
КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2026.01.003>

УДК 669.715:539.4

А.В. Нарівський, докт. техн. наук, проф., член-кор. НАН України;
e-mail: av.narivskii@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-1596-6401>

С.Л. Поливода, наук. співроб.; e-mail: etma@i.ua;
<https://orcid.org/0009-0002-8906-0693>

А.Ю. Семенко, канд. техн. наук, ст. досл., ст. наук. співроб.;
e-mail: semenko.au@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>

В.О. Твердохвалов, канд. техн. наук., ст. наук. співроб.;
e-mail: tverdohvalov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3756-7639>

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

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ЗНИЖЕННЯ ВМІСТУ СКАНДІЮ У ВИСОКОМІЦНІХ СПЛАВАХ СИСТЕМИ Al–Mg

У статті представлено комплексний огляд сучасних підходів до вирішення проблеми зниження вмісту скандію в алюмінієвих сплавах системи Al–Mg із вмістом магнію 4,5–6,5 мас. %. Скандій є одним із найбільш ефективних мікролегуючих елементів, який забезпечує формування когерентних дисперсних частинок Al_3Sc , що сприяють подрібненню зерна, пригніченню рекристалізації та суттєвому підвищенню механічних властивостей алюмінієвих сплавів. Водночас висока вартість скандію обмежує його широке промислове застосування, що зумовлює актуальність пошуку рішень для його принаймні часткової заміни без помітної втрати переваг від його додавання. На основі аналізу сучасних літературних джерел розглянуто можливості часткової або повної заміни скандію за рахунок мікролегування рідкісноземельними та перехідними металами (РЗМ та ПМ) цирконієм, ітрієм, ербієм, лантаном та індієм. Показано, що ітрій та ербій, як і скандій, здатні утворювати когерентні інтерметалідні фази зі структурою $L1_2$, які забезпечують дисперсійне зміцнення та стабілізацію мікроструктури. Особливу увагу приділено ролі цирконію, який у поєднанні зі скандієм формує термічно стабільні частки $Al_3(Sc,Zr)$, що дозволяє суттєво зменшити вміст Sc без суттєвої втрати характеристик міцності. Обґрунтовано перспективність комплексного легування систем Sc–Y–Zr як ефективного підходу до оптимізації співвідношення механічних властивостей і вартості сплавів Al–Mg. Показано, що зниження вмісту скандію при збереженні високої міцності, пластичності і термічної стабільності відкриває широкі можливості для застосування таких сплавів в авіаційній, суднобудівній і транспортній галузях.

Ключові слова: сплави системи Al–Mg, модифікування, мікролегування, скандій, ітрій, цирконій, рідкісноземельні метали, дисперсійне зміцнення.

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

Вступ

Алюмінієві сплави системи Al–Mg із вмістом магнію 4,5–6,5 традиційно широко застосовуються в авіаційній, суднобудівній та аерокосмічній галузях через поєднання високої питомої міцності, відмінної корозійної стійкості та гарної зварюваності [1]. Ключовим фактором, що дозволяє значно підвищити механічні характеристики таких сплавів, є легування скандієм (Sc).

Скандій — це один із найефективніших мікролегуючих елементів для алюмінієвих сплавів [2]. Він утворює когерентні нанорозмірні інтерметаліди Al_3Sc зі структурою L_{12} , які ефективно подрібнюють зерно, забезпечують дисперсійне зміцнення та гальмують рекристалізацію. Ці механізми дозволяють значно підвищити межу текучості, міцність і термічну стабільність сплаву, що робить його конкурентоспроможним у виробництві високонавантажених деталей [3, 4]. Водночас скандій є високовартісним елементом, що обмежує його широке промислове застосування та визначає актуальність пошуку альтернативних легуючих елементів або комбінованих схем легування, здатних частково чи повністю замінити скандій без втрати ключових експлуатаційних характеристик сплаву та забезпечити структурно-фазові й механічні характеристики навіть у литому стані на рівні сплаву після деформації [5]. Це, у свою чергу, дає потенціал до суттєвого додаткового підвищення механічних властивостей при подальшій деформаційній і термічній обробці зливоків таких сплавів.

Сучасні дослідження зосереджені на використанні рідкісноземельних (РЗМ) та перехідних металів (ПМ) як потенційних замінників скандію. До них належать цирконій (Zr), ітрій (Y), ербій (Er), лантан (La), індій (In) та ін. РЗМ і ПМ [6, 7]. Ці елементи можуть формувати когерентні інтерметалідні фази, частково заміщувати скандій, утворюючи комплексні інтерметаліди $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{РЗМ}_x)$ і $\text{Al}_3(\text{Sc}_{1-x}\text{ПМ}_x)$, які модифікують мікроструктуру, запобігають рекристалізації сплавів, забезпечуючи подібні до Sc механізми зміцнення.

Особливий інтерес викликає комплексне легування, зокрема поєднанням Sc–Zr–Y, яке дозволяє досягти оптимального балансу між механічними властивостями та економічною доцільністю. Введення цирконію в поєднанні зі скандієм утворює високостабільні частки $\text{Al}_3(\text{Sc},\text{Zr})$, що забезпечує збереження високої міцності при значному зниженні вмісту Sc [8, 9]. Аналогічно ітрій може частково замінювати скандій, зберігаючи дрібнозернисту структуру та підвищуючи термічну стабільність сплаву при рекристалізації.

Сучасний підхід до оптимізації вмісту модифікуючих і мікролегуючих добавок для високоміцних сплавів системи Al–Mg передбачає не лише підбір альтернативних легуючих елементів, а й вивчення їх комплексної взаємодії від засвоєння, розподілу та утворення зародків кристалізації в розплаві, так і вивчення взаємодії з матрицею сплаву та один з одним для забезпечення необхідних технологічних і механічних характеристик. Це відкриває широкі можливості для виробництва економічно легованих матеріалів для стратегічних галузей промисловості [10]. Метою даного дослідження є систематизація сучасних підходів до зниження вмісту скандію у сплавах системи Al–Mg з вмістом магнію 4,5–6,5 мас. % та оцінка ефективності рідкісноземельних і перехідних металів як часткових або повних замінників Sc з точки зору збереження високих механічних властивостей і термічної стабільності сплавів.

Роль скандію та механізм зміцнення у сплавах Al–Mg

Скандій вважається найефективнішим мікролегуючим елементом для алюмінієвих сплавів, який забезпечує значне підвищення їх механічних властивостей, зокрема міцності, пластичності та зварюваності. Введення скандію в сплави системи Al–Mg реалізує кілька ключових механізмів зміцнення [5, 6].

Структурне зміцнення (модифікування структури)

При кристалізації сплавів системи Al–Mg мікролегованих скандієм утворюються інтерметаліди Al_3Sc , які мають гранецентровану кубічну (ГЦК) кристалічну ґратку зі структурою типу L_{12} із невеликою розбіжністю параметрів ґратки з алюмінієвою

матрицею, що робить їх ефективними центрами гетерогенної зародження зерен α -Al. Це дозволяє одержувати зливки з недендритною дрібнозернистою структурою та забезпечує значний внесок у загальну міцність сплаву відповідно до співвідношення Холла-Петча (Hall-Petch), яке описує залежність границі текучості полікристалічного матеріалу від розміру його зерен та показує, що зі зменшенням їх розміру межа текучості збільшується [6–8].

Твердорозчинне зміцнення

При кристалізації частина скандію залишається в твердому розчині алюмінію, також сприяючи зміцненню. Хоча внесок цього механізму, як правило, менший, порівняно зі зміцненням сплаву за рахунок подрібнення зерна, він все одно є відчутним фактором, який впливає на загальні механічні властивості литого виробу [6]. При тривалому впливі високих температур скандій починає формувати вторинну зміцнюючу фазу Al_3Sc і роль твердорозчинного зміцнення падає при одночасній появі фактора дисперсійного зміцнення.

Дисперсійне зміцнення та запобігання рекристалізації

Основним механізмом зміцнення алюмінієвих сплавів Al–Mg при мікролегуванні скандієм є виділення вторинних дисперсних інтерметалідів Al_3Sc у процесі технологічних нагрівів. Ці нанорозмірні когерентні частки рівномірно розподіляються по об'єму матриці та є стійкими до укрупнення навіть при високих температурах. Вони перешкоджають руху дислокацій в об'ємі зерна, ефективно гальмують ріст зерен і пригнічують процес рекристалізації під час термічної обробки та деформації, що призводить до значного підвищення межі текучості й міцності сплаву [5, 7].

Отже, скандій відіграє критичну роль у формуванні мікроструктури та забезпеченні високих показників механічних властивостей сплавів системи Al–Mg, однак висока вартість обмежує його застосування. Це спонукає до розробки нових економно легованих сплавів, які зберігатимуть високий рівень властивостей, характерний для сплавів Al–Mg [10, 11].

Рідкісноземельні та перехідні метали як мікролегуючі добавки у сплавах системи Al–Mg

Перехідний метал Zr є легуючим елементом, який підвищує ефективність Sc як дисперсоїдоутворюючого елемента та модифікатора зеренної структури, здатного підвищувати механічні властивості алюмінієвих сплавів, особливо після високотемпературної деформаційної та / або термічної обробки і зварювання [12–14].

Додавання Zr до сплаву системи Al–Mg призводить до утворення складних за будовою інтерметалідних часток $Al_3(Sc_x, Zr_{1-x})$ з оболонкою, збагаченою Zr, що значно підвищує їх стійкість до коалесценції (укрупнення) при високих температурах, порівняно з частками Al_3Sc [9, 14]. Це дозволяє зменшити вміст високовартісного Sc, зберігаючи при цьому чудові механічні властивості. Дослідження показують, що загальний вміст Sc+Zr близько 0,3–0,4 мас. % є ефективним для значного зерноподрібнення та зміцнення сплавів системи Al–Mg. Оптимальне співвідношення Sc/Zr (близько 2,6–3,3 в атомних відсотках) забезпечує найкращі показники пластичності [15].

Додавання цирконію ефективно для затримки процесу розпаду твердого розчину скандію в алюмінії та коагуляції продуктів розпаду. У присутності цирконію припустиме більш високотемпературне нагрівання при переробці зливка в деформований напівфабрикат.

Рідкісноземельний метал ітрій перебуває в тій самій групі періодичної системи, що й Sc та має схожі властивості. З алюмінієм він утворює рівноважну фазу Al_3Y з гексагональним типом структури. Однак у роботі [16] повідомляється про існування метастабільної кристалізаційної кубічної фази Al_3Y (L12), що утворювалася у швидко охолодженому сплаві. У реальних промислових умовах таке практично неможливо, і прийнято вважати, що немає стабільної когерентної фази, утвореної ітрієм. Згадується також, що ітрій може утворювати фази $Al_{11}Y_3$ або Al_2Y [17, 18]. Ітрій здатний замінити скандій при утворенні дисперсоїдів $Al_3(Sc, Y)$ із тривалою термічною стабільністю до 300 °C [19].

Мікролегування комплексом Zr+Y є найбільш ефективним варіантом зниження

вмісту скандію в сплавах системи Al–Mg. При цьому утворюються складні нанорозмірні частки $Al_3(Sc, Zr, Y)$, які забезпечують найсприятливіший ефект із точки зору зміцнення в широкому інтервалі температур та запобігання росту зерна при рекристалізації, що призводить не лише до підвищення міцності литих заготовок, але й робить подальший зерноподрібнюючий та зміцнюючий ефекти від гарячої пластичної деформації найвищим [14, 15, 20]. Головним завданням при цьому підході є забезпечення високої швидкості кристалізації литих заготовок задля збереження високої дисперсності інтерметалідних зародкоутворюючих фаз та одержання гомогенної дрібнозернистої структури. Для цього ефективним є відцентрове лиття, лиття під тиском та коїльне лиття малогабаритних або тонкостінних виливків.

При мікролегуванні ітрієм досягаються такі ефекти: формується дрібнозерниста мікроструктура сплавів під час кристалізації, подібно до легування цирконієм та скандієм [6, 8]; підвищується рідкоплинність і зменшується схильність до утворення гарячих тріщин; підвищуються межа текучості та міцність сплаву за рахунок перешкоджання руху дислокацій утворюваними інтерметалідними фазами [21]; при підвищених температурах експлуатації досягається висока міцність без значного зростання пластичності, що є критичним для застосування у високотемпературних умовах [17, 21].

Рідкісноземельний метал ербій утворює в алюмінієвій матриці когерентні нанорозмірні частинки Al_3Er ($L1_2$), подібні до алюмінідів скандію й цирконію, але вони є менш стійкими до високих температур [4, 12]. Механізм модифікування та зміцнення ербієм аналогічний, але менш ефективний, порівняно зі скандієм. Вважається [22], що за зниженого вмісту скандію ефективність ербію доволі низька. Для досягнення порівняного зі скандієм результату концентрація ербію в сплавах Al–Mg повинна сягати 0,7 мас. %, що призводить до структурної неоднорідності литих заготовок та ливарних дефектів [4, 12, 13].

Вплив рідкісноземельного металу лантану на властивості сплавів системи Al–Mg недостатньо вивчений. Існує думка [23], що введення лантану в сплави системи Al–Mg спрямоване переважно на модифікування структури та потенційне покращення ливарних властивостей. Що ж стосується сплавів цієї системи, легуваних скандієм та цирконієм, то додаткове легування лантаном призводить до їх зміцнення [26] за дисперсійним механізмом вторинними інтерметалідами $Al_3(Sc, P3M)$, Al_3La [24] і Al_4La [25]. За звичайного для цих сплавів вмісту скандію (~ 0,25 мас. %) додаткове введення лантану (< 0,1 мас. %) дозволяє підвищити межу текучості до 30 %, а межу міцності до 25 % без зниження відносного подовження. Також додавання лантану суттєво підвищує корозійні властивості цих сплавів. Зменшення вмісту скандію до 0,10–0,15 мас. % при одночасному збільшенні вмісту лантану призводило до зниження межі текучості при значному (на 38 %) підвищенні відносного подовження. Таким чином, La не може повністю замінити Sc, але є цінним доповненням при комплексному легуванні. Його використання дозволяє підвищити якість литої структури та пластичність, що сприяє зменшенню загальної потреби в дорогому скандії шляхом комбінованого ефекту з іншими елементами.

Застосування індію в алюмінієвих сплавах здебільшого пов'язане з активацією процесів анодного розчинення, що відбувається через руйнування природного захисного оксидного шару на поверхні металу. У контексті покращення механічних властивостей заміна Sc на In не є ефективною, оскільки індій не утворює зміцнюючих фаз ні з алюмінієм, ні з магнієм. Мікролегування індієм може впливати на швидкість окиснення та змінювати корозійну поведінку сплавів, однак його роль у формуванні структури та зміцненні матеріалу (як альтернативи скандію) залишається малодослідженою і потребує подальшого вивчення [26–28].

У таблі. 1 систематизовано літературні дані про вплив Zr, Y, Er, La та In на ключові механізми зміцнення у сплавах системи Al–Mg, а також їх потенціал до заміщення скандію.

Із наведених вище даних видно, що використання скандію, цирконію та ітрію

Таблиця 1
Порівняльний аналіз впливу легуючих елементів на механізми зміцнення
у сплавах системи Al–Mg

Елемент	Типова концентрація (мас. %)	Ключові фази зміцнення	Механізм зміцнення	Потенціал заміни Sc
Zr	0,1–0,2	Al_3Zr $Al_3(Sc,Zr)$	Гальмування рекристалізації, дисперсійне зміцнення. Комплексний ефект зі Sc	Високий (комплексний)
Y	0,1–0,7	Al_3Y $Al_3(Sc,Y)$ $Al_3(Sc,Zr,Y)$	Дисперсійне зміцнення, гальмування рекристалізації	Високий
Er	0,1–0,4	Al_3Er	Дисперсійне зміцнення, гальмування рекристалізації, підвищення термічної стабільності	Середній
La	< 0,1	Al_3La Al_4La	Модифікування литої структури, контроль морфології вторинних фаз	Середній
In	< 0,1	Знижує дифузійну рухливість вакансій та підвищує стабільність дисперсних фаз	Збільшує тривалість процесу старіння, є бар'єром для руху дислокацій та покращує зварюваність і корозійну стійкість	Низький

є найбільш перспективним для оптимізації хімічного складу сплавів системи Al–Mg, що дозволяє досягти необхідного балансу між механічними властивостями та економічною доцільністю виробництва. У табл. 2 наведено порівняльний аналіз можливостей легування сплавів цієї системи з орієнтовними діапазонами концентрацій легуючих елементів. Вміст магнію у всіх варіантах залишається в межах 4,5–6 мас. %.

Порівняльний аналіз властивостей сплавів системи Al–Mg за різних схем легування дозволив оцінити ефективність часткової або комплексної заміни скандію. Для базового стану без легування характерними є відносно низькі показники межі текучості та міцності і слабке подрібнення зерен, що обмежує його застосування у відповідальних конструкціях. Легування сплаву скандієм у концентрації 0,15–0,6 мас. % забезпечує значне підвищення механічних властивостей та добре подрібнення зерна, однак через високу вартість цієї добавки співвідношення «власливості / вартість» залишається спірним.

Комплексне легування Sc+Y+Zr забезпечує максимальні показники міцності ($\sigma_{0,2}$ =300–400 МПа, σ_b =400–500 МПа) та найкраще подрібнення зерна, одночасно з цим зменшуючи схильність до утворення гарячих тріщин. Додавання цирконію сприяє утворенню високостабільних комбінованих фаз $Al_3(Sc,Zr,Y)$, що забезпечує надзвичайну термічну стабільність сплаву, а також раціональний баланс між механічними властивостями та економічною ефективністю.

Слід зазначити, що перспективними для вивчення є інші рідкісноземельні (Tm, Yb Lu) й перехідні (Hf, Ti) метали, які також можуть заміщати Sc в L12-упорядкованих виділеннях $Al_3(Sc_{1-x},PЗМ_x)$ і $Al_3(Sc_{1-x},ПМ_x)$. Зокрема, Hf і Ti поліпшують опір росту виділень $Al_3(Sc_{1-x},Ti/Hf_x)$ за тим самим механізмом, що й цирконій, але менш ефективні порівняно з ним.

Таблиця 2

Аналіз властивостей сплавів Al – (4,5–6,5 мас. %) Mg за різних схем легування та орієнтовний вміст легуючих елементів*

Параметр	без легування	+ Sc (базовий)	+ Sc+Y+Zr (комплексне легування)
Концентрація Sc, мас.%	—	0,15–0,6	можливе зниження до 0,05–0,15
Концентрація Y, мас.%	—	—	0,1–0,3
Концентрація Zr, мас.%	—	до 0,05 (на рівні домішок)	0,1–0,2 (цілеспрямоване додавання)
Концентрація Zr, мас.%	—	до 0,05 (на рівні домішок)	0,1–0,2 (цілеспрямоване додавання)
Межа міцності (σ_B), МПа	280–310	350–420	400–500
Відносне подовження (δ), %	12–18	10–16	10–15
Схильність до утворення гарячих тріщин	висока	середня	низька
Подрібнення зерна	слабке	дуже добре	найкращий ефект

*Точні кількісні показники можуть варіюватись залежно від процесу виробництва (спосіб лиття, деформаційна та термічна обробка), але загальні дані наведені у таблиці є типовими.

Висновки

Розглянуто сучасні підходи до зниження вмісту скандію у сплавах системи Al–Mg зі збереженням ключових механізмів зміцнення: структурного, твердорозчинного та дисперсійного. Визначено, що скандій (Sc), цирконій (Zr) ітрій (Y), ербій (Er) формують подвійні та комплексні когерентні наночастки, які забезпечують подрібнення зерна, пригнічення рекристалізації та підвищення межі текучості на рівні 300–400 МПа, межі міцності 400–500 МПа при збереженні відносного подовження в межах 10–15 %. Комплексне легування Sc+Y+Zr дозволяє знизити вміст скандію до 0,05–0,15 мас.%, зберігаючи високі механічні властивості і термічну стабільність, що робить розглянуті сплави економічно більш привабливими для авіаційної, суднобудівної і транспортної промисловостей. Запропоновані підходи можуть сприяти створенню високоміцних, легких і технологічно ефективних сплавів на базі системи Al–Mg з раціональним співвідношенням властивостей і вартості.

References

- Jiang, L., Zhang, Z., Bai, Y., Li, S., & Mao, W. (2022). Study on Sc Microalloying and Strengthening Mechanism of Al-Mg Alloy. *Crystals*, 12(5), 673. <https://doi.org/10.3390/cryst12050673>
- Marquis, E. A., & Seidman, D. N. (2001). Nanoscale structural evolution of Al₃Sc precipitates in Al(Sc) alloys. *Acta Materialia*, 49(11), 1909–1919. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(01\)00116-1](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(01)00116-1)
- Xu, C., Xiao, W., Hanada, S., Yamagata, H., & Ma, C. (2015). The effect of scandium addition on microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloy: A multi-refinement modifier. *Materials Characterization*, 110, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.10.030>

- 4 Seidman, D. N., Marquis, E. A., & Dunand, D. C. (2002). Precipitation strengthening at ambient and elevated temperatures of heat-treatable Al(Sc) alloys. *Acta Materialia*, 50(16), 4021–4035. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(02\)00201-x](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(02)00201-x)
- 5 Jeong, H. T., Han, S. H., & Kim, W. J. (2019). Effects of large amounts of Mg (5–13 wt%) on hot compressive deformation behavior and processing maps of Al–Mg alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 788, 1282–1299. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.293>
- 6 Riddle, Y.W., Sanders, T.H. A study of coarsening, recrystallization, and morphology of microstructure in Al–Sc–(Zr)–(Mg) alloys. *Metall Mater Trans A* 35, 341–350 (2004). <https://doi.org/10.1007/s11661-004-0135-3>
- 7 Kendig, K. L., & Miracle, D. B. (2002). Strengthening mechanisms of an Al–Mg–Sc–Zr alloy. *Acta Materialia*, 50(16), 4165–4175. [https://doi.org/10.1016/s1359-6454\(02\)00258-6](https://doi.org/10.1016/s1359-6454(02)00258-6)
- 8 Song, M., & He, Y. H. (2011). Investigation of primary Al₃(Sc,Zr) particles in Al–Sc–Zr alloys. *Materials Science and Technology*, 27(1), 431–433. <https://doi.org/10.1179/174328409x443236>
- 9 Dang, J.-Z., Huang, Y.-F., & Cheng, J. (2009). Effect of Sc and Zr on microstructures and mechanical properties of as-cast Al–Mg–Si–Mn alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(3), 540–544. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(08\)60309-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(08)60309-x)
- 10 González-Rovira, L., Cabrera-Correa, L., de Dios López-Castro, J., Ojeda-López, A., & Botana, F. J. (2025). AlMgScZr alloys for laser powder bed fusion additive manufacturing. A review. *Materials & Design*, 114080. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114080>
- 11 Tariq, H. M. R., Ishtiaq, M., Kang, H.-H., Chaudry, U. M., & Jun, T.-S. (2025). A Critical Review on the Comparative Assessment of Rare-Earth and Non-Rare-Earth Alloying in Magnesium Alloys. *Metals*, 15(2), 128. <https://doi.org/10.3390/met15020128>
- 12 Gao, Z., Zhang, F., Li, H., Ma, T., Yang, H., Wang, W., Wei, W., Wen, S., Huang, H., Wu, X., Gao, K., Rong, L., Xiong, X., & Nie, Z. (2025). Process and Properties of Al–Mg–Er–Zr–Sc High-Strength Aluminum Alloy Powder Prepared by Vacuum Induction Melting Gas Atomization. *Materials*, 18(8), 1763. <https://doi.org/10.3390/ma18081763>
- 13 Wang, Q. D., Li, D. Q., Li, Q., & Ding, W. J. (2007). Effects of Er on Microstructure and Mechanical Properties of Mg–Zn–Er–Zr Magnesium Alloys. *Materials Science Forum*, 546–549, 105–108. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.546-549.105>
- 14 Lu, Y., Zhang, H., Xue, P., Wu, L., Liu, F., Jia, L., Ni, D., Xiao, B., & Ma, Z. (2023). Microstructural Evaluation and Tensile Properties of Al–Mg–Sc–Zr Alloys Prepared by LPBF. *Crystals*, 13(6), 913. <https://doi.org/10.3390/cryst13060913>
- 15 Li, M.-j., Liu, S., Wang, X.-d., Shi, Y.-j., Pan, Q.-l., Zhou, X.-j., Zhang, R.-f., & Birbilis, N. (2022). Improved intergranular corrosion resistance of Al–Mg–Mn alloys with Sc and Zr additions. *Micron*, 154, 103202. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103202>
- 16 Foley, J. C., Allen, D. R., & Perepezko, J. H. (1997). Strategies for the development of nanocrystalline materials through devitrification. *Materials Science and Engineering: A*, 226–228, 569–573. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(97\)80065-2](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(97)80065-2)
- 17 Çiftci, Y. Ö., Çolakoglu, K., Deligöz, E., & Bayhan, Ü. (2012). First-Principles Calculations on Structure, Elastic and Thermodynamic Properties of Al₂X (X=Sc, Y) under Pressure. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(2), 155–163. [https://doi.org/10.1016/s1005-0302\(12\)60036-x](https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60036-x)
- 18 Røyset, J., & Ryum, N. (2005). Scandium in aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 50(1), 19–44. <https://doi.org/10.1179/174328005x14311>
- 19 Karnesky, R. A., van Dalen, M. E., Dunand, D. C., & Seidman, D. N. (2006). Effects of substituting rare-earth elements for scandium in a precipitation-strengthened Al–0.08at. %Sc alloy. *Scripta Materialia*, 55(5), 437–440. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.021>
- 20 Yuan, W., & Liang, Z. (2011). Effect of Zr addition on properties of Al–Mg–Si aluminum alloy used for all aluminum alloy conductor. *Materials & Design*, 32(8-9), 4195–4200. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.034>

- 21 Ding, W., Zhao, X., Chen, T., Zhang, H., Liu, X., Cheng, Y., & Lei, D. (2020). Effect of rare earth Y and Al–Ti–B master alloy on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 830, 154685. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154685>
- 22 Zou, C., Wu, R., Yang, X., Ma, Z., & Hou, L. (2025). Effects of a Welding Wire Containing Er or Sc on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of the 5xxx Aluminum Alloy MIG Joint. *Metals*, 15(3), 287. <https://doi.org/10.3390/met15030287>
- 23 Zheng, Q., Zhang, L., Jiang, H., Zhao, J., & He, J. (2020). Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al–Si alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 47, 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.021>
- 24 Zhang, X., Wang, Z. H., Zhou, Z. H., Xu, J. M., Zhong, Z. J., Yuan, H. L., & Wang, G. W. (2015). Effects of Rare Earth on Microstructure and Mechanical Properties of Al–3.2Mg Alloy. *Materials Science Forum*, 817, 192–197. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.817.192>
- 25 Zhang, X., Wang, Z., Zhou, Z. and Xu, J. (2017) Influence of Rare Earth (Ce and La) Addition on the Performance of Al–3.0 wt%Mg Alloy. *Journal of Wuhan University of Technology–Materials Science Edition*, 32, 611–618. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1642-6>
- 26 Liu, J., Hu, J., Li, M., Liu, G., Wu, Y., Gao, T., Liu, S., & Liu, X. (2024). Influence of Zr Microalloying on the Microstructure and Room-/High-Temperature Mechanical Properties of an Al–Cu–Mn–Fe Alloy. *Materials*, 17(9), 2022. <https://doi.org/10.3390/ma17092022>
- 27 Zhang, W., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2018). Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*, 61(1), 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
- 28 Li, D., Wu, Y., Geng, Z., Zhang, J., Chen, C., Liu, X., Liu, Y., & Zhou, K. (2022). High Strength Al–Mg–Sc–Zr Alloy with Heterogeneous Grain Structure and Intragranular Precipitation Produced by Laser Powder Bed Fusion. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4134180>

Одержано / Received 15.01.2026

Прийнято / Accepted 09.02.2026

Опубліковано / Published 17.03.2026.

A.V. Narivskiy, D.Sc. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine;
e-mail: av.narivskii@gmail.com; ORCID: 0000-0002-1596-6401

S.L. Polyvoda, Researcher; e-mail: etma@i.ua; ORCID: 0009-0002-8906-0693

A.Yu. Semenko, PhD (Engin.), Senior Research Scientists, Senior Researcher
e-mail: semenko.au@gmail.com; ORCID 0000-0002-0448-1636

V.O. Tverdokhvalov, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher;
e-mail: tverdohvalov@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3756-7639

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

CURRENT METHODS FOR MINIMIZING SCANDIUM IN HIGH-STRENGTH Al–Mg ALLOYS

The article presents a comprehensive review of modern approaches to solving the problem of reducing the content of the scandium deficient modifier in high-strength aluminum alloys of the Al–Mg system using the example of the deformable alloys 1570 or 1545. Scandium is one of the most effective microalloying elements, which ensures the formation of coherent dispersed particles of Al₃Sc, which contribute to grain refinement, suppression of recrystallization and a significant increase in the mechanical properties of high-strength aluminum alloys. At the same time, the high cost of scandium limits its wide industrial application, which makes it urgent to find solutions for its, at least, partial replacement, without a noticeable loss of advantages from its addition. Based

on the analysis of modern literary sources, the possibilities of partial or complete replacement of scandium due to microalloying with rare-earth and transition metals, in particular yttrium, erbium, lanthanum, as well as zirconium and indium, are considered. It is shown that yttrium and erbium, like scandium, are capable of forming coherent intermetallic phases with the $L1_2$ structure, which provide dispersion strengthening and stabilization of the microstructure. Particular attention is paid to the role of zirconium, which in combination with scandium forms thermally stable $Al_3(Sc,Zr)$ particles, which allows to significantly reduce the Sc content without significant loss of strength characteristics. The prospects of complex alloying of Sc–Y–Zr systems as an effective approach to optimizing the ratio of mechanical properties and cost of the Al–Mg alloy are substantiated. It is shown that reducing the scandium content while maintaining high strength, ductility and thermal stability opens up wide opportunities for the application of such alloys in the aviation, shipbuilding and transport industries.

Keywords: Al–Mg alloys, modification, microalloying, scandium, yttrium, zirconium, rare earth metals, dispersion strengthening.