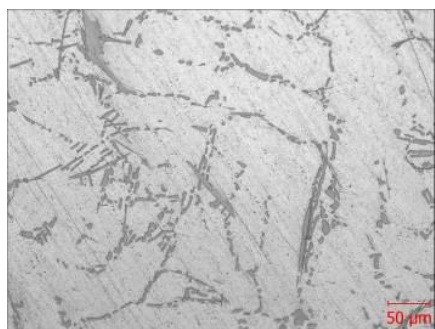
Таблиця 1

**Хімічний склад сплаву АК7ч / The chemical composition of the alloy AK7ch**

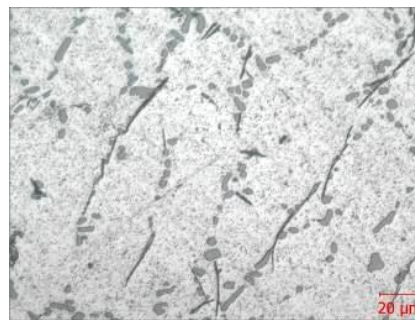
Сплав	Вміст елементів, мас. %						
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn
АК7ч	ос-но-ва	6,72	0,6	0,05	0,08	0,32	0,02

**Результати та обговорення**

Структура сплаву у деталі, що виготовлена за класичною технологією без додаткової обробки, складалась із алюмінієвої матриці, евтектичного кремнію та витягнутих голкоподібних інтерметалідних  $\beta$ -фаз  $Al_3FeSi$  довжиною 30...40 мкм (рис. 2). Слід зауважити, що структура виглядала неоднорідною, а включення кремнію та інтерметаліди розташовувалися по границях дендритів.



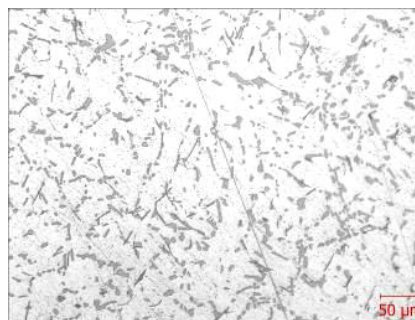
a



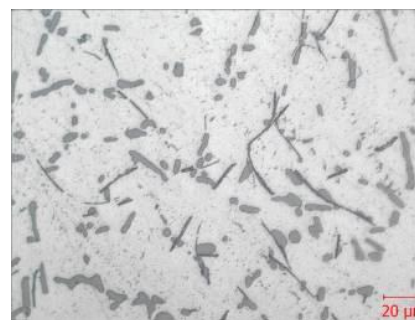
б (b)

Рис. 2. Мікроструктура сплаву АК7ч: а –  $\times 200$ ; б –  $\times 500$  / Fig. 2. Microstructure of the alloy AK7ch: a –  $\times 200$ ; b –  $\times 500$

За умови додавання 35 % ДКП у структурі сплаву АК7ч відбулося зменшення розмірів інтерметалідів в середньому до 20...30 мкм без зміни їх форми, а сама структура стала більш однорідною з помітним зменшенням розмірів дендритів (рис. 3).



a



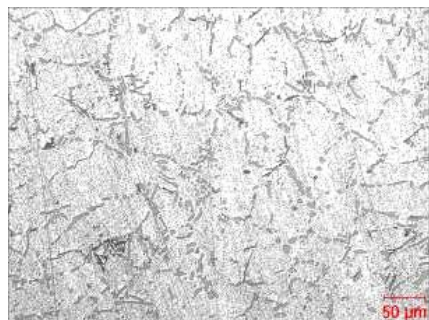
б (b)

Рис. 3. Мікроструктура сплаву АК7ч з 35 % ДКП у складі шихти : а –  $\times 200$ ; б –  $\times 500$  / Fig. 3. Microstructure of the alloy AK7ch with a fine-crystalline remelt charge of 35 % : a –  $\times 200$ ; b –  $\times 500$

Зменшення розмірів зерна та включень відбулося завдяки тому, що при додаванні ДКП до складу шихти, вносяться додаткові центри кристалізації. Відомо, що при перегріванні розплаву кристали не дисоціюють повністю, а зменшуються до певного критичного розміру, який відповідає нульовій енергії поверхневого натягу на поверхні розподілу рідина-зародок[7].

Під час комплексної обробки модифікувальним комплексом МК-1 у кількості 0,05 % мас. та ДКП,

окрім помітного зменшення поперечного розміру дендритів, спостерігали зміну форми інтерметалідів з видовженої на включення у вигляді «китайських ієрогліфів» (рис. 4).



а



б (b)

Рис. 4. Мікроструктура сплаву АК7ч з 35 % ДКП у складі шихти та обробкою МК-1 у кількості 0,05 % маси: а –  $\times 200$ ; б –  $\times 500$  /Fig. 4.

*Microstructure of the alloy AK7ch with a fine-crystalline remelt charge of 35 % and processing MK-1 of 0,05 % : a –  $\times 200$ ; b –  $\times 500$*

Оскільки метал всіх технологічних варіантів виготовлення виливків відповідав 1-му балу пористості за ГОСТ 1583-93, можна стверджувати, що зміна механічних властивостей відбулася за рахунок зменшення основних структурних складових та зміни морфології залізозмісних фаз та, як наслідок, зменшення концентрації напружень. Результати механічних випробувань (табл. 2), для варіанту комплексної технології обробки дрібнокристалічним переплавом та модифікувальним комплексом, відповідали змінам структури та

показали значне зростання пластичності до  $\delta = 5,2$  % та границі міцності до 230 МПа, при задовільній твердості 102 НВ.

Таблиця 2

#### Механічні властивості сплаву АК7ч / Mechanical properties of the alloy AK7ch

Варіант технологічної обробки	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ %	НВ
АК7ч без обробки	200	3,2	110
АК7ч + 35 % ДКП	210	4,5	105
АК7ч + 35 % ДКП + +0,05 % МК-1	230	5,2	102

#### Наукова новизна та практична цінність

Вперше в умовах виробництва була застосована технологія комплексної обробки розплаву модифікувальним комплексом МК-1 та ДКП. Отримані результати дозволили підвищити якість деталей типу «диск» із відходів виробництва сплаву АК7ч. Було встановлено, що зменшення розмірів зерна та структурних складових впливали не тільки на механічні властивості, а й сприяли поліпшенню оброблюваності литих деталей різанням.

#### Висновок

Використання дрібнокристалічного переплаву з інвертованою структурою дозволило зменшити розмір основних структурних складових та поперечного перерізу дендритів внаслідок значного збільшення кількості центрів кристалізації, але не вплинуло на форму залізозмісних інтерметалідних фаз, що виступають у ролі концентраторів напружень. Комплексна взаємодія ДКП та МК-1 дозволила отримувати деталі з більш високими механічними властивостями внаслідок формування структури з рівномірним розподілом фаз та зміною морфології залізозмісних інтерметалідів.

#### ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Марочник сталей и сплавов / [Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский и др.]. – Москва : 2014. – 1216 с.
2. Модифицирование сплавов / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко. – Минск : Беларуская навука, 2009. – 192 с.
3. Неменюк Б.М. Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Неменюк. – Минск : Технопринт, 1999. – 1072 с.
4. Ferguson J. B. Correlation vs. Causation : The Effects of Ultrasonic Melt Treatment on Cast Metal Grain Size / J. B. Ferguson, Benjamin F. Schultz, Kyu Cho, Pradeep K. Rohatgi // Metals. – 2014. – № 4. – Pp. 477–489. – Режим доступу : [www.mdpi.com/2075-4701/4/4/477](http://www.mdpi.com/2075-4701/4/4/477)
5. Пат. 46094 Україна, МПК (2009) С22С1/00. Модифікувальний комплекс для алюмінієвих сплавів / К. М. Лоза, О. А. Мігтяєв, І. П. Волчок (Україна); заявник та патентовласник : Запорізький національний технічний університет. – № u200905914; заявл. 09.06.2009; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. – 4 с.

6. Волчок И. П., Митяев А.А., Фролов Р.А. Комплексная технология повышения качества вторичных алюминиевых сплавов / И. П. Волчок, А. А. Митяев, Р. А. Фролов // *Литьё и металлургия*. – 2018. – №4 (93).– С. 19–23. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/kompleksnaya-tehnologiya-povysheniya-kachestva-vtorichnyh-alyuminiyevyh-splavov>
7. Стеценко В. Ю. Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы / В. Ю. Стеценко // *Литьё и металлургия*. – 2015. – № 2 (79). – С. 12–16. – Режим доступа : <https://cyberleninka.ru/article/n/klastery-v-zhidkih-metallah-stabilnye-nanokristally>

## REFERENCES

1. Dragunov G.Yu., Zubchenko A.S., Kashirskiy Yu.V. and oth. *Marochnik staley i splavov* [List of steels and alloys]. Moscow, 2014, 1216 p. (in Russian).
2. Marukovich E.I. *Modifitsirovanie splavov* [Modifying alloys]. Minsk : Belaruskaya navuka, 2009, 192 p. (in Russian).
3. Nemenenok B.M. *Teoriya i praktika kompleksnogo modifitsirovaniya siluminov* [Theory and practice of complex modification silumin]. Minsk : Tehnoprint, 1999, 1072 p. (in Russian).
4. Ferguson J. B., Schultz Benjamin F., Kyu Cho, Rohatgi Pradeep K. Correlation vs. Causation : The Effects of Ultrasonic Melt Treatment on Cast Metal Grain Size. *Metals*, 2014, no. 4, pp. 477–489.
5. Loza K.M., Mityayev O.A. and Volchok I.P. *Modyfikovalnyi kompleks dlia aliuminiyevykh splaviv* [Modifying complex for aluminium alloys]. Patent UA, no. u200905914, 2009. (in Russian).
6. Volchok I.P., Mityayev A.A. and Frolov R.A. *Kompleksnaya tekhnologiya povysheniya kachestva vtorichnykh alyuminiyevykh splavov* [Complex technology of secondary aluminium alloys quality increasing]. *Litye i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2018, no. 4 (93), pp. 19–23.(in Russian).
7. Stetsenko V.Yu. *Klastery v zhidkikh metallakh – stabilnyye nanokristally* [Clusters in liquid metals – stable nanocrystals]. *Litye i metallurgiya* [Casting and metallurgy]. 2015, no. 2 (79), pp. 33–25. (in Russian).

*Стаття рекомендована до друку д-ром техн. наук, проф. Г. І. Слинком (Україна); д-ром техн. наук, проф. О. В. Овчинниковим (Україна).*

Поступила до редакції 09.03.2019.

Прийнята до друку 13.03.2019.