

Управління структурою і властивостями ливарного алюмінієвого сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) модифікуванням дрібнокристалічними лігатурами

Пригунова А. Г., доктор технічних наук, завідувачка відділу, adel_nayka@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8030-9160>

Жидков Є. А., науковий співробітник, ezh71@ukr.net

Бабюк В. Д., науковий співробітник, vdbptima@ukr.net

Шеневідько Л. Г., науковий співробітник, onml@ukr.net

Цір Т. Г., кандидат технічних наук, науковий співробітник, jknd-t@ukr.net

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

Для управління структурою, механічними та експлуатаційними властивостями високоміцного ливарного алюмінієвого сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) в роботі використано метод модифікування, заснований на принципі структурної спадковості, з використанням швидкоохолоджених ($V_{\text{охол.}} \geq 10^5$ °C/c) дрібнокристалічних лігатур AlTi5 і AlZr10, а також лігатури хімічного складу базового сплаву з нанорозмірною величиною інтерметалідів і кристалів Al α .

Встановлено, що введення до розплаву дрібнокристалічних добавок приводить до переходу від дендритної до недендритної структури, суттєвого зменшення розміру кристалів твердого розчину Al α , збільшення ступеня його пересичення. Мікроструктура стає більш однорідною – зменшується різниця між максимальною і мінімальною величиною зерен. Найефективніше зменшення розміру зерна і перехід від дендритної до недендритної структури твердого розчину алюмінію при підвищених швидкостях охолодження відбувається при легуванні дрібнокристалічною лігатурою AlTi5, введеною до розплаву у перерахунку на чистий титан 0,05-0,15 мас. %. Основним фактором модифікування швидкоохолодженими лігатурами є надходження до розплаву великої кількості додаткових центрів кристалізації.

Після термічної обробки Т6 найбільш висока міцність сплаву досягається при модифікуванні лігатурою AlZr10, зокрема, при масовій частці цирконію 0,25 %. Ймовірно, головним чином це пов'язано з розширенням області твердого розчину міді та цирконію в алюмінії при високошвидкісному охолодженні та подальшим його розпадом при термічній обробці з виділенням зміцнюючих нанорозмірних фаз Al $_2$ Si та Al $_3$ Zr. Трибологічні дослідження показали, що найвищу зносостійкість має сплав, модифікований дрібнокристалічною лігатурою базового складу сплаву в кількості 12 мас. %.

Ключові слова: дрібнокристалічні лігатури, АМ4.5Кд (ВАЛ10), модифікування, мікроструктура, міцність, зносостійкість.

При постійно зростаючих вимогах до литих виробів традиційні шляхи підвищення їх якості стають все менш ефективними. Одним із резервів подрібнення структури, поліпшення ливарних та фізико-механічних властивостей литих алюмінієвих сплавів є способи модифікування, засновані на явищі структурної спадковості [1-3]. В основі його практичного застосування є передача закладеної в шихті інформації через рідку фазу та її прояв при твердненні. З таких позицій важливе значення мають дослідження, спрямовані на одержання більш ефективних модифікаторів нового класу з використанням процесів високошвидкісного охолодження [4].

Відомо підвищення властивостей алюмінієвих сплавів введенням до розплаву титану і цирконію, які відносяться до модифікаторів II роду і сприяють суттєвому подрібненню зерна, підвищенню міцності і жароміцності [5]. Тому очікується, що використання швидкоохолоджених ($V_{\text{охол.}} \geq 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) з рідкого стану стандартних лігатур AlTi5 і AlZr10 збільшить ефективність їх дії. Керуючись принципом структурної і розмірної відповідності Данкова-Конобєєвського [5], можна сподіватися, що використання охолодженої таким чином лігатури хімічного складу базового сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) з дисперсними тугоплавкими інтерметалідними фазами та нанорозмірною величиною зерен Al α [6] також сприятиме його модифікуванню.

Виходячи з цього, метою роботи є дослідження впливу модифікування швидкоохолодженими ($V_{\text{охол.}} \geq 10^5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) дрібнокристалічними лігатурами AlTi5 і AlZr10, а також лігатурою складу базового сплаву на структуру, механічні властивості та зносостійкість високоміцного ливарного алюмінієвого сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10).

Дослідний сплав (табл. 1) розплавляли в лабораторній печі опору. При температурі 750 $^\circ\text{C}$ рафінували препаратом «Дегазер-190» виробництва фірми «Foseco» в кількості 0,2 % від ваги шихти. Після двадцятихвилинної витримки з поверхні розплаву видаляли шлак і механічним замішуванням вводили дрібнокристалічні лігатури, що отримували на установці, наведений на рис. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідного сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10)

Table 1

Chemical composition of the experimental alloy AM4.5Kd (VAL10)

Марка сплаву		Масова частка хімічних елементів, %					
		Mn	Cu	Ti	Cd	Fe	Al
ВАЛ10	ДСТУ 2839-94	0,35-0,80	4,5-5,1	0,15-0,35	до 0,15	до 0,15	решта
	дослідний	0,52	4,51	0,24	0,11	0,11	решта

Лігатури AlTi5, AlZr10, АМ4.5Кд (ВАЛ10) розплавляли в електричній печі опору СШОЛ-1,5 при температурі 750 $^\circ\text{C}$, заливали в нагріту до 700 $^\circ\text{C}$ приймальну ємність з вогнетривкої кераміки низької теплопровідності, через яку розплав потрапляв на мідний диск, що обертався зі швидкістю до 3000 об/хв. (рис. 1). У процесі його високошвидкісного охолодження отримували металеві переривисті стрічки – «чіпси» товщиною від 100 мкм



Рис. 1. Установки для отримання дрібнокристалічних лігатур, 1 – приймальна воронка для подачі розплаву, 2 – мідний диск-кристалізатор, 3 – пристрій для регулювання зазору, 4 – електродвигун, 5 – система керування електродвигуном; 6 – приймальна ємність.

Fig. 1. The installation for the production of fine crystalline ligatures, 1 – receiving funnel for feeding the melt, 2 – copper disc-crystallizer, 3 – device for adjusting the gap, 4 – electric motor, 5 – electric motor control system, 6 – receiving tank.

до 500 мкм (рис. 2). Після введення дрібнокристалічних добавок розплав охолоджували з різними швидкостями: 0,4 °C/с, 1,8 °C/с і 33 °C/с. Це відповідає охолодженню в піщаній формі, в підігрітому (280 °C) і холодному (20 °C) чавунному кокілі, в якому отримували зразки для механічних випробувань.

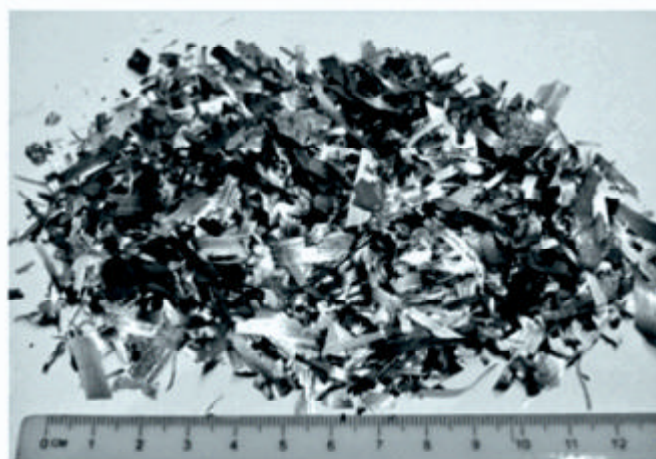


Рис. 2. Зовнішній вигляд швидкоохолоджених стрічок-«чипсів».

Fig. 2. Appearance of rapidly cooled ribbons-"chips".

Виливки, одержані при швидкості охолодження 0,4 °C/с, модифікували дрібнокристалічною лігатурою ($V_{\text{охол.}} \geq 10^5$ °C/с) складу сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10), яку вводили до розплаву в кількості 0, 3, 6, 9, 12 мас. %. При кокільному литті ($V_{\text{охол.}} = 1,8; 33$ °C/с) модифікування

Плавлення і кристалізація

здійснювали лігатурами складу базового сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10), а також AlTi5 і AlZr10. Швидкоохолодженню лігатуру («чіпси») зі сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) вводили до розплаву в кількості 12 мас. %, AlTi5 і AlZr10 – із розрахунку одержання в сплаві певної концентрації Ti та Zr, а саме: титану 0,05; 0,15; 0,25 мас. %; цирконію 0,05; 0,25; 0,5 мас. %. Температура модифікування в усіх випадках складала 720 °С.

Зразки, одержані литтям в металевий кокіль, термообробляли за режимом Т6 який включає: нагрівання до температури 545 °С, витримку 13 год і охолодження у воді, старіння при температурі 170 °С з витримкою 8 год та охолодження на повітрі.

Металографічний аналіз проведено за стандартами ISO 4499-1:2020 та ISO 4499-3:2020. Для виявлення мікроструктури застосовували хімічне травлення реактивом Келлера: HF – 5 %, HCl – 5 %, HNO₃ – 5 %, H₂O – 85 %. Кількісний металографічний аналіз дендритного параметру, розміру кристалів (зерна) твердого розчину алюмінію проводили методом січних [7], згідно зі стандартом ISO 4499-3:2016:

$$L_{\text{ср.}} = L / nL, \quad (1)$$

де $L_{\text{ср.}}$ – середній розмір зерна (або дендритного параметра), мкм;

L – довжина січної, мкм; nL – число перетинів із січною.

Мікротвердість (H_{μ}) $Al\alpha$ вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на інденторі 0,0196 Н (ДСТУ ISO 6507-1:2007). Тимчасовий опір розриву – короточасну міцність (σ_B) визначали за ДСТУ EN 10002-1:2006 на розривній машині UTM-100. Випробування проводили на коротких зразках діаметром 10 мм з ливарною скоринкою.

Трибологічні дослідження сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) здійснювали в парі тертя з чавуном марки СЧ20. Зносостійкість оцінювали по величині сили тертя, втраті ваги і коефіцієнту тертя, який розраховували за виразом:

$$\mu = F / N, \quad (2)$$

де μ – коефіцієнт тертя; F – сила тертя, Гс; N – навантаження по нормалі, г.

Електропровідність визначали струмовихревим методом на експериментальному приладі ІЕ-199, що розроблений ФТІМС НАН України.

Встановлено (рис. 3), що при швидкості охолодження 0,4 °С/с мікроструктура вихідного базового сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) складається з первинних кристалів твердого розчину алюмінію, переважно у вигляді грубих дендритів середнім розміром 862 мкм (рис. 3 а, рис. 4), по границях яких розташовано фази Al_3Ti , $Al_{12}Mn_2Cu$ та евтектика $Al\alpha + Al_2Cu$ [8].

Введення до розплаву дрібнокристалічних добавок сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) призводить до переходу від дендритної до недендритної структури (рис. 3 б, в, г), суттєвого зменшення розміру кристалів $Al\alpha$ (рис. 4). Зокрема, при масовій частці швидкоохолоджених добавок 12 % – у понад 8 разів: з 862 мкм до 106 мкм. Структура стає більш однорідною –

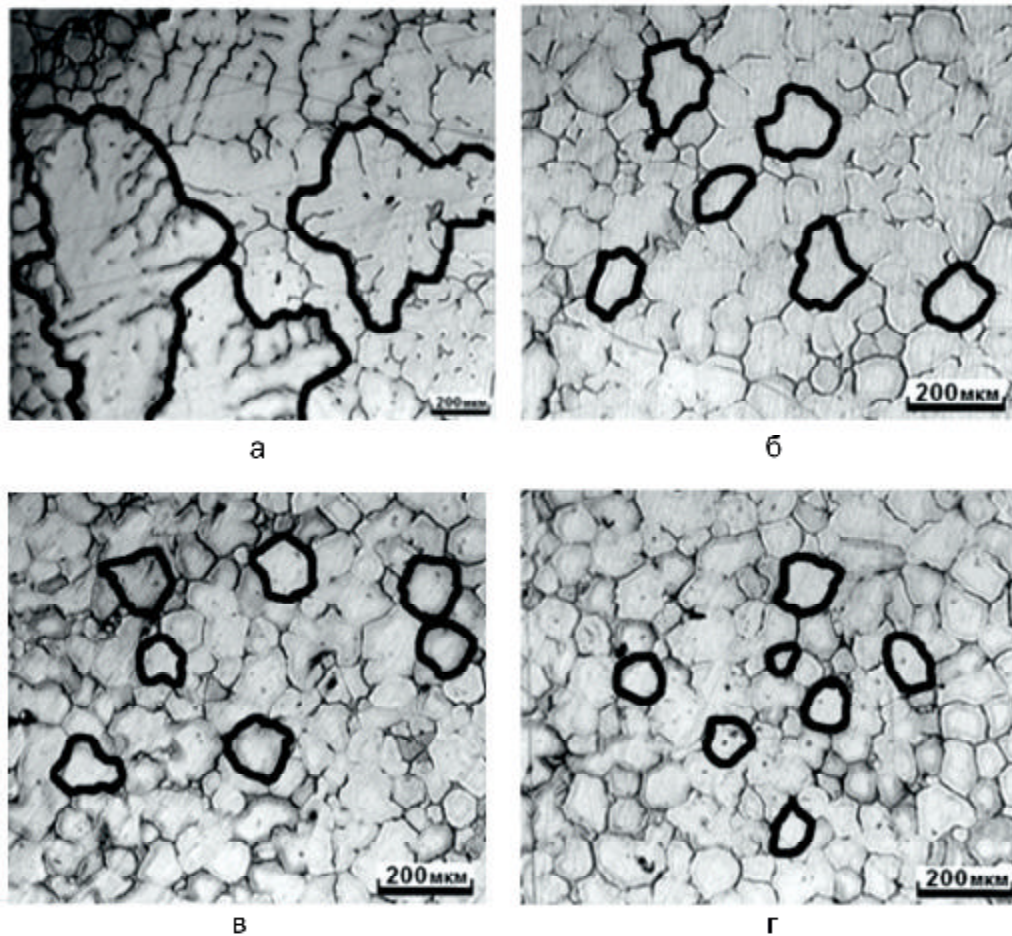


Рис. 3. Зміна мікроструктури сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при $V_{\text{охл.}} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ після введення до розплаву дрібнокристалічних добавок того ж хімічного складу, а – вихідний сплав; б – 6 % добавок; в – 9 % добавок; г – 12 % добавок.

Fig. 3. Changes in the microstructure of the AM4.5Kd (VAL10) alloy at $V_{\text{cool.}} = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ after the introduction of fine-crystalline additives of the same chemical composition into the melt, а – initial alloy, б – 6 % additives, в – 9 % additives, г – 12 % additives.

зменшується різниця між максимальним і мінімальним розміром кристалів твердого розчину алюмінію (рис. 5). Причому, якщо у вихідному сплаві ця різниця більш ніж в 5 разів, то після модифікування дрібнокристалічними добавками – в 1,5-1,7 рази.

При модифікуванні дрібнокристалічними добавками кристали $\text{Al}\alpha$ переважно глобулярної та розеткоподібної форми, зменшується їх розмірний фактор (відношення більшого розміру кристалу до меншого): з 2,15 – у вихідному сплаві до 1,0-1,3 – у модифікованому. Використання лігатури та збільшення її кількості від 3 % до 12 % призводить до підвищення мікротвердості $\text{Al}\alpha$, до зменшення електропровідності сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) (рис. 6). Останнє, ймовірно, зумовлено підвищенням ступеня пересичення твердого розчину алюмінію, переважно атомами міді [8].

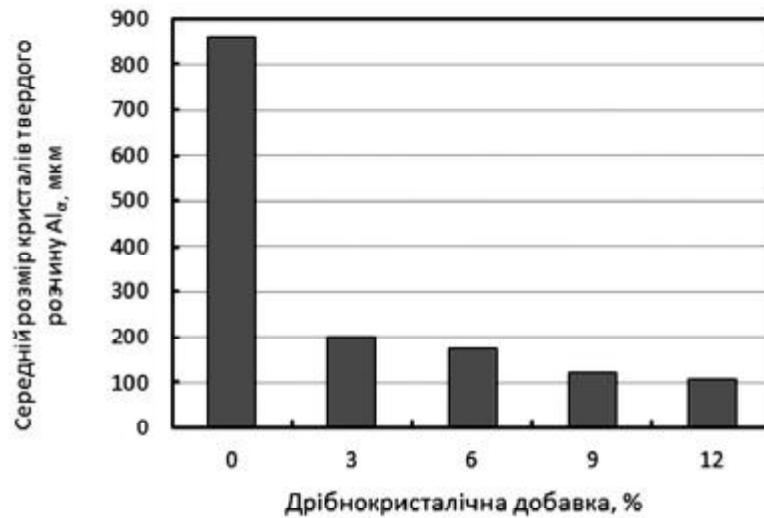


Рис. 4. Залежність середнього розміру кристалів твердого розчину Al_{α} в сплаві АМ4.5Кд (ВАЛ10) від масової частки дрібнокристалічних добавок, введених до розплаву.

Fig. 4. Dependence of the average size of Al_{α} crystals in the AM4.5Kd (VAL10) alloy on the mass fraction of finely crystalline additives introduced into the melt.

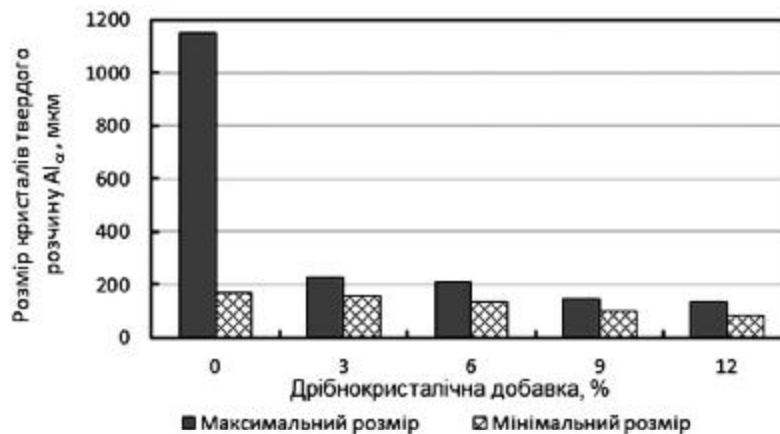


Рис. 5. Максимальний і мінімальний розмір кристалів твердого розчину Al_{α} в сплаві АМ4.5Кд (ВАЛ10) залежно від кількості дрібнокристалічних добавок, введених до розплаву.

Fig. 5. The maximum and minimum size of Al_{α} solid solution crystals in the AM4.5Kd alloy (VAL10) depending on the mass fraction of fine-crystalline additives introduced into the melt.

Можемо стверджувати, що одним з основних факторів модифікування сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) швидкоохолодженою лігатурою того ж складу є надходження до розплаву великої кількості готових центрів кристалізації. За принципом Данкова-Конобєєвського кристалографічна та розмірна відповідність елементів структури швидкоохолоджених добавок (лігатури) та сплаву, що модифікується, призводить до зменшення енергії утворення фаз при кристалізації. Можна припустити, що разом з появою додаткових центрів кристалізації, це є основою формування дрібнокристалічної структури виливків.

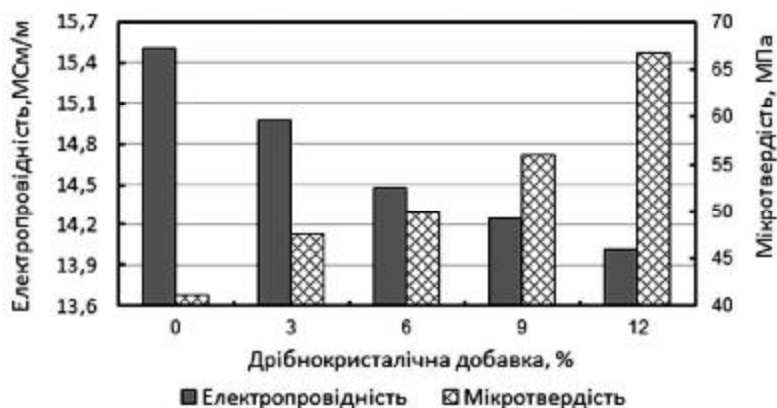


Рис. 6. Вплив модифікування дрібнокристалічними добавками на електропровідність і мікротвердість $\text{Al}\alpha$ сплаву AM4.5Kd (VAL10)

Fig. 6. The effect of modification with fine-crystalline additives on the electrical conductivity and the microhardness of $\text{Al}\alpha$ of the AM4.5Kd (VAL10) alloy.

Підвищення швидкості охолодження сплаву від $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ призводить до зміни його мікроструктури (рис. 7 а) і морфології кристалів твердого розчину алюмінію: з переважно грубої дендритної (рис. 3 а)

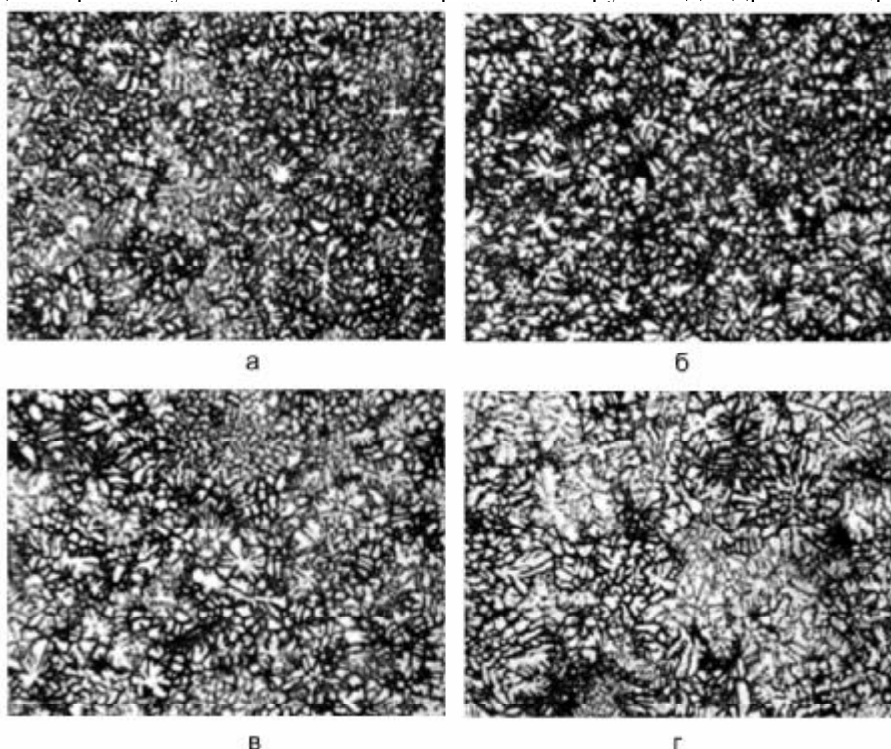


Рис. 7. Мікроструктура вихідного (а) і легованого дрібнокристалічними лігатурами (б-г) сплаву в литому стані при охолодженні розплаву зі швидкістю $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$. а – немодифікований сплав, б – модифікування $0,15\text{ }\%$ Ti, в – модифікування $0,05\text{ }\%$ Zr, г – модифікування $0,5\text{ }\%$ Zr.

Fig. 7. Microstructure of the original (a) and alloyed with fine crystal ligatures (b-d) in the cast state at cooling melt state at a rate of $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$. a – unmodified alloy, б – modification titanium $0.15\text{ }\%$, в – modification of $0.05\text{ }\%$ Zr, г – modification of $0.5\text{ }\%$ Zr.

на розгалужену дендритну, з утворенням гілок n -порядку (рис. 7 а). Зменшується дендритний параметр $Al\alpha$ з 78 мкм до 17 мкм, а також розмір інших структурних складових, збільшується об'ємна частка та ступінь диференціювання евтектики $Al\alpha + Al_2Cu$.

Модифікування титаном і цирконієм при їх оптимальних концентраціях призводить до зменшення розміру кристалів твердого розчину алюмінію. Зокрема, при 0,15 % титану в середньому більше ніж в 2-3 рази (рис. 7 б). Цирконій в кількості 0,5 % сприяє їх збільшенню в 1,5-2,0 рази (рис. 7 г). Подібну неоднозначну тенденцію впливу цирконію на структуру алюмінієвих сплавів у литому стані спостерігали також автори робіт [9, 10].

Вироби зі сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) використовуються лише в термообробленому стані. Мікроструктури термооброблених зразків зі сплаву, охолоджених у двофазній області зі швидкістю 1,8 °С/с, наведено на рис. 8. Вони відрізняються від литих немодифікованих сплавів, охолоджених з такою ж швидкістю (рис. 7).

Модифікування дрібнокристалічними добавками призводить до часткової глобулізації кристалів твердого розчину алюмінію, особливо при легуванні титаном в кількості 0,05 % і 0,15 %, коли перехід від дендритної до недендритної структури $Al\alpha$ спостерігається як при швидкості охолодження 1,8 °С/с, так і 33 °С/с. Позитивну роль титану в процесі одержання литих алюмінієвих сплавів з недендритною структурою відзначають і автори роботи [11]. Зі зниженням швидкості охолодження до 1,8 °С/с твердий розчин алюмінію глобулярної морфології виявляється і при 0,05 % цирконію.

Після гартування в структурі присутня нерозчинна в алюмінії надлишкова фаза Al_3Ti . Фаза Al_2Cu (θ) повністю переходить у твердий розчин алюмінію. Це забезпечує зміцнення сплаву при старінні [8] і збільшення мікротвердості $Al\alpha$ у вихідному сплаві з 55,3 МПа в литому стані до 152 МПа – після термообробки.

У структурі термооброблених виливків зменшується об'ємна частка евтектики $Al\alpha + Al_2Cu$, що пов'язано з розчиненням фази Al_2Cu . По границях і в об'ємі зерен твердого розчину алюмінію виділяються у великій кількості інтерметалідні фази розміром від 2 мкм до 7,7 мкм, з параметром форми близьким до 1. Також ледь помітні тонкі пластинчасті кристали фази Al_3Ti розміром до 15 мкм.

Модифікування дрібнокристалічними лігатурами призводить до зменшення розміру макрозерна (рис. 9) як при швидкості охолодження зразків 33 °С/с, так і 1,8 °С/с. Найбільш ефективно його зменшення при легуванні сплаву дрібнокристалічною лігатурою $AlTi5$ при введенні її до розплаву в перерахунку на чистий титан 0,05 % і 0,15 %. Проте, не дивлячись на те, що середній розмір макрозерна при цих концентраціях титану менший, ніж при модифікуванні цирконієвою лігатурою, в останньому випадку структура модифікованого сплаву більш однорідна (рис. 8 е-з) – з меншим відхиленням розміру макрозерен від їх середнього значення.

Разом з тим, найбільш високі показники міцності сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при модифікуванні його 0,05-0,25 % цирконію (рис. 10).

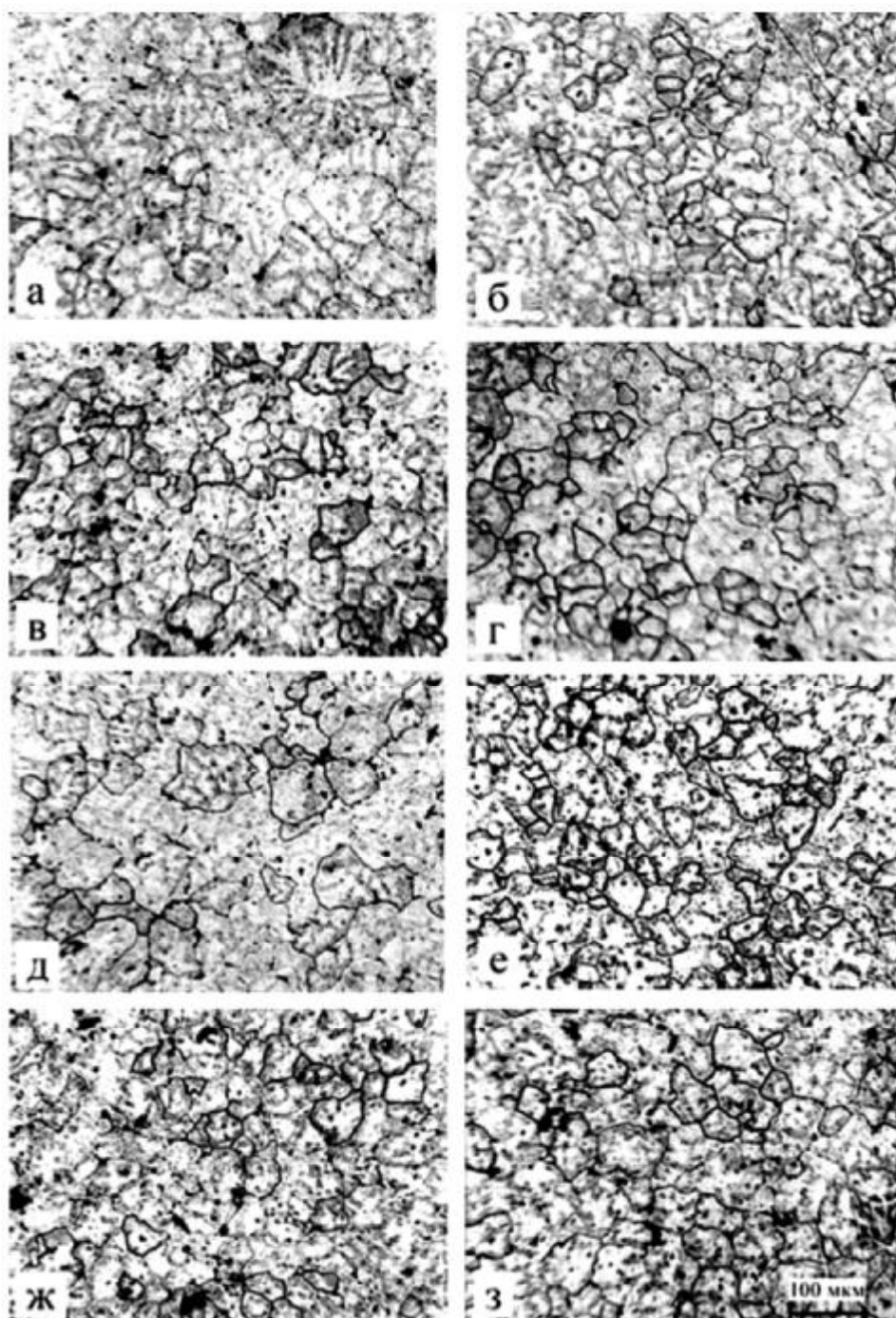


Рис. 8. Мікроструктури сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10), а – немодифікований сплав; б-з – модифікування дрібнокристалічними добавками («чіпси»); б – сплав ВАЛ10; в, г, д –лігатура AlTi5, в – 0,05 % Ti, г – 0,15 % Ti, д – 0,25 % Ti; е, ж, з – лігатура AlZr10, е – 0,05 % Zr, ж – 0,25 % Zr, з – 0,5 % Zr.

Fig. 8. Microstructures of AM4.5Kd alloy (VAL10), а – unmodified alloy; б-з – modification with fine crystal additives ("chips"); б – VAL10 alloy; в, г, д – ligature AlTi5, в – 0.05 % Ti, г – 0.15 % Ti, д – 0.25 % Ti; е, ж, з – ligature AlZr10, е – 0.05 % Zr, ж – 0.25 % Zr, з – 0.5 % Zr.

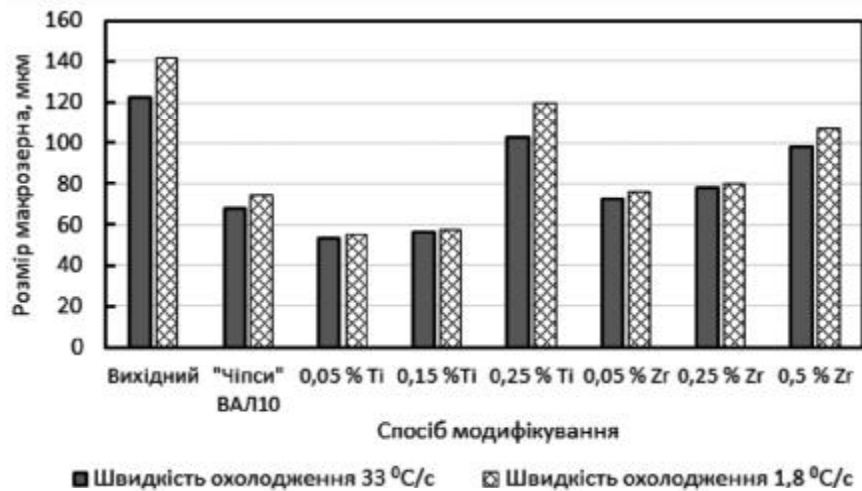


Рис. 9. Вплив способу модифікування і швидкості охолодження на розмір макрозерна в сплаві AM4.5Кд (ВАЛ10).

Fig. 9. Influence of the modification method and cooling rate on the size of the macrograin in the AM4.5Kd alloy (VAL10).

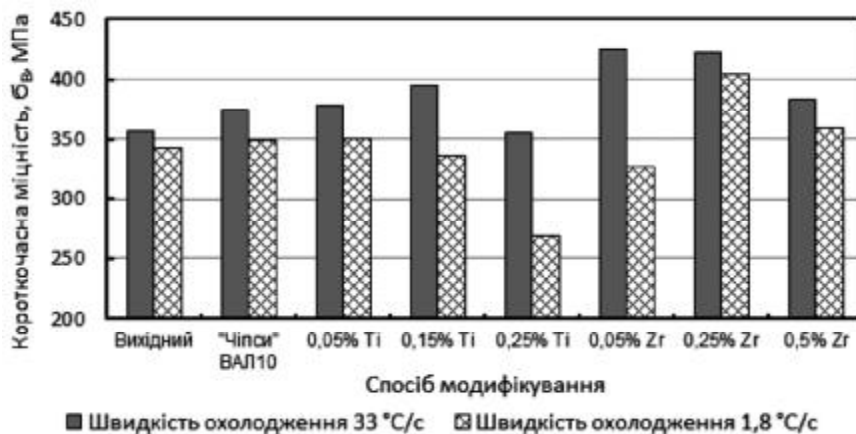


Рис. 10. Залежність короточасної міцності сплаву AM4.5Кд (ВАЛ10) від швидкості охолодження і способу модифікування.

Fig. 10. Dependence of the short-term strength of the alloy AM4.5Kd (VAL10) on the speed cooling and method of modification.

При цьому зафіксовано найбільшу мікротвердість $Al\alpha$ (рис. 11).

Слід вважати, це зумовлено збагаченням твердого розчину не тільки міддю, як це має місце у немодифікованому сплаві, але й цирконієм, який при швидкісному охолодженні лігатури ALZr10 здатний до 6 % розчинятися в алюмінії [10]. Внаслідок модифікування такою лігатурою утворюється твердий розчин алюмінію з більш високою концентрацією цирконію, ніж у рівноважному стані (близько 0,28 % цирконію) [12]. Тобто, крім розміру макрозерна, за яким у більшості випадків оцінюють ефективність модифікування і поліпшення механічних властивостей, не менш значимою характеристикою є ступінь пересиченості твердого розчину алюмінію. В

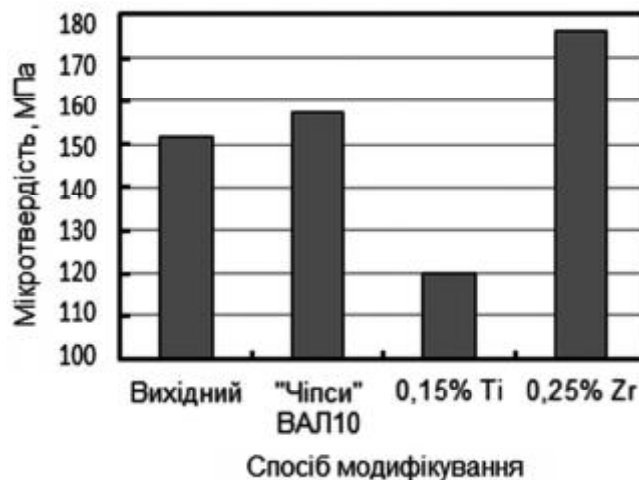


Рис. 11. Вплив способу модифікування на мікротвердість твердого розчину алюмінію в зразках сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10), одержаних при швидкості охолодження 1,8 °С/с.

Fig. 11. Effect of the modification method on the microhardness of the aluminum solid solution in AM4.5Kd (VAL10) alloy samples obtained at a cooling rate of 1.8 °C/s.

нашому випадку це атомами міді і цирконію, концентрація яких в твердому розчині алюмінію може регулюватися параметрами термічної обробки.

Трибологічні дослідження сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10), результати якого наведено на рис. 12, 13 і в табл. 2, показали позитивний вплив дрібнокристалічних лігатур на його зносостійкість.

Встановлено, що максимальна зносостійкість досягається при введенні до розплаву дрібнокристалічних добавок складу базового сплаву в

Таблиця 2

Коефіцієнт тертя та зношування сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при різних способах модифікування

Table 2

The coefficient of friction and wear of the alloy AM4.5Kd (VAL10) with different methods of modification

Зразок*	Вага до випробування, г	Вага після випробування, г	Втрата ваги, г	Коефіцієнт тертя
9-2	5,032	5,006	0,026	0.394
10	6,205	6,184	0,020	0.378
12-2	3,522	3,500	0,021	0.386
15-2	5,063	5,040	0,024	0.390

*Примітка: 9-2 – вихідний сплав; 10 – сплав, модифікований 12 мас. % «чіпсів» складу сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10); 12-2 – модифікований «чіпсами» з лігатури AlTi5 у перерахунку на 0,15 мас. % Ti; 15-2 – модифікований «чіпсами» з лігатури AlZr10 у перерахунку на 0,25 мас. % Zr.

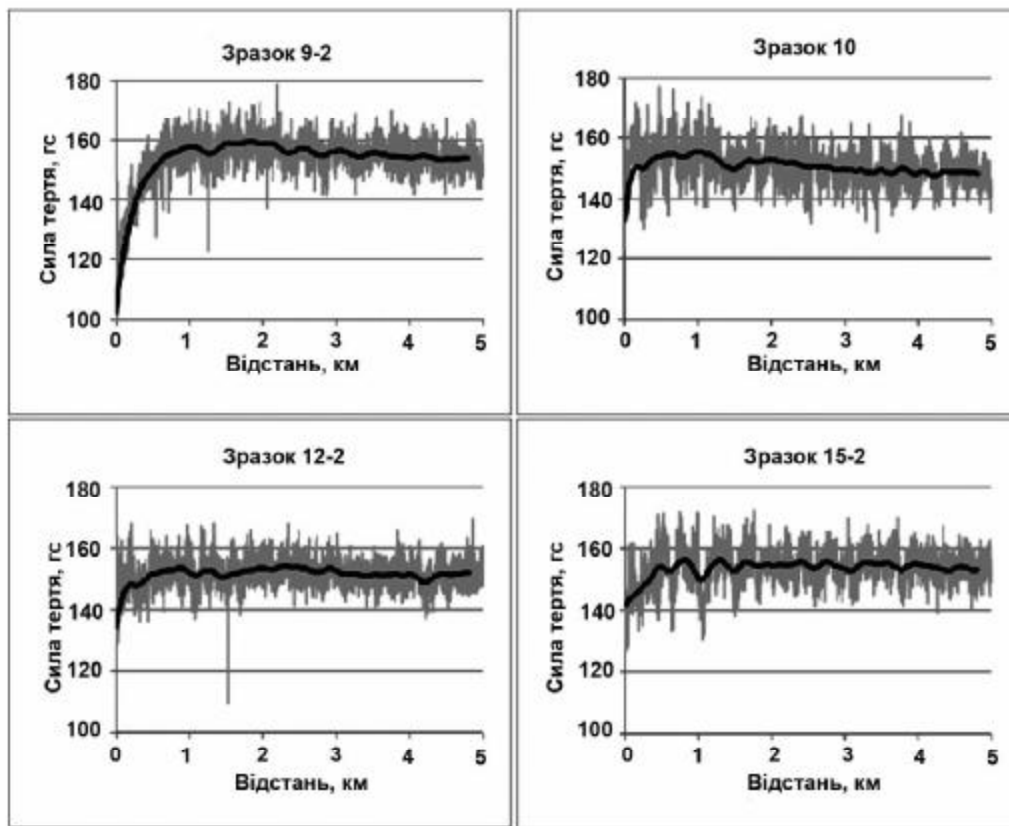


Рис. 12. Діаграма сили тертя зразків сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) при різних схемах його модифікування ($V_{\text{охол.}} = 33^\circ\text{C/s}$), 9-2 – немодифікований сплав; 10 – сплав, модифікований 12 % «чіпсів» зі сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10); 12-2 – модифікований 0,15 % Ti; 15-2 - модифікований 0,25 % Zr.

Fig. 12. Diagram of friction force of AM4.5Kd alloy samples (VAL10) with different schemes of its modification ($V_{\text{cool.}} = 33^\circ\text{C/s}$), 9-2 – unmodified alloy; 10 – alloy modified with 12 % of AM4.5Kd alloy "chips" (VAL10); 12-2 – modified 0,15 % Ti; 15-2 - modified 0,25 % Zr.

кількості 12 %. Це дозволяє на 21,5 % зменшити втрату ваги в процесі сухого тертя, на 4 % зменшити силу і коефіцієнту тертя (табл. 2, рис. 13), що сприяє подовженню терміну експлуатації виливків в умовах абразивного зношування.

Таким чином, модифікування сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) швидкоохолодженими ($V_{\text{охол.}} \geq 10^5^\circ\text{C/s}$) дрібнокристалічними лігатурами складу базового сплаву, AlTi5 і AlZr10 забезпечує отримання виливків з подрібненою структурою та покращеними механічними властивостями. Перехід від дендритної до недендритної структури при модифікуванні цими лігатурами найбільш ефективний при швидкості охолодження $0,4^\circ\text{C/s}$ і при додаванні титану (0,05-0,15 %) в разі отримання кокільних виливків ($V_{\text{охол.}} = 1,8-33^\circ\text{C/s}$). З підвищенням швидкості охолодження від $0,4^\circ\text{C/s}$ до 33°C/s збільшується розмірний фактор кристалів твердого розчину алюмінію, збільшується об'ємна частка евтектики $\text{Al}\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$. Термічна обробка призводить до зменшення кількості евтектики, до розчинення

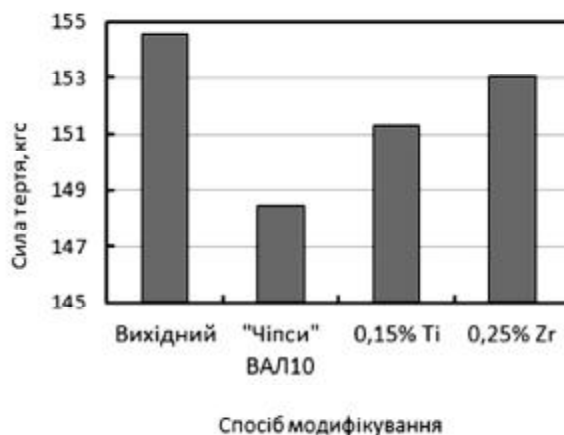


Рис. 13. Залежність сили тертя в сплаві АМ4.5Кд (ВАЛ10) від способу модифікування дрібнокристалічними лігатурами ($V_{\text{оохл.}} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$).

Fig. 13. Dependence of the friction force in AM4.5Kd alloy (VAL10) on the method of modification with fine crystal ligatures ($V_{\text{cool}} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$).

фази Al_2Cu в алюмінії і до збільшення ступеня пересиченості твердого розчину атомами міді і цирконію в разі модифікування лігатурою AlZr10 . Міцність термічно обробленого сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) збільшуються у послідовності: вихідний сплав $\rightarrow$ модифікований дрібнокристалічними добавками складу сплаву АМ4.5Кд (ВАЛ10) $\rightarrow$ модифікований дрібнокристалічною лігатурою AlTi5 у перерахунку 0,05-0,15 % титану $\rightarrow$ модифікований дрібнокристалічною лігатурою AlZr10 у перерахунку 0,05-0,25 % цирконію. Модифікування підвищує зносостійкість сплаву. Найбільша зносостійкість досягається при легуванні дрібнокристалічною лігатурою складу основного сплаву в кількості 12 %.

Література

1. Никитин В.И., Кривопапов Д.С., Никитин К.В. Наследственное влияние структуры лигатур на эффективность модифицирования сплава АК9ч // Литейщик России. – 2012 – №8. – С. 31-33.
2. Никитин В.И., Кривопапов Д.С., Никитин К.В. Влияние мелкокристаллических модификаторов AlSr10 , AlTi5 , AlTi5B1 и МКП на структуру и свойства сплава АК6М2 // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: Материалы 5-го Всероссийского научно-технического совещания. – Самара: СамГТУ. – 2013. – С. 188-195.
3. Бродова И.Г., Попель П.С., Бардин Н.М., Ватолин Н.А. Расплавы как основа формирования структуры и свойств алюминиевых сплавов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 369 с.
4. Кондратюк С.Є., Пархомчук Ж.В., Стоянова О.М., Щеглов В.М. Спадкове модифікування сталі. К. : Видавець Кравченко Я.О., 2018. – с. 130. ISBN 978-966-97775-5-3
5. Бондарев Б.И. Модифицирование алюминиевых деформируемых сплавов / Б.И. Бондарев, В.И. Напалков, В.И. Тарарышкин. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.

6. Пригунова А.Г., Жидков Є.А., Бабюк В.Д., Борисов А.Г., Шеневідько Л.К. Вплив швидкості охолодження на структуроутворення сплаву АМ4,5КД (ВАЛ10) // *Металознавство та обробка металів*. – 2022. – №1. – С. 29-37.
7. Салтыков С.А. *Стереометрическая металлография*. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
8. Захаров А.М. *Промышленные сплавы цветных металлов. Фазовый состав и структурные составляющие* / А.М. Захаров. – М., 1980.
9. Сергиенко Р.А., Щерецкий А.А., Наumenко М.И., Лукашук А.И., Верховлюк А.М. Разработка эффективного способа модифицирования высокопрочного алюминиевого сплава В96ц (7050) // В кн.: *матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції Нові матеріали і технології в машинобудуванні*. - 2021. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 154- 160.
10. Кривопалов Д. С. Применение микрокристаллических модификаторов при подготовке алюминиевых расплавов к литью с целью повышения качества литых изделий // *Автореф. дисс. ... канд. техн. наук.* – Нижний Новгород. – 2016. – 20 с.
11. Белик В.И., Пригунова А.Г., Дука В.М., Семенченко А.И., Цир Т.Г. Эффективность быстроохлажденной лигатуры AlTi5 в условиях прямого термического метода реолития // *Процессы литья*. 2018. № 4 (130). – С. 3-11.
12. Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов* / пер. с англ. под ред. Квасова Ф.И., Строганова Г.Б., Фридляндера И.Н. – М.: Металлургия, 1979. – 64 с.

References

1. Nikitin V.I., Krivopalov D.S., Nikitin K.V. *Liteyshchik Rossii*, 2012, No.№ 8, pp. 31-33. [in Russian].
2. Nikitin V. I., Krivopalov D. S., Nikitin K. V. *Influence of fine-grained AlSr10, AlTi5, AlTi5B1 modifiers and FGR on the structure and properties of the AK6M2, Interaction of science and foundry and metallurgical production: Materials of the 5th All-Russian scientific and technical meeting*, Samara, SamGTU, 2013, pp. 188-195. [in Russian].
3. Brodova I. G., Popel P.S., Bardin N.M., Vatolin N.A., *Melts as the basis for the formation of the structure and properties of aluminum alloys*, Yekaterinburg: UrO RAN, 2005, 369 p. [in Russian].
4. Kondratyuk S.Ye., Parkhomchuk Z.V., Stoyanova O.M., Shchekhlov V.M. *Spadkove modyfikuvannya stali* (Hereditary modification of steel), Kyiv : Vydavets' Kravchenko Ya.O., 2018, p. 130. ISBN978-966-97775-5-3. [in Ukrainian].
5. Bondarev B. I., Napalkov V. I., Tararyshkin V. I. *Modification of aluminum wrought alloys*, M.: Metallurgiya, 1979, 224 p. [in Russian].
6. Prygunova A.G., Zhydkov Y.A., Babiuk V.D., Borisov A.G., Shenevidko L.K. *Metaloznastvo ta obrobka metaliv*, 2022, №1, pp. 29-37. [in Ukrainian].
7. Saltykov S.A. *Stereometric metallography*, M.: Metallurgy, 1976. – 272 p. [in Russian].
8. Zaharov A. M. *Industrial alloys of non-ferrous metals. Phase composition and structural components*, M., 1980. [in Russian].
9. Sergienko R.A., Scheretsky A.A., Naumenko M.I., Lukashuk A.I., Verkhovlyuk A.M. *Development of an effective method for modifying high-strength aluminum alloy V96ts (7050)*, In the book: materials of the XIII International Scientific and Technical Conference New materials and technologies in machine-building, 2021, Kyiv: KPI im. Igor Sikorsky, 2021, pp. 154-160. [in Russian].
10. Krivopalov D.S. *Application of microcrystalline modifiers in the preparation of aluminum melts for casting in order to improve the quality of cast products*.

- Abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences, Nizhny Novgorod, 2016, 20 p. [in Russian].
11. Belik V.I., Prigunova A.G., Duka V.M., Semenchko A.I., Tsir T.G. *Processes of casting*, 2018, No. 4 (130), pp. 3-11. [in Russian].
 12. Mondolfo L.F. *Structure and properties of aluminum alloys*, per. from English. ed. Kvasova F.I., Stroganova G.B., Fridlyandera I.N. - M.: Metallurgy, 1979, 64 p. [in Russian].

Одержано 02.09.22

Prigunova A. G., Zhydkov Y. A., Babiuk V. D., Shenevidko L. K., Tsir T. G.

Management the structure and properties of cast aluminum alloy AM4.5Kd (VAL10) by modification with fine crystalline ligatures

Summary

To management the structure, mechanical and operational properties of the high-strength cast aluminum alloy AM4.5Kd (БАЛ10), the work uses a modification method based on the principle of structural inheritance, using rapidly cooled ($V_{cool} \geq 10^5$ °C/s) fine-crystal ligatures AlTi5 and AlZr10, and as well as ligatures of the chemical composition of the base alloy with nanoscale size of intermetallics and $Al\alpha$ crystals.

Studies have shown that the introduction of fine-crystalline additives into the melt leads to a transition from a dendritic to a non-dendritic structure, a significant decrease in the size of the crystals of the $Al\alpha$ solid solution, and an increase in its degree of supersaturation. The microstructure becomes more uniform – the difference between the maximum and minimum size of the grains decreases. The most effective reduction of the grain size and the transition from dendritic to non-dendritic structure of the aluminum solid solution at increased cooling rates occurs when alloying with fine-crystal AlTi5 ligature introduced into the melt in terms of pure titanium 0.05-0.15 wt. %. We must think that the main factor of modification by rapidly cooled ligatures is the introduction of a large number of additional crystallization centers into the melt.

After T6 heat treatment, the highest strength of AM4.5Kd alloy (VAL10) is achieved when modified with AlZr10 ligature, in particular, with a mass fraction of zirconium of 0.25 %. Probably, this is mainly due to the expansion of the region of the solid solution of copper and zirconium in aluminum during high-speed cooling and its subsequent disintegration during heat treatment with the release of strengthening nano-sized $CuAl_2$ and Al_3Zr phases. Tribological studies of AM4.5Kd alloy (VAL10) were carried out. The alloy modified with fine crystal ligature of the base alloy composition in the amount of 12 wt.% has the highest wear resistance.

Keywords: fine crystal ligatures, AM4.5Kd (VAL10), modification, microstructure, strength, wear resistance.