

Є. О. Єрмоленко, Г. І. Мерніков, О. О. Руденко,
канд. техн. наук О. В. Бондаренко ORCID.org/0000-0003-4958-1777

ОГЛЯД ПЕРЕВАГ ЗАСТОСУВАННЯ В РАКЕТНО-КОСМІЧНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ СПЛАВІВ СИСТЕМИ AL–MG–SC І АНАЛІЗ РИНКОВИХ ЧИННИКІВ

Визначено перспективність, можливості та напрями використання алюмінієво-скандієвих сплавів для ракетно-космічної техніки в Україні та розглянуто потенційні можливості України як постачальника таких сплавів. Актуальність і наукова новизна дослідження викликають необхідність пошуку нових матеріалів для заміщення традиційних поставок в умовах загострення геополітичного протистояння (торговельні війни) між КНР, США, ЄС, РФ і іншими світовими державами на ринках стратегічної сировини. У рамках пошуку альтернативних матеріалів і джерел імпорту для виготовлення ракетно-космічної техніки розглянуто можливості використання сплавів алюмінію з поліпшеними характеристиками, а саме: Al–Mg, Al–Li, Al–Cu–Li, Al–Si–Mg, Al–Sc, Al–Mg–Sc. Показано, що фізико-механічні та хімічні властивості сплавів системи алюміній-скандій і алюміній-магній-скандій не тільки відповідають умовам функціонування ракетно-космічної техніки, але й мають комплекс переваг, і дозволяють поліпшити такі ключові технічні показники ракетно-космічної техніки, як конструктивна досконалість (зменшення маси конструкцій, висока точність виготовлення завдяки дрібнозернистості сплаву), надійність під час роботи у складних умовах (висока міцність, вібростійкість, термостійкість і корозійна стійкість сплавів), можливість багаторазового використання (термостійкість і довговічність сплавів). Технологічні процеси виготовлення деталей із зазначених сплавів не відрізняються від традиційних. Сплави алюміній-скандій легко зварювати, пресувати, механічно обробляти різанням. Доведено, що в Україні є можливості відродження власного виробництва алюмінієво-скандієвих сплавів, оскільки є працююча науково-дослідна база та фахівці. Мінерально-сировинна база скандію в Україні дозволяє реалізувати будь-які потреби ракетно-космічної галузі. До 1995 р. в Україні працював завод з виробництва сплавів з вмістом скандію на основі української сировини. Відновлення виробництва потребує інвестицій і політичної волі.

Ключові слова: алюмінієво-скандієві сплави, ракетно-космічна техніка, ринкові дослідження, виробники алюмінієвих сплавів, цінові показники.

The article outlines the prospects, possibilities, and directions for the space rocket applications of aluminum-scandium alloys in Ukraine. It also analyzes the potential of Ukraine as a supplier of aluminum-scandium alloys. The relevance and the scientific novelty of this study are determined by the need to find new materials to replace traditional supplies, considering the aggravation of geopolitical confrontation (trade wars) between the PRC, USA, EU, Russian Federation, and other world powers in the markets of strategic raw materials. As part of the search for alternative materials and sources of import for the manufacturing of space rocket technologies, this paper studies the possibilities of using aluminum alloys with enhanced properties, namely: Al–Mg, Al–Li, Al–Cu–Li, Al–Si–Mg, Al–Sc, and Al–Mg–Sc alloys. The paper demonstrates that the physical, mechanical, and chemical properties of aluminum-scandium and aluminum-magnesium-scandium alloys fit the operating conditions of space rocket technologies. Moreover, these alloys have many advantages and allow for the enhancement of principal technical parameters for space rocket technologies, such as structural perfection (reduction of the mass of structures, high manufacturing accuracy due to the fine grain size of alloys), reliability of operation under severe conditions (high strength and resistance to vibration, heat, and corrosion), and the possibility of repeated use (heat resistance and durability of alloys). The manufacturing of parts from these alloys does not differ from traditional production processes. Aluminum-scandium alloys are easy to weld, press, and machine by cutting. The paper corroborates that Ukraine holds the potential to revive its production of aluminum-scandium alloys, as it possesses a functioning research base and professionals. Ukraine's mineral and feedstock base for scandium enables the country to satisfy any needs of the space rocket industry. Until 1995, Ukraine operated a plant producing scandium-containing alloys from Ukrainian raw materials. The resumption of production requires investment and political will.

Keywords: aluminum-scandium alloys, space rocket technologies, market research, aluminum alloy manufacturers, price indicators.

Вступ

Розглянуто можливості та переваги використання алюмінієво-скандієвих сплавів у ракетно-космічній техніці (РКТ), проаналізовано світовий ринок цих сплавів у сучасній геополітичній ситуації.

У РКТ розроблення ДП «КБ «Південне» як конструкційні матеріали традиційно використовували широку номенклатуру алюмінієвих сплавів, напівфабрикати, які раніше постачали з рф. З 2014 р. перед українськими розробниками РКТ постало завдання знайти заміну поставкам з країни-агресора.

Сплави, які використовували в українській космічній галузі, відповідали номенклатурі, розробленій у радянський період для використання в космічній техніці. На Заході традиційна номенклатура алюмінієвих сплавів для ракетно-космічної техніки має істотні відмінності. «Радянський» набір сплавів використовують і виробляють у КНР, рф і деяких інших країнах, робота з якими неможлива або створює політичні ризики. Таким чином, питання адекватної заміни постачальників алюмінієвих сплавів потребує вирішення.

Метою статті є визначення перспективності, можливостей і напрямів використання під час створення ракетно-космічної техніки в Україні алюмінієво-скандієвих сплавів, а також розгляд потенційних можливостей України як постачальника алюмінієво-скандієвих сплавів.

Актуальність і наукову новизну дослідження визначають з огляду на необхідність пошуку нових матеріалів для заміщення традиційних поставок в умовах загострення геополітичного протистояння (торговельні війни) між КНР, США, ЄС, рф і іншими світовими державами на ринках стратегічної сировини. В епіцентрі цього протистояння перебуває Україна, яка, з одного боку, належить до світових лідерів за покладами скандію, а з другого – потребує значних фінансових надходжень для відновлення відповідних видобувних потужностей і виробництв.

Вирішення завдання застосування в ракетно-космічній галузі України сплавів системи Al–Mg–Sc

У ході робіт з пошуку та вибору матеріалів і постачальників необхідно зважати на такі чинники:

1) фізико-механічні та хімічні властивості матеріалів, їх відповідність умовам роботи та навантаженням у складі конструкцій РКТ;

2) переваги та недоліки матеріалів порівняно з традиційними. Можливість підвищення рівня конструктивної досконалості та комплексу інших характеристик виробів з нових матеріалів;

3) технологічність процесів виготовлення конструкцій РКТ з матеріалів, які розглядають;

4) можливість виготовлення конструкцій з обраних матеріалів за традиційними технологіями на наявному устаткуванні. Необхідний обсяг впровадження нових технологій і устаткування;

5) доступність необхідних нових технологій і устаткування. Можливість і вартість впровадження технологічних процесів виготовлення конструкцій з обраних матеріалів;

6) собівартість у виробництві конструкцій з нових матеріалів. Вплив впровадження нових матеріалів і технологій на техніко-економічні показники кінцевого продукту;

7) окупність витрат на впровадження нових матеріалів і технологій виготовлення з них;

8) компанії-виробники, умови та ціна постачання матеріалів і напівфабрикатів з них;

9) ринкова доступність матеріалів і напівфабрикатів з них, геополітичні ризики та впливи на ринок.

Отже, при виборі матеріалу необхідно розглядати ринкові цінові показники та доступність придбання для всіх цих видів напівфабрикатів.

У РКТ алюмінієві сплави є одними з найпоширеніших конструкційних матеріалів завдяки поєднанню малої густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості та технологічності. У рамках проведення робіт з пошуку альтернативних матеріалів і джерел імпорту для виготовлення РКТ доцільно першочергово розглянути можливості використання сплавів алюмінію з поліпшеними характеристиками.

Сплави алюмінію, використовувані в аерокосмічній галузі

Основні легувальні елементи алюмінієвих сплавів і їх використання в РКТ [1]:

1. Магній (Mg) – знижує густину, підвищує міцність і корозійну стійкість. Сплави Al–Mg [2] часто застосовують в обичайках і паливних баках рідинних ракет. Ці сплави розробники обирають як основні конструкційні матеріали завдяки хорошій корозійній стійкості, відносно низькій масі та відповідній вимогам ударній в'язкості; використовують ці сплави також у тонкостінних конструкціях, елементах несучих каркасів тощо.

2. Мідь (Cu) – підвищує міцність алюмінієвих сплавів. Розчиняючись в алюмінії, мідь підвищує міцність, не знижуючи його корозійної стійкості [3]. Алюмінієві сплави, леговані міддю, наприклад сплави 2024, 2219-T87, широко використовують в авіакосмічній галузі. Сплав 2219-T87 – один із найпоширеніших на Заході матеріалів для паливних баків рідинних ракет, зокрема в американських програмах (наприклад, сплав використовують у PH Delta IV). Він має відмінну зварюваність і стабільність за криогенних температур.

3. Цинк (Zn) – забезпечує дуже високу міцність. У поєднанні з магнієм і міддю утворює сплави, які мають максимальну питому міцність (сплави 7075, 7475, 7050).

4. Кремній (Si) – використовують для поліпшення лиття. У комбінації з магнієм формують сплави Al–Si–Mg.

5. Літій (Li) – особливо важливий у космічній галузі, знижує густину (на 3 % на кожен 1 % Li), збільшує модуль пружності (~6 % на 1 % Li). Сплави типу Al–Cu–Li (наприклад, 8090, 2195, Weldalite 049) використовують у паливних баках ракет-носіїв. Алюмінієві сплави цієї групи використовують для вузлів ракетної техніки з високими вимогами до надійності. Паливні баки PH Falcon 9 виготовлено зі сплаву Al–Li 2195. Це високотехнологічний сплав, що належить до серії 2000 (Al–Cu–Li) і має міжнародне позначення AA 2195. Сплав обрала компанія SpaceX через його високу питому міцність і здатність витримувати термічні навантаження при багаторазовому використанні.

6. Скандій (Sc) – підвищує міцність, зменшує зерно, підвищує зварюваність. Застосовують у високотехнологічних сплавах Al–Sc, перспективних для РКТ, але їх використання обмежене через високу ціну й обмежений доступ до скандію. За малих концентрацій

Sc істотно підвищує міцність, стійкість до розтріскування та втомної довговічності, дозволяє виготовляти тонші стінки та легші конструкції, що важливо для корпусів супутників, трубопроводів, деталей, що вимагають високого співвідношення міцність / маса. Сплави на основі Al–Sc є одними з найперспективніших у РКТ, тому метою цього дослідження обрано саме їх.

Сплави системи Al–Mg–Sc

Українські вчені в галузі матеріалознавства (Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАНУ, Інститут проблем матеріалознавства ім. Францевича НАНУ) вже багато років працюють над дослідженням властивостей і поліпшенням характеристик алюмінієвих сплавів системи Al–Mg–Sc (такими як 1545, 1570, 5028 та інші).

Сплави Al–Mg–Sc порівняно з традиційними сплавами Al–Mg, які широко використовують в українській ракетно-космічній техніці, мають істотні переваги: вищі показники міцності, термостійкості, корозійної та вібраційної стійкості [4–7]. Легування скандієм підвищує міцність алюмінієвих сплавів за рахунок утворення фаз Al₃Sc, які забезпечують кращу структурну стабільність. Поліпшується здатність до штучного старіння, що важливо для тривалого використання в складних умовах. Роботи з модифікації сплавів нанодомішками, з удосконалення технологій їх отримання провели українські вчені з метою підвищення зазначених показників. Це дозволило отримати додаткове поліпшення характеристик сплавів цієї системи [4, 6, 7].

Використання сучасних модифікованих сплавів Al–Mg–Sc під час виготовлення РКТ створює для кінцевого виробу комплекс переваг:

1) дрібнозернистість структури сплавів надає можливість виготовляти високоточні деталі;

2) зазначені сплави демонструють високу вібраційну стійкість, що дозволяє їх використовувати як конструкційний матеріал для вібронавантажених деталей РКТ, забезпечуючи високу надійність цих конструктивних елементів;

3) застосування деталей, виготовлених зі сплавів системи Al–Mg–Sc, завдяки їхній високій термостійкості дозволяє підвищити надійність і безпечність конструкцій хвостових відсіків, днищ, обтічників, які зазнають значних термічних навантажень;

4) висока стійкість до атмосферної та морської корозії дозволяє використовувати конструкції, виготовлені із зазначених сплавів, у складі РН, які перевозять морським транспортом, запускають з морських стартових платформ або з приморських космодромів;

5) висока стійкість до корозії забезпечує довге зберігання як напівфабрикатів зі сплавів Al–Mg–Sc, так і готових виробів з них, що дозволяє здешевити логістику, забезпечити поставлення необхідної кількості виробів для виконання замовлення без істотної адаптації виробничих процесів;

Українські фахівці мають досвід застосування сплавів системи Al–Mg–Sc в авіаційній і космічній галузях [5]:

- Сплав 1545 (системи Al–Mg–Sc) тестували та використовували в конструкціях паливних баків, у зварних вузлах ракетносіїв «Зеніт» і «Циклон» розроблення ДП «КБ «Південне».

- У дослідних зразках літаків Ан-148, Ан-158 розроблення ДП «Антонов» у рамках програми модернізації матеріалів було використано сплави системи Al–Mg–Sc для виготовлення конструктивних елементів фюзеляжу, що забезпечило зменшення маси та підвищення міцнісних характеристик конструкцій.

- У ході досліджень, які проводили на кафедрі ракетно-космічних і інноваційних технологій Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара, сплав 1545 використовували для 3D-друку елементів двигунів і кріплень. Завдяки дрібнозернистій структурі виготовлені зразки продемонстрували під час випробувань високі показники.

- В Інституті проблем матеріалознавства НАН України досліджують і розробляють сплав 1545 для виготовлення елементів конструкції РКТ. Окреме місце посідають дослідження впливу компонентів ракетних палив на характеристики сплаву.

В інших країнах також активно досліджують сплави алюміній-скандій і роз-

робляють елементи РКТ з використанням цих сплавів.

У публікації [8] (США, 2019 р.) розглянуто застосування сплавів системи Al–Sc для виготовлення двигунів космічних апаратів за адитивними технологіями. Як позитивний чинник відзначено термостійкість і структурну стабільність алюмінієво-скандієвих сплавів.

Компанія S7 (рф) використовує під час створення своєї РН інноваційний експериментальний алюмінієво-магнієвий сплав, легований скандієм у кількості 0,1 % від загальної маси (сплав 1580 у відпаленому стані) [9]. У компанії відзначають, що застосування цього сплаву замість традиційного АМг6 дозволяє збільшити міцність конструкції, при цьому міцність сплаву 1580 не зменшується під час нагрівання (сплав зберігає свої властивості приблизно до 500 °С). Це дає змогу створювати ступені РН, які повертаються на Землю та витримують нагрівання під час проходження через атмосферу, не втрачаючи міцності.

Є дані, що скандієвомісні алюмінієві сплави використовує лідер космічного ринку американська компанія SpaceX. Вона застосовує модифіковані сплави на основі Al–Mg–Sc для зменшення маси конструкцій без втрати міцності. Завдяки високій втомній міцності та термостійкості ці сплави використовують також в елементах, які необхідні при багаторазових запусках і посадках.

Відомо, що роботи з розроблення алюмінієвих сплавів, легованих скандієм, для використання в космічній галузі проводять у КНР. Китайські виробники скандію та його сполук відзначають [10], що останніми роками використання алюмінієво-магнієвих сплавів з вмістом скандію зросло за рахунок їх застосування в таких галузях, як авіаційна та космічна промисловість, транспортне машинобудування, суднобудування.

Таким чином, перспективні напрями застосування сплавів Al–Mg–Sc у РКТ такі:

- виготовлення вузлів РКТ, призначених для багаторазового використання, для РКК морського базування, для апаратів, що приводнюються, тощо;

- виготовлення полегшених тонкостінних баків для рідкого/кріогенного палива (Al–Mg і спеціальні Al–Mg–Sc сплави);

- виготовлення каркасів і несучих елементів космічних апаратів (Al–Sc дає можливість зменшити масу конструкції без втрати жорсткості);

- деталі, отримані шляхом адитивного виробництва (SLM / DMLS) з порошків Al–Sc і Al–Mg–Sc (можливість виготовлення складнопрофільних деталей, зменшення кількості з'єднань, висока точність виготовлення, високий коефіцієнт використання матеріалу, високі показники міцності, менше дефектів, краща витривалість);

- виготовлення елементів конструкції, від яких необхідні підвищені корозійна та втомна стійкості (антени, приводи механізмів, кріплення);

- комбінація з технологіями термічного оброблення та зварювання тертям з перемішуванням (friction stir welding) для великих структур зі зменшенням кількості з'єднань і кріплень.

Характеристики світового ринку алюмінієвих сплавів

Ринок сплавів системи Al–Sc (Al–Mg–Sc)

Забезпечення реальної конкурентоспроможності на ринках передбачає використання сучасних легких і міцних матеріалів, серед яких алюмінієві сплави посідають вагоме місце. Це стосується фактично всіх сфер економіки: будівництва, промисловості, транспорту й аерокосмічної промисловості.

За сучасною методологією ринкового аналізу, глобальний ринок алюмінієвих сплавів сегментовано на основі виду продукту, типу конструкції, типу чутливості, типу міцності та сфери використання.

Обсяг і динаміка ринку алюмінію й алюмінієвих сплавів

Дослідження Precedence Research [11] оцінює світовий ринок алюмінію у 2025 р. у 190,98 млрд дол. США. У 2024 р. оцінювали в 179,67 млрд дол. США. Прогноз зростання до 2034 р. – до 329,08 млрд дол. США. Динаміка ринку з 2024 р. та прогноз до 2030 р. наведено на рис. 1.

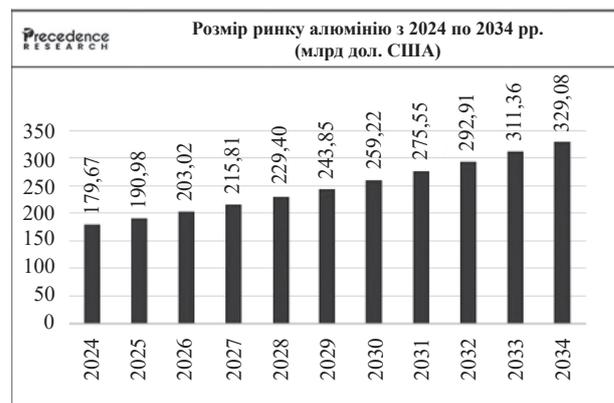


Рис. 1. Прогноз обсягу ринку алюмінію з 2025 до 2034 рр.

Дослідження Fortune Business Insights [12] надає дещо більші оцінки: глобальний алюмінієвий ринок за підсумками 2024 р. становив 249,8 млрд дол. США, у 2025 р. ринок оцінюють у 265,13 млрд дол. США, а прогноз на 2032 р. – 403,29 млрд дол. США.

У 2024 р. глобальний ринок алюмінієвих сплавів оцінювали приблизно в 100–130 млрд дол. США. Очікується, що він зростатиме зі середньорічним темпом (CAGR) близько 5–6 % до 2034 р.



Рис. 2. Характеристики ринку алюмінію відповідно до дослідження Fortune Business Insights

Попит транспортного сектора

За даними Global Market Insights, ринок алюмінієвих сплавів перевищив 100 млрд дол. США ще у 2016 р. і продовжував стабільно зростати. За прогнозами, до 2034 р. його обсяг може сягнути 259,54 млрд дол. США [13]. Це пов'язано із загальносвітовою тенденцією до збільшення попиту на сировину в автомобільній і аерокосмічній галузях. Попит на алюмінієві сплави дуже високий.

Сплави 1545, 1570, 5028 (Al–Mg–Sc) та інші варіанти алюмінієво-скандієвих сплавів є нішевим товаром на ринку (приблизно 1 % від ринку алюмінієвих сплавів), виробляє їх обмежена кількість компаній у світі. Через високу вартість і низьку доступність скандію виробництво алюмінієво-скандієвих сплавів обмежене. Обсяг ринку алюмінієво-скандієвих сплавів у 2025 р. оцінюють у 1,38 млрд дол. США, прогнозують його зростання до 2034 р. до 2,06 млрд дол. США (рис. 3) [14].

Розмір ринку алюмінієво-скандієвих сплавів

Джерело: Global Growth Insights



Рис. 3. Обсяг світового ринку алюмінієво-скандієвих сплавів

Основний тип алюмінієво-скандієвих сплавів, які реалізовані на ринку, – це лігатура або зливки. 20 % сплавів у вигляді порошків використовують для адитивного виробництва. Також на ринку наявні листи та профілі (переважно для авіакосмічної галузі): 40 % продукції реалізують для використання в ракетно-космічній галузі, 30 % – в авіабудуванні. На ринку домінує лігатура з 2%-ним вмістом скандію (рис. 4). Вміст скандію в конструкційних сплавах становить від 0,2 до 0,5 % за масою [5]. За даними [9], вміст скандію у сплавах 1580 (5180) становить до 0,1 % за масою, а у сплаві 1581 (5181) – 0,03 % за масою.

Відповідно до дослідження Market.us [15] на кінець 2025 р. ринок алюмінієво-

скандієвих сплавів оцінюють приблизно лише в 100 млн дол. США.

Глобальний ринок алюмінієво-скандієвих сплавів (млрд дол. США)



Рис. 4. Показники та прогноз зростання ринку алюмінієво-скандієвих сплавів відповідно до даних Market.us [15]

Річне виробництво алюмінієво-скандієвих сплавів за приблизними оцінками становило у 2024 р. 400–600 т. Це один з найменших і найдорожчих сегментів алюмінієвих сплавів.

За даними дослідження Market.us, 53,2 % попиту створюють аерокосмічна й оборонна промисловості.

Країни-споживачі:

- США (компанії Lockheed Martin, SpaceX, Boeing);
- ЄС (Airbus, оборонні компанії);
- Японія, Південна Корея (космічні компанії, високотехнологічне виробництво).

Виробники алюмінію та алюмінієвих сплавів

Найбільшим виробником алюмінію у світі залишається Китай, частка якого на 2023 р. становила 58,9 % світового ринку. Саме тому головним чинником, що визначає ситуацію на ринку алюмінію, є попит і пропозиція на нього в КНР, а також поточний стан запасів на біржі LME [11].

Основні виробники алюмінієво-скандієвих сплавів – спеціалізовані підприємства кольорової металургії, розташовані в Європі, США, Китаї, рф. Є досвідні виробничі потужності в Україні. Близько 40 % виробництва алюмінієво-скандієвих сплавів припадає на Китай.

Компанії-лідери ринку алюмінію: Alcoa (США), Rio Tinto (Австралія), Norsk Hydro (Норвегія), Rusal (рф), Novelis (Канада), China Hongqiao Group (Китай), Emirates Global Aluminium (ОАЕ), South32 (Австралія), Constellium (Нідерланди) та Vedanta Limited (Індія) [16].

Найбільші виробники алюмінію у світі [16]

Країна	Компанія	Обсяг виробництва (млн тонн/рік)
КНР	China Hongqiao Group	6,2
рф	Rusal	3,6
Канада	Alcan (частина Rio Tinto)	2,9
Індія	Hindalco Industries	1,4
Норвегія	Norsk Hydro	1,3
Австралія	Alumina Limited (частина Alcoa)	1,3
Бразилія	Companhia Brasileira de Alumínio	0,9
США	Alcoa Corporation	0,8
ОАЕ	Emirates Global Aluminium	0,7
Саудівська Аравія	Ma'aden	0,5

Найбільші виробники алюмінію в Європі за 2023 р. [17]

Країна	Компанія	Обсяг виробництва (млн тонн/рік)
Норвегія	Norsk Hydro	1,30
Фінляндія	Hydro Extruded Solutions	0,25
Греція	Mytilineos	0,20
Іспанія	Alucoil	0,15
Італія	Alcoa, Feralpi	0,70
Нідерланди	Constellium	0,30
Словенія	Talum	0,14

Основні компанії-виробники алюмінієво-скандієвих сплавів згідно з наведеними маркетинговими дослідженнями [14, 15]: MCC, Standford Materials Corp. (США), AMG Aluminum (США), DNI Metals Inc., CODOS (Італія), Hunan Oriental Scandium Co. Ltd., Rusal (рф, 25 % ринку), Rongjiayu Technology, Metallica Minerals, Platina Resources Ltd., Scandium International Mining Corp., Sumitomo

Metal Mining (Японія, 20 % ринку), Huizhou Top Metal Materials Co. (КНР), Guangxi Maoxin (КНР), Shanghai Diyang (КНР).

В Україні власне дослідне виробництво лігатур має Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. Ця наукова організація розробляє лігатури Al–Sc, Al–Zr, Al–Ti–Zr з високими показниками якості. Інститут має унікальні технології для створення складних лігатур з вмістом модифікаторів до 20 % маси.

Українська компанія-дистриб'ютор ТОВ «ВІРС» пропонує широкий спектр алюмінієвих лігатур, включно з модифікаторами структури та зернистості. Можлива поставка лігатур Al–Sc під замовлення.

Слід зауважити, що виробництво алюмінієвих сплавів з вмістом магнію (таких як Al–Mg–Sc) не поширене в країнах Заходу. У дослідних масштабах виробництво може бути в Україні. А в промислових масштабах – переважно в рф і КНР.

Закупівля нішевих сплавів відбувається через дистриб'юторів або шляхом прямого замовлення у виробника.

Цінова динаміка на ринку

У 2022 р. світові ціни на алюміній і його похідні зросли до 14-річного максимуму [11]. Цей процес триває.

Головні складові цінової динаміки:

- обмеження виробництва алюмінію в Китаї, для поліпшення екологічної ситуації;
- пандемія COVID-19, яка розпочалася саме в місті Байсе – головному виробнику китайського алюмінію;

- зменшення обсягів виробництва первинного алюмінію в ЄС у зв'язку зі зростанням світових цін на природний газ і електроенергію;

- російська агресія проти України;

- поглиблення проблем з поставлянням сировини у зв'язку із заборонаю Австралії на експорт глинозему й алюмінієвої руди в рф, у рамках санкцій проти рф, що вплинуло на обсяги виробництва компанією Rusal (поставки забезпечували лише 20 % потреб у сировині для виробництва алюмінію). Зупинка Миколаївського глиноземного заводу потужністю 1,75 млн т глинозему на рік.

Виплавка алюмінію потребує багато електроенергії – на неї припадає близько 30 %

собівартості цього металу. Енергетична криза в Європі та Китаї змусила зупиняти заводи, які його виплавляють.

Американська компанія Alcoa через високі ціни на енергоносії планує закрити завод в Іспанії, який за рік виробляє 228 тис. т алюмінію. Інші компанії готуються скорочувати виробництва в Словаччині, Чорногорії, Румунії та Франції.

Вирішило б проблему збільшення потужностей у Китаї, на який протягом останнього десятиліття припало 90 % зростання галузі. Однак китайська влада обмежила виробництво заради стабільного енергозабезпечення та контролю CO₂.

Запаси алюмінію на складах LME становлять 704,8 тис. т, що є найнижчим рівнем з 2007 р. Запаси алюмінію на біржових складах Шанхаю впали на 4,2 % – до 333,8 тис. т.

У 2024 р. середня ціна алюмінієво-скандієвих лігатур з вмістом скандію 2 та 5 % становила приблизно від 1 500 до 3 500 дол. США за кілограм. Порошки для адитивного виробництва можуть коштувати близько 4 000 дол. США за кілограм. Відповідно сплави з вмістом скандію від 0,2 до 0,5 % за масою повинні коштувати від 150 до 350 дол. США за кілограм, реально можуть мати ціну в діапазоні від 550 до 650 дол. США за кілограм. Така різниця в ціні подібних товарів у різних виробників може бути пояснена рядом чинників: різним вмістом скандію у вихідній сировині, різним рівнем технічної культури та розуміння наукових основ технологічних процесів, технічною досконалістю обладнання та рівнем відпрацювання технологічних процесів, політичними рішеннями. Сам же високий рівень цін зумовлений високою вартістю скандію – 15–20 тис. дол. за кілограм, політичними ризиками в торгівлі (основні виробники – КНР і рф), обмеженим видобутком (переважно в КНР, рф, Австралії), високими витратами на легування й оброблення.

Геополітичні чинники нестабільності ринку алюмінієво-скандієвих сплавів

На цей час світова економіка характеризується значно нижчим рівнем глобалізації, ніж до початку 2020 р. Геополітична напруга та порушення торговельних зв'язків [18] значно впливають на ринок алюмінієво-

скандієвих сплавів, спричиняючи цінову нестабільність сировини та напівфабрикатів і збільшуючи виробничі витрати їхніх споживачів.

Ланцюг постачання сировини для алюмінієво-скандієвих сплавів значною мірою зосереджений у обмеженому колі регіонів, таких як Китай, рф, Австралія та Канада, що робить ринок уразливим до збоїв, спричинених геополітичною напругою, санкціями або торговельними війнами.

Такі події можуть призвести до коливань цін і регіонального дефіциту, що впливає на доступність алюмінію для виробництва сплавів. Скандій, як рідкісноземельний елемент з обмеженими джерелами видобутку, ще більш чутливий до порушень у ланцюгах поставок. Геополітична нестабільність у країнах-лідерах з видобутку, таких як рф і КНР, або торговельні обмеження, наприклад санкції на російський експорт, можуть істотно вплинути на постачання скандію, підвищуючи витрати та змінюючи глобальну торговельну динаміку.

Крім того, торговельні війни, такі як поточне протистояння між США та Китаєм, ще більше загострюють невизначеність на ринку. США запроваджує високі митні тарифи на імпортований алюміній та інші критично важливі сировинні матеріали. Ці тарифи можуть збільшити вартість алюмінієво-скандієвих сплавів для американських виробників, які залежать від імпортової сировини, що в кінцевому підсумку впливає на виробничі витрати та ціноутворення. Зміни в регіональних торговельних угодах, таких як Угода між США, Мексикою та Канадою (USMCA), або торговельна політика Європейського Союзу також можуть як сприяти переміщенню алюмінієво-скандієвих сплавів через кордони, так і ускладнювати його, додатково впливаючи на ринкові умови.

Таким чином, політичні чинники обмежують доступ до джерел сировини та створюють на ринку алюмінієво-скандієвих сплавів значну цінову волатильність, що, в свою чергу, робить використання таких сплавів ризикованим у поточних геополітичних умовах.

Ураховуючи такі чинники:

– на експлуатацію однієї РН середнього класу (за високої пускової активності) на рік потрібно приблизно 500 т алюмінієвих сплавів;

– річна світова потужність виробництва алюмінієво-скандієвих сплавів становить 400–600 т;

– сплави алюміній-скандій надзвичайно дорогі, –

можна зробити висновок: немає можливості й економічного сенсу використовувати алюмінієво-скандієві сплави як основні конструкційні матеріали для РН. Наразі в поточних ринкових умовах, алюмінієво-скандієві сплави доцільно використовувати в невеликих відповідальних вузлах РКТ.

Можливості виробництва алюмінієвих сплавів і напівфабрикатів в Україні

В Україні алюмінієві руди підтверджені на Закарпатті, в Приазов'ї та в межах Українського щита, проте їх не видобувають.

На початку незалежності в Україні була розвинена алюмінієва промисловість. Її основу становили Миколаївський глиноземний завод, який виробляв з імпортованих бокситів сировину для виплавки алюмінію, та Запорізький алюмінієвий комбінат, який виплавляв чушку з чистого алюмінію. Окрім того, електротехнічну катанку виготовляв Лисичанський завод, алюмінієві сплави могли виготовляти численні ливарні виробництва машинобудівних заводів. Не вистачало лише виробництва прокату та поковок.

На початку 2000 р. в Україні почали з'являтися підприємства, що виробляли алюмінієвий прокат переважно для застосування в будівельній галузі (Броварський, Дніпропетровський, Алчевський та інші заводи). Водночас унаслідок приватизації російським монополістом Rusal, в умовах несприятливої цінової кон'юнктури на ринку електроенергії було знищено основне виробництво на Запорізькому алюмінієвому комбінаті. Цей самий монополіст приватизував і основу української алюмінієвої галузі – Миколаївський глиноземний завод. Згодом і Запорізький комбінат, і Миколаївський глиноземний завод (який зупинив свою роботу в лютому 2024 р.) було повернуто до державної власності. Проте наразі, в умовах війни, обидва підприємства не здатні працювати. Істотно скоротилася кількість ливарних потужностей в Україні, частина підприємств галузі перебуває на окупованих територіях.

Таким чином, станом на 2025 р. алюмінієва галузь в Україні має ряд проблем:

– втрата основних потужностей, відсутність не тільки замкненого циклу виробництва, але й тих його елементів, що були в наявності;

– відсутність працюючих потужностей з виробництва та перероблення сировини для виготовлення алюмінію;

– залежність від світових виробників чистого алюмінію та рівня світових цін;

– постійне зростання цін на енергоресурси за високої енергоємності виробництва як алюмінію, сплавів на його основі, так і напівфабрикатів, і кінцевої продукції.

Таким чином, замовлення в Україні виробництва сплавів для ракетно-космічної техніки можливе лише в незначних масштабах з імпортованою сировиною на дослідному виробництві Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Можливість виробництва напівфабрикатів в Україні та їхньої номенклатури необхідно обговорювати з тими виробниками, які станом на 2025 р. працюють.

Запаси скандію в Україні

За даними Національної академії наук, за розвіданими покладами скандію Україна посідає перше місце в Європі та входить до п'ятірки світових лідерів.

В Україні джерелом скандію є родовища ільменітових та ільменіт-титаномангнетитових руд габро-анортозитової формації (Стремигородське та Торчинське), які містять до 0,005 % Sc_2O_3 ; головні концентратори скандію – ільменіт (до 0,015 % Sc_2O_3) та піроксен (до 0,024 % Sc_2O_3). На ільменітові руди припадає до 60 % скандію.

Значні запаси скандію містять Малишевське й Іршавське родовища, також скандій міститься у складі комплексних руд Жовтореченського, Аннівського та Первомайського родовищ.

Окремим джерелом видобутку скандію є відходи перероблення інших мінералів. Зокрема, значний відсоток скандію є у червоному шламі, який залишається після перероблення бокситів (на тонну сировини – 100 г скандію); на тонну піроксенів «хвостів» залізної руди – 150 г; на тонну титанових шлаків – 200 г скандію.

Саме тому Україна зберігає значний резерв для отримання скандію з червоних шлаків – відходів виробництва Миколаївського глиноземного заводу. На сьогодні цю технологію видобутку скандію не використовують, завод не працює.

За часів СРСР в Україні на території Жовторіченського залізно-уранового родовища працювало підприємство з видобутку скандієвої сировини (за оцінками західних експертів, воно було найбільшим у світі). За часів незалежності підприємство було акціоновано, 30 % акцій належало американській компанії Ashurst Technology Ltd. З 1993 р. підприємство виробляло алюміній-скандієвий сплав, його виробничу потужність оцінювали в 900 т, хоча реальний випуск не перевищував десятків тонн. У 1995 р. роботу унікального комбінату з перероблення стратегічної сировини зупинили американські господарі.

З огляду на вищенаведене можна констатувати, що з існуючих потенційних джерел скандію найбільший інтерес викликають ільменітові концентрати з корінних і розсипних родовищ титану, а також відходи титаномангнетитового виробництва (піроксенові хвости).

Існуюча мінерально-сировинна база скандію в Україні дозволяє реалізувати будь-які вимоги ракетно-космічної галузі. Україна має всі передумови стати важливим гравцем на світовому ринку скандію: потужна сировинна база, потенціал для перероблення промислових відходів, стратегічне розташування, інтерес з боку ЄС, США та Японії до імпорту альтернативної сировини. Інтерес потенційних стратегічних інвесторів до українських надр є стабільно високим, що пов'язано зі зростанням світових цін на ринку стратегічної сировини. Для реалізації цього потенціалу необхідні інвестиції в технології, держпідтримка та розвиток міжнародного партнерства.

Українсько-американська «Угода про надра» створює правову, економічну й організаційну основу для стратегічної співпраці між Україною та США у сфері розроблення корисних копалин та інвестування в суміжні сектори, зокрема в інфраструктуру та переробку промисловість. Угода покликана регулювати питання спільного управління надрами, стимулювати інвестиції та сприяти

розробленню нових родовищ, зокрема стратегічних рідкісноземельних елементів, які є важливими для оборонного, енергетичного та технологічного секторів.

Вихід на світовий ринок скандію й алюмінієво-скандієвих сплавів України здатен не тільки задовольнити попит, що стабільно зростає, знизити політичні й економічні ризики роботи для покупців, але й забезпечити стабільне надходження в Україну валюти, створення нових робочих місць, прогнозовану окупність інвестицій (за умови вирішення енергетичних проблем і прийнятних цін на електроенергію), розвиток власних виробничих можливостей у високотехнологічних галузях, у першу чергу – в аерокосмічній сфері.

Висновки

Аналіз джерел у сфері матеріалознавства й інформації щодо ринків алюмінієвих і алюмінієво-скандієвих сплавів, геополітичних чинників на цих ринках показав, що:

1. Фізико-механічні та хімічні властивості сплавів системи алюміній-скандій та алюміній-магній-скандій відповідають умовам функціонування РКТ, мають комплекс переваг і дозволяють поліпшити конструктивну досконалість (зменшення маси конструкцій, висока точність виготовлення завдяки дрібнозернистості сплаву), надійність при роботі у складних умовах (висока міцність, вібростійкість, термостійкість і корозійна стійкість сплавів), можливість багаторазового використання (термостійкість і довговічність сплавів).

2. Технологічні процеси виготовлення деталей із зазначених сплавів не відрізняються від традиційних. Сплави алюміній-скандій легко піддаються зварюванню, пресуванню, механічному обробленню різанням. Новою технологією, перспективною для впровадження у виробництво, є адитивне виробництво, яке станом на 2024 р. споживало 20 % усіх виготовлених сплавів алюміній-скандій.

3. Визначено перелік компаній-виробників зазначених сплавів, ціни поставок. Лідери на цьому ринку – компанії рф і КНР. Проте є постачальники на європейському й американському ринках. Поставки проводять на цьому ринку в рамках замовлення

в дистриб'ютора або виробника сплаву або напівфабрикату зі сплаву з певним складом, потрібним споживачу.

4. На ринку алюмінієво-скандієвих сплавів існують істотні політичні ризики. Політичні чинники обмежують доступ до джерел сировини та створюють на ринку алюмінієво-скандієвих сплавів значну цінову волатильність. Ціновий чинник робить масштабне використання в РКТ цих сплавів економічно недоцільним через високу кінцеву собівартість продукції.

5. Незначний обсяг виробництва сплавів алюміній-скандій (400–600 т на рік) обмежує їх широке використання в РКТ. У наслідок високої ціни та малої кількості у продажу зазначені сплави доцільно використовувати у відповідальних навантажених вузлах або деталях у складі елементів РКТ, призначених для багаторазового використання.

6. В Україні є можливості відродження власного виробництва алюмінієво-скандієвих сплавів – є працююча науководослідна база та фахівці, мінерально-сировинна база скандію в Україні дозволяє реалізувати будь-які потреби ракетно-космічної галузі. До 1995 р. в Україні працював завод з виробництва сплавів з вмістом скандію на основі української сировини. Відновлення виробництва потребує інвестицій і політичної волі.

Список використаної літератури

1. Алюміній та його сполуки в ракетній техніці. URL: <https://evек.com.ua/reference/alyuminiy-i-ego-soedineniya-v-raketnoy-tehnike.html> (дата звернення 21.09.2025).

2. 5000 Series Aluminum Alloy: A Comprehensive Overview. URL: <https://elkamehr.com/en/5000-series-aluminum-alloy/> (дата звернення 21.09.2025).

3. Алюміній, мідь та сплави на їх основі. НУБіП України. pdf URL: https://elearn.nubip.edu.ua/pluginfile.php/704375/mod_resource/content/2/%D0%9C%D0%BE%D0%B4_2_%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86i%D1%8F_11_%D0%B0%D0%BB%D1%8E%D0%BCi%D0%BDi%D0%B9_%D0%BCi%D0%B4_.pdf?utm_source=chatgpt.com (дата звернення 21.09.2025).

4. Джур Є. О., Калініна Н. Є., Джур О. Є., Калінін О. В., Носова Т. В., Мамчур С. І.

Підвищення властивостей деформованих алюмінієвих сплавів, модифікованих нанокпозиціями. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 98–104.

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.098>

5. Калініна Н. Є., Бондаренко О. В. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці: Навч. посіб. Д.: РВВ ДНУ, 2011. 64 с.

6. Давидюк А., Поліжко С. Зміна структури та механічних властивостей алюмінієвого сплаву системи Al–Mg–Sc унаслідок оброблення комплексним наномодифікатором. *Вісн. Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2023. № 103. С 211–215.

7. Остап О. П., Чепіль Р. В., Тітов В. А., Поливода С. Л., Ворон М. М., Подгурська В. Я. Міцність і циклічна тріщиностійкість термодформованих сплавів системи Al–Mg–Sc. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2021. Т. 57. № 3. С. 118–125.

<https://doi.org/10.1007/s11003-021-00555-w>

8. AIAA Propulsion and Energy Forum, 2019 – Additive Manufacturing for Propulsion Systems, 19–22 august 2019. С. 217.

9. Перестань грызть вафли, розділ «Космонавтика» сайту N+1, 2021 р. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D0%B>

10. Scandium oxide is a rare and valuable metal. URL: <https://ua.hnosc.com/news/scandium-oxide-is-a-rare-and-valuable-metal-th-75876554.html>

11. Aluminum Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. URL: <https://www.precedenceresearch.com/aluminum-market> (дата звернення 21.09.2025).

12. Aluminium Market Size, Share & Industry Analysis, By Product (Sheet, Plate, Cast Products, Extrusion, and Others), By Alloy Type (Cast Alloy and Wrought Alloy), By End-use (Construction, Transportation {Aerospace, Automotive, and Marine}, Packaging {Food & Beverages, Cosmetics, and Others}, Electrical, Consumer Durables, Machinery & Equipment, and Others), and Regional Forecast, 2024-2032. 2025. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/aluminium-market-100233> (дата звернення 21.09.2025).

13. Global Market Insights, Inc. Aluminum Alloys Market Size By Product (Wrought, Cast),

By End-user (Transportation, Construction, Packaging, Machinery, Electrical): Industry Analysis Report, Regional Outlook, Growth Potential, Price Trends, Competitive Market Share & Forecast, 2017–2024. April 2017. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/aluminum-alloys-market>

14. Aluminum Scandium Alloys Market Size. 2025. <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/aluminum-scandium-alloys-market-107081> (дата звернення 21.09.2025).

15. Aluminium scandium alloy market.2025. <https://market.us/report/aluminium-scandium-alloy-market/> (дата звернення 21.09.2025).

16. Aluminum Producing Companies in the World, 6 august 2020.

URL: <https://www.steeltechnology.com/>

[articles/aluminum-producing-companies-in-the-world?utm_source=chatgpt.com](https://www.steeltechnology.com/articles/aluminum-producing-companies-in-the-world?utm_source=chatgpt.com)

17. Miningdigital URL: https://miningdigital.com/top10/top-10-aluminium-mining-processing-companies?utm_source=chatgpt.com

18. Geopolitical Impact Analysis <https://market.us/report/aluminium-scandium-alloy-market/> (дата звернення 21.09.2025).

Стаття надійшла 03.11.2025

Дата прийняття статті до друку після рецензування
17.11.2025

Дата публікації 12.02.2026