

<https://doi.org/10.15407/plit2025.01.048>

УДК 669.715:018.95

Р.Ф. Ліхацький, д-р філос., мол. наук. співроб.;

e-mail: richard.kpi@outlook.com; <https://orcid.org/0000-0001-8277-5122>

М.М. Ворон, канд. техн. н., ст. досл.; *e-mail: mihail.voron@gmail.com;*

<https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

А.В. Нарівський, д-р техн. н., зав. відділу;

e-mail: av.narivskii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>

В.О. Твердохвалов, канд. техн. н., наук. співроб.;

e-mail: tverdohvalov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3756-7639>

І.Ф. Ліхацький, аспірант; *e-mail: likhatskyi8@gmail.com;*

<https://orcid.org/0000-0002-2069-5255>

Є.О. Матвієць, гол. технолог

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

АЛЮМОМАТРИЧНІ КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З ОКСИДАМИ ТА КАРБІДАМИ

У роботі розглянуто технологічні особливості одержання литих алюмоматричних композиційних матеріалів (АМК), армованих оксидними та карбідними частинками Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiC, B_4C та WC. Завдяки розвитку методів, таких як лиття з активним перемішуванням, *in-situ* синтез, перемішування, тертя та ін., можна створювати якісні композити зі сприятливими структурними характеристиками та високим рівнем механічних властивостей. Серед розглянутих методів одержання литих алюмоматричних композитів найбільш застосовуваними є лиття з активним перемішуванням розплаву та лиття під тиском. Перший спосіб універсальний для замішування і розподілення армуючих частинок, а другий дозволяє мінімізувати дефектність і пористість структури. Показано, що висока дисперсність добавок оксидів і карбідів частіше призводить до негативних наслідків — дефектів незасвоєння та агломерації порошків. Крупні частинки армуючих компонентів, у свою чергу, призводять до утворення пор. Краще засвоєння порошкових добавок за рахунок підвищення їх змочуваності забезпечується кількома способами, найефективнішими з яких є їх попередній підігрів, активація поверхні або додавання до алюмінієвого розплаву магнію в кількості до 1 % мас. Більшість досліджень присвячені створенню АМК на основі сплаву А356. Найпопулярнішими добавками при цьому є Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC, B_4C та WC. Оптимальний вміст наповнювачів для більшості досліджуваних складів — близько 2–6 % мас. Оптимальний розмір частинок — у межах 5–35 мкм, що виражається в підвищенні твердості композитів. Більший розмір частинок мало впливає на механічні властивості сплавів, а нанометрові розміри можуть призводити до нерівномірного їх розподілу та дефектів будови виробів.

Ключові слова: литі композиційні матеріали, алюмоматричні композити, оксидні й карбідні добавки, засвоєння армуючих фаз.

Вступ

Алюмоматричні композити (АМК) на основі ливарних алюмінієвих сплавів із додаванням оксидів, карбідів і нітридів є інноваційними матеріалами, що поєднують низьку густину, корозійну стійкість та комплекс високих механічних і експлуатаційних характеристик. Це робить композиційні матеріали важливими в авіакосмічній, автомобільній, суднобудівній та військовій промисловості. Завдяки своїм властивостям АМК широко застосовуються для виготовлення деталей двигунів, компонентів підвіски, теплообмінників та інших конструкцій, які потребують високої міцності, зносостійкості та стійкості до динамічних навантажень [1, 2].

Методи одержання АМК. Спосіб виготовлення композита має вирішальне значення для визначення його кінцевих властивостей. До основних процесів виробництва АМК у промислових об'ємах належать [3]:

1) твердотільні виробничі процеси, що включають численні методи порошкової металургії (ПМ);

2) виробництво, яке відбувається в рідкому стані (ливарні технології);

3) способи, які базуються на процесах наплавлення.

Порошкова металургія — найпоширеніший метод виготовлення АМК. На відміну від інших технологій, ПМ дозволяє включити в матрицю значну кількість армуючих включень та рівномірно їх розподіляти. Компоненти змішуються з порошком алюмінієвого сплаву різними способами та можуть поєднуватись як при н. у., так і при підвищеній температурі (спікання). Крім того, використовуються також методи вторинної обробки, такі як екструзія, прокатка, рівноканальна кутова екструзія, кування тощо, які можуть додатково перемішувати компоненти матеріалу та формувати заготовку або готовий виріб. Однак такі методи дуже вартісні, що обмежує їх масове виробництво [4, 5]. Фрикційна обробка (FSP) забезпечує більш глибоке перемішування та подібнення структури, покращуючи механічні властивості готового матеріалу, проте також є високоевартісною [6, 7].

Лиття є найбільш економічно доцільним методом виготовлення АМК, при якому рідкий розплав заливається у форму чи шаблон необхідних розмірів. Існує багато дефектів процесу лиття, як-от пористість, сегрегація, гарячі розриви, утворення небажаних гідридів, шпінелі тощо [8]. Однією з головних проблем під час створення АМК є забезпечення рівномірного розподілу зміцнювальних часток у матриці, що на пряму впливає на анізотропію структури та механічні властивості. При традиційному литті нерідко виникають сегрегаційні скупчення часток та їх незасвоєння через недостатнє змочування алюмінієвим розплавом. Для вирішення цієї проблеми розроблено технології активного перемішування, зокрема композитне лиття та лиття під тиском, які сприяють більш ефективному включенню армуючих часток SiC , Al_2O_3 чи BN в алюмінієву матрицю [9-11].

Лиття з перемішуванням є одним із найпоширеніших методів для виготовлення АМК завдяки своїй простоті та економічності. У цьому процесі зміцнювальні фази вводять у розплав під час активного перемішування, яке може бути механічним, електромагнітним, вібраційним тощо. Додавання армуючих часток може відбуватись як за звичайних умов, так і в атмосфері інертного газу чи вакууму. Часто в розплав також додають модифікатори та застосовують ультразвукову обробку [3, 12–14].

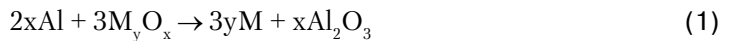
Композитне лиття є вдосконаленим методом, що дозволяє інтегрувати зміцнювальні фази в процесі твердіння матриці. Технологія включає в себе підготовку армуючих фаз (частки чи волокна зміцнювача вводять у попередньо розігрітий алюмінієвий розплав), контроль процесу змочування (додавання спеціальних флюсів чи застосування ультразвукової обробки) й заливку для подальшої кристалізації. Переваги цього методу полягають у високій продуктивності та можливості введення великої кількості зміцнювальних фаз без значного збільшення вартості виробництва. Композитне лиття широко використовується для виготовлення деталей транспорту й електроніки, які потребують термічної стійкості і зменшення маси [15].

Лиття під тиском є високотехнологічним методом, який поєднує переваги

лиття та кування. У цьому процесі розплавлений алюмінієвий сплав із введеними зміцнювальними частками (наприклад, SiC або Al_2O_3) заливають у прес-форму та стискають під високим тиском. Метод забезпечує більш глибоке проникнення часток у матрицю та усуває газові пори при одночасному збільшенні щільності матеріалу, що зменшує кількість внутрішніх дефектів, підвищує міцність, твердість і зносостійкість. Лиття під тиском дозволяє отримувати деталі меншого розміру і складної геометрії, але рівномірність розподілу частинок і точність їх вмісту залишається не до кінця розв'язаною задачею [3, 16].

Іншою важливою проблемою є досягнення стабільності структури та збереження властивостей композитів під впливом високих температур і механічних навантажень. Традиційно армування додають до металевої матриці методами ex-situ (ззовні) [17], який потребує використання нижчої межі розміру армуючих частинок через погану змочуваність між ними і матрицею внаслідок збільшення площі поверхні та наявності поверхні забруднення [18, 19]. У цьому контексті перспективними є методи in-situ (зсередини) синтезу, які забезпечують формування зміцнювальних фаз безпосередньо в матриці в ході реакцій між компонентами розплаву [20]. Наприклад, утворення фаз TiC чи Al_2O_3 під час реакцій у розплавленому алюмінії дозволяє отримати матеріали з кращою стабільністю структури, мінімізуючи дефекти, які властиві екзогенним методам введення часток [21].

Синтез в розплаві одержують використовуючи багато підходів, таких як реактивне гаряче пресування (RHP), синтез горінням або пряме окислення метал / метал (DIMOX) [18, 22]. Процес DIMOX заснований на реакції між чистим металом і оксидами менш реакційного металу, що є найперспективнішим способом виготовлення композиту «на місці» через його простоту, високу продуктивність і легкість керування композитною структурою. Зокрема, оксид алюмінію може бути сформований цим способом для армування матриці [23]. Загальну реакцію при цьому можна зобразити як:



Різні оксиди металів можуть бути використані для виробництва in-situ AMK, наприклад оксид цинку. Результати [24] показали низьку реакційну здатність між оксидом цинку та розплавленим алюмінієм через дрібний розмір частинок оксиду та його погану змочуваність алюмінієм. Автори [20] подолали цю проблему, розробивши новий метод «API», у якому порошки Al і ZnO змішували та подрібнювали в кульовому млині для активації порошків ZnO. Іншими перевагами цього способу є подрібнення частинок оксиду та підвищена змочуваність під час інжекції в розплав завдяки наявності на оксиді шару алюмінію. Інші оксиди також використовувалися як джерело кисню для реакції з алюмінієм і формування дрібних зміцнюючих частинок Al_2O_3 в алюмінієвій матриці, таких як NiO, TiO_2 , Fe_2O_3 , CuO та ZnO [25, 26].

Методи осадження з парової фази (PVD) відкривають нові можливості для створення AMK, що відзначаються покращеними властивостями, такими як висока міцність, зносостійкість і корозійна стійкість. Ці технології дозволяють створювати покриття або структури з наночасток, волокон або інших твердих фаз безпосередньо на поверхні чи всередині алюмінієвої матриці. Методи напилення підходять для створення багатошарових або функціонально градієнтних матеріалів [27, 28]. Методи напилення та хімічного осадження з парової фази є важливим доповненням до традиційних технологій виготовлення AMK, адже дозволяють досягати унікальних властивостей, що відповідають вимогам сучасної інженерії та науки.

Кожен із цих методів має свої переваги й обмеження, тому вибір технології залежить від вимог до готового виробу, особливостей зміцнювальних фаз і бюджету виробництва. Разом вони створюють широкий спектр можливостей для виготовлення композитів із високими експлуатаційними характеристиками.

Фактори, що впливають на можливість одержання AMK ливарними методами. Нерівномірність розподілу або агломерація частинок може призвести до дефектів

у структурі композита, що знижує його експлуатаційні характеристики. Основні фактори, які впливають на засвоєння та розподіл армуючих частинок, включають змочуваність, розмір і форму частинок, реологічні властивості розплаву, швидкість перемішування, густину армуючого матеріалу і температурний режим.

Змочуваність визначає, наскільки добре матриця покриває поверхню армуючих частинок. Це ключовий фактор, який визначає ефективний розподіл і запобігає агломерації. Змочуваність характеризується кутом контакту (Θ) між розплавом матриці та частинкою:

$$\cos \Theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (2)$$

де γ_{sv} — енергія поверхні твердої фази, Дж/м²; γ_{sl} — енергія міжфазного контакту твердої фази і рідини, Дж/м²; γ_{lv} — енергія поверхні рідкої фази, Дж/м².

Чим менший кут змочування Θ , тим кращою є змочуваність. Наприклад, оксиди (Al_2O_3) мають середню змочуваність у розплавленому алюмінії, що вимагає застосування флюсів або спеціальних обробок поверхні для покращення адгезії [15, 29].

Розмір частинок впливає на їхній розподіл у матриці: чим менший розмір, тим легше забезпечити рівномірний розподіл. Однак це також підвищує ймовірність агломерації частинок через їх високий питомий об'єм. Так, наночастинки оксидів чи карбідів мають тенденцію до агломерації, якщо їх поверхня попередньо не модифікована [30]. Форма частинок також впливає на їх взаємодію з розплавом. Частинок з високим коефіцієнтом асиметрії (пластини, волокна) складніше рівномірно розподілити через підвищений гідродинамічний опір у рідкому середовищі.

Різниця в густині між армуючими частинками ($\rho_{\text{ч}}$) і розплавом матриці ($\rho_{\text{м}}$) викликає сегрегацію частинок під впливом гравітаційних сил. Сегрегація описується за допомогою швидкості осідання, визначеної законом Стокса:

$$v_c = \frac{2r^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{м}})g}{9\eta} \quad (3)$$

де r — радіус армуючих часток, м; η — в'язкість розплаву, Па·с.

Швидкість і тип перемішування суттєво впливають на рівномірність розподілу частинок. Механічне перемішування або ультразвукова обробка створюють локальні турбулентності, які сприяють руйнуванню агломератів. Ефективність перемішування описується числом Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{\rho_{\text{м}} v D}{\eta} \quad (4)$$

де v — швидкість обертання, м/с; D — діаметр ротора, м.

Оптимальний режим для замішування частинок — перехідний між ламінарним і турбулентним потоком, що запобігає утворенню нових агломератів [31].

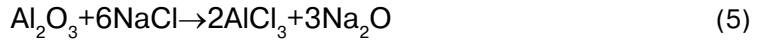
Температура розплаву впливає на в'язкість самого розплаву та змочуваність армуючої фази. При підвищенні температури знижується в'язкість, що полегшує перемішування, але надмірно висока температура може призвести до реакцій між частинками і розплавом, зайвого утворення оксидів і втрати армуючих властивостей.

Дослідження [30] показали, що використання ультразвукової обробки перегрітого алюмінієвого сплаву з частинками SiC знижує їх агломерацію і покращує механічні властивості, такі як міцність на розтяг і твердість. Водночас використання B_4C при високих температурах розплаву без модифікування поверхні частинок призводить до утворення газових включень і дефектів у матриці [32].

Для покращення змочуваності та рівномірного розподілу армуючих частинок у металевій матриці широко використовуються флюси й модифікатори. Вони впливають на поверхневу енергію системи, сприяючи зниженню міжфазного натягу та запобігаючи агломерації частинок.

Флюси застосовуються для покращення змочуваності армуючих частинок рідким металом і видалення оксидів з їх поверхні. Це дозволяє уникнути утворення неефективних міжфазних шарів і забезпечує якісний контакт між матрицею та армуючими фазами. Зокрема, для систем із використанням SiC і Al_2O_3 ефективними є хлоридно-фторидні флюси, що видаляють оксидну плівку з поверхні розплаву, полегшуючи введення саме дисперсних частинок [29].

Хімічна реакція між флюсом і оксидом виглядає так:



Унаслідок цього поверхневий шар оксиду замінюється на розчинний шар, який полегшує змочування фаз, що вводяться в розплав.

Для одержання АМК також часто використовують титанові та магнієві модифікатори. Модифікування розплаву титаном при додаванні B_4C сприяє утворенню стабільних сполук TiB_2 , що запобігає агломерації карбідів і підвищує твердість композиту [32]. Магнієві добавки використовуються для покращення змочуваності частинок SiC і Al_2O_3 , оскільки магній знижує поверхневий натяг рідкого алюмінію. Це особливо важливо при застосуванні наночастинок, що мають високу тенденцію до агломерації [31].

Достатня змочуваність і висока твердість, подібно до керамічних армуючих частинок, належить порошкам високоентропійних сплавів (ВЕС). Розробка й дослідження технологічних процесів приготування, лиття і деформування АМК з ВЕС є новим напрямом, що нині розвивається [33].

Вплив армування оксидами та карбідами на властивості ливарних алюмінієвих.

Види армуючих часток класифікуються за їх природою, геометрією та взаємодією з металевою матрицею. Основними групами зміцнювальних фаз є: оксиди (забезпечують високу твердість і стійкість до корозії), карбіди (додають зносостійкість і термостабільність) та нітриди (підвищують теплопровідність і стабільність в агресивних середовищах) [29]. Деякі ширококовживані й перспективні добавки твердих частинок для одержання алюмоматричних композитів наведено в табл. 1 [34, 35].

Оксиди, такі як Al_2O_3 , TiO_2 і ZrO_2 , є одними з найпоширеніших армуючих часток в АМК завдяки їх високій твердості, хімічній стійкості та низькій теплопровідності. Їх часто використовують для створення зносостійких деталей, як-от підшипники чи елементи двигунів, що працюють в умовах високих температур і агресивного середовища. Застосування таких оксидів покращує механічну міцність і тривалість служби матеріалів, водночас зберігаючи їх низьку вагу, чим обґрунтовано популярність використання саме таких армуючих частинок [31, 36].

АМК Al- Al_2O_3 . Оксид алюмінію має гексагональну ґратку, його густина становить $3,9 \text{ г/см}^3$, а самі частинки Al_2O_3 слабо змочуються рідким алюмінієм [37]. Успішні дослідження армування чистого алюмінію оксидами, карбідами чи нітридами частіше

Таблиця 1
Армуючі добавки для одержання АМК [34, 35]

Основа	оксиди	карбіди	нітриди	бориди
Алюміній	Al_2O_3	–	AlN	–
Бор	–	B_4C	BN	–
Вольфрам	–	WC, W_2C	WN, W_2N	WB, W_2B
Гафній	HfO_2	HfC	HfN	–
Кремній	–	SiC	Si_3N_4	–
Молібден	–	MoC, Mo_2C	MoN, Mo_2N	MoB, Mo_2B
Тантал	–	TaC	–	–
Титан	TiO_2	TiC	TiN	TiB_2
Цирконій	ZrO_2	ZrC	ZrN	ZrB_2
Хром	Cr_2O_3	CrC	CrN	CrB

пов'язані з використанням технологій порошкової металургії [15]. Можна знайти нечисленні дослідження одержання таких АМК технологіями лиття з ультразвуковою обробкою розплаву [38, 39] чи in-situ формуванням [18].

Автори [38] досліджували можливість створення АМК із вмістом Al_2O_3 до 2 % мас. Отримані дані механічних випробувань (табл. 2) показують незначне їх покращення. Враховуючи необхідність у додатковому кульовому помелі оксиду алюмінію до нанорозмірів та особливостей процесу плавки, ця технологія є ще й затратною. У випадку армування за принципами «in-situ» [18] відбувається додавання до розплаву оксидів алюмінію, цирконію, титану чи дешевшого боросилікатного скла натрію — усі вони в процесі плавлення формують всередині розплаву оксид Al_2O_3 , заодно додатково легуючи композит цирконієм, титаном чи іншими металами відповідно. Технологія теж вимагає використання кульового помелу з подальшою термообробкою для покращення засвоєння компонентів (табл. 2).

Таблиця 2

Приклади АМК на основі чистого алюмінію та їх механічні властивості

АМК	Технологія	Вміст, % мас.	Розмір час- ток, мкм	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %
Al+ Al_2O_3 [38]	UC	0	—	30	62	47
		2	0,01	47	92	36
Al+ SiO_2 [18]	In-situ	0	—	44	81	39
		4	5–20	67	123	29
		6	5–20	73	129	22
Al+ TiO_2 [18]	In-situ	6	20	52	104	7
Al+ ZnO [18]	In-situ	6	20	58	114	13

Серед ливарних алюмінієвих сплавів для отримання АМК методами лиття як матричний матеріал часто використовують доевтектичний сплав А356 (АК7). У дослідженні, яке вивчає вплив змочуваності [40], помітили, що покращення змочуваності оксиду шляхом помелу покращило межу текучості сплаву на 215 %, крім підвищення твердості, зносостійкості та подрібнення мікроструктури. Робота полягала в дослідженні різниці попередньої обробки Al_2O_3 , а її результати описані в табл. 3.

В іншому дослідженні [41], щоб покращити змочуваність і розподіл дрібнодисперсних частинок Al_2O_3 в матриці алюмінієвого сплаву А356 і уникнути агломерації та поділу частинок, був використаний схожий метод змішування. Армуючі частинки витримували при 1100 °С протягом 20 хв в інертній атмосфері, після чого відбувалося введення частинок у розплав за допомогою тиску потоком аргону. Після цього відбувалося перемішування розплаву механічною мішалкою від 200 до 450 об/хв. Мікроструктура цих композитів містила первинні α -Al дендрити та евтектичний кремній, при тому що частинки Al_2O_3 перебували і в міждендритних областях, і в евтектичному кремнію. Інші інтерметалічні сполуки, такі як Mg_2Si , Al_5FeSi та Al_4C_3 , також були складовими евтектики.

Високі механічні характеристики АМК сплаву А356 одержали автори роботи [43] методом композитного лиття. У роботі порівнюються характеристики композитів, отриманих композитним литвом і литтям із перемішуванням (табл. 3). Пористість та розмір зерен у композитному литті були нижчими, ніж у процесі лиття з перемішуванням, оскільки змочуваність частинок у композитного лиття була кращою, ніж при перемішуванні. Пластичність АМК при цьому також була вищою.

У роботі [45] оксид алюмінію нагрівали до 800 °С та додавали до розплаву А359 (АК9ч) при 700 °С у кількості 2...8 % мас., використовуючи електромагнітне перемішування, яке призводить до більшого подрібнення зерна та кращого зв'язування між частинками матриці. Це також позитивно впливає на механічні властивості сплаву, що відображено в табл. 4.

Таблиця 3
Характеристики композитів $\text{A356-Al}_2\text{O}_3$, одержаних ливарним способом

Вміст Al_2O_3 , % мас.	Особливості армування	Методика	Розмір часток, мкм	σ_r , МПа	σ_b , МПа (розтяг.)	σ_b , МПа (стиск.)	НВ	Зносо- стійкість K_{zn}
0	—	Лиття з перемішув., подача арм. під тиском в Аг [40]	—	45	—	—	44	0,67
5	—		2	64	—	—	58	0,51
5	1100 °С, 20 хв		2	76	—	—	65	0,48
5	помел з Al		0,2	142	—	—	75	0,42
5	помел з Si		0,15	131	—	—	68	0,45
0	—	Лиття з перемішув., подача арм. під тиском в Аг [41]	—	—	—	234	53	—
1	300 об/хв		20	—	—	250	62	—
3	300 об/хв		20	—	—	310	64	—
5	200 об/хв		20	—	—	—	68	—
5	300 об/хв		20	—	—	390	73	—
5	450 об/хв		20	—	—	—	72	—
1	+0,3 %мас. Sr	Лиття [42]	0,3	—	—	374	70	0,22
1	—	Лиття з перемішув. [43]	20	87	142	272	63	—
3	—		20	94	148	348	64	—
5	—		20	98	154	423	72	—
7,5	—		20	93	153	450	75	—

Сплав А360, армований оксидом алюмінію, використовують при виготовленні поршнів, корпусів коробок передач і деталей двигунів з огляду на високу термічну стабільність та механічні властивості таких композитів [46]. Зі сплавів А356 і 443.0, армованих Al_2O_3 , виготовляють корпуси насосів та пропелерів, що працюють у морському середовищі, оскільки армування покращує їх корозійну стійкість і довговічність

Таблиця 4

Твердість та міцність на розтяг композиту АК9ч+Al₂O₃ [45]

Вміст Al ₂ O ₃ , %мас.	Твердість НВ	σ _в , МПа
2	51,5	108,7
4	58,5	120,6
6	66,7	133,8
8	72,8	148,7

АМК Al-ZrO₂. Оксид цирконію може мати тетрагональну та моноклінну ґратку, а його густина становить 5,68 г/см³. Наявність частинок ZrO₂ в матриці алюмінію призводить до підвищення міцнісних характеристик та зносостійкості, в тому числі при підвищених температурах.

Широких досліджень використання оксиду цирконію для армування чистого алюмінію з використанням ливарних технологій немає. У роботі [49] досліджували додавання 3...12 % мас. ZrO₂ до сплаву А356 при литті з перемішуванням зі швидкістю 950 об/хв. Температура розплаву становила 850 °С, а ZrO₂, нагрітий до 575 °С, повільно вводили до розплаву під час перемішування. Мікроструктури зразків композиту показані на рис. 1, а механічні характеристики — на рис. 2. Серед переваг одержаних композитів відзначимо відсутність пористості та додаткових реакцій під час плавлення й кристалізації. При цьому зростання вмісту ZrO₂ зумовлює підвищення крихкості.

Інше дослідження з матрицею зі сплаву 512.0 [50] проводили за аналогічних умов, але оксид цирконію нагрівали до 200 °С протягом 20 хв для видалення вологи. До нього

при контакті із солоною водою [47]. Покращена електропровідність і стійкість до окислення роблять вказані та подібні до них АМК якісним матеріалом для теплообмінних пластин і елементів систем охолодження [48]. АМК на основі сплаву А319 (АК5М2) використовують при виробництві корпусів електронних пристроїв [10] та виготовленні зносостійких деталей інструментів, що піддають високим механічним навантаженням [46].

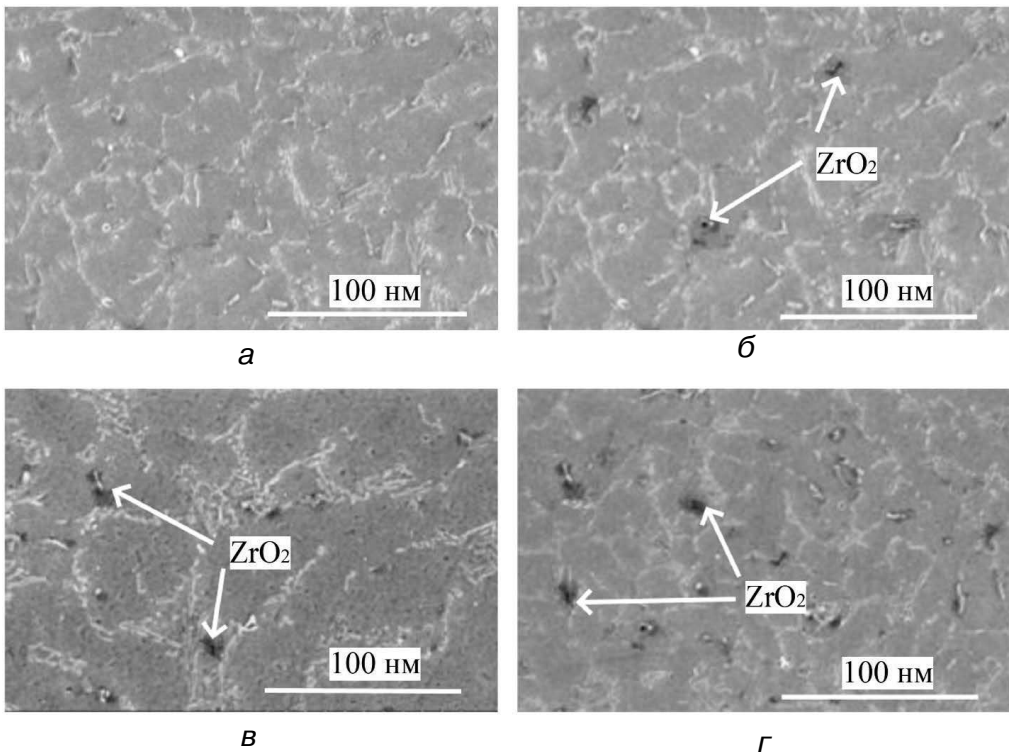


Рис. 1. Мікроструктури зразків АМК сплаву А356 (а); 3% (б); 6% (в); 12% мас. (г) оксиду цирконію [49]

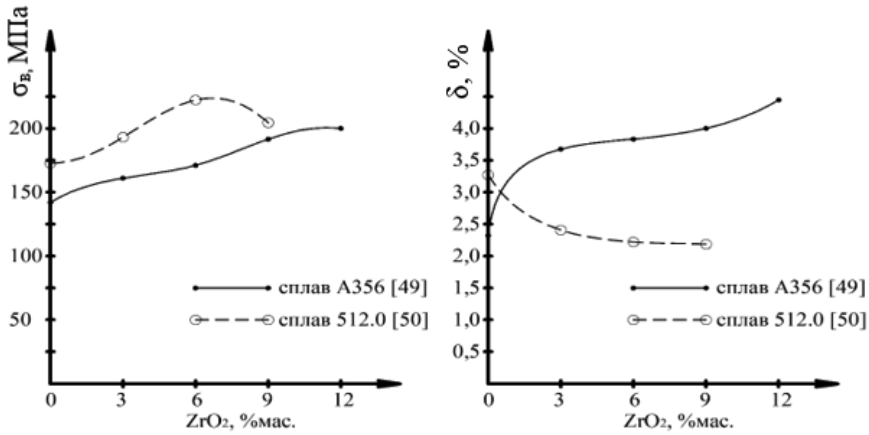


Рис. 2. Залежність міцності на розтяг (ліворуч) та пластичності (праворуч) для ливарних алюмінієвих сплавів армованих оксидом цирконію

повільно додавали розплав сплаву 512.0 та перемішували зі швидкістю 600 об/хв. Температура заливки розплаву в підігріту до 650 °С форму становила 750 °С. Для забезпечення кращої змочуваності частинок до розплаву додавали магній у кількості 0,5 % мас. Одержані результати представлено на рис. 3.

Практичне використання АМК із додаванням оксиду цирконію зумовлене суттєвим зростанням термічної стійкості та механічних властивостей матричного сплаву. Із композитів А.360/ZrO₂, для прикладу, виготовляють корпуси двигунів і шестерень в автомобільній галузі [51], корпуси авіаційних компонентів [52] та високоміцні деталі для тракторів і механізмів дозування, що працюють в умовах інтенсивного тертя [46].

Інші наповнювачі — карбіди, такі як SiC, WC та B₄C є одними з найбільш ефективних армуючих матеріалів для алюмінієвих матричних композитів (АМК) завдяки їх високій

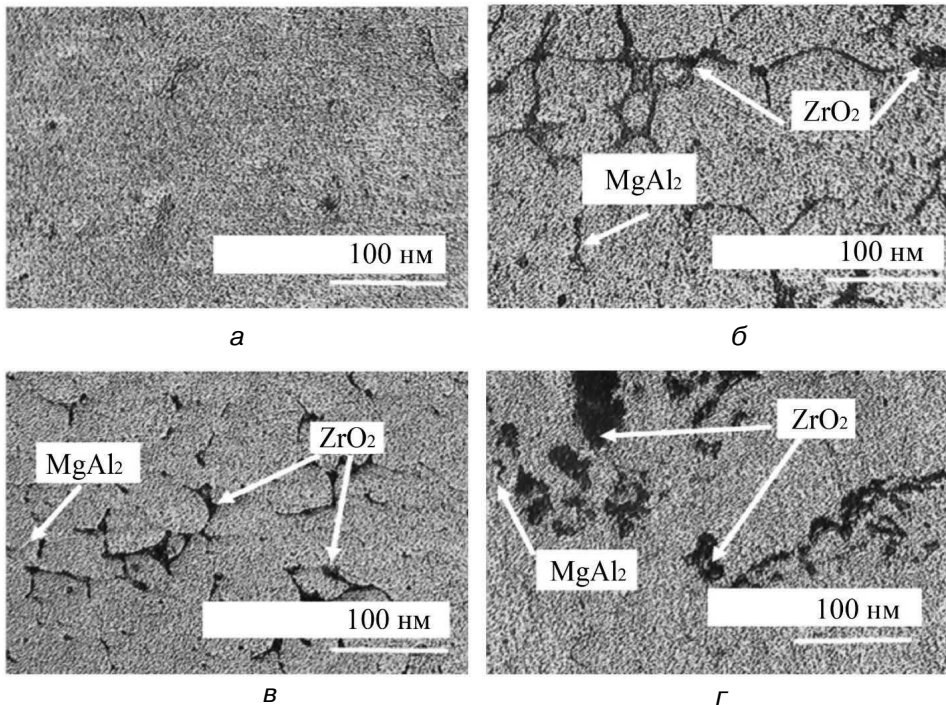


Рис. 3. Мікроструктури сплаву 512.0 (а) з додаванням 3% (б); 6% (в); 9% мас. (г) оксиду цирконію [50]

твердості і термостійкості. Їх застосовують при виробництві зносостійких деталей, зокрема підшипників, гальмівних дисків та елементів двигунів, що працюють в умовах інтенсивного тертя, високих температур і агресивних середовищ.

АМК Al-SiC. Карбід кремнію є доволі дешевим та поширеним армуючим матеріалом для створення АМК, який має високу твердість, зносостійкість і термостабільність. У комплексі з ливарними алюмінієвими сплавами SiC значно покращує механічні властивості, у тому числі міцність на розтяг і твердість. Використання ливарних технологій, таких як змішувальне лиття і лиття під тиском, дозволяє ефективно інтегрувати частинки SiC у розплав, забезпечуючи доволі однорідний розподіл зміцнювальних фаз [53, 54].

Проведені дослідження показують, що армування карбідом кремнію при використанні ливарних технологій є ефективним лише у випадках дрібнодисперсних розмірів часток та наявності в матричному сплаві кремнію та магнію. Армування сплаву А356 наночастинками SiC розмірами до 50 нм із додатковим модифікуванням 1 % мас. магнію при литті з перемішуванням значно підвищує зносостійкість композита, що відображають графіки на рис. 4 [53]. При цьому розплав продували азотом, щоб мінімізувати окислення розплавленого алюмінію. Вищу твердість (табл. 5) одержаних композитних зразків порівняно з матричним алюмінієвим сплавом можна пояснити зменшенням розміру зерен та наявністю дисперсних твердих частинок, що перешкоджають руху дислокацій і спричиняють зміцнення за механізмом Орована [53, 55].

У дослідженні [56] автори одержали композит А356-10 % мас. SiC технологією лиття з перемішуванням. Під час перемішування до розплаву у невеликій кількості додавали магній для покращення змочування, а армуючі частинки попередньо нагрівали до 650 °С. Експериментальні зразки мали високий ступінь пористості. Частинки SiC скупчуються в міждендритних областях, а їх геометричне захоплення дендритами спостерігається рідко. Отже, вони завжди відштовхуються фронтом зростання дендритів під час кристалізації, незалежно від відстані між дендритними гілками [56, 57]. Одержані АМК мають меншу міцність на розрив, проте суттєво вищу твердість, порівняно з матричним сплавом.

У роботі [58] досліджено гібридні композити, які містили, окрім SiC, золю рисового лушпиння (90 % Si; 5 % C; 1,5 % CaO; 0,6 % MgO), подрібнену до середніх розмірів 25 мкм. Композити отримували шляхом лиття з перемішуванням з додаванням магнію та попереднім нагріванням армуючих частинок (табл. 5). Кількість золи, що додавалась до розплаву, дорівнювала масі частинок SiC. Використання такої добавки дозволяє одержувати якісні АМК із мінімальними витратами на армуючі матеріали.

Композити А356-SiC все частіше використовують як матеріали для зниження маси деталей та конструкцій при зівставних механічних властивостях. Із таких композитів виготовляють шестерні, поршні та гальмівні диски автомобілів. Висока жорсткість, зносостійкість і мала густина вказаних композитів зумовлює їх використання як гальмівних шасі авіатранспорту [59]. Також використання цих АМК поширене для легких підшипників [60].

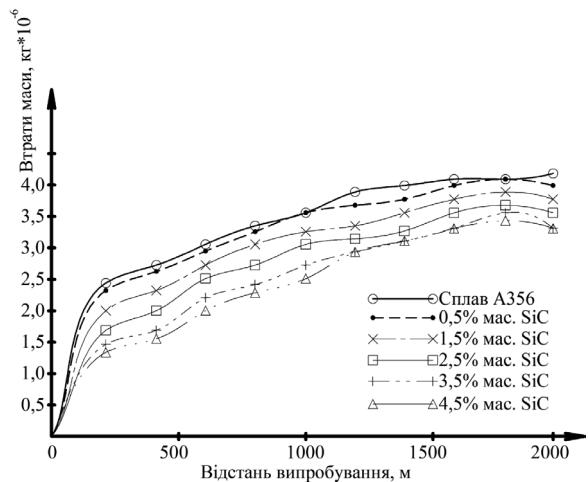


Рис. 4. Залежність втрати маси зразків АМК А356+SiC при випробуванні в умовах сухого тертя ковзання [53]

Таблиця 5

Твердість та міцність на розрив композиту A356+SiC

Вміст SiC, % мас.	Розмір часток, нм	Матричний сплав	Твердість НВ	σ_b , МПа
0	–	A356 [53, 55]	53	163
0,5	50		64	201
1,5	50		68	215
2,5	50		73	228
3,5	50		76	264
4,5	50		75	217
0	–	A356 [56]	53	165
10	25 мкм		100	146
0	–	A356.2 [58]	68	168
2	35 мкм		74	182
4	35 мкм		83	196
6	35 мкм		96	230
8	35 мкм		104	258

АМК Al-WC. Карбід вольфраму зберігає свою міцність при високих температурах і має низький коефіцієнт теплового розширення й високу корозійну та зносостійкість [61]. У роботі [62] досліджено вплив додавання WC до алюмінію. Такий композит отримували методом лиття з перемішуванням при відсотковій частці 1–5 % мас. WC. Механічні характеристики зростали при додаванні до 4 % мас. та падали після перевищення цього значення. Більшість досліджень, присвячених додаванню WC, пов'язані з заевтектичними алюмінієвими сплавами.

Автори [63] дослідили одержання АМК із карбідом вольфраму методом лиття з перемішуванням із матричним сплавом А356. Зразки, що містили 6 % мас. WC мали на 30 % кращу зносостійкість порівняно з базовим сплавом. При цьому такий АМК необхідно було піддавати старінню при 150 °С, що підвищує твердість композиту більше ніж на 45 % та знижує пористість. Такі АМК з карбідом вольфраму можна використовувати як поршні, гальмівні диски та інші деталі машинобудування, що працюють в умовах інтенсивного зношування [64, 65].

АМК Al-B₄C. Карбід бору (B₄C) є одним із найтвердіших та найлегших керамічних матеріалів, що робить його ідеальним для зміцнення алюмінієвих матричних композитів, створених методом лиття. Композити, армовані B₄C, демонструють підвищену міцність, зносостійкість, твердість і високу термостійкість. Лиття під тиском дозволяє рівномірно розподілити частинки B₄C у матриці, забезпечуючи високу якість кінцевого виробу. Наприклад, для сплаву А356, армованого 3 % мас. B₄C, спостерігається значне підвищення міцності та однорідності структури завдяки рівномірному розподілу зміцнюючих частинок [66].

У роботі [67] описано і досліджено створення гібридних АМК на основі оксиду алюмінію та карбіду бору. Композит виготовляли за технологією лиття з перемішуванням. Як матричний матеріал використовували сплав А356. АМК, що містив 3 % мас. B₄C та 2% мас. Al₂O₃ мав твердість 53 НВ. Зразки, що містили 2 % мас. B₄C та 3% мас. Al₂O₃, мали твердість 48 НВ. Міцність на розрив одержаних композитів менша, ніж в матричного сплаву, однак ударна в'язкість підвищувалась зі збільшенням вмісту карбіду в композиті.

Композити на основі карбіду бору застосовуються лише у вузьких, спеціалізованих галузях, таких як авіація, космічна техніка та бронетехніка, де їх унікальні властивості виправдовують високу вартість і складність виготовлення [68]. B₄C доволі погано змочується алюмінієм [69], що вимагає використання флюсів, які помітно підвищують

собівартість композита. Також карбід може сприяти утворенню фаз AlB_2 та Al_3C_4 , що знижують його механічні властивості [70].

Висновки

Лиття з перемішуванням та лиття під тиском — це найбільш економічно вигідні і технологічно універсальні методи виготовлення алюмоматричних композитів. Сучасний розвиток ливарних технологій усе більше нівелює недоліки лиття при одержанні АМК, порівняно з методами порошкової металургії. Для оптимізації ливарних процесів виробництва АМК з оксидами й карбідами необхідно розробляти економічно ефективні методи поліпшення змочуваності частинок, використовувати комп'ютерне моделювання для передбачення властивостей композитів та вдосконалювати технології перемішування й обробки готових виробів, такі як термічна, механічна, деформаційна, ультразвукова чи електромагнітна обробки для мінімізації дефектів і пористості.

References

- 1 Pravin, R., & Raj, S. K. (2019). Stir casting & processing of aluminum matrix composites. In *Advances in basic science (ICABS 2019)*. AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/1.5122395>
- 2 Fan, Q., Yang, Y., & Wang, M. (2017). Research on key welding technologies of aluminum matrix composites. In *2017 international conference on materials science and biological engineering*. Francis Academic Press. <https://doi.org/10.25236/icmsbe.2017.03>
- 3 Singh, L., Kumar, S., Raj, S., Badhani, S., & Badhani, P. (2021). Aluminium metal matrix composites: manufacturing and applications. In *IOP conf. series: materials science and engineering*. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1149/1/012025>
- 4 Lakshmikanthan, A., Angadi, S., Malik, V., Saxena, K. K., Prakash, C., Dixit, S., & Mohammed, K. A. (2022). Mechanical and tribological properties of aluminum-based metal-matrix composites. *Materials*, 15(17), 6111. <https://doi.org/10.3390/ma15176111>
- 5 Yadav, V. (2011). *Spark plasma sintering of aluminum matrix composites* [Master's dissertation, Oklahoma State University]. ISBN-13: 978-1-249-08584-3. <https://core.ac.uk/download/pdf/215277828.pdf>
- 6 Izadi, H., Nolting, A., Munro, C., Bishop, D., Plucknett, K., & Gerlich, A. (2013). Friction stir-processing of Al/SiC composites fabricated by powder metallurgy. *Journal of materials processing technology*, 213, 1900-1907. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.012>
- 7 Muribwathoho, O., Msomi, V., & Mabuwa, S. (2022). Metal matrix composite fabricated with 5000 Series marine grades of aluminium using FSP technique: State of the art review. *Applied Sciences*, 12(24), 12832. <https://doi.org/10.3390/app122412832>
- 8 Sukumaran, K., Ravikumar, K. K., Pillai, S. G. K., Rajan, T. P. D., Ravi, M., Pillai, R. M., & Pai, B. C. (2008). Studies on squeeze casting of Al 2124 alloy and 2124-10% SiCp metal matrix composite. *Materials science and engineering: A*, 490(1-2), 235-241. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.01.054>
- 9 Jokhio, M. H., Panhwer, M. I., & Unar, M. A. (2010). Manufacturing of aluminum composite material using stir casting process. *Mehran university research journal of engineering and technology*, 30(1), 53-64. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1604.01251>
- 10 Rathod, N. R., & Menghani, J. (2019). A consequence of reinforcements in aluminum-based metal matrix composites: a literature review. *Metallurgical and materials engineering*, 25(3), 195-208. <https://doi.org/10.30544/422>
- 11 Q., Rottmair, C., & Singer, R. (2010). CNT reinforced light metal composites produced by melt stirring and by high pressure die casting. *Composites science and technology*, 70(16), 2242-2247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.09.012>
- 12 Sharma, A. K., Bhandari, R., & Pinca-Bretotean C. (2021). A systematic overview on fabrication aspects and methods of aluminum metal matrix composites. *Materials today: proceedings*, 45(5), 4133-4138. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.899>

- 13 Su H., Gao W., Feng Z., & Lu Z. (2012). Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al_2O_3 particle reinforced aluminum matrix composites. *Materials & Design*, 36, 590-596. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.064>
- 14 Sayuti, M., Sulaiman, S., Baharudin, B. T. H. T., & Arifin, M. K. A. (2016). Metal matrix composite products by vibration casting method. Reference module in materials science and materials engineering: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04082-0>
- 15 Kim, C.-S., Cho, K., Manjili, M. H., & Nezafati, M. (2017). Mechanical performance of particulate-reinforced Al metal-matrix composites (MMCs) and Al metal-matrix nano-composites (MMNCs). *Journal of materials science*, 52(23), 13319-13349. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1378-x>
- 16 Vijayaram, T. R., Sulaiman, S., Hamouda, A. M. S., & Ahmad, M. H. M. (2006). Fabrication of fiber reinforced metal matrix composites by squeeze casting technology. *Journal of materials processing technology*, 178(1-3), 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.026>
- 17 Woo, K. D., & Huo, H. W. (2006). Effect of high-energy ball milling on displacement reaction and sintering of Al-Mg/ SiO_2 composite powders. *Metals and materials international*, 12(1), 45-50.
- 18 Afkham, Y., Khosroshahi, R. A., Rahimpour, S., Aavani, C., Brabazon, D., & Mousavian, R. T. (2018). Enhanced mechanical properties of in situ aluminium matrix composites reinforced by alumina nanoparticles. *Archives of civil and mechanical engineering*, 18, 215-226. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.06.011>
- 19 Gawdzińska, K., Chybowski, L., & Przetakiewicz, W. (2016). Proper matrix-reinforcement bonding in cast metal matrix composites as a factor of their good quality. *Archives of civil and mechanical engineering*, 16, 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2015.11.004>
- 20 Maleki, A., Niroumand, B., & Meratian, M. (2015). Effects of processing temperature on in-situ reinforcement formation in Al (Zn)/ Al_2O_3 (ZnO) nanocomposite. *Metallurgical and materials engineering*, 21(4), 283-291. Retrieved from <https://metall-mater-eng.com/index.php/home/article/view/75>
- 21 Ullah-Khan, S., Wanwu, D., Ullah-Khan, Q., Khan, S., Alam, A., Ullah, A., & Ullah, H. (2021). An analysis of in-situ synthesized Al 6061 alloy metal matrix composites: Review. *European journal of materials science and engineering*, 6(4), 220-233. <https://doi.org/10.36868/ejmse.2021.06.04.220>
- 22 Yu, P., Mei, Z., & Tjong, S. (2005). Structure, thermal and mechanical properties of in situ Al-based metal matrix composite reinforced with Al_2O_3 and TiC submicron particles. *Materials chemistry and physics*, 93, 109-116.
- 23 Muley, A. V., Aravindan, S., & Singh, I. (2015). Nano and hybrid aluminium-based metal matrix composites: an overview. *Manufacturing review*, 2, 15. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2015018>
- 24 Tavoosi, M., Karimzadeh, F., & Enayati, M. (2008). Fabrication of Al-Zn/ $\alpha-Al_2O_3$ nanocomposite by mechanical alloying. *Materials letters*, 62(2), 282-285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2007.05.017>
- 25 Zhu, H., Wang, H., Ge, L., Xu, W., & Yuan, Y. (2008). Study of the microstructure and mechanical properties of composites fabricated by the reaction method in an Al-TiO₂-B₂O₃ system. *Materials science and engineering: A*, 478(1-2), 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.076>
- 26 Yang, B., Sun, M., Gan, G., Xu, C., Huang, Z., Zhang, H., & Fang, Z. Z. (2010). In situ Al_2O_3 particle-reinforced Al and Cu matrix composites synthesized by displacement reactions. *Journal of alloys and compounds*, 494(1-2), 261-265. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.01.005>
- 27 Ogawa, F., & Masuda, C. (2014). Fabrication of carbon nanofiber-reinforced aluminum matrix composites assisted by aluminum coating formed on nanofiber surface by in-situ chemical vapor deposition. *Materials research express*, 2(1), 015601. <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/2/1/015601>

- 28 Xu, Z., Choi, Y., Matsugi, K., Li, D., & Sasaki, G. (2010). Mechanical and thermal properties of vapor-grown carbon fiber reinforced aluminum matrix composites by plasma sintering. *Materials transactions*, 51(3), 510-515. <https://doi.org/10.2320/matertrans.mbw200918>
- 29 Kataria, M., & Mangal, S. K. (2018). Characterization of aluminium metal matrix composite fabricated by gas injection bottom pouring vacuum multi-stir casting process. *Metallic materials*, 56(4), 231-243. https://doi.org/10.4149/km_2018_4_231
- 30 Jia, S., Xuan, Y., Nastac, L., Allison, P. G., & Rushing, T. W. (2016). Microstructure, mechanical properties and fracture behavior of 6061 aluminium alloy-based nanocomposite castings fabricated by ultrasonic processing. *International journal of cast metals research*, 29(5), 286-289. <https://doi.org/10.1080/13640461.2016.1181232>
- 31 Sathiyaraj, S., Selvababu, B., Maqsood, A., Baskar, B., & Harsha, V. (2019). Fabrication and microstructure examination of Al-SiC MMCs via stir casting technique. *International journal of innovative technology and exploring engineering*, 9(2S4), 461-464. <https://doi.org/10.35940/ijitee.b1213.1292s419>
- 32 Thippeswamy, J. C., & Sathisha, N. (2019). Experimental investigations on mechanical properties of AL8081 reinforced with B₄C particulate MMC's. *Journal of Experimental & Applied Mechanics*, 10(2). <https://doi.org/10.37591/joeam.v10i2.2997>
- 33 Vijayakumar, M., Pradeep-Rai, M., Muthukrishnan, M., & Gnanakumar, N. (2022). Stir casting and successive rolling of aluminium alloy 2218 MMCs reinforced by high-entropy alloy particles. *Key engineering materials*, 935, 151-159. <https://doi.org/10.4028/p-4o2q09>
- 34 Kainer, U. K. (Ed.). (2006). *Metal matrix composites: Custom-made materials for automotive and aerospace engineering*. Wiley-VCH.
- 35 Sayuti, M., Sulaiman, S., Baharudin, B. T. H. T., & Arifin, M. K. A. (2016). *Metal matrix composite products by vibration casting method*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04082-0>
- 36 Xiao, C., Chen, L., Tang, Y., Zhang, X., Zheng, K., & Tian, X. (2019). Three-dimensional porous alumina network for polymer composites with enhanced thermal conductivity. *Composites part A: Applied science and manufacturing*, 124, 105511. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105511>
- 37 Sangghaleh, A., & Halali, M. (2008). An investigation on the wetting of polycrystalline alumina by aluminium. *Journal of materials processing technology*, 197(1-3), 156-160. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.024>
- 38 Mula, S., Padhi, P., Panigrahi, S. C., Pabi, S. K., & Ghosh, S. (2009). On structure and mechanical properties of ultrasonically cast Al-2%Al₂O₃ nanocomposite. *Materials research bulletin*, 44(5), 1154-1160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.materresbull.2008.09.040>
- 39 Aybarç, U., Ertuğrul, O., & Seydibeyoğlu, M. Ö. (2020). Effect of Al₂O₃ particle size on mechanical properties of ultrasonic-assisted stir-casted al A356 matrix composites. *International journal of metalcasting*, 2, 638-649. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00490-7>
- 40 Nourouzi, S., Damavandi, E., & Rabiee, S. M. (2016). Microstructural and mechanical properties of Al-Al₂O₃ composites focus on experimental techniques. *International journal of microstructure and materials properties*, 11(5). <http://dx.doi.org/10.1504/IJMMP.2016.10001593>
- 41 Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., & Beygi, H. (2011). Microstructure and mechanical properties of Al-Al₂O₃ micro and nano composites fabricated by stir casting. *Materials science and engineering: A*, 528(29-30), 8765-8771. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.052>
- 42 Hossein-Zadeh, M., Mirzaee, O., & Saidi, P. (2014). Structural and mechanical characterization of Al-based composite reinforced with heat treated Al₂O₃ particles. *Materials & Design*, 54(2), 245-250. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.036>
- 43 Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., & Torabi Parizi, M. (2011). Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Materials & Design*, 34, 106-111. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.037>

- 44 Chou, S. N., Lu, H. H., Lii, D. F., & Huang, J. L. (2009). Processing and physical properties of Al₂O₃/aluminum alloy composites. *Ceramics international*, 35(1), 7-12. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.09.019>
- 45 Kumar, A., Lal, S., & Kumar, S. (2013). Fabrication and characterization of A359/Al₂O₃ metal matrix composite using electromagnetic stir casting method. *Journal of materials research and technology*, 2(3), 250-254. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.03.015>
- 46 Praneeth, J., & Naveen, N. (2017). Aluminium based metal matrix composites: A review of reinforcement; mechanical, wear properties. *International journal for research in applied science & engineering technology*, 5(10), 1232-1235. <http://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10178>
- 47 Nicolais, L., Singh, H., & Dhindaw, B. K. (2012). Metal matrix composites: Aluminum. In L. Nicolais (Ed.), *Wiley encyclopedia of composites*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118097298.weoc137>
- 48 Tian, X. (2018). Preparation and forming technology of particle reinforced aluminum matrix composites. *Materials Science and Advanced Composite Materials*, 1(1), 501. <https://dx.doi.org/10.18063/MSACM.V1I1.501>
- 49 Govindan, K., & Raghuvaran, J. G. (2019). Mechanical properties and metallurgical characterization of LM25/ZrO₂ composites fabricated by stir casting method. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(3). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0753>
- 50 Prakash, J. U., Jebarose, J. S., Salunkhe, S., Gawade, S. R., Nasr, E. S. A., & Kamrani, A. K. (2023). Mechanical characterization and microstructural analysis of stir-cast aluminum matrix composites (LM5/ZrO₂). *Crystals*, 13(8), 1220. <https://doi.org/10.3390/cryst13081220>
- 51 Pandiyarajan, R., Maran, P., Marimuthu, S., & Ganesh, K. C. (2017). Synthesis and characterization of zirconium dioxide particulate reinforced aluminium alloy metal matrix composite. *Journal of Advanced Composites*.
- 52 Dinesh, M., & Ravindran, R. (2016). Evaluation of mechanical and corrosive properties of aluminium AA7075 metal matrix composites. *Journal of Applied Composites*, 12(21). <https://dx.doi.org/10.24297/JAC.V12I21.116>
- 53 Mazahery, A., & Shabani, M. O. (2012). Nano-sized silicon carbide reinforced commercial casting aluminum alloy matrix: experimental and novel modeling evaluation. *Powder technology*, 217, 558-565. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.11.020>
- 54 Selvababu, S., Ravikumar, G., & Mahendran, M. (2019). Investigation of mechanical properties of aluminium composites reinforced with silicon carbide. *International journal of innovative technology and exploring engineering*, 8(2S4), 350-353. <https://dx.doi.org/10.35940/ijitee.B1213.1292S419>
- 55 Mazahery, A., & Shabani, M. O. (2012). Characterization of cast A356 alloy reinforced with nano SiC composites. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 22(2), 275-280. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)61171-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)61171-0)
- 56 Rajmohan, T., Palanikumar, K., & Ranganathan, S. (2013). Evaluation of mechanical and wear properties of hybrid aluminium matrix composites. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 23(9), 2509-2517. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(13\)62762-4](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(13)62762-4)
- 57 Basavarajappa, S., Mohan, C. G., Mukund, K., Ashwin, M., & Prabhu, M. (2006). Dry sliding wear behaviour of Al 2219/SiC/Gr hybrid metal matrix composites. *Journal materials engineering and performance*, 15(6), 668-674.
- 58 Prasad, D. S., Shoba, C., & Ramanaiah, N. (2014). Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. *Journal of materials research and technology*, 3(1), 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.11.002>
- 59 Mohanavel, V., Rajan, K., & Kumar, S. S. (2018). Effect of silicon carbide reinforcement on mechanical and physical properties of aluminum matrix composites. *Materials today: proceedings*, 5(2), 11820-11826. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.089>

- 60 Ranjbaran, M. M. (2010). Experimental investigation of fracture toughness in Al 356-SiCp aluminium matrix composite. *American journal of scientific and industrial research*, 1(3), 549-557. <https://doi.org/10.5251/ajsir.2010.1.3.549.557>
- 61 Esteve, J., Zambrano, G., Rincon, C., Martinez, E., Galindo, H., & Prieto, P. (2000). Mechanical and tribological properties of tungsten carbide sputtered coatings. *Thin solid films*, 373(1-2), 282-286. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01108-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01108-1)
- 62 Krishna, A. R., Arun, A., Unnikrishnan, D., & Shankar, K. V. (2018). An investigation on the mechanical and tribological properties of alloy A356 on the addition of WC. *Materials today: proceedings*, 5(5), 12349-12355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.213>
- 63 Hegde, N. T., Pai, D., & Hegde, R. (2019). Heat treatment and mechanical characterization of LM-25/tungsten carbide metal matrix composites. *Materials today: proceedings*, 19, 810-817. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.136>
- 64 Anand, P., Rajesh, D., Lenin, N., Balaji, V., & Raja, V. K. B. (2021). Enhancement of mechanical characterization of aluminum alloy with tungsten carbide metal matrix composite by particulate reinforcements. *Materials today: proceedings*, 46(9), 3690-3692. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.848>
- 65 Arivukkarasan, S., Dhanalakshmi, V., & Stalin, B. (2018). Mechanical and tribological behaviour of tungsten carbide reinforced aluminum LM4 matrix composites. *Journal of composite materials*, 52(12), 1234-1242. <https://doi.org/10.1080/02726351.2017.1331285>
- 66 Khademian, M., Alizadeh, A., & Abdollahi, A. (2017). Fabrication and characterization of hot rolled and hot extruded boron carbide (B C) reinforced A356 aluminum alloy matrix composites produced by stir casting method. *Transactions of the Indian institute of metals*, 70(3), 601-608. <https://doi.org/10.1007/s12666-016-0962-0>
- 67 Vijaya Ramnath, B., Elanchezhian, C., Jaivignesh, M., Rajesh, S., Parswajinan, C., & Siddique Ahmed Ghias, A. (2014). Evaluation of mechanical properties of aluminium alloy-alumina-boron carbide metal matrix composites. *Materials & Design*, 58, 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.068>
- 68 Shirvanimoghaddam, K., & Khayyam, H. (2016). Boron carbide reinforced aluminium matrix composite: Physical, mechanical characterization and mathematical modelling. *Materials science and engineering: A*, 658, 135-149. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.114>
- 69 Sharma, D. K., Sharma, M., & Upadhyay, G. (2019). Boron carbide (B4C) reinforced aluminum matrix composites (AMCs). *International journal of innovative technology and exploring engineering*, 9(1), 2194-2203. <https://doi.org/10.35940/ijitee.a4766.119119>
- 70 Nie, C. Z., Gu, J. J., Liu, J. L., & Zhang, D. (2007). Production of boron carbide reinforced 2024 aluminum matrix composites by mechanical alloying. *Materials transactions*, 48(5), 990-995. <https://doi.org/10.2320/matertrans.48.990>

Received 23.01.2025

R.F. Likhatskyi, Ph.D. (Engin.), Junior Researcher; e-mail: richard.kpi@outlook.com;
<https://orcid.org/0000-0001-8277-5122>

M.M. Voron, Ph.D. (Engin.), Senior Researcher; e-mail: mihail.voron@gmail.com;
<https://orcid.org/0000-0002-0804-9496>

A.V. Narivsky, Dr. Sci. (Engin.), Head of Department; e-mail: av.narivskii@gmail.com;
ORCID 0000-0002-1596-6401

V.O. Tverdokhvalov, Ph.D. (Engin.), Researcher

I.F. Likhatskyi, Ph.D student; e-mail: likhatskyi8@gmail.com;
ORCID 0000-0002-2069-5255

E.O. Matviets, Chief Technologist

ALUMINUM MATRIX COMPOSITES BASED ON CASTING ALUMINUM ALLOYS WITH OXIDES AND CARBIDES

The paper considers the technological features of obtaining as-cast aluminum matrix composite materials (AMC), reinforced by oxide and carbide particles Al_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiC, B_4C and WC. Because of the development of active mixing casting, in-situ synthesis, friction stirring, etc. methods, high-quality composites with favorable structural characteristics and a high level of mechanical properties can be created and obtained. Among many considered methods of obtaining as-cast aluminum matrix composites, one of the most universal and widely used are melt active mixing casting and injection molding. The first method is universal for stirring and distributing reinforcing particles, and the second allows to minimize structure defects and porosity. It has been shown that high dispersion of oxide and carbide additives often leads to negative consequences – defects of non-integration and powders agglomeration. Large particles of reinforcing components, in turn, lead to the formation of pores. Better absorption of powder additives by increasing their wettability ensures by several methods, among which the most effective are their preheating, surface activation, or adding magnesium to the aluminum melt in an amount of up to 1 wt. %. The vast majority of studies are devoted to the creation of AMC based on the A356 alloy. The most popular additives in this case are Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC, B_4C and WC. The optimal content of fillers for most of the studied compositions is about 2-6 wt. %. The optimal particle size is within 5-35 microns, which is expressed in an increase in the hardness of the composites. A larger particle size has little effect on the mechanical properties of the alloys, and nanometer sizes can lead to their uneven distribution and defects in the products structure.

Keywords: as-cast composite materials, aluminum matrix composites, oxide and carbide additives, absorption of reinforcing phases.