

УДК 669.046.516

М.М. Ворон^{1,2}, докт. техн. наук, ст. досл., заст. завідувача відділу;
e-mail: mykhailo.m.voron@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

М.М. Ямшинський², докт. техн. наук, проф., завідувач кафедри;
e-mail: yamshinskiy@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

А.В. Мініцький², докт. техн. наук, проф.; e-mail: aminitsky@gmail.com;
<http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

М.Ю. Барабаш^{2,3}, докт. техн. наук, стар. наук. співроб., проф.;
e-mail: mbarabash@nasu.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

І.В. Лук'яненко², канд. техн. наук, доцент;
e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Є.Г. Биба², канд. техн. наук, доцент, доцент;
e-mail: byba.evgen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

Р.В. Лютий² докт. техн. наук, доцент, проф.;
e-mail: rvl2005@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

¹Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)

³Технічний центр НАН України, (Київ, Україна)

ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФІКУВАННЯ НА ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ФАЗ У СПЛАВІ АК8МЗ

Роботу присвячено дослідженням структурно-фазових характеристик, зокрема модифікуванню залізовмісних фаз у ливарних алюмінієвих сплавах системи Al–Si–Cu після додавання до їх складу мікролегуючих добавок і модифікаторів (Co, Cr, V та Mo) окремо та в різних комбінаціях один з одним. Як модельний сплав для проведення досліджень вибрано поширений комерційний сплав АК8МЗ (А380). Показано перспективність використання саме комплексного модифікування, що дає можливість знизити вміст модифікаторів у сплаві до 0,5 % мас. Така концентрація модифікуючих добавок є в 2–3 рази меншою порівняно з аналогічними дослідженнями. Показано, що найкращі показники зерноподрібнення та гомогенізації мікроструктури було досягнуто при модифікуванні сплаву кобальтом, ванадієм і молібденом. Установлено, що молібден ефективніше подрібнює зерно, але робить залізовмісні фази менш компактними та сприяє їх утворенню за первинним механізмом навіть при однокомпонентному модифікуванні. Негативні аспекти впливу молібдену підсилюються при додаванні хрому, але їх нівелює додавання ванадію та кобальту. Модифікування за схемами Co+V, V+Mo, Cr+Co+Mo, V+Co+Mo та Co+Cr+V+Mo показало найвищу ефективність впливу на структурно-фазовий стан сплаву АК8МЗ. Зокрема, майже повністю нівельовано утворення фаз типу $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ і досягнуто суттєвого подрібнення фаз типу $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Me})_3\text{Si}_2$.

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

розміри яких зазвичай не перевищували 10...15 мкм. При збільшенні кількості модифікаторів, особливо ванадію та молібдену, спостерігалось більше ознак утворення залізовмісних фаз за первинним механізмом з одночасним збереженням їх дрібних розмірів. Показано, що варіюючи набір та вміст модифікаторів можна суттєво впливати на структуро-й фазоутворення силумінів системи Al-Si-Cu.

Ключові слова: Al-Si-Cu, АК8МЗ, комплексне модифікування, залізовмісні фази, мікро-структура, фазоутворення.

Розвиток сучасного машинобудування тісно пов'язаний із виробництвом литих виробів з алюмінієвих сплавів із необхідним рівнем фізико-механічних та експлуатаційних характеристик. Саме тому за останні десятиліття виробництво алюмінію та його сплавів збільшилося в 2,6 рази, а їх споживання в цілому зростає більше ніж споживання інших металів та сплавів. Світовий попит на алюміній зростає з 64 млн т на рік і має досягнути 90 млн т на рік до 2040 р., тобто майже на 30 %. З 2020 р. темпи зростання як виробництва, так і споживання алюмінієвих сплавів знизились в усьому світі, але в цей самий період активно розвивається напрям підвищення якості сплавів та готової продукції [1, 2].

У світі існує кілька десятків алюмінієвих сплавів, які застосовуються майже в усіх можливих сферах. Це відбувається завдяки поєднанню фізико-механічних і технологічних властивостей алюмінію та його сплавів з їх здатністю до багаторазової переробки, що робить ці матеріали надзвичайно економічно привабливими [3, 4]. Водночас кожний цикл переробки сприяє збільшенню у складі сплавів шкідливих домішок, а насамперед газів та заліза, що суттєво погіршує властивості сплавів та виробів із них. Особливо гостро це питання стоїть для силумінів — основного ливарного класу алюмінієвих сплавів, для яких високий вміст заліза є важливим фактором зниження міцності та пластичності литва.

Із цими недоліками борються, застосовуючи модифікування сплавів марганцем, щоб сприяти утворенню замість голкоподібних інтерметалідів $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ менш шкідливої та більш компактної фази $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe,Mn})_3\text{Si}_2$ із морфологією китайського шрифту [5, 6]. Крім марганцю, дещо менший модифікуючий ефект стосовно залізовмісних фаз мають також хром і кобальт, але останнім часом досліджується вплив також тугоплавких елементів, зокрема V, Mo і W [7–10]. Наявність таких добавок дозволяє подрібнити структуру, збільшити ефективність дисперсійного зміцнення та зберегти високі ливарні властивості [11–13].

Окремий вплив ванадію на характеристики силумінів розглянуто в роботах [14, 15] як такий, що одночасно чинить помірну зерноподрібнюючу дію та зменшує шкідливий вплив домішкового заліза. Наявність ванадію у сплаві на рівні 0,25 % мас. призводить до збільшення ступеню легування кремнієм твердого розчину на основі алюмінію. Евтектичні складові при цьому подрібнюються, а залізовмісні фази замість голчастої форми набувають розгалуженої і також характеризуються дрібними розмірами. Додавання хрому в силуміни зазвичай обмежується кількістю 0,35 % мас. і надає їм головним чином структурної стабільності при високих температурах, але огрублює та збільшує розміри залізовмісних фаз [16], тому його негативний вплив на рідкоплинність є в півтора рази більший, ніж марганцю [17, 18]. Кобальт, подібно до хрому, має здатність до підсилення дії марганцю при модифікуванні залізовмісних фаз, але, на відміну від хрому, він має здатність утворювати залізовмісні фази компактної форми без наявності у сплаві марганцю [18]. Вміст 0,1–0,3 % мас. молібдену можна вважати оптимальною кількістю для модифікування силумінів типу АК7 та АК8МЗ для утворення залізовмісних фаз зіркоподібної морфології та зерноподрібнення, але при його додаванні часто спостерігається виражена газова та міждендритна пористість [19].

Окремий однокомпонентний вплив тугоплавких елементів і деяких стандартних модифікаторів вивчався в багатьох роботах [7–17], але дослідження комплексного впливу двох та більше модифікаторів практично не проводилися [20]. Таким чином, було виконано дослідження, присвячені вивченню впливу комплексного модифікування силумінів кобальтом, хромом, ванадієм та молібденом. Основну

увагу приділено загальній оцінці зміни мікроструктури та впливам введених добавок на залізовмісні фази, які багато в чому визначають як механічні, так і технологічні характеристики силумінів.

Досліджуваним сплавом вибрали силумін марки АК8МЗ, який є широкоживим у світовому машинобудуванні поряд із такими сплавами, як АЗ80, АЗ60, та деякими іншими. Для одержання експериментальних литих зразків сплаву, його виплавку проводили в печі опору в алундовому тиглі, який було поміщено в сталеву обойму. Як шихту використовували відходи сплавів АК12М2, АК5М2, чисту мідь марки М1, та лігатури Al–33Cu, Al–4Cr, Al–4Co, Al–10V і Al–10Mo. Після приготування розплав витримували протягом 5 хв при температурі 750 °С, після чого заливали в підігрітий до 200 °С сталевий кокіль. У результаті було одержано циліндричні виливки діаметром 12 мм та висотою 100 мм, із яких потім вирізалися зразки для досліджень структури та властивостей.

Для визначення хімічного складу зразків використовували енергодисперсійний рентгенофлуорисцентний елементний аналіз, який здійснювали на приладі «Expert 3L» із діапазоном вимірювання хімічних елементів від магнію до урану. Первинну оцінку мікроструктури проводили методом оптичної металографії на мікроскопі Euromex iScope IS.1053-PLMi. Найбільш детальні дослідження мікроструктури виконували методом електронної мікроскопії на скануючому електронному мікроскопі Tescan Vega 3, оснащеному детектором Bruker, який дозволяв визначати локальний хімічний склад фаз та здійснити EDX-mapping (елементний розподіл на досліджуваній площі). Для вимірювання твердості зразків використовували метод Бринеля і твердомір ТШ-2М.

Таблиця 1

Хімічний склад і твердість експериментальних зразків сплаву АК8МЗ із різним вмістом модифікуючих добавок Co, Cr, V та Mo

Зразок	Вміст модифікаторів, % мас.				HB, 10 ⁻¹
	Co	Cr	V	Mo	
1*	—	—	—	—	62
2	0,2	—	—	—	69
3	—	0,25	—	—	67
4	—	—	0,2	—	69
5	—	—	—	0,2	68
6	0,12	0,15	—	—	67
7	0,11	—	0,13	—	65
8	0,15	—	—	0,14	86
9	—	0,2	0,2	—	61
10	—	0,16	—	0,11	68
11	—	—	0,15	0,14	87
12	0,2	0,15	0,2	—	70
13	0,2	0,11	—	0,1	65
14	0,2	—	0,12	0,1	82
15	—	0,1	0,1	0,1	80
16	0,05	0,08	0,07	0,09	68

*Сплав АК8МЗ містить Si 7,5...10; Cu 2...4,5; Fe≤1,3; Mn≤0,5; Ni≤0,5; Zn≤1,2; Mg≤0,45; Pb+Sn ≤0,3 (% мас.). Після лиття під тиском його механічні властивості перебувають в межах 147≤σ_г≤216 МПа, δ=0.5...1 %, HB=70–90.

Було одержано 16 зразків сплаву: 1 без додавання модифікаторів та 15 модифікованих в усіх можливих комбінаціях за умови, що сумарний вміст доданих елементів не перевищував 0,5 % мас. Відповідні дані наведено в табл. 1.

Усі експериментальні зразки характеризувалися дуже низьким вмістом магнію та цинку (0,05...0,25 % мас.), а вміст заліза в зразках перебував у межах 0,7...1,2 % мас., зі співвідношенням Fe: Mn~2, що відповідає стандартним промисловим концентраціям. Кількість марганцю підбирали таким чином, щоб забезпечити одночасно легування твердого розчину та утворення в структурі фаз типу $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ замість Al_5FeSi . Хром і кобальт здатні замінити собою частину марганцю в складі фази $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, що може призвести до збільшення вмісту останнього в твердому розчині та підвищити твердість сплаву. При цьому окреме однокомпонентне додавання хрому зазвичай обмежується через утворення в структурі сплавів грубих інтерметалідів $\alpha-Al_{13}(Fe,Cr)_4Si_4$, з морфологією китайського шрифту та незначної кількості $\beta-Al_5FeSi$ [21, 22]. Водночас у роботі [23] відзначено, що співвідношення Fe:Cr~3 забезпечує формування головної α -Fe фази складу $Al_{15}(FeCr)_{3,7}Si_{2,3}$, але одночасно показано, що додавання до сплаву АЗ19 (АК5М2) 0,1 % мас. Cr та 1 % мас. Mn із вмістом заліза на рівні до 1,5 % мас. сприяло підвищенню міцності сплаву, у тому числі за рахунок формування дрібних первинних інтерметалідів зіркоподібної форми. Одночасне перевищення норми вмісту заліза та марганцю є зростаючою проблемою при використанні вторинної алюмінієвої сировини і залишається недопустимим для більшості промислових задач. Разом з тим наведені приклади демонструють, що саме комплексне додавання кількох модифікаторів здатне демонструвати синергетичний вплив покращення структурно-фазових характеристик розглянутих сплавів.

Дані оптичної металографії, представлені на рис. 1 і 2, дозволяють попередньо оцінити ступінь впливу обраних модифікаторів на гомогенізацію, подрібнення структурних складових сплаву та формування залізовмісних фаз. Як видно з наведених зображень, кобальт майже не впливає на зерноподрібнення сплаву, так само як і хром. Ванадій та молібден, навпаки, проявляють суттєвий зерноподрібнюючий вплив, який для молібдену є помітно вищим. Сумісна дія кобальту та хрому призводить до появи поодиноких крупних дендритів твердого розчину на основі алюмінію на тлі помітного загального зерноподрібнення. Ванадій і кобальт при одночасному додаванні формують подрібнену та однорідну структуру без утворення окремих крупних дендритів. Кобальт разом із молібденом проявляють себе так само, але подрібнення є набагато сильнішим завдяки дії молібдену. Модифікування хромом і ванадієм очікувано не призводить до значного зерноподрібнення через їх більше розчинення в твердому розчині. Попарне додавання хрому й молібдену, а також ванадію і молібдену сприяє підвищенню неоднорідності розмірів дендритів при одночасному їх подрібненні.

Помітно, що потрібне модифікування кобальтом, хромом і ванадієм або молібденом забезпечує формування більш подрібненої та рівномірної структури, ніж додавання ванадію та молібдену одночасно з хромом або кобальтом. Це може бути результатом занадто сильної зародкоутворюючої дії, що виражається у збільшенні часу для зростання дендритів. Чотирикомпонентне модифікування сприяє утворенню рівномірної дрібнозернистої структури, яка виглядає найбільш сприятливо з-поміж усіх розглянутих.

Результати електронної мікроскопії, наведені на рис. 3 і 4, демонструють дані розподілу хімічних елементів, що дозволяє візуально розділити основні структурно-фазові складові і, зокрема визначити складові евтектики. Особливу увагу приділено залізовмісним фазам, порівняння хімічного складу яких зображено графічно на рис. 5.

Аналізуючи одержані дані, можна зробити висновки, що при додаванні кобальту (Co) в сплаві формується рівномірна дрібнозерниста структура. Евтектичний кремній та залізовмісні фази мають розміри 5–10 мкм. Хімічний склад залізовмісних компонентів евтектики відповідає сполуці $Al_{15}(Fe,Mn,Me)_3Si_2$, де Me — один або декілька модифікаторів. Варто відзначити, що кобальт входить до складу даної фази

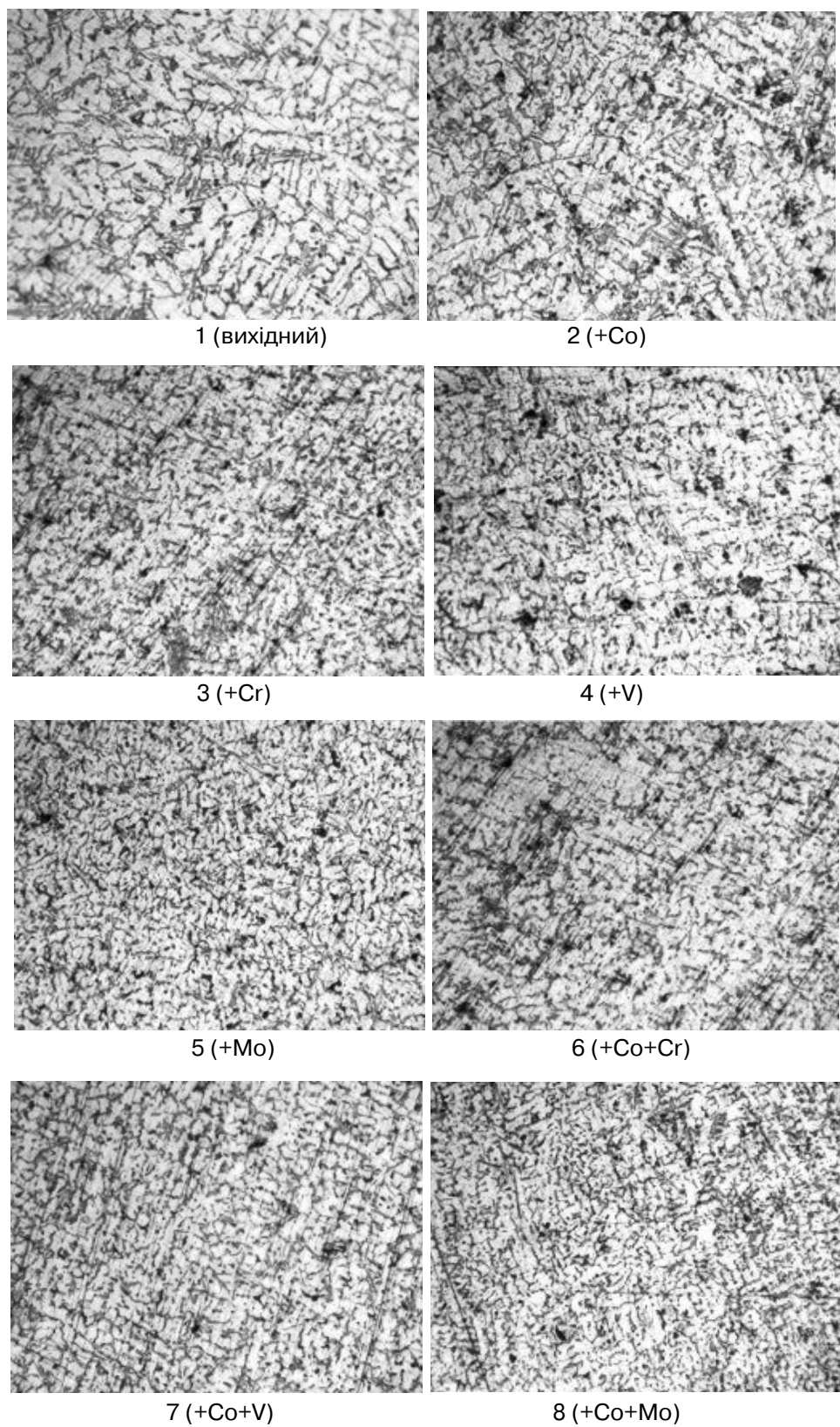
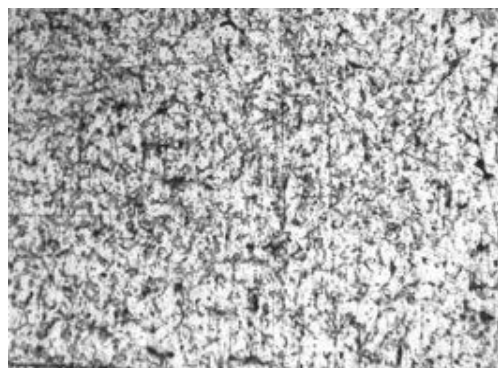
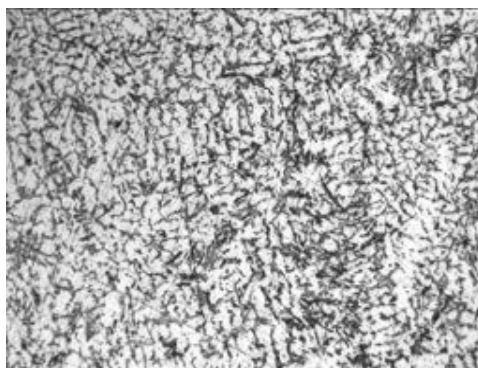


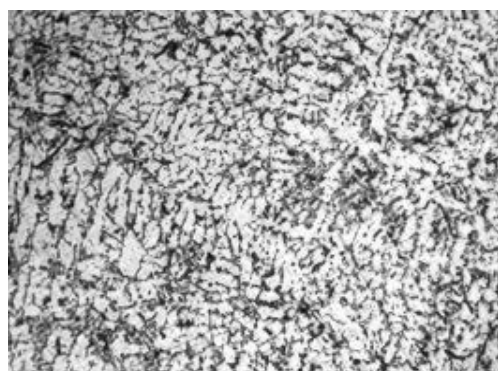
Рис. 1. Мікроструктура модифікованих зразків сплаву АК8МЗ (Х250)



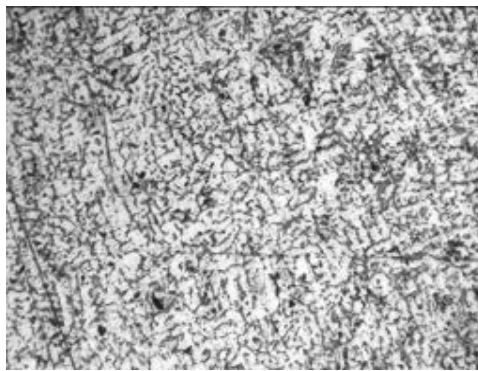
9 (+Cr+V)



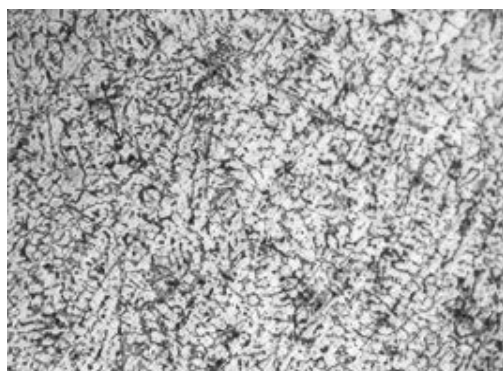
10 (+Cr+Mo)



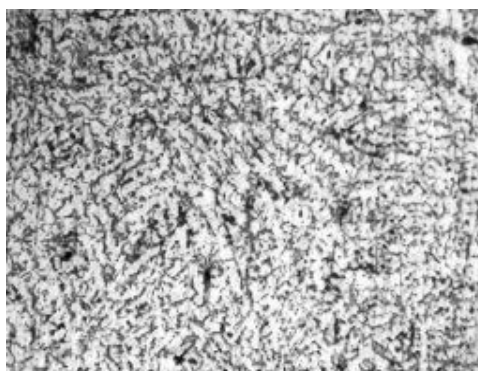
11 (+V+Mo)



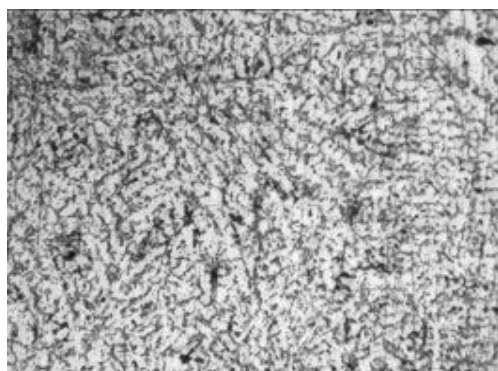
12 (+Co+Cr+V)



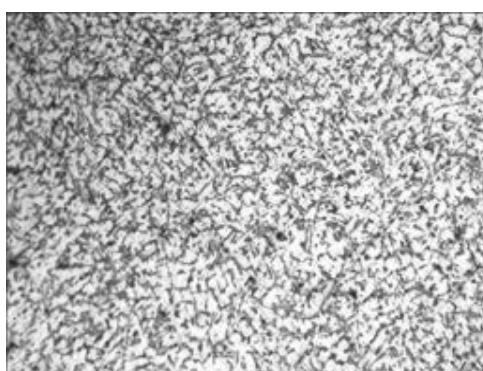
13 (+Co+Cr+Mo)



14 (+Co+V+Mo)



15 (+Cr+V+Mo)



16 (+Co+Cr+V+Mo)

Рис. 2. Мікроструктура модифікованих зразків сплаву АК8М3 (X250)

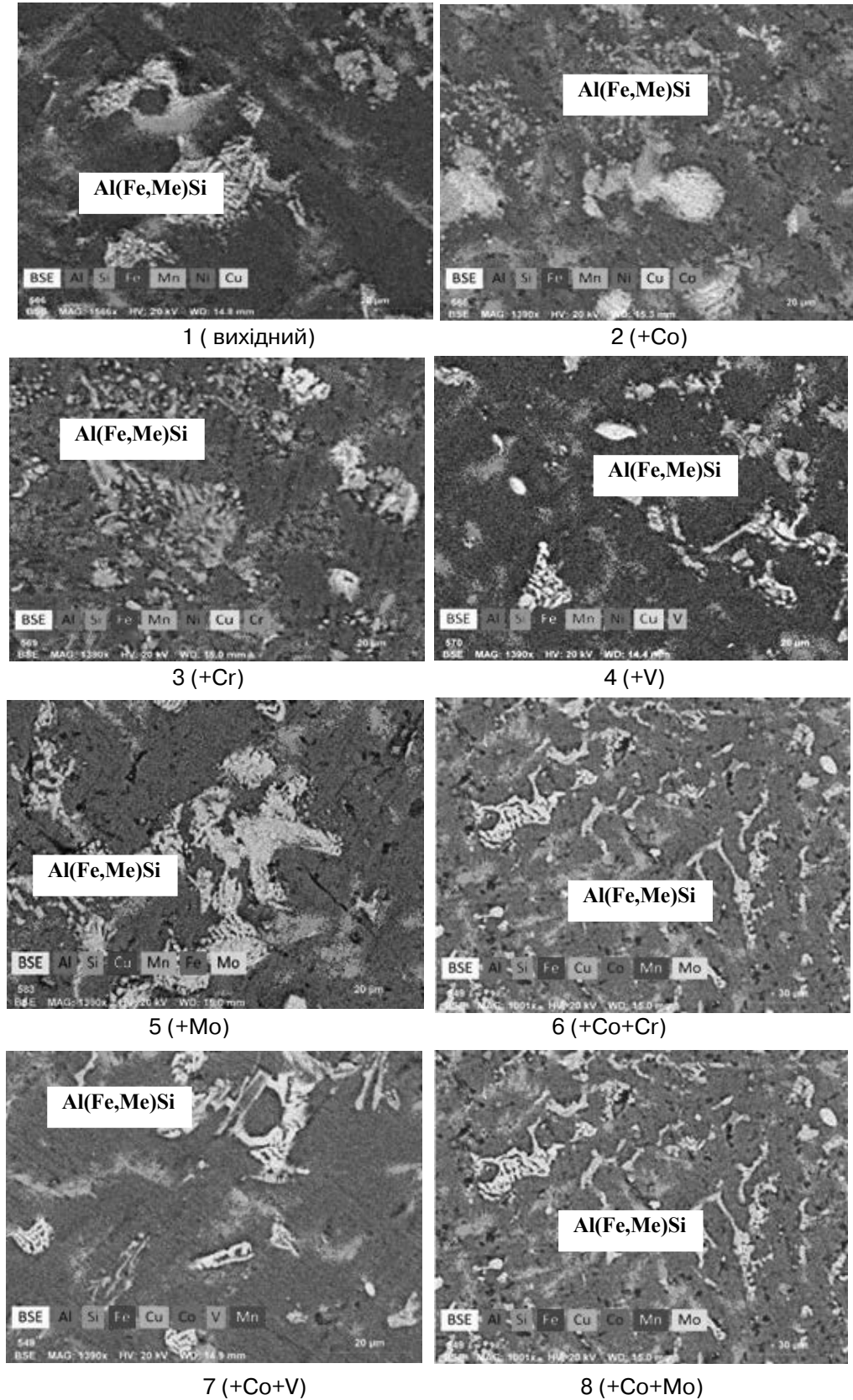


Рис. 3. Електронна мікроскопія та EDX-mapping модифікованих зразків сплаву АК8МЗ

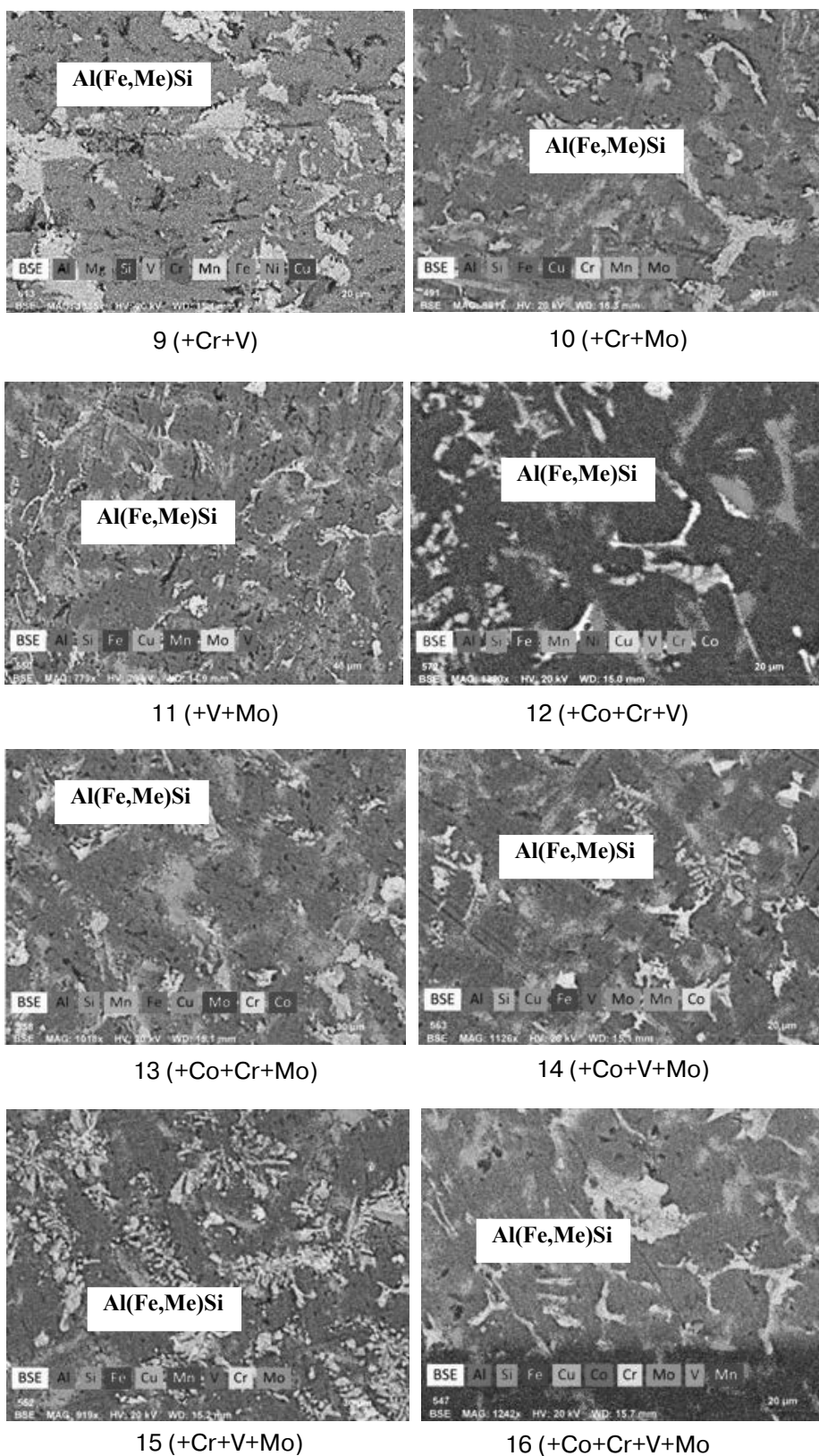


Рис. 4. Електронна мікроскопія та EDX-mapping модифікованих зразків сплаву АК8М3

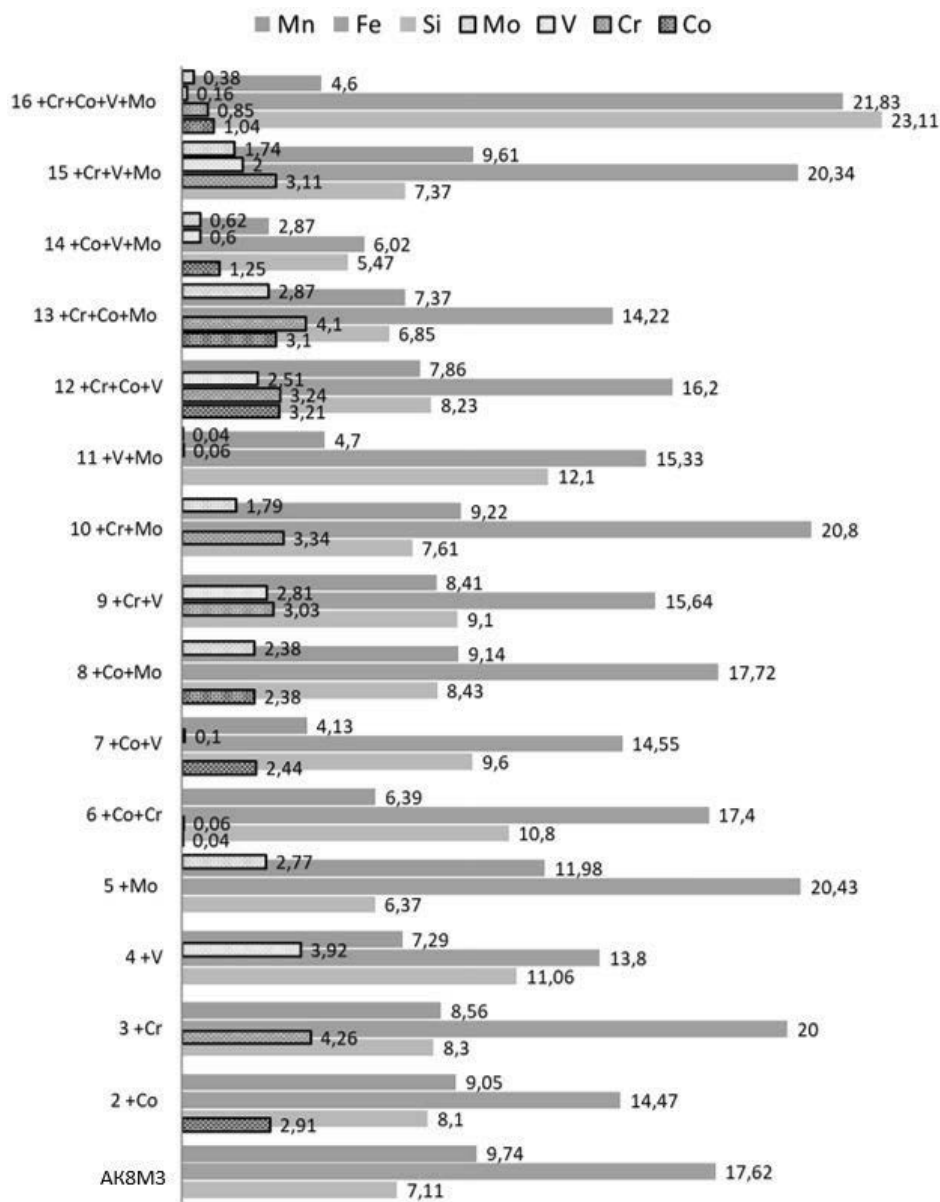


Рис. 5. Порівняльний аналіз хімічного складу залізовмісних фаз експериментальних зразків (% мас.)

і, очевидно, сприяє зміні її морфології та диспергуванню.

Уведення до сплаву хрому (Cr) призвело до помітного підвищення структурної неоднорідності, зокрема через утворення залізовмісних фаз скелетоподібної морфології, що можуть формувати скупчення розмірами від 10 до 70 мкм. Одночасно спостерігаються також обидва типи частинки даного типу включень, у складі яких визначено високий вміст хрому та заліза, тому ці фази найбільше відповідають сполуці Al_3Fe_2Si .

Модифікування з додаванням ванадію (V) забезпечує формування контрастної структури з чітко розділеними зонами дендритів твердого розчину на основі алюмінію та евтектичними областями, що вказує на помітну зародкоутворюючу дію модифікатора. При цьому варто відзначити, що евтектика є рівномірно розподіленою

та дрібнодисперсною настільки, що точно визначити хімічний склад залізовмісних фаз важко. Водночас, найімовірніше, можна спостерігати сильне подрібнення більш сприятливої α -Fe фази.

Додавання до сплаву молібдену (Mo) показало підвищення неоднорідності мікроструктури, що виражається в нерівномірності розподілу та розмірів евтектичних ділянок. Залізовмісні фази, імовірно первинного походження, представлені головню частинками розміром 5...20 мкм. Роль молібдену найбільше помітна у формуванні α -Al(Fe,Mn)Si фази. Зазвичай вона має містити до 30 % мас. Fe та 10...30 % мас. Mn. В одержаному зразку молібден забезпечив доволі високий вміст заліза у α -фазі близько 20 % мас. при тому, що вміст марганцю відповідав майже мінімальній концентрації 10 % мас. Це вказує на те, що α -Fe фаза для даного зразку кристалізувалась як первинна і мала час для зростання при кристалізації, тому набула ознак дендритної форми.

Одночасне додавання до сплаву Co+Cr призвело до формування доволі однорідної структури та рівномірно розподілених ділянок евтектики. З EDX-аналізу видно, що хром та кобальт входять до складу доволі крупних частинок (20...35 мкм) фази $Al_{15}(Fe,Mn,Me)_3Si_2$, при чому хром більшою мірою.

Додавання до сплаву модифікуючої пари Co+V сприяло утворенню однорідної дрібнодисперсної структури з рівномірно розподіленою евтектикою. Залізовмісні фази були представлені компактними включеннями сприятливої морфології, які мають розміри до 10 мкм. Такі структурні характеристики є дуже сприятливими для формування високого рівня механічних властивостей модифікованого сплаву. З EDX-аналізу видно, що до складу α -Al(Fe,Mn,Me)Si фази входить головню кобальт.

Сукупна дія Co+Mo виявилася більш значущою, порівняно з додаванням кобальту й ванадію, на що вказує надзвичайно дрібна та рівномірна мікроструктура і утворення дуже дисперсних інтерметалідів залізовмісних фаз. Кобальт і молібден входять до їх складу в однаковій кількості, а вміст марганцю є помітно більшим, ніж у попередніх зразках і складає 9,14 % мас. Отже, молібден може підсилювати модифікуючу дію марганцю.

Одночасне модифікування сплаву поєднанням Cr+V спричиняє формування дрібнозернистої структури сплаву. Залізовмісна складова в структурі зразка була виражена двома типами морфології — зерноподібними включеннями з розмірами близько 10...15 мкм та включеннями волокнистого типу завдовжки до 60 мкм і завширшки до 1 мкм. Останній тип залізовмісних фаз спостерігався в структурі в малій кількості. Склад залізовмісних складових даного зразка є схожим на попередній, модифікований кобальтом і молібденом. Такі фази типу α -Al(Fe,Mn,Me)Si містять значну кількість марганцю (близько 8 % мас.) та модифікаторів (сумарно близько 6 % мас.).

Одночасне додавання Cr+Mo сприяло формуванню чітко вираженої неоднорідної структури. Розміри суцільних залізовмісних фаз або скупчень евтектичних складових можуть сягати в даному випадку 100...200 мкм та мати дендритну морфологію, характерну для первинних фаз. Згідно з EDX-аналізом, обидва модифікатори входять до складу залізовмісних фаз, і хром більшою мірою. Сполука типу Al(Fe,Mn,Me)Si містить молібдену ~1,8% мас., а вміст хрому в ній майже вдвічі більший та перевищує орієнтовний вміст для цієї фази. Також спостерігається перевищення вмісту заліза на ~ 20...25 %. Сплави, які містили молібден, у дослідженнях попередніх зразків також показували здатність цього елемента «збирати» більшу кількість заліза та марганцю навколо себе. Хром підсилює такий вплив молібдену і також призводить до утворення первинних залізовмісних фаз крупних розмірів. Сукупність цих факторів робить сумісне використання хрому та молібдену несприятливим.

Сукупна дія V+Mo знайшла своє вираження у формуванні доволі рівномірної та дрібнозернистої мікроструктури. Обидва модифікатори рівномірно розподілені в усьому об'ємі сплаву та майже відсутні в складі евтектичних компонентів. Залізовмісні включення характеризуються низьким вмістом модифікуючих елементів

та високим вмістом кремнію, що пояснюється високою дисперсністю та близьким розташуванням фаз.

Показовим є те, що ванадій і молібден доволі активно модифікують залізовмісні фази окремо, а разом практично не чинять такого впливу. Імовірно, це явище можна пояснити тим, що обидва елементи-модифікатори в процесі кристалізації сплаву в першу чергу починають формувати алюмініди за перитектичним механізмом, які слугують центрами зародкоутворення. Це прискорює сам процес кристалізації та сильно уповільнює дифузійний перерозподіл елементів. Таким чином, у залишках рідкої фази, із яких формується евтектика, ванадію та молібдену майже не залишається, а вміст інших, розчинних в алюмінії компонентів, менший за рахунок їх збереження в твердому розчині.

Потрійне модифікування сплаву за схемою $\text{Co}+\text{Cr}+\text{V}$ сприяло утворенню неоднорідної структури, що проявляється переважно різними за розмірами та будовою ділянками евтектики. Локальний хімічний аналіз структурних складових показав високий сумарний вміст модифікаторів, на рівні 9 % мас., спостерігається в залізовмісних фазах, що може слугувати фактором їх подрібнення.

Вплив одночасного додавання $\text{Co}+\text{Cr}+\text{Mo}$ виражається в утворенні дрібно-дисперсної та рівномірної мікроструктури з розмірами зерен твердого розчину на основі алюмінію в межах 15...30 мкм. Евтектичні складові також мають невеликі розміри та рівномірний характер розподілу. Завдяки EDX-аналізу розподілу елементів вдалося визначити, що залізовмісні фази поділяються на два типи, обидва з яких містять кобальт, але більш дрібні частинки відрізняються підвищеним вмістом хрому та молібдену. Один тип залізовмісних фаз містить близько 3,5 % мас. модифікуючих добавок та 2,5 % мас. марганцю, а інший — 10 та 7,4 % мас. відповідно. При цьому для першого типу основним модифікатором є кобальт, а для другого — хром, вміст якого ~4 % мас. не набагато вищий за вміст молібдену та кобальту (~3 % мас.). Обидва типи частинок відповідають фазі $\alpha\text{-Al}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Me})\text{Si}$.

Комбінація модифікаторів $\text{Co}+\text{V}+\text{Mo}$ також сприяла утворенню дисперсної рівномірної мікроструктури. Залізовмісні складові евтектики представлені головню невеликими об'ємами з розмірами до 20 мкм та морфологією «китайського шрифту». Незважаючи на дрібні розміри залізовмісних фаз, можна зробити висновок, що кобальт разом із ванадієм і молібденом входить до складу сполук типу $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Me})_3\text{Si}_2$. Серед розглянутих комбінацій модифікаторів ця також є однією з найбільш вдалих.

Модифікування $\text{Cr}+\text{V}+\text{Mo}$ показало результат, помітно гірший за попередній, що виражається в нерівномірному розподілі евтектики та наявності залізовмісних евтектичних компонентів різної будови, які за своїм складом все одно відповідають включенням $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Me})_3\text{Si}_2$. Згідно з аналізом EDX-mapping, хром наявний у складі залізовмісних фаз у великій кількості та може суттєво впливати на їх первинний механізм утворення, а наявність ванадію та молібдену забезпечує збереження їх дрібних розмірів через підвищення модифікування, зміни кристалічної будови фази та дифузійних процесів у ній.

При одночасному додаванні $\text{Co}+\text{Cr}+\text{V}+\text{Mo}$ також утворюється дрібна та рівномірна мікроструктура. Зерна твердого розчину на основі алюмінію мають розміри 10...30 мкм. Збагачені залізом та міддю евтектичні складові розташовані по межах зерен і мають переважно морфологію тонких коротких голок або волокон, що вказує на формування фаз типу $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$. Попри те, було одержано суттєве подрібнення цих складових, що може мати позитивний вплив на формування структури та властивостей сплаву.

Найбільш оптимальним і бажаним поєднанням характеристик залізовмісних фаз для забезпечення найвищих показників міцності для досліджуваного сплаву та його аналогів є одночасно їх невеликі розміри (до 10 мкм), компактна морфологія, високий вміст заліза і низька дифузійна активність, яка досягається ускладненням хімічного складу.

Аналіз діаграми розподілу елементів у складі залізовмісних фаз досліджуваних зразків (рис. 5) показує, що молибден та хром, як окремо, так і разом, сприяють підвищенню вмісту марганцю та заліза в їх складі. Кобальт здатний частково замінювати марганець, при цьому подрібнюючи залізовмісні фази, але разом із хромом він чинить негативний вплив на їх розміри та морфологію. Ванадій та молибден, як разом так і окремо, більше грають роль зародкоутворюючих модифікаторів. У складі фаз типу $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{M})_3\text{Si}_2$ вони присутні в малій кількості. Ці два елементи призводять до зниження вмісту марганцю в залізовмісних фазах. У більшості випадків наявність молибдену в складі сплаву сприяє збільшенню вмісту заліза й досягнення хімічного складу, близького до фази $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$, проте морфологія таких включень не є типовою голчастою, а розміри часто дуже малі (менше 5 мкм по одній зі сторін), що ускладнює визначення точного хімічного складу, як це спостерігається для зразка сплаву № 14 (Co+V+Mo). Одночасне модифікування всіма чотирма компонентами показує єдиний випадок утворення типових залізовмісних фаз $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$ з відповідною будовою, але вони при цьому мають дуже дрібні розміри.

Порівняння результатів проведених досліджень із подібними, які проводилися для такого самого сплаву [24–26] доводять перевагу запропонованого підходу з точки зору зменшення концентрацій модифікаторів та одержання більш сприятливої структурно-фазової будови. Можна стверджувати, що вибраний ряд модифікаторів (Co, Cr, V, Mo) в деяких зазначених комплексних варіантах модифікування показує значно кращі результати зміни основних структурно-фазових складових сплаву. Так, наприклад, в дослідженнях, із якими проводилось порівняння, вказано, що вміст модифікаторів у складі залізовмісних фаз може досягати 14–15 % мас. При цьому їх розміри становлять близько 50 мкм. Розроблений та представлений підхід щодо зменшення цих параметрів удвічі свідчить про вищу ефективність, порівняно із запропонованими рішеннями. У розроблених схемах модифікування вміст добавок у складі залізовмісних фаз, у тому числі первинних, обмежувався значеннями близько 7 % мас., а їх розміри становили 4–25 мкм.

Подяка. Робота виконана в рамках держбюджетної теми 0125U001485 «Розробка надміцного алюмінієвого сплаву з ультрадисперсною структурою для деталей авіаційного призначення, що працюють в екстремальних умовах».

References

- 1 Aluminum alloys market outlook and statistics – 2024 [Electronic resource] // Global Market Insights Inc. Mode of access: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/aluminum-alloys-market>
- 2 Adding value to secondary aluminum casting alloys: a review on trends and achievements / Helder Nunes [et al.] *Materials*. 2023. No. 3 (16). 895. <https://doi.org/10.3390/ma16030895>
- 3 Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability: handbook / ed. by J. A. S. Green. Ohio, USA: ASM International, 2007. 267 p.
- 4 Making sustainable aluminum by recycling scrap: the science of “dirty” alloys / Dierk Raabe [et al.]. *Progress in materials science*. 2022. No. 1 (128). 100947. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>
- 5 Aluminium and aluminium alloys: handbook / ed. by J. R. Davis. Ohio, USA: ASM International, 1993. 627 p.
- 6 Crepeau P. N. Effect of iron in Al-Si alloys: a critical review. Transactions of the American foundryman's society. 1995. Vol. 103. P. 361–366.
- 7 Rana R. S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites / R. S. Rana, R. Purohit, S. Das. *International journal of scientific and research publications*. 2012. No. 6 (2). P. 1–7.
- 8 Kumar K. S. Ternary intermetallics in aluminium refractory-metal X systems (X = V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn). *Intermetallic materials review*. 1990. No. 1 (35). P. 293–327. <https://doi.org/10.1179/095066090790324037>

- 9 Selected characteristic of silumins with additives of Ni, Cu, Cr, Mo, W and V / S. Pietrowski [et al.]. *Archives of foundry engineering*. 2010. No. 2 (10). P. 107–126.
- 10 Pietrowski S. Crystallization, microstructure and mechanical properties of silumins with micro-additions of Cr, Mo, W and V / S. Pietrowski, T. Szymczak. *Archives of foundry engineering*. 2010. No. 1 (10). P. 123–136.
- 11 Farkoosh A. R. Dispersoid strengthening of a high temperature Al–Si–Cu–Mg alloy via Mo addition / A. R. Farkoosh, X. G. Chen, M. Pekguleryuz. *Materials science and engineering: A*. 2015. Vol. 620. P. 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.10.004>
- 12 Tensile and fatigue properties of a cast aluminum alloy with Ti, Zr and V additions / H. A. Elhadari [et al.]. *Materials science and engineering: A*. 2011. Vol. 528. P. 8128–8138. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.018>
- 13 Mbuya T. O. Influence of iron on castability and properties of aluminium silicon alloys: literature review / T. O. Mbuya, B. O. Odera, S. P. Ng'ang'a. *International journal of cast metals research*. 2003. Vol. 16. P. 451–465. <https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819622>
- 14 Bolibruchova D. Vanadium influence on iron based intermetallic phases in AlSi6Cu4 alloy / D. Bolibruchova, M. Zihalova. *Archives of metallurgy and materials*. 2014. No. 3 (59). P. 837–841. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0172>
- 15 Voron M. Vanadium edition influence on the structural and phase parameters of Al–Si–Cu alloys / M. M. Voron [et al.]. *Casting processes*. 2019. No.6 (138). P. 52–58.
- 16 Ahmad R. The effect of chromium addition on fluidity, microstructure and mechanical properties of aluminum LM6 cast alloy. *International journal of materials science research*. 2018. No. 1 (1). P. 32–35. <https://doi.org/10.18689/ijmsr-1000105>
- 17 Timelli G. The influence of Cr content on the microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3(Fe) die-casting alloys / G. Timelli, F. Bonollo. *Materials science and engineering: A*. 2010. No. 1 (528). P. 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.079>
- 18 The role of Cr additions and Fe-rich compounds on microstructural features and impact toughness of AlSi9Cu3 (Fe) diecasting alloys / G. Timelli [et al.]. *Materials science and engineering: A*. 2014. Vol. 603. P. 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.071>
- 19 Effect of Mo addition on room and high temperature tensile behavior of Al–Si–Cu–Mg alloy in as-cast and heat-treated conditions / M. Zamani [et al.]. *Advanced materials research*. 2019. Vol. 1155. P. 71–79. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1155.71>
- 20 Characteristics of Al–Si alloys with high melting point elements for high pressure die casting / Tomasz Szymczak [et al.]. *Metals*. 2020. Vol. 13. 4861. <https://doi.org/10.3390/ma13214861>
- 21 Shabestari S. G. Gravity segregation of complex intermetallic compounds in liquid aluminum-silicon alloys / S. G. Shabestari, J. E. Gruzleski. *Metallurgical and materials transactions: A*. 1995. Vol. 26A. P. 999–1006. <https://doi.org/10.1007/BF02649097>
- 22 Gustafsson G. Influence of Fe and Cr on the microstructure of cast Al–Si–Mg alloys / G. Gustafsson, T. Thorvaldsson, G. L. Dunlop. *Metallurgical transactions: A*. 1986. Vol. 17A. P. 45–52. <https://doi.org/10.1007/BF02644441>
- 23 Precipitation of Fe rich intermetallics in Cr- and Co-modified A413 alloy / M. Mahta [et al.]. *International journal of cast metals research*. 2005. Vol. 18. P. 73–79. <https://doi.org/10.1179/136404605225022928>
- 24 Microstructural characteristics of AlSi9Cu3(Fe) alloy with high melting point elements / Tomasz Szymczak [et al.]. *Metals*. 2020. No.10 (10). 1278. <https://doi.org/10.3390/met10101278>
- 25 Characteristics of Al–Si alloys with high melting point elements for high pressure die casting / Tomasz Szymczak [et al.]. *Metals*. 2020. Vol. 13. 4861. <https://doi.org/10.3390/ma13214861>
- 26 Szymczak T. Evaluation of the effect of Cr, Mo, V and W on the selected properties of silumins / T. Szymczak, J. Szymshal, G. Gumienny. *Archives of foundry engineering*. 2018. No. 4 (18). P. 77–82. <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125172>

Одержано / Received 11.02.2026

Прийнято / Accepted 23.02.26

Опубліковано / Published 17.03.2026

M.M. Voron^{1, 2}, PhD (Engin.), senior research scientist., deputy head of department;
e-mail: mykhailo.m.voron@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

M.M. Yamshinskij², Dr. Sci. (Engin.), prof., head of department;
e-mail: yamshinskiy@ukr.net; <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

A.V. Minitskiy², Dr. Sci (Engin.), prof.; e-mail: aminitsky@gmail.com;
<http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

M.Yu. Barabash^{2,3}, Dr. Sci (Engin.), senior research scientist, prof.;
e-mail: mbarabash@nasu.kiev.u; <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

I.V. Lukianenko², PhD (Engin.), associate professor;
e-mail: lukianenkoiv@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

E.G. Byba², PhD (Engin.), associate professor, associate professor;
e-mail: byba.evgen@gmail.com; <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

R.V. Liutyi², Dr. Sci (Engin.), associate professor, prof.;
e-mail: rvl2005@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6655-6499>

¹ Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine),

³ Technical Centre, NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

INFLUENCE OF COMPLEX MODIFICATION ON THE FORMATION OF IRON-CONTAINING PHASES IN THE A380 ALLOY

The work is devoted to the study of structural-phase characteristics, in particular - the modification of iron-containing phases in Al-Si-Cu system cast aluminum alloys after adding microalloying elements and modifiers (Co, Cr, V and Mo) to their composition separately and in various combinations with each other. The widespread commercial alloy A380 was chosen as a modeling material for the research. The prospects of using complex modification principles, which makes it possible to reduce the content of modifiers to 0.5 wt. % are shown. Such concentration of modifying additives is 2–3 times lower in comparison with similar studies. It is also shown that the best grain refinement and microstructure homogenization indicators were achieved by modifying the alloy with cobalt, vanadium and molybdenum. It was found that molybdenum is more effectively grain refiner, but it makes iron-containing phases less compact and promotes their formation by the primary mechanism even with single-component modification. The negative aspects of the molybdenum influence are enhanced by the addition of chromium, but they can be eliminated by the addition of vanadium and cobalt. Alloy modification according to the schemes Co+V, V+Mo, Cr+Co+Mo, V+Co+Mo and Co+Cr+V+Mo showed the highest efficiency of the influence on the structural-phase state of the A380 alloy. In particular, the formation of β -Al₅FeSi-type phases was almost completely eliminated and significant modification and refinement of the α -Al₁₅(Fe,Mn,Me)₃Si₂-type phases, the sizes of which usually did not exceed 10...15 μ m, was achieved. With an increase in the number of modifiers, especially vanadium and molybdenum, more signs of the iron-containing phases by the primary mechanism formation were observed, while maintaining their small sizes. It is shown that by varying the set and content of modifiers, it is possible make influence on the structure and phase formation of the Al-Si-Cu system alloys.

Keywords: Al-Si-Cu, A380, complex modification, iron-containing phases, microstructure, phase formation