

УДК 669.046.516

Д.В. Іванченко*, асистент; e-mail: cortdm77@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0001-6162-8537>

М.М. Ямшинський*, докт. техн. наук, професор,

e-mail: yamshinskiy@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

І.Я. Петрик**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: iyap@ukr.net;

<http://orcid.org/0000-0003-0863-5476>

І.В. Лук'яненко*, канд. техн. наук, доцент;

e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Є.П. Чвертко*, канд. техн. наук, доцент; e-mail: e.chvertko@kpi.ua;

<https://orcid.org/0000-0003-3073-1034>

Б.В. Кивгило*, асистент; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

Р.В. Лютий*, докт. техн. наук, доцент; e-mail: rvl2005@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

Є.Г. Биба*,***, канд. техн. наук, доцент;

e-mail: byba.evgen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

І.А. Владимирський*, докт. фіз.-мат. наук;

e-mail: vladymyrskiy@kpm.kpi.ua; <http://orcid.org/0000-0002-2106-9176>

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

**Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)

***Інститут прикладних систем управління Національної академії наук України (Київ, Україна)

ЗМІНА СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛИВАРНОГО СПЛАВУ AM5, ЗМІЦНЕНОГО Zr

У роботі досліджено вплив модифікування ливарного сплаву AM5 Zr, введеним до розплаву у складі флюсової композиції на основі тетрафториду цирконію, на зміну структури та механічних властивостей сплаву. Актуальність дослідження зумовлена потребою у створенні високоякісних сплавів системи Al–Cu з підвищеною міцністю та стабільною мікроструктурою для застосування в авіаційній і автомобільній промисловості. У статті проаналізовано сучасний стан досліджень щодо легування та модифікування сплавів системи Al–Cu, зокрема із застосуванням елементів перехідної групи, та доведено перспективність використання Zr як ефективного модифікатора. Методика досліджень передбачала проведення плавлення сплаву із введенням комплексного флюсу, який являв собою суміш тетрафториду цирконію та фториду літію (співвідношення сполук ZrF_4 та LiF у композиції 1:1,2) при температурах 750 °C та 900 °C із витримкою 15 хв. Для оцінки механічних властивостей використовували випробування на одновісний розтяг стандартних зразків у литому стані та після термічної обробки за режимом T5. Хімічний склад і мікроструктуру проаналізовано методами енергодисперсійного

рентгеноспектрального та рентгенофлуоресцентного аналізу, а також растрової електронної мікроскопії. Для статистичної обробки даних застосовано повний факторний експеримент типу 2^2 та регресійний аналіз, що дозволяє прогнозувати вплив температури плавлення і концентрації ZrF_4 на показники міцності та пластичності на основі отриманих в даному дослідженні експериментальних результатів. Отримані експериментальні дані переконливо свідчать, що введення Zr до розплаву зумовлює формування інтерметаліду Al_3Zr , який слугує центром кристалізації та перешкоджає росту зерен, забезпечуючи подрібнення структури. Термічна обробка за режимом T5 сприяє дисперсійному зміцненню сплаву завдяки утворенню дрібних вкраплень фази $CuAl_2$ та підвищенню однорідності структури. Встановлено, що найкращі механічні характеристики досягаються в результаті введення до розплаву 2 % ZrF_4 при температурі 750 °C у поєднанні з подальшою обробкою за режимом T5: тимчасовий опір розриванню становить ~365 МПа, що перевищує показники немодифікованого сплаву на 10...20 %. При цьому відносно подовження залишається на рівні ~5 %, тобто зміцнення сплаву не призводить до втрати ним характеристик пластичності. Зроблені висновки підтверджують ефективність використання комплексних флюсів із Zr для модифікування алюмінієвих сплавів, оскільки вони дозволяють одночасно підвищити міцність і зберегти достатній рівень пластичності, що робить можливим їх застосування у відповідальних конструкційних елементах авіаційної та автомобільної техніки.

Ключові слова: алюмінієво-мідні сплави, цирконій, тетрафторид цирконію, зміцнення, структура, модифікування, механічні властивості.

Вступ

Алюмінієві сплави посідають провідне місце серед конструкційних матеріалів завдяки унікальному поєднанню властивостей: високій міцності при низьких і високих температурах, малій густині, сприятливих ливарних характеристиках та високій корозійній стійкості [1]. Особливо затребуваними є сплави системи Al–Cu, що характеризуються високою питомою міцністю, жаростійкістю та низьким коефіцієнтом теплового розширення, що робить їх ефективними для використання в авіаційній та автомобільній промисловостях [1]. Разом із цим сплави даного класу чутливі до утворення дефектів литої структури та схильні до розтріскування під час кристалізації, що спричинює необхідність використання модифікаторів і розроблення оптимальних режимів їх термічної обробки. Висока міцність цих сплавів дозволяє їм конкурувати із сучасними композитними матеріалами, особливо для виготовлення виробів авіакосмічної техніки [1], а розвиток адитивних та нетрадиційних технологій отримання, зокрема тривимірного друку, відкриває нові перспективи виробництва деталей із сплавів системи Al–Cu.

Закономірності впливу легувальних елементів та обробки на механічні властивості сплавів на основі Al нині широко досліджують. Для литого сплаву ZL205A встановлено, що введення Cd в поєднанні з ультразвуковою обробкою підвищують міцність і рівномірність розподілу елементів, при цьому оптимальний вміст Cd складає 0,20 % [2]. Гаряче деформування литих заготовок Al–Cu–Li при температурах 300...500 °C та швидкості деформування $\sim 1 \text{ c}^{-1}$ до величини деформації 60 % забезпечує ефективну рекристалізацію та рівномірний розподіл вкраплень фаз — Al_2CuLi , Al_2Cu , тоді як високі швидкості обробки ($0,001 \text{ c}^{-1}$) спричиняють утворення додаткових дефектів структури [3]. Додавання Cd впливає на утворення рівноважних фаз Al–Cu–Li грубої морфології та пригнічує участь Cu і Li у формуванні зміцнювальних фаз [4]. Однак сьогодні використання Cd для легування сплавів на основі Al має обмежений характер, що зумовлено комплексом токсикологічних, екологічних та технологічних чинників. Натомість набуває розвитку використання інших легуючих елементів — Ag, Sc, Zr, In, Mn, які забезпечують вищу міцність, стабільність структури та не несуть суттєвих екологічних ризиків.

Розробка технології виробництва нових жароміцних сплавів шляхом лазерного порошкового наплавлення з додаванням Ti та Ag сприяє подрібненню зерен за рахунок формування когерентних частинок $(Al_{1-x}Me_x)_3Ti$ та Ag_2Al [5]. Аналогічно модифікатори Al_3Ti – Al_2O_3 /Al забезпечують значне подрібнення зерен у сплавах

Al–Cu–Mn [6], тоді як легування Ti сплавів Al–Cu покращує високотемпературні властивості, підвищуючи межу міцності до 203,9 МПа при температурі 300 °C [7]. Одночасне легування сплавів системи Al–Cu Mn та Zr стабілізує виділення фаз Al_2Cu та $(Ti_{1-x}Zr_x)Al_3$, а також забезпечує високу міцність при температурі понад 300 °C [8]. Додавання аморфного сплаву Ni–Nb–Ti дозволяє зменшити розмір зерна α -Al та фази Al_2Cu , а також підвищити тимчасовий опір розриванню і величину деформації. Так, при температурі ~200 °C межа міцності на розрив і величина деформації при руйнуванні сплаву системи Al–Cu, інокульованого 0,05 мас. % Ni–Nb–Ti, збільшуються на 29,97 % і 146,15 % при швидкості деформування 10^{-4} c^{-1} (312,6 МПа і 7,15 %). Ці самі параметри при швидкості деформування 10^{-1} c^{-1} становлять 406,3 МПа і 17,60 %, відповідно [9].

Результати дослідження впливу термічної обробки сплавів системи Al–Cu, легуваних Mn, Zr та Ag, на їхні механічні властивості підтверджують визначальну роль інтерметалідних фаз і вкраплень у підвищенні міцності, подрібненні зерен і стабілізації структури під час високотемпературних випробувань [10, 11, 12, 13]. Установлено, що рівноканальне кутове пресування, що є одним із розповсюджених процесів пластичної деформації сплаву Al–4 %Cu, викликає зменшення розміру зерен до 200...300 нм, сприяє підвищенню міцності і дозволяє досягти ефективного закріплення дислокацій при наявності дрібнодисперсних вкраплень [14]. Також відомо, що старіння композитних матеріалів $TiB_2/Al-4,5Cu$ прискорює досягнення високої міцності завдяки впливу частинок TiB_2 на розподіл вкраплень фази Al_2Cu [15].

Таким чином, результати сучасних досліджень свідчать, що ефективно поєднання контролю параметрів мікроструктури, легування, термічної обробки та модифікування дозволяє отримати сплави системи Al–Cu з високою міцністю, жароміцністю та покращеною пластичністю, що відкриває широкі перспективи їх застосування в авіаційній, автомобільній та енергетичній промисловості. Ключовими викликами залишаються пошук оптимального співвідношення між підвищенням міцності та забезпеченням достатнього рівня пластичності, оптимізацією складу сплаву, режимами термічної обробки та використанням сучасних ефективних технологій виробництва.

Постановка задачі. Аналіз літературних даних засвідчив, що формування зміцнювальних фаз, досягнення їх рівномірного розподілу за об'ємом сплаву та стабілізація отриманої мікроструктури є актуальним дослідницьким завданням. Зокрема, необхідно підібрати оптимальний вміст Zr у сплаві AM5, що забезпечує максимально можливу міцність сплаву без втрати пластичності та дослідити особливості формування мікроструктури матеріалу залежно від параметрів легування.

Технологія плавлення сплаву AM5. Плавка ливарного сплаву системи Al–Cu типу AM5 проводилася у два етапи. На початковому етапі у розплавлений і доведений у шахтній печі опору до температур 750...900 °C Al марки A7 вводили тетрафторид цирконію у складі механічної суміші системи ZrF_4 –LiF (співвідношення компонентів — 1:1,2). Суміш наносили на ретельно очищену поверхню Al, витримували до розплавлення флюсу та замішували в розплав до повного розчинення. Розплав витримувався при заданій температурі впродовж 15 хв. Отриманий сплав розливали у виливницю. Наступним етапом розплавляли отриманий сплав у печі опору шахтного типу, вводили Mn за допомогою лігатури та розчиняли Cu, використовуючи прутки міді електролітичної чистоти. Запропонована флюсова композиція забезпечує мінімальну температуру плавлення такої суміші, а отже — максимальну її реакційну здатність.

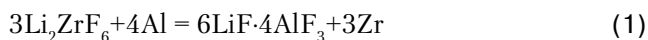
Оскільки у литому стані механічні властивості сплаву AM5 є незадовільними, з метою їх покращення застосовано термічну обробку за режимом T5 у лабораторній камерній печі опору СНОЛ-1.6.2.5.1/11-12, яка відбувалася шляхом двоступінчастого нагрівання під гартування до температури 535 ± 5 °C з витримкою упродовж 5 год та подальшим гартуванням у воду і подальшим штучним старінням при температурі 175 ± 5 °C упродовж 6 год.

Дослідження механічних властивостей сплаву AM5 у литому стані та після термічної обробки здійснювали з використанням розривної машини типу FP 100/1

Кристалізація та структуроутворення сплавів

на стандартних зразках при кімнатній температурі за результатами випробувань визначали тимчасовий опір розриванню та відносне подовження. Хімічний аналіз зразків проводили методом рентгенофлуоресцентного аналізу за допомогою приладу Expert 3L. Дослідження мікроструктури зразків та виявлення локального хімічного складу методом енергодисперсійного рентгеноспектрального аналізу проводили за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ 106-И.

Особливості відновлення Zr у середовищі Al із його тетрафториду. Процес відновлення Zr із його тетрафториду полягає ось у чому: після розчинення ZrF_4 у сполуці LiF утворюються такі комплексні сполуки, як Li_3ZrF_7 , Li_2ZrF_6 (при температурі 600 °C та вище). Далі, згідно з [16], відбувається відновлення Zr з цих фторцирконатів шляхом відповідної хімічної реакції:



При вмісті Zr у алюмінієвому розплаві у кількості більшій за межу розчинності (0,28...1,9 % Zr в інтервалі температур від 660 до 1000 °C) відбувається утворення інтерметаліду з Al за реакцією:



або у загальному випадку:



Результати та їх обговорення

Сплави системи Al–Cu не містять легувальних елементів (табл. 1), які були б схильні до інтенсивного окиснення під час введення флюсових композицій. У зв'язку з цим для інтенсифікації процесу відновлення Zr із його сполук доцільно підвищувати температуру введення флюсу до 900 °C. Підвищення температури сприяє більш ефективному руйнуванню оксидних плівок, полегшує контакт Zr із відновлювальними компонентами флюсу та забезпечує прискорене формування металевої фази цирконію у розплаві, що підвищує рівномірність його розподілу і стабільність у сплаві.

Таблиця 1

Хімічний склад ливарного сплаву AM5

Сплав	Компоненти, %						Домішки, %	
	Cu	Mn	Ti	Zr	Cd	Інші	Fe	Si
Al–5 % Cu	4,0–5,0	0,6–1,0	–	–	–	–	≤1,0	≤1,2

У табл. 2 наведено механічні характеристики — тимчасовий опір розриванню і відносне подовження — сплаву AM5 у литому стані та після термічної обробки за режимом Т5 залежно від температури розплаву та концентрації тетрафториду цирконію, введеного до розплаву. Зазначимо, що тимчасовий опір розриванню і відносне подовження сплаву AM5, закристалізованого без додавання Zr і підданого подальшій термічній обробці, становлять 330 МПа і 5 %, відповідно.

Аналіз отриманих результатів (див. табл. 2) засвідчує, що тимчасовий опір розриванню збільшується зі збільшенням кількості введеного Zr або в результаті одночасного збільшення кількості Zr, введеного до розплаву, та підвищення температури розплаву. Підвищення температури розплаву знижує тимчасовий опір розриванню, що характерно як для литого стану, так і після обробки виливка за режимом Т5. Введення Zr до розплаву також сприятиме збільшенню відносного

Таблиця 2

Механічні властивості сплаву AM5 у литому стані та після термічної обробки залежно від параметрів плавлення

Концент- рація ZrF_4 у розплаві, %	Температура розплаву, °C	Литий стан		Після термічної обробки	
		Тимчасовий опір розриван- ню (σ_b), МПа	Відносне подовжен- ня (d), %	Тимчасовий опір розриван- ню (σ_b), МПа	Відносне подовжен- ня (d), %
1	750	179	3,75	330	3,20
2	750	211	7,10	365	5,00
1	900	157	3,20	258	1,25
2	900	203	3,00	360	3,25

подовження, натомість підвищення температури розплаву має зворотній ефект. Проте збільшення кількості Zr у розплаві з одночасним підвищення температури буде суттєво знижувати відносне подовження тільки литого сплаву, практично не знижуючи цю характеристику для сплаву, обробленого за режимом T5.

Найвищі показники механічних властивостей вилівка забезпечують Zr, введений із тетрафториду цирконію у кількості 2 % при температурі 750 °C в поєднанні з термічною обробкою за режимом T5 ($\sigma_b \sim 365$ МПа, $\delta \sim 5,0$ %).

Загальновідомо, що підвищення значень механічних характеристик сплаву AM5 з додаванням Zr унаслідок термічного впливу має таке пояснення: у литому стані сплав характеризується наявністю грубих евтектичних включень уздовж меж зерен, що зумовлює підвищену крихкість та нерівномірний розподіл властивостей за перерізом вилівка. Застосування термічної обробки за режимом T5 сприяє частковій трансформації пересиченого твердого розчину та утворенню дрібнодисперсних частинок фази Al_3Zr в матриці, що підвищує міцність і твердість сплаву при збереженні достатньої пластичності, зменшує схильність до міжкристалітної крихкості й трансформує структуру на більш рівномірну, порівняно з литим станом. Таким чином, застосування режиму T5 забезпечує суттєве покращення експлуатаційних характеристик сплаву.

З метою забезпечення можливості надійного прогнозування механічних властивостей сплаву AM5 в залежності від параметрів плавлення — кількості введеного до розплаву Zr із його тетрафториду і температури розплаву, на основі експериментальних даних, наведених у табл. 2, сплановано повний факторний експеримент виду 2^2 , який дозволяє досліджувати два фактори на двох рівнях та оцінювати не лише їх основні ефекти, а й результат взаємодії між собою. Цей підхід забезпечує економічну та статистично обґрунтовану методику отримання даних із мінімальною кількістю експериментальних точок. Результати такого експерименту дозволяють прогнозувати показники міцності сплаву та оптимізувати технологічні параметри лиття й очищення. Прийнято таке позначення факторів та відгуків: кількість тетрафториду цирконію, введеного до розплаву — x_1 ; температура розплаву — x_2 ; тимчасовий опір розриванню у литому стані — y_1 ; тимчасовий опір розриванню після термічної обробки — y_2 ; відносне подовження у литому стані — y_3 ; відносне подовження після термічної обробки — y_4 .

Отримані такі рівняння регресії (у кодованому вигляді), що описують залежність межі тимчасового опору розриванню та відносного подовження сплаву AM5 у литому стані та після обробки за режимом T5 від параметрів плавлення:

$$y_1 = 187,525 + 19,475 \cdot x_1 - 7,525 \cdot x_2 + 3,525 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$y_2 = 327,975 + 34,275 \cdot x_1 - 19,225 \cdot x_2 + 16,575 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$y_3 = 4,26 + 0,79 \cdot x_1 - 1,16 \cdot x_2 + 0,89 \cdot x_1 \cdot x_2$$

$$y_4 = 3,175 + 0,95 \cdot x_1 - 0,925 \cdot x_2$$

Отримані рівняння регресії дають можливість прогнозувати механічні властивості сплавів залежно від керованих технологічних параметрів, оптимізувати режими їх оброблення та підвищувати ефективність розроблення нових матеріалів із заданим комплексом характеристик, що дозволить зменшити кількість експериментальних випробувань і забезпечити прогнозоване досягнення необхідного рівня міцності та пластичності.

З метою встановлення адекватності отриманих рівнянь регресії та виявлення значущості обчислених їх коефіцієнтів розраховано критерій Кохрена для кожного регресійного рівняння, значення якого перебуває у межах $G_{f_1, f_2}^p = 0,2 \dots 0,6$. Розраховане значення є істотно меншим за табличне, яке для умов $f_2 = N = 4$ та $f_1 = n - 1 = 2$ (N — кількість експериментів у повному факторному досліді, n — кількість виливків, отриманих у кожному досліді) становить $G_{f_1, f_2}^p = 0,767$, що свідчить про адекватний характер отриманих регресійних рівнянь. Також на основі критерію Стюдента встановлено достатню значимість обчислених коефіцієнтів.

Для виявлення механізму зміцнення сплаву AM5 проведено дослідження мікроструктури виливків до та після введення Zr із його тетрафториду. Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури немодифікованого сплаву AM5, закристалізованого із розчину, витриманого при температурі 750 °C упродовж 15 хв без введення Zr, і підданого подальшій термічній обробці за режимом T5, представлено на рис. 1.

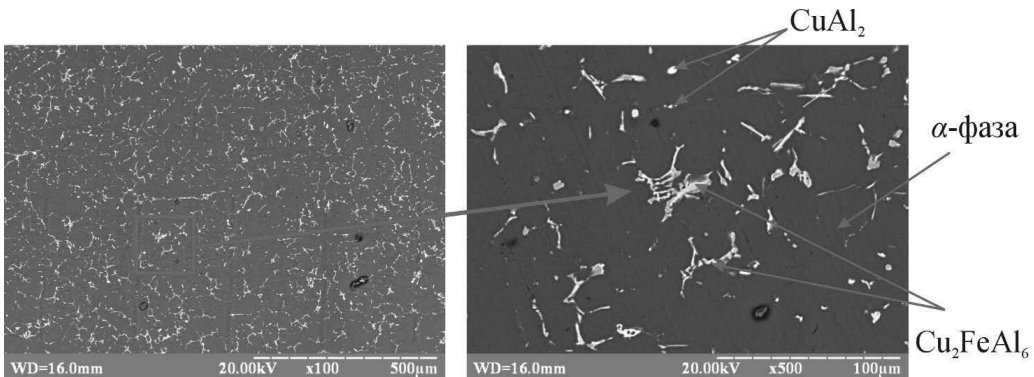


Рис. 1. Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури сплаву AM5, закристалізованого із розчину без введення Zr

Структура сплаву AM5 без Zr являє собою твердий розчин Cu, Mn та Fe в алюмінії (α -фаза) з включеннями, за складом наближеними до фаз CuAl_2 та Cu_2FeAl_6 , які переважно локалізуються на межах зерен α -розчину. Хімічний склад краплень визначено методом енергодисперсійного рентгеноспектрального аналізу, результати якого наведено у табл. 3 (відповідні області проведення локального хімічного аналізу позначено на рис. 2). Крім того, при детальнішому вивченні можна бачити, що сплав має дендритну структуру з великими зернами α -Al, евтектичними включеннями CuAl_2 в міждендритних областях, а також фазами на основі Fe та Mn. Така структура призводить до помірної міцності ($\sigma_B \approx 330$ МПа), але зумовлює низьку стійкість до рекристалізації та термічних навантажень, а також схильність

Таблиця 3

Локальний хімічний склад сплаву AM5, закристилізованого із розчину без введення Zr (області дослідження позначено на рис. 2)

Область дослідження	Вміст елементів, %			
	Al	Mn	Fe	Cu
точка 1	22,91	3,57	18,82	54,71
точка 2	95,95	0,03	0,21	3,81
точка 3	25,68	5,68	23,5	45,14
точка 4	29,39	3,47	14,01	53,13

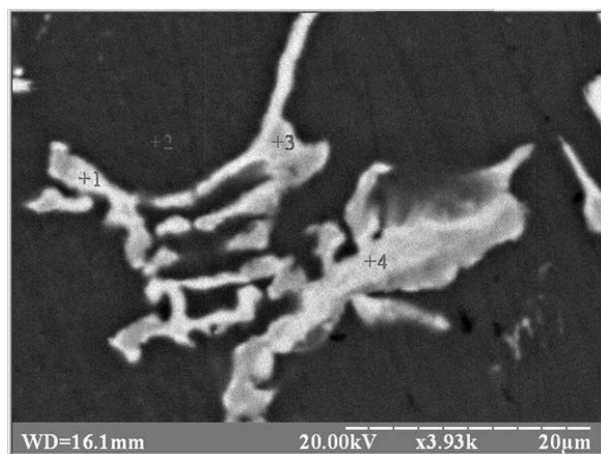


Рис. 2. Електронно-мікроскопічне зображення мікроструктури сплаву AM5, закристилізованого із розчину без введення Zr, із позначенням локальних областей визначення хімічного складу

рентгеноспектрального аналізу, результати якого наведено у табл. 4 (відповідні області проведення локального хімічного аналізу представлено на рис. 4).

Додатково необхідно зауважити, що інтерметалід Al_3Zr , який має тетрагональну структуру і формується у вигляді дисперсоїдів розмірами 1...20 мкм, фіксує межі зерен, запобігаючи їх росту під час термічної обробки. Водночас фаза $CuAl_2$ з'являється як евтектична, але в модифікованому сплаві вона дрібніша та більш

до грубозернистості, що забезпечує доволі високу пластичність ($\delta \sim 5,0\%$). Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури сплаву AM5, закристилізованого із розчину, до якого введено Zr із суміші ZrF_4 та LiF, і підданого подальшому термічному впливу, представлено на рис. 3. Аналіз мікроструктури свідчить, що Zr в основному зосереджується на межах зерен у складі інтерметалідних фаз.

Установлено, що тимчасовий опір розриванню зміцненого цирконієм сплаву, становить ~ 365 МПа, що перевищує показник немодифікованого сплаву (330 МПа), а відносно подовження $\delta \sim 5,0\%$ залишається на рівні вихідного сплаву. Даний результат підтверджує, що легування Zr підвищує міцність без зниження пластичності, що є важливою перевагою з точки зору експлуатаційних властивостей матеріалу. При модифікуванні Zr структура сплаву суттєво подібнюється завдяки утворенню інтерметаліду Al_3Zr , які діють, з одного боку, як центри зародкоутворення, з іншого — як інгібітори росту зерен, що сприяє підвищенню механічних властивостей. Хімічний склад вкраплень визначено методом енергодисперсійного

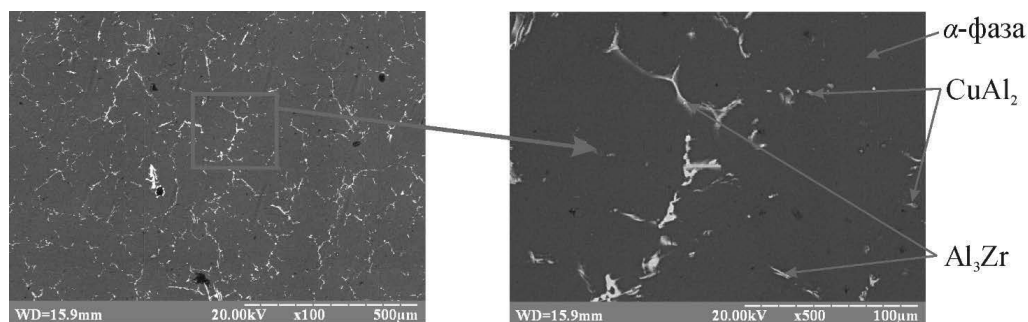


Рис. 3. Електронно-мікроскопічні зображення мікроструктури сплаву AM5, закристилізованого із розчину, до якого введено ZrF_4 (2 %)

Таблиця 4
Локальний хімічний склад сплаву АМ5, закристалізованого із розчину, до якого введено Zr (області дослідження позначено на рис. 4)

Область дослідження	Вміст елементів, %				
	Al	Mn	Fe	Cu	Zr
точка 1	52,28	0,56	–	0,55	46,61
точка 2	56,52	2,57	7,58	32,50	0,83
точка 3	47,86	0,17	0,34	1,44	50,19
точка 4	29,48	2,57	14,58	53,38	–
точка 5	92,90	0,65	0,12	6,33	–

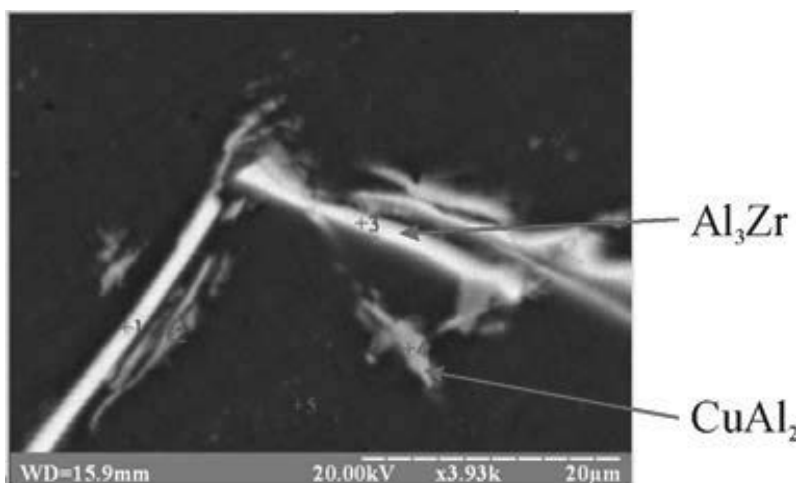


Рис. 4. Електронно-мікроскопічне зображення мікроструктури сплаву АМ5, закристалізованого із розчину, до якого введено ZrF_4 (2 %), із позначенням локальних областей визначення хімічного складу

рівномірно розподілена, що сприяє зменшенню концентрації напружень. Загалом, модифікування Zr перетворює грубу дендритну структуру на більш однорідну та дрібнозернисту, покращуючи механічні характеристики.

Результати дослідження можна пояснити тим, що введення у флюсову композицію ZrF_4 та LiF сприяло інтенсифікації процесів очищення та модифікування металевого розплаву. Іони цирконію виступають ефективними модифікаторами, здатними утворювати в розплаві термостійкі дрібнодисперсні частинки, які слугують центрами кристалізації твердого розчину. Це призводить до формування більш дрібнозернистої та рівномірної мікроструктури сплаву. Крім того, застосування термічної обробки за режимом T5 додатково забезпечує виокремлення дрібних дисперсних фаз інтерметаліду $CuAl_2$ (рис. 3), які сприяють підвищенню міцності завдяки механізму дисперсійного зміцнення. Водночас рівномірність структури та зменшення концентрації дефектів сприяють покращенню пластичності.

Висновки

1. Установлено, що сплав АМ5, модифікований Zr у складі комплексного флюсу з додаванням тетрафториду цирконію, характеризується підвищеними механічними властивостями: тимчасовий опір розриванню досягає 365 МПа, що перевищує в середньому на 15 % показник немодифікованого сплаву. Одночасно відносно по-

довження залишається на високому рівні ~ 5,0 %, що свідчить про покращення як міцності, так і пластичності. Комплексний вплив Zr та термічної обробки за режимом T5 сприяє дисперсійному зміцненню за рахунок утворення дрібних краплин інтерметаліду CuAl_2 , що додатково підвищує міцність без суттєвої втрати пластичності.

2. Підвищення рівня механічних властивостей пояснюється формуванням у процесі модифікування дрібнодисперсних фаз типу Al_3Zr , які переважно розташовуються межами зерен α -твердого розчину. Такі інтерметаліди виконують роль ефективних центрів кристалізації та перешкоджають росту зерна, що забезпечує зміцнення сплаву.

3. Отримані результати підтверджують перспективність застосування комплексних флюсів із Zr для модифікування алюмінієвих сплавів, оскільки вони дозволяють одночасно підвищити міцність і пластичність, що є важливою умовою для розширення їх використання у відповідальних конструкційних елементах.

Подяка

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках виконання проекту «Розробка легованих та модифікованих литих алюмінієвих сплавів авіаційного призначення».

Список літератури

- 1 Tolga Dursun, Costas Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 56, 2014, P. 862–871, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- 2 Wenkai Li, Chunguang Xu, Wenjun Zhang, Shiyuan Liu, Peng Yin; Effect of ultrasound treatment on the performance and segregation of Al–Cu alloy with different Cd contents. *AIP Advances* 1 March 2024; 14 (3): 035037. <https://doi.org/10.1063/5.0188602>.
- 3 Sheng, Z.; Huang, Y.; Zhao, Y.; Fu, R.; Wang, X.; Fan, X.; Wu, F. Hot Workability and Microstructure Evolution of Homogenized 2050 Al–Cu–Li Alloy during Hot Deformation. *Materials* 2024, 17, 4236. <https://doi.org/10.3390/ma17174236>.
- 4 Lin, F.S., Chakraborty, S.B. & Starke, E.A. Microstructure-property relationships of two Al–3Li–2Cu–0.2Zr–XCd alloys. *Metall Trans A* 13, 401–410 (1982). <https://doi.org/10.1007/BF02643349>
- 5 Xia, XZ., Li, RD., Wang, YT. et al. Unveiling the heat-resistant mechanism of an additively manufactured Ag- and Ti-modified Al–Cu–Mg alloy. *Rare Met.* 44, 5811–5823 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12598-025-03263-5>.
- 6 Ding, J.; Wang, C.; Lu, C.; Zhu, G.; Guo, N.; Gao, X.; Wang, X.; Cui, C. Preparation of Al_3Ti - $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ Inoculant and Its Inoculation Effect on Al–Cu–Mn Alloy. *Materials* 2023, 16, 5264. <https://doi.org/10.3390/ma16155264>.
- 7 . Kuishen Hu, Chunming Zou, Hongwei Wang, Zunjie Wei, The role of in-situ Al_3Ti formed during solidification in improving the high-temperature properties of Al–Cu alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 902, 2024, 146585, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146585>.
- 8 Jonathan D. Poplawsky, Brian K. Milligan, Lawrence F. Allard, Dongwon Shin, Patrick Shower, Matthew F. Chisholm, Amit Shyam, The synergistic role of Mn and Zr/Ti in producing θ'/L_2 co-precipitates in Al–Cu alloys, *Acta Materialia*, Vol. 194, 2020, P. 577–586, ISSN 1359-6454, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.043> .
- 9 Lin Zhu, Tian-Shu Liu, Tao-Tao Duan, Tao-Tao Li, Feng Qiu, Hong-Yu Yang, Zhi-Hao Bai, Ying-Ying Liu, Qi-Chuan Jiang, Design of a new Al–Cu alloy manipulated by in-situ nanocrystals with superior high temperature tensile properties and its constitutive equation, *Materials & Design*, Vol. 181, 2019, 107945, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107945> .
- 10 H.A. Elhadari, H.A. Patel, D.L. Chen, W. Kasprzak, Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, Issue 28, 2011, P. 8128–8138, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.018>.

- 11 R. Fernández Gutiérrez, F. Sket, E. Maire, F. Wilde, E. Boller, G. Requena, Effect of solution heat treatment on microstructure and damage accumulation in cast Al-Cu alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, 2017, P. 341–352, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.280>.
- 12 WeiWen Zhang, Bo Lin, DaTong Zhang, YuanYuan Li, Microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al–5.0Cu–0.6Mn alloys with different Fe content, *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 52, 2013, P. 225–233, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.079>.
- 13 Son, H.-T., Kim, Y.-H., Kim, J.-H. and Yu, H.-S. (2016). Effects of Alloying Elements on Microstructure, Mechanical Properties and Formability of Al-Si-Fe-Cu-Mn Based Alloys for Micro-Channel Tube of Heat Exchanger. In *Light Metals 2016*. <https://doi.org/10.1002/9781119274780.ch46>
- 14 Erika F. Prados, Vitor L. Sordi, Maurizio Ferrante, The effect of Al₂Cu precipitates on the microstructural evolution, tensile strength, ductility and work-hardening behaviour of a Al–4wt. % Cu alloy processed by equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 61, Issue 1, 2013, P. 115–125, ISSN 1359-6454, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.038>.
- 15 15. Rui Du, Qi Gao, Shusen Wu, Shulin Lü, Xiong Zhou, Influence of TiB₂ particles on aging behavior of in-situ TiB₂/Al–4.5Cu composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 721, 2018, P. 244–250, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.099>.
- 16 Москвитин В.И., Д.А.С.В. Термодинамические основы алюминотермического восстановления циркония из ZrO₂ в хлоридно-фторидных солевых расплавах. *Цветные металлы*. 2012. № 4. С. 43–46.

Надійшла 23.09.2025

References

- 1 Tolga Dursun, Costas Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 56, 2014, P. 862–871, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- 2 2. Wenkai Li, Chunguang Xu, Wenjun Zhang, Shiyuan Liu, Peng Yin; Effect of ultrasound treatment on the performance and segregation of Al–Cu alloy with different Cd contents. *AIP Advances* 1 March 2024; 14 (3): 035037. <https://doi.org/10.1063/5.0188602>.
- 3 Sheng, Z.; Huang, Y.; Zhao, Y.; Fu, R.; Wang, X.; Fan, X.; Wu, F. Hot Workability and Microstructure Evolution of Homogenized 2050 Al–Cu–Li Alloy during Hot Deformation. *Materials* 2024, 17, 4236. <https://doi.org/10.3390/ma17174236>.
- 4 Lin, F.S., Chakraborty, S.B. & Starke, E.A. Microstructure-property relationships of two Al–3Li–2Cu–0.2Zr–xCd alloys. *Metall Trans A* 13, 401–410 (1982). <https://doi.org/10.1007/BF02643349>
- 5 Xia, XZ., Li, RD., Wang, YT. et al. Unveiling the heat -resistant mechanism of an additively manufactured Ag- and Ti-modified Al–Cu–Mg alloy. *Rare Met.* 44, 5811–5823 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12598-025-03263-5>.
- 6 Ding, J.; Wang, C.; Lu, C.; Zhu, G.; Guo, N.; Gao, X.; Wang, X.; Cui, C. Preparation of Al₃Ti–Al₂O₃/Al Inoculant and Its Inoculation Effect on Al–Cu–Mn Alloy. *Materials* 2023, 16, 5264. <https://doi.org/10.3390/ma16155264>.
- 7 Kuishen Hu, Chunming Zou, Hongwei Wang, Zunjie Wei, The role of in-situ Al₃Ti formed during solidification in improving the high-temperature properties of Al–Cu alloy, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 902, 2024, 146585, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146585>.
- 8 Jonathan D. Poplawsky, Brian K. Milligan, Lawrence F. Allard, Dongwon Shin, Patrick Shower, Matthew F. Chisholm, Amit Shyam, The synergistic role of Mn and Zr/Ti in producing θ'/L₁₂ co-precipitates in Al–Cu alloys, *Acta Materialia*, Vol. 194, 2020, P. 577–586, ISSN 1359-6454, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.05.043>.

- 9 Lin Zhu, Tian-Shu Liu, Tao-Tao Duan, Tao-Tao Li, Feng Qiu, Hong-Yu Yang, Zhi-Hao Bai, Ying-Ying Liu, Qi-Chuan Jiang, Design of a new Al-Cu alloy manipulated by in-situ nanocrystals with superior high temperature tensile properties and its constitutive equation, *Materials & Design*, Vol. 181, 2019, 107945, ISSN 0264-1275, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107945>.
- 10 H.A. Elhadari, H.A. Patel, D.L. Chen, W. Kasprzak, Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, Issue 28, 2011, P. 8128–8138, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.018>.
- 11 R. Fernández Gutiérrez, F. Sket, E. Maire, F. Wilde, E. Boller, G. Requena, Effect of solution heat treatment on microstructure and damage accumulation in cast Al-Cu alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 697, 2017, P. 341–352, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.280>.
- 12 WeiWen Zhang, Bo Lin, DaTong Zhang, YuanYuan Li, Microstructures and mechanical properties of squeeze cast Al–5.0Cu–0.6Mn alloys with different Fe content, *Materials & Design* (1980-2015), Vol. 52, 2013, P. 225–233, ISSN 0261-3069, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.079>.
- 13 Son, H.-T., Kim, Y.-H., Kim, J.-H. and Yu, H.-S. (2016). Effects of Alloying Elements on Microstructure, Mechanical Properties and Formability of Al-Si-Fe-Cu-Mn Based Alloys for Micro-Channel Tube of Heat Exchanger. In *Light Metals* 2016. <https://doi.org/10.1002/9781119274780.ch46>
- 14 Erika F. Prados, Vitor L. Sordi, Maurizio Ferrante, The effect of Al₂Cu precipitates on the microstructural evolution, tensile strength, ductility and work-hardening behaviour of a Al–4wt. % Cu alloy processed by equal-channel angular pressing, *Acta Materialia*, Vol. 61, Issue 1, 2013, P. 115–125, ISSN 1359-6454, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.09.038>.
- 15 Rui Du, Qi Gao, Shusen Wu, Shulin Lü, Xiong Zhou, Influence of TiB₂ particles on aging behavior of in-situ TiB₂/Al-4.5Cu composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 721, 2018, P. 244–250, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.099>
- 16 Moskvitin V.I., D.A.S.V. Thermodynamic fundamentals of aluminothermic reduction of zirconium from ZrO₂ in chloride-fluoride salt melts. *Nonferrous Metals*. 2012. No. 4. P. 43–46.

Received 23.09.2025

D.V. Ivanchenko*, assistant; e-mail: cortdm77@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0001-6162-8537>

M.M. Yamshinskiy*, DSc, professor; e-mail: yamshinskiy@ukr.net;

<http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

I.Ya. Petryk**, cand. of techn. sciences, associate professor;

e-mail: iyap@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0003-0863-5476>

I.V. Lukianenko*, cand. of techn. sciences, associate professor;

e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Ye.P. Chvertko*, cand. of techn. sciences, associate professor;

e-mail: e.chvertko@kpi.ua, <https://orcid.org/0000-0003-3073-1034>

B.V. Kyvgylo*, assistant; e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com;

<http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

R.V. Liutyi*, DSc, associate professor; e-mail: rvl2005@ukr.net;

<https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

E.G. Byba*, ***, cand. of techn. sciences, associate professor;

e-mail: byba.evgen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

I.A. Vladymyrskiy*, DSc; e-mail: vladymyrskiy@kpm.kpi.ua;

<http://orcid.org/0000-0002-2106-9176>

* National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine);

** Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, Ukraine);

*** Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

CHANGE IN THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE AM5 CASTING ALLOY STRENGTHENED WITH Zr

This paper investigates how modifying the AM5 casting alloy with Zr by introducing it into the melt as part of a zirconium tetrafluoride-based flux composition affects the alloy's structure and mechanical properties. This study is relevant because there is a need to create high-quality Al-Cu alloys with increased strength and a stable microstructure for the aviation and automotive industries' applications. The article analyzes the current state of research on alloying and modifying Al-Cu alloys, particularly the use of transition group elements, and demonstrates the potential effectiveness of using Zr. The research methodology involved melting the alloy and adding a complex flux, a mixture of zirconium tetrafluoride and lithium fluoride (ZrF₄ and LiF compounds at a ratio of 1:1.2), at temperatures of 750 °C and 900 °C for 15 minutes. To evaluate the mechanical properties, uniaxial tensile tests were performed on standard samples in the cast state and in the T5 condition after heat-treatment. The chemical composition and microstructure were analyzed using energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray fluorescence analysis, and scanning electron microscopy. A full factorial experiment of type 2² and regression analysis were used for statistical data processing. These methods allow one to predict the influence of melting temperature and ZrF₄ concentration on strength and plasticity indicators based on the experimental results obtained in this study. The experimental data clearly show that introducing Zr into the melt causes the formation of the Al₃Zr intermetallic compound, which acts as a crystallization center and inhibits grain growth, ensuring a refined structure. T5 heat treatment disperses the alloy, strengthening it due to the formation of fine CuAl₂ phase inclusions and increasing the homogeneity of the structure. The best mechanical properties are achieved by adding 2% ZrF₄ to the melt at 750 °C, followed by T5 treatment. The resulting temporary tensile strength is ~365 MPa, exceeding the values of the unmodified alloy by 10–20%. At the same time, the relative elongation remains at ~5%; thus, strengthening the alloy does not result in a loss of plasticity. These results confirm the effectiveness of using complex fluxes containing Zr to modify aluminum alloys because they simultaneously increase strength while maintaining sufficient plasticity. This makes them suitable for critical structural elements in aviation and automotive equipment.

Keywords: aluminum-copper alloys, zirconium, zirconium tetrafluoride, strengthening, structure modification, mechanical properties.