

Формування дрібнодисперсної структури вторинних алюмінієвих сплавів шляхом рафінування та корекції хімічного складу

Петриченко С. В.¹, аспірант, serg.petrichenko@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6394-1026>

Коваленко В. В.¹, аспірант, vitaly.kovalenko1983@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

Биба Є. Г.^{1,2}, кандидат технічних наук, доцент, byba.evgen@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

Мініцький А. В.¹, доктор технічних наук, професор, aminitsky@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

Лук'яненко І. В.¹, кандидат технічних наук, доцент, lukianenkoiv@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

Мініцька Н. В.¹, кандидат технічних наук, доцент, minitska27@gmail.com,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5156-7328>

Ямшинський М. М.¹, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

yamshinskiy@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

Барабаш М. Ю.^{1,3,4}, доктор технічних наук, професор, старший науковий

співробітник, mbarabash@nasu.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Інститут прикладних систем управління НАН України, Київ, Україна

³Технічний центр НАН України, Київ, Україна

⁴Інститут газу НАН України, Київ, Україна

Робота присвячена розробленню технологічних основ оптимізації хімічного складу, структури та механічних властивостей вторинних алюмінієвих сплавів, отриманих у результаті рециклінгу різнотипного алюмінієвого брухту, у тому числі військового та промислового походження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю раціонального використання вторинної сировини, зниження енергетичних витрат та мінімізації екологічного навантаження при виробництві високоміцних конструкційних матеріалів для авіаційної та машинобудівної галузей.

У роботі запропоновано технологічну схему переплавлення з використанням бінарного сольового флюсу системи NaCl-KCl, що забезпечує ефективне рафінування розплаву

від неметалевих включень, інтенсифікацію дегазації та зниження втрат легувальних елементів. Запропоновано підхід до коригування хімічного складу вторинного сплаву шляхом легування цинком з метою формування високоміцної системи типу Al–Zn–Mg.

Показано, що легування цинком і додаткове флюсове оброблення сприяють зниженню вмісту шкідливих домішок заліза до 0,36-0,38 %, трансформації морфології залізовмісних інтерметалідних фаз та зменшенню залишкових напружень у виливках. За результатами металографічних і мікроструктурних досліджень встановлено формування більш однорідної дрібнодисперсної литої структури зі зниженим рівнем дефектності. Визначено механічні властивості сплаву у литому стані: тимчасовий опір розриванню становить 140 МПа, відносно подовження – 5,42 %, що відповідає проміжному етапу формування властивостей перед термічним обробленням.

Отримані результати підтверджують перспективність розробленої технології як ефективної основи для створення вторинних високоміцних алюмінієвих сплавів із прогнозованими структурно-механічними властивостями та можливістю їх практичного використання у відповідальних конструкційних елементах авіаційного та загальномашинобудівного призначення.

Ключові слова: вторинні алюмінієві сплави, рециклінг алюмінію, флюсове рафінування, механічні властивості, сплави системи 7xxx.

Алюмінієві сплави належать до основних конструкційних матеріалів сучасного машинобудування, авіаційної, автомобільної та оборонної промисловості завдяки унікальному поєднанню малої густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості та вдалим технологічним властивостям [1-3]. Водночас стрімке зростання обсягів виробництва такої техніки, скорочення термінів її експлуатації та постійне оновлення парку призводять до накопичення значних обсягів алюмінієвого брухту [1, 4].

Особливо важливою ця проблема проявляється в авіаційній галузі. За аналітичними даними, упродовж останніх десятиліть кількість списаних літальних апаратів у світі зросла у декілька разів, що призвело до формування потужного потоку вторинної алюмінієвої сировини [4-6]. Це створює потужний ресурсний потенціал для вторинної металургії, який, за умови вдалого та ефективного технологічного опрацювання, може суттєво зменшити витрати первинної сировини та енергоресурсів.

Відомо, що енерговитрати на отримання вторинного алюмінію у 5-10 разів нижчі, ніж на виробництво первинного металу з бокситів, а викиди парникових газів скорочуються у декілька разів [1-4]. Тому, рециклінг алюмінієвих сплавів має не лише економічне, а й важливе екологічне значення, відповідаючи сучасним вимогам сталого розвитку промисловості.

Разом з тим вторинна переробка авіаційного та військового алюмінієвого брухту супроводжується низкою серйозних технологічних труднощів. Основними проблемами є багатокомпонентність сплавів, нестабільність їх хімічного складу, підвищений вміст заліза, наявність неметалевих включень (Al_2O_3 , MgO), залишків мастил, полімерних та композиційних матеріалів [2, 9-11].

Залізо є однією з найшкідливіших домішок у вторинних алюмінієвих сплавах. Навіть за його концентрації на рівні десятих часток відсотка

формується пластинчасті інтерметалідні фази типу Al_5SiFe , Al_7Cu_2Fe , Al_8SiFe_2 , які є потужними концентраторами напружень і різко знижують пластичність та втомну міцність матеріалу [10-12]. Для нейтралізації негативного впливу заліза застосовують комплексні методи легування (Mn, Cr, Ni, Mo), модифікування та рафінування розплавів [12, 13-17].

Разом із тим високоміцні сплави є структурно чутливими до режимів лиття, хімічного складу та термічної обробки. Навіть незначні відхилення у вмісті Si та Fe можуть призводити до утворення крихких фаз, гарячих тріщин і різкого зниження пластичності [15-20]. Тому, використання вторинної сировини для отримання сплавів потребує ретельної оптимізації складу та багатоступеневого рафінування.

Окремий інтерес у сучасних дослідженнях викликають алюмінієві сплави з підвищеним вмістом цинку, які поєднують високу твердість, високу зносостійкість та підвищену демпфірувальну здатність [21-23].

Водночас проблемою залишається забезпечення оптимального співвідношення «міцність-пластичність», що є критично важливим для запобігання крихкому руйнуванню в умовах ударних та циклічних навантажень.

Відомо, що одним із найбільш ефективних способів підвищення якості вторинних алюмінієвих сплавів є застосування флюсового рафінування, яке забезпечує: видалення неметалевих включень; дегазацію розплаву; стабілізацію хімічного складу; зменшення втрат легувальних елементів (Mg, Zn) під час витримування [2, 13, 15]. Ефективність таких флюсів безпосередньо впливає на рівень залишкових напружень, однорідність мікроструктури та механічні властивості литих заготовок [13, 15].

В умовах воєнного часу та післявоєнного відновлення промисловості особливої актуальності набуває перероблення алюмінієвого брухту військового та авіаційного призначення. Такий брухт відзначається високою концентрацією легувальних елементів, проте й підвищеним рівнем технологічного забруднення. Раціональне використання цього ресурсу дозволяє не лише суттєво скоротити витрати дорогої первинної сировини, а й створити передумови для отримання високоміцних сплавів із заданими експлуатаційними характеристиками.

Таким чином, актуальною науково-технічною задачею є розробка технологічних основ рециклінгу вторинних алюмінієвих сплавів високоміцних систем Al-Zn-Mg-Mn з прогнозованими механічними властивостями, зокрема шляхом керування хімічним складом та режимами флюсового рафінування.

Метою роботи є розробка технологічних засад формування дрібнодисперсної структури вторинних алюмінієвих сплавів шляхом рафінування сольовим флюсом та корекції хімічного складу легуванням цинком, для нейтралізації шкідливого впливу домішок заліза та забезпечення високого рівня механічних властивостей, необхідних для виробництва відповідальних виробів авіаційної галузі.

З метою очищення алюмінієвого сплаву було застосовано бінарну суміш солей у молярному співвідношенні 50 мол.% NaCl і 50 мол.% KCl у кількості 5 % від маси рідкого металу.

Для визначення рівня механічних властивостей використовували зразки з діаметром робочої частини 12,5 мм. Дослідження міцності на тимчасовий опір розриванню здійснювали на універсальній розривній машині МР-100. За результатами випробувань визначали відносне подовження та звуження.

Хімічний аналіз зразків проводили за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу на приладі Expert 3L. Дослідження мікроструктури проводили на скануючому електронному мікроскопі РЕМ 106-И. Дослідження фазового складу та залишкових напружень виконували методом рентгенофазового аналізу на дифрактометрі Ultima IV (ЦККНО, КПІ ім. Ігоря Сікорського).

В якості сировини для плавлення алюмінію було використано різнотипний алюмінієвий брухт Алюміній 10 та Алюміній 11, що містить: залишки броньованої бойової машини (ББМ), знищеної внаслідок бойових дій; зворот власного виробництва, що утворюється під час технологічних операцій; побутовий брухт у вигляді алюмінієвих банок; а також промислову алюмінієву стружку. Такий підхід дозволяє оцінити можливості вторинного використання алюмінієвих відходів різного походження з метою формування литих заготовок із підвищеними механічними властивостями.

За результатами плавлення отримано модифікований сплав AlSi2Mg(Zn) табл. 1, який позначено умовно як: Al-2,5Mg-2,5Zn-1,0Mn-0,6Si. Зазначений хімічний склад не відповідає жодному з уніфікованих стандартів EN 1706, проте в межах цього дослідження він розглядається як вихідний сплав.

Таблиця 1
Хімічний склад серії зразків

Table 1
Chemical composition of series of samples

Сплав	Вміст елементів, мас. %						
	Zn	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Al
Серія 1	2,71	3,14	0,58	0,14	0,56	0,41	залишок
Серія 2	2,41	2,41	0,96	0,00	0,58	0,37	залишок
Серія 3	2,59	2,59	1,04	0,06	0,42	0,49	залишок
Узагальнений середній хімічний склад	2,57	2,71	0,86	0,07	0,52	0,42	залишок

З метою кінетичного аналізу стабільності рідкої фази та визначення впливу часу високотемпературної витримки (720 °C) під сольовим флюсом (NaCl-KCl), досліджено кінетику вигорання (втрат) ключових легувальних

елементів (Mg, Zn, Mn, Si) та домішок Fe протягом 6 годин із дискретністю відбору проб 1 година. Кінетичний аналіз (з кроком відбору проб 1 год) дозволяє встановити швидкість реакції (константу швидкості) втрат для кожного елемента і визначити максимально допустимий час витримання розплаву без критичної зміни його хімічного складу. Результати аналізу хімічного складу отриманих алюмінієвих сплавів показано на рис. 1.

Вивчення кінетики втрат хімічних елементів у рідкому металевому розплаві є ключовим для контролю якості та технологічної спадковості сплаву, особливо в умовах рециклінгу вторинної сировини. Процеси втрати легувальних компонентів за високотемпературного витримання 720 °C можуть відбуватися за двома основними механізмами, які флюс покликаний мінімізувати.

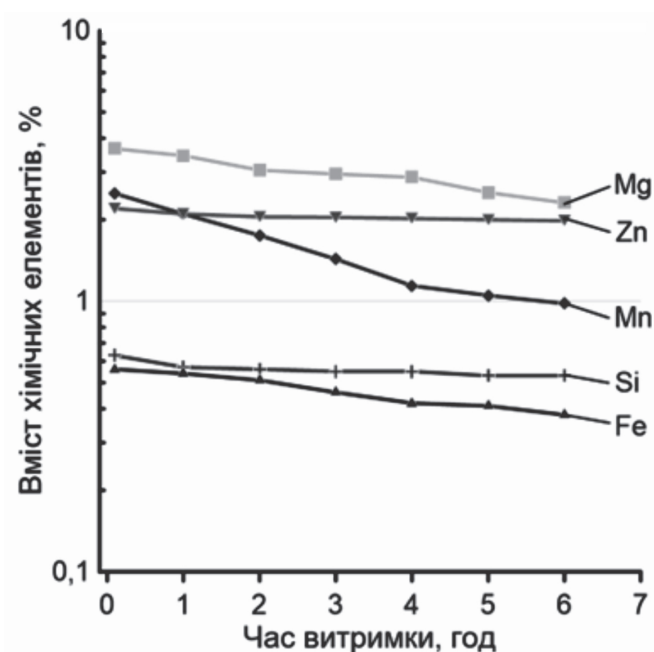


Рис. 1. Кінетика зміни вмісту легувальних елементів Mg, Zn, Mn, Si та домішок Fe у розплаві вторинного алюмінієвого сплаву в процесі витримання за температури 720 °C під сольовим флюсом.

Fig. 1. Kinetics of variation in alloying elements (Mg, Zn, Mn, Si) and Fe impurity concentrations in a secondary aluminum alloy melt during thermal exposure at 720 °C under salt-flux treatment.

Перший механізм – це окиснення та перехід у шлак на поверхні розплаву або у мікрооб'ємах киснем повітря, яке дифундує крізь флюс, або за рахунок хімічної взаємодії з компонентами флюсу. Оскільки магній має найвищу спорідненість до кисню серед досліджуваних елементів його втрати відбуваються найбільш інтенсивно (див. рис. 1) через утворення оксиду MgO, який переходить у шлак або розчиняється у флюсі. Флюс формує захисний шар на поверхні, що фізично перешкоджає прямому контакту кисню з металом.

За другим механізмом – випаровування та утворення газової фази стосується таких елементів, які мають відносно високу пружність пари за робочої температури. Цинк має низьку температуру кипіння, його незначні втрати за 720 °С вказують на ефективність флюсу як бар'єру проти випаровування. Інші елементи Mn та Si мають високу хімічну стійкість та низьку пружність пари. Їхнє незначне зниження концентрації, ймовірно, пов'язане з окисненням, утворенням інтерметалідних фаз та їхньою седиментацією на дно тигля.

Вміст алюмінію залишається на стабільному рівні $\approx 95\%$ впродовж всього терміну дослідження.

Оскільки визначений хімічний склад не відповідає жодному з уніфікованих стандартів EN 1706 орієнтувалися по вмісту кремнію, через те, що він не зменшує свою кількість під час рециклінгу. Сумарний вміст легувальних елементів $Mg + Zn + Mn \approx 6,0\%$. Сукупний вміст легувальних елементів на рівні $\approx 6,0\%$ робить досліджуваний сплав близьким за хімічним складом до системи 7xxx (зокрема сплавів типу 7005 або 7022).

Більшість авіаційних 7xxx-сплавів характеризуються дуже низьким вмістом Si (зазвичай $\leq 0,1-0,3\%$), оскільки кремній у вільному стані знижує пластичність та сприяє формуванню крихких інтерметалідних включень. Таким чином, за сумарним вмістом основних легувальних елементів отриманий сплав можна вважати наближеним до сплаву EN AW-7005. Водночас для повної відповідності вимогам цієї системи необхідно або скоригувати хімічний склад (особливо співвідношення Zn/Mg та вміст Si), або застосувати спеціалізовані технологічні режими, які забезпечать формування необхідної мікроструктури та експлуатаційних властивостей.

Після витримування сплаву в печі впродовж 6 год додавали алюміній марки А5 та цинк із розрахунку вийти на середнє значення 4,5 %. Алюміній марки А5 характеризується мінімальним вмістом домішок. Його додавання допомагає знизити загальний вміст небажаних домішок (наприклад, Fe) у вторинному сплаві, підвищуючи чистоту кінцевого продукту, що є критично важливим для авіаційних сплавів. Таким чином, додавання Al та Zn є необхідним для фінальної корекції складу (з урахуванням втрат). Результати дослідження наведено в табл. 2. Хімічний склад визначено методом енергодисперсійного рентгеноспектрального аналізу, результати якого наведено у табл. 3 (відповідні області проведення локального хімічного аналізу позначено на рис. 2).

Чистота отриманого сплаву підтверджується очищенням від негативних домішок аналізом залишкових напружень. Встановлено, що сплав у вихідному стані має залишкові напруження – 1848,57 МПа, а після витримування впродовж 6 год складає – 1321,99 МПа. Додаткове опрацювання флюсом знижує залишкові напруження до 1149,86 МПа. Витримування за високих температур прискорює релаксацію напружень. В'язкість рідкого металу дозволяє матеріалу під час кристалізації

Таблиця 2

Хімічний склад стандартного та досліджуваних сплавів

Table 2

Chemical composition of standard and studied alloys

Сплав	Вміст елементів, %						
	Zn	Mg	Mn	Cr	Si	Fe	Al
EN AW-7005	4,0-5,0	1,0-1,8	0,20-0,70	0,06-0,20	≤ 0,35	≤ 0,40	залишок
Al-2,5Mg-2,5Zn-1,0Mn-0,6Si	2,50	2,50	1,00	0,00	0,60	0,38	залишок
Al-2,5Mg-2,5Zn-1,0Mn-0,6Si + Zn	4,21	1,64	0,67	0,00	0,03	0,36	залишок

перерозподілити енергію пружної деформації, спричинену литтям у металеву форму. Додатково, тривале витримання сприяє дифузії легувальних елементів та розчиненню мікросегрегацій, що формувалися на межах зерен. Це робить структуру більш однорідною і зменшує локальні градієнти складу, які є основною причиною виникнення залишкових напружень.

Наявність стискаючих напружень є очікуваними, оскільки на поверхні вони підвищують корозійну стійкість і втомну міцність, внаслідок перешкоджання утворення тріщин.

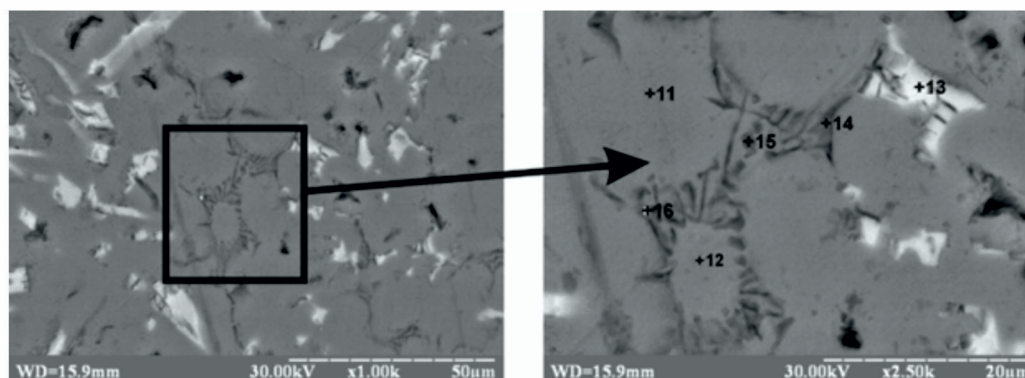


Рис. 2. Зображення мікроструктури отриманого сплаву, виконане методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM), з позначенням локальних ділянок для визначення хімічного складу.

Fig. 2. The image of the alloy's microstructure, acquired via scanning electron microscopy (SEM), with marked locations for chemical composition analysis.

Додаткове оброблення розплаву флюсом ефективно видаляє неметалеві включення Al_2O_3 , MgO та розчинені гази. Їхнє видалення підвищує чистоту металу та зменшує структурні неоднорідності, які генерують локальні напруження під час кристалізації та охолодження. Зниження залишкових напружень (від -1321,99 МПа до -1149,86 МПа) після оброблення можна пояснити тим, що процес рафінування видалив

частину крихких залізовмісних інтерметалідів або оксидних плівок, які були джерелом надзвичайно високих локальних напружень. Зниження абсолютного значення залишкових напружень після додаткової обробки розплаву флюсом є прямим і кількісним індикатором підвищення його металургійної чистоти.

Таблиця 3

Локальний хімічний склад досліджуваного сплаву (області дослідження позначено на рис. 2)

Table 3

Local chemical composition of the alloy under study (the study areas are marked in Fig. 2)

Сплав	Елемент, мас. %						
	Zn	Mg	Mn	Si	Ti	Fe	Al
Спектр 11	1,06	2,40	0,58	0,73	0,26	0,30	залишок
Спектр 12	1,52	3,21	0,72	1,03	0	0	залишок
Спектр 13	0,57	1,45	6,87	0,15	Cr – 0,19	16,25	залишок
Спектр 14	1,69	4,59	0,41	7,05	Cu – 0,24	0,49	залишок
Спектр 15	2,37	7,29	0,17	0,65	0	0,12	залишок
Спектр 16	0,93	2,88	0	0	W – 49,14	0,21	43,54

Зазначений взаємозв'язок ґрунтується на флюсовому обробленні розплаву, яке забезпечує ефективне видалення мікроскопічних неметалевих включень. Зменшення кількості таких частинок в об'ємі сплаву, своєю чергою, приводить до скорочення числа зон локальної концентрації напружень. Відповідно, розплав кристалізується більш однорідним, що додатково знижує градієнти складу та термічних деформацій, сприяючи загальній релаксації залишкових напружень у виливку.

Показано, що зниження абсолютного значення залишкових напружень після оброблення корелює з підвищенням чистоти сплаву, оскільки видалення неметалевих включень та усунення мікронеоднорідностей зменшує кількість концентраторів напружень, роблячи структуру більш гомогенною та стійкою.

Дослідження механічних властивостей, рис. 3, додатково підтверджують доцільність запропонованої технології рециклінгу алюмінієвого брухту з метою отримання дрібнодисперсної литої структури.

Сплав EN AW-7005 після оптимального термічного оброблення характеризується рівнем тимчасового опору розриванню 350-400 МПа та відносним подовженням 7-12 %. Отримані на даному етапі експериментальні результати (140 МПа та 5,42 % відповідно) мають проміжний характер і відображають стан сплаву без завершальної термічної обробки. Подальше проведення режимів гомогенізації, гартування та штучного старіння розглядається як необхідний етап валідації можливості досягнення необхідного рівня міцності 350-400 МПа.

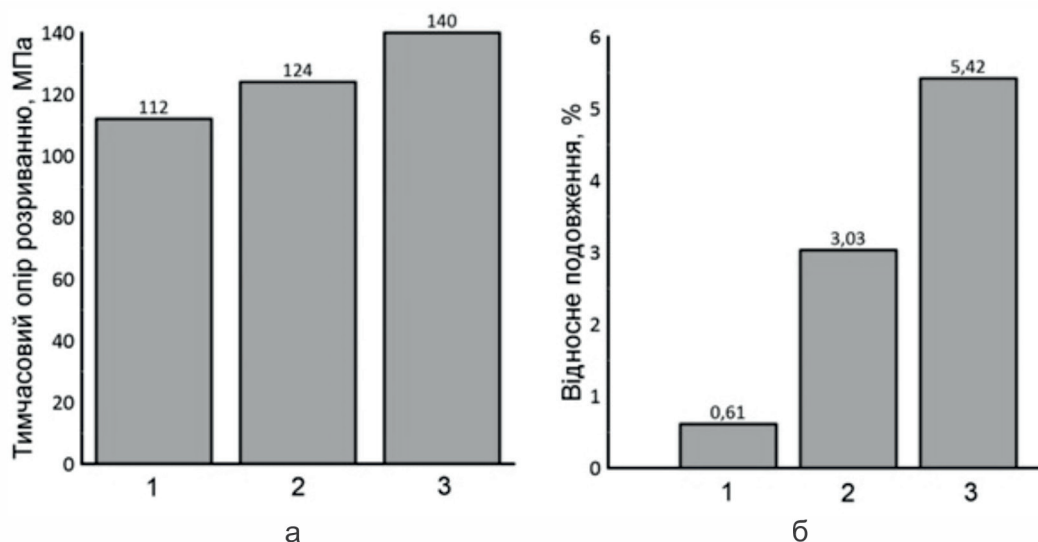


Рис. 3. Механічні властивості отриманого сплаву: а – тимчасовий опір розриванню, б – відносне подовження, 1 – вихідний сплав, 2 – вихідний сплав після витримування 6 год, 3 – вихідний сплав після витримування 6 год легований цинком та додаткового оброблений флюсом.

Fig. 3. Mechanical properties of the obtained alloy: a – ultimate tensile strength, b – elongation to failure. 1 – base alloy, 2 – base alloy after 6 hours of aging, 3 – base alloy after 6 hours of aging, alloyed with zinc and treated with flux.

Отримані результати дозволили обґрунтувати можливість практичного застосування розробленого сплаву для виготовлення відповідальних конструкційних елементів авіаційного призначення.

Висновки

1. Показано, що оброблення флюсами сплаву на основі алюмінію призводить до часткового видалення активних неметалевих домішок (Fe) та стабілізації основних легувальних елементів (Mg, Zn, Si), що впливає на процес кристалізації та структуру сплаву.

2. Кінетичний аналіз дозволив встановити максимально допустимий час витримування розплаву без критичної зміни його хімічного складу, що є необхідним для формування технологічної спадковості сплаву.

3. Визначено, що застосування флюсів сприяє зростанню тимчасового опору розриванню та відносного подовження алюмінієвого сплаву у межах концентрації до 5 %. Це пов'язано з покращенням чистоти металу за рахунок видалення неметалевих включень, оксидів і водню, що підвищує структурну стабільність та цілісність литої заготовки. Також це сприяє зниженню залишкових напружень.

4. Показано, що вплив коригувальних елементів та технологічної обробки на нейтралізацію Fe-домішок (вміст Fe знижено до 0,38 %). Компактна морфологія α -фази забезпечує меншу площу контакту з матрицею та меншу гостроту кутів, що суттєво знижує градієнти напружень на межі розділу фаз. Це безпосередньо призводить до підвищення пластичності (з

0,61 % до 5,42 %). Таким чином, надлишкова концентрація Mn підтверджує його подвійну функцію: не тільки як легувального елемента (що створює додаткове зміцнення та підвищує властивості сплавів), але і як ефективного модифікатора, спрямованого на трансформацію небажаних Fe-вмісних інтерметалідних фаз.

5. Визначено рівень механічних властивостей досліджуваних алюмінієвих сплавів (наближений до сплаву EN AW-7005 відповідно до класифікації стандарту EN755-2) та показано, що відносне подовження і звуження знижуються зі збільшенням вмісту флюсу завдяки зменшенню кількості кремнієвих евтектик (через зниження вмісту Si) та утворенням крихких фаз у присутності залишкових домішок. Зменшення пластичності в певних межах супроводжується помірним зростанням міцності.

6. Розроблено технологію рециклінгу (витримування впродовж 6 год та застосування флюсу з подальшим легуванням цинком + додаткове оброблення флюсом), що є ефективним способом очищення вторинного алюмінію. Такий підхід дозволяє покращити фізико-механічні характеристики матеріалу вторинного алюмінієвого сплаву, стабілізувати хімічний склад та забезпечити придатність сплаву для прецензійного лиття.

Література

1. Гнатуш В. А. Світові тенденції ринку вторинної переробки відходів та брухту алюмінієвих сплавів // Процеси лиття. – 2020. – № 3 (141). – С. 56-69.
2. Cappuzzi S., Timelli G. Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: a review // Metals. – 2018. – Vol. 8. – Art. 249. – 24 p.
3. Ashkenazi D. How aluminum changed the world: a metallurgical revolution through technological and cultural perspectives // Technological Forecasting and Social Change. – 2019. – Vol. 143. – P. 101-113.
4. Grand View Research. Aluminum Market Size, Share & Trends Analysis Report by Processing Method, by Product Form, by Application (Transport, Building & Construction, Electrical, Consumer Durables, Foil & Packaging), and Segment Forecasts, 2021–2028. – 2021. – Report ID: GVR-1-68038-531-9.
5. Feister T. Failure predictions in warm forming of 7075-T6 aluminum structural parts // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 418. – P. 012024.
6. European Aluminium Association. Aluminium in Cars: Unlocking the Light-Weighting Potential. – Brussels : EAA Report, 2018. – 24 p.
7. DriveAluminum. Roadmap for Automotive Aluminum. – DriveAluminum, 2022.
8. Jiang G.H. Trends in aluminium alloy development and their joining methods / Jiang G.H., Xu L., Liu H.T. // Materials Science Forum. – 2020. – Vol. 913. – P. 3-15.
9. Kargarzadeh A. Advanced casting methods for aluminum alloys: a review / Kargarzadeh A., Bamberger M., Brosh E. // Material Science and Engineering International Journal. – 2022. – Vol. 2, Iss. 3.
10. Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., Glazoff, M. V. Casting Aluminum Alloys. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2018. 544 p.
11. Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., Glazoff, M. V. Casting Aluminum Alloys. Amsterdam: Elsevier Science, 2007. 544 p.

12. Mondolfo, L. F. Aluminum Alloys: Structure and Properties. Butterworth-Heinemann, 2021. 971 p.
13. Milani V., Timelli G. Laboratory-scale procedure for evaluating the flux efficiency on melt cleanliness and tensile properties of recycled aluminum alloys. *Advanced Engineering Materials*. 2025. DOI: 10.1002/adem.202500824.
14. Krivonosova, Ye. A., Gorchakov, A. I., Scherbakov, Yu. V. Structure and properties of coatings in microarc oxidation. *Welding International*, 2014, vol. 28, no. 10, pp. 816-819.
15. Kulikov B., Partyko E., Kosovich A., Yuryev P., Mansurov Y., Stepanenko N., Baykovskiy Y., Bozhko D., Durnopyanov A., Dombrovskiy N. Analysis of composition, properties, and usage efficiency of different commercial salt fluxes for aluminum alloy refining // *Metals*. – 2025. – Vol. 15. – Art. 448. – DOI: 10.3390/met15040448.
16. Fiocchi J., Colombo C., Vergani L. M., Fabrizi A., Timelli G., Tuissi A., Biffi C. A. Heat treatments for stress relieving AlSi9Cu3 alloy produced by laser powder bed fusion // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – Art. 4184. – DOI: 10.3390/ma14154184.
17. Верховлюк А. М. Вплив технологічних факторів на властивості високоміцного алюмінієвого сплаву системи Al-Zn-Mg-Cu / А. М. Верховлюк *Металознавство та обробка металів*. 2020. №1. – С. 27-36.
18. Murat Y. Aluminum alloys as advanced materials: A short communication / Murat Y., Atilgan İ. // *Research & Development in Material Science*. – 2021. – Vol. 15, No. 1. – P. 1612-1615.
19. Fan X. Nanostructured aluminum alloys: processing, characterization and properties / Fan X., Gao Z., Hou J. // *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 140. – P. 39-51
20. Rajan T.P.D. Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites / Rajan T.P.D., Pillai R.M., Pai B.C. // *Journal of Materials Science*. – 2019. – Vol. 33. – P. 3491-3503.
21. Wang, Y. et al. Effect of multi-element synergistic addition on the microstructure evolution and performance enhancement of laser clad Al-Mg-Zn-(Mn-Cu-Er-Zr) alloy. *Mater. Sci. Eng. A* 896, 146256 (2024).
22. Shin, S.-S., Lim, K.-M. & Park, I.-M. Effects of high Zn content on the microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Cu gravity-cast alloys. *Mater. Sci. Eng. A* 679, 340-349 (2017).
23. Sivasankaran S., Rajendran N., Balasubramanian M., Senthilnathan N. Microstructural evolutions and enhanced mechanical performance of novel Al-Zn die-casting alloys processed by squeezing and hot extrusion // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2021. – Vol. 292. – Art. 117063.

References

1. Hnatysh, V. A. (2020). *World trends of the market of secondary processing of waste and scrap of aluminum alloys*. *Casting Processes*, (3), 56-69 [in Ukrainian].
2. Cappuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and melting of scrap in aluminum recycling: A review. *Metals*, 8, 249.
3. Ashkenazi, D. (2019). How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 101-113.
4. Grand View Research. (2021). *Aluminum market size, share & trends analysis report by processing method, by product form, by application ... and segment forecasts, 2021-2028* (Report ID: GVR-1-68038-531-9).

5. Feister, T. (2018). Failure predictions in warm forming of 7075-T6 aluminum structural parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 418, 012024.
6. European Aluminium Association. (2018). *Aluminium in cars: Unlocking the light-weighting potential* (24 p.). Brussels: EAA.
7. DriveAluminum. (2022). *Roadmap for automotive aluminum*.
8. Jiang, G. H., Xu, L., & Liu, H. T. (2020). Trends in aluminium alloy development and their joining methods. Materials Science Forum, 913, 3-15.
9. Kargarzadeh, A., Bamberger, M., & Brosh, E. (2022). Advanced casting methods for aluminum alloys: A review. Material Science and Engineering International Journal, 2(3).
10. Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., & Glazoff, M. V. (2018). *Casting aluminum alloys* (2nd ed., 544 p.). Elsevier Science.
11. Zolotarevsky, V. S., Belov, N. A., & Glazoff, M. V. (2007). *Casting aluminum alloys* (544 p.). Elsevier Science.
12. Mondolfo, L. F. (2021). *Aluminum alloys: Structure and properties* (971 p.). Butterworth-Heinemann.
13. Milani, V., & Timelli, G. (2025). Laboratory-scale procedure for evaluating the flux efficiency on melt cleanliness and tensile properties of recycled aluminum alloys. Advanced Engineering Materials. <https://doi.org/10.1002/adem.202500824>
14. Krivosova, Ye. A., Gorchakov, A. I., & Scherbakov, Yu. V. (2014). Structure and properties of coatings in microarc oxidation. Welding International, 28(10), 816-819.
15. Kulikov, B., Partyko, E., Kosovich, A., Yuryev, P., Mansurov, Y., Stepanenko, N., Baykovskiy, Y., Bozhko, D., Durnopyanov, A., & Dombrovskiy, N. (2025). Analysis of composition, properties, and usage efficiency of different commercial salt fluxes for aluminum alloy refining. Metals, 15, 448. <https://doi.org/10.3390/met15040448>
16. Flocchi, J., Colombo, C., Vergani, L. M., Fabrizi, A., Timelli, G., Tuissi, A., & Biffi, C. A. (2021). Heat treatments for stress relieving AlSi9Cu3 alloy produced by laser powder bed fusion. Materials, 14, 4184. <https://doi.org/10.3390/ma14154184>
17. Verkhovliuk, A. M. (2020). *Influence of technological factors on the properties of a high-strength aluminum alloy of the Al-Zn-Mg-Cu system*. Metal Science and Heat Treatment, (1), 27-36 [in Ukrainian].
18. Murat, Y., & Atilgan, İ. (2021). Aluminum alloys as advanced materials: A short communication. Research & Development in Material Science, 15(1), 1612-1615.
19. Fan, X., Gao, Z., & Hou, J. (2018). Nanostructured aluminum alloys: Processing, characterization and properties. Materials & Design, 140, 39-51.
20. Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., & Pai, B. C. (2019). Reinforcement coatings and interfaces in aluminium metal matrix composites. Journal of Materials Science, 33, 3491-3503.
21. Wang, Y., et al. (2024). Effect of multi-element synergistic addition on the microstructure evolution and performance enhancement of laser clad Al-Mg-Zn-(Mn-Cu-Er-Zr) alloy. Materials Science and Engineering A, 896, 146256.
22. Shin, S.-S., Lim, K.-M., & Park, I.-M. (2017). Effects of high Zn content on the microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Cu gravity-cast alloys. Materials Science and Engineering A, 679, 340-349.
23. Sivasankaran, S., Rajendran, N., Balasubramanian, M., & Senthilnathan, N. (2021). Microstructural evolutions and enhanced mechanical performance of novel Al-Zn

die-casting alloys processed by squeezing and hot extrusion. Journal of Materials Processing Technology, 292, 117063.

Одержано 27.11.25

Formation of a finely dispersed structure of secondary aluminum alloys by refining and correcting the chemical composition

S. V. Petrychenko¹, Postgraduate student, serg.petrichenko@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6394-1026>

V. V. Kovalenko¹, Postgraduate student, vitya.kovalenko1983@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

E. G. Byba^{1,2}, PhD, Associate Professor, byba.evgen@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

A. V. Minitskyi¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, aminitsky@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

I. V. Lukianenko¹, PhD, Associate Professor, lukianenkoiv@gmail.com,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

N. V. Minitska¹, PhD, Associate Professor, minitska27@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5156-7328>

M. M. Yamshinskiy¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department Chair,
yamshinskiy@ukr.net, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

M. Yu. Barabash^{1,3,4}, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher,
mbarabash@nasu.kiev.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

²Institute of Applied Control Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

This work is dedicated to developing a technological basis for optimizing the chemical composition, structure, and mechanical properties of secondary aluminum alloys obtained from the recycling of various types of aluminum

scrap, including military and industrial origins. The relevance of this research is driven by the necessity for rational utilization of secondary raw materials, reduced energy consumption, and minimized environmental impact in the production of high-strength structural materials for the aviation and machine-building industries.

A remelting technology utilizing a binary NaCl-KCl salt flux system is proposed. This system ensures effective melt refining from non-metallic inclusions, intensifies degassing, and reduces the loss of alloying elements. An approach involving zinc (Zn) alloying is introduced to adjust the chemical composition of the secondary alloy, facilitating the formation of a high-strength Al-Zn-Mg system.

It is demonstrated that zinc alloying and additional flux treatment contribute to a reduction of harmful iron (Fe) impurities to 0.36-0.38 %, a transformation in the morphology of iron-containing intermetallic phases, and a decrease in residual casting stresses. Metallographic and microstructural analyses confirmed the formation of a more homogeneous, fine-grained cast structure with a reduced defect density. The mechanical properties of the alloy in the as-cast state were determined: an ultimate tensile strength of 140 MPa and an elongation of 5.42 %, which corresponds to an intermediate stage of property development prior to subsequent heat treatment.

The results confirm the potential of the developed technology as an effective foundation for producing secondary high-strength aluminum alloys with predictable structural and mechanical properties, suitable for practical application in critical structural components for aviation and general machine-building.

Keywords: secondary aluminum alloys, aluminum recycling, flux refining, mechanical properties, 7xxx series alloys.