

С.В. Петриченко¹, здобувач вищої освіти, e-mail: serg.petrichenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-6394-1026>

В.В. Коваленко¹, здобувач вищої освіти, e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

М.М. Ямшинський¹, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри, e-mail: yamshinskiy@ukr.net,

<https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>, Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

Є.Г. Биба^{1,2}, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри, e-mail: byba.evgen@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>, Web of Science ResearcherID: AAK-1757-2020

І.В. Лук'яненко¹, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри, e-mail: lukianenkoiv@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>, Web of Science ResearcherID: J-7294-2017

А.В. Мініцький¹, д-р техн. наук, професор, професор кафедри, e-mail: aminitsky@gmail.com,

<https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>, Web of Science ResearcherID: AAK-1245-2020

Б.В. Кивгило¹, асистент кафедри, e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

М.Ю. Барабаш^{1,3,4}, д-р техн. наук, ст. наук. співр., професор кафедри, e-mail: mbarabash@nasu.kiev.ua,

<https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>, Web of Science ResearcherID: JOK-2828-2023

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

²Інститут прикладних систем управління Національної академії наук України (Київ, Україна)

³Технічний центр Національної академії наук України (Київ, Україна)

⁴Інститут газу Національної академії наук України (Київ, Україна)

Оптимізація складу флюсу NaCl-KCl для підвищення якості очищення алюмінієвих сплавів

Дослідження присвячено оптимізації складу флюсу на основі хлоридів натрію (NaCl) та калію (KCl) для підвищення якості очищення вторинних алюмінієвих сплавів, отриманих із різнотипного алюмінієвого брухту, включаючи залишки броньованої техніки, побутовий брухт, промислову стружку та зворот власного виробництва. Метою роботи є аналіз впливу бінарної евтектичної суміші NaCl-KCl (50 мол. % NaCl та 50 мол. % KCl) на хімічний склад, мікроструктуру, механічні та ливарні властивості сплавів, а також визначення оптимального дозування флюсу для забезпечення високої якості литих заготовок, придатних для використання в авіаційній галузі.

У процесі дослідження використано різнотипний алюмінієвий брухт, що дозволило оцінити ефективність флюсу в умовах перероблення сировини з різним рівнем забруднення. Флюс у концентраціях 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 % та 15 % від маси розплаву вводили після сушіння за температури 120 °C для видалення вологи. Заливання зразків проводили в металевий кокіл, попередньо оброблений антипригарною фарбою, за температури 200 °C.

Результати показали, що використання флюсу NaCl-KCl сприяє значному очищенню розплаву від неметалевих включень, оксидів (Al_2O_3 , MgO, SiO_2) та газів, зокрема водню, що покращує якість сплаву. Максимальний вміст алюмінію (95,13 %) досягнуто за 15 % флюсу, що свідчить про ефективне видалення домішок, таких як кремній, магній, марганець та цинк. Зокрема, вміст кремнію знижується до 0,54–0,90 % уже за вмісту флюсу 1 %, що вказує на його високу ефективність у видаленні кремнієвих включень. Однак надмірне флюсування (понад 5 %) призводить до зниження вмісту легувальних елементів, що негативно впливає на пластичність сплаву.

Дослідження тимчасового опору розриванню показали, що оптимальний діапазон концентрації флюсу (3–5 %) забезпечує максимальну міцність до 235 МПа та рідкотекучість до 585 мм, що пов'язано з ефективним

очищенням розплаву та зниженням в'язкості. Водночас, зростання концентрації флюсу до 15 % сприяє зниженню пластичності (відносно подовження зменшується з 4,41 % до 1,32 %, звуження — з 4,52 % до 0,85 %) через зменшення кремнієвих евтектик та утворення крихких фаз. Мікроструктурний аналіз підтвердив, що за кількості флюсу 2–4 % формується однорідна структура з пластичним типом руйнування, тоді як при 15 % спостерігається крихке міжкристалітне розтріскування через надлишкове шлакоутворення.

Рідкотекучість сплаву зростає в діапазоні 5–10 % флюсу завдяки зниженню в'язкості та видаленню включень, але надлишок флюсу (понад 10 %) знижує цей показник через утворення густих шлакових плівок і локальне охолодження розплаву. Оптимальний вміст флюсу від 3 до 5 % забезпечує баланс між очищенням, збереженням легувальних елементів і високою рідкотекучістю, що робить сплав придатним для прецизійного лиття.

Таким чином, флюс NaCl-KCl є ефективним для очищення вторинного алюмінію, дозволяє підвищити вміст алюмінію, зменшити домішки та покращити механічні властивості. Оптимальна концентрація флюсу від 3 до 5 % рекомендована для промислового використання, оскільки забезпечує високу якість сплаву, енергоефективність і відповідність стандартам для високотехнологічних застосувань.

Ключові слова: вторинні алюмінієві сплави; флюс NaCl-KCl; очищення розплаву; мікроструктура; механічні властивості; неметалеві включення; ливарні властивості.

Вступ. За даними видання «Forbes» та Українського національного інформаційного агентства «Укрінформ», у результаті бойових втрат було накопичено близько 2 500 тонн алюмінію серед приблизно 85 000 тонн металевих брухтів — включно з 75 000 т сталі, 1 000 т міді, 360 т титану та магнію та дорогішими металами [1].

Алюміній широко використовується у різних галузях промисловості через свої високі характеристики міцності, легкості та корозійної стійкості. В процесі виробництва та переробки важливо забезпечити високий рівень чистоти та якості металу, зменшуючи кількість неметалевих включень і газових пор.

Аналіз різноманітних технологій перероблення вторинного алюмінію [2, 3] свідчить про наявність низки техніко-економічних і екологічних переваг під час використання суміші хлоридів натрію та калію (NaCl-KCl) у якості флюсу. Такий підхід виявляється ефективним як з точки зору термодинамічної стабільності процесу, так і з погляду зменшення втрат металу та покращення якості отриманого вторинного сплаву за механічними властивостями.

Очищення алюмінію від оксидних включень, неметалевих домішок та залишків шлаку становить один із ключових та ефективних етапів у процесах його перероблення та вторинного використання, оскільки визначає як фізико-механічні властивості кінцевого сплаву, так і рівень технологічної придатності отриманого матеріалу до подальшого застосування. Наявність оксидної плівки, неметалевих включень (наприклад, карбідів, нітридів, силікатів) та залишкових продуктів шлакоутворення значно знижує якість вторинного алюмінію, спричиняючи погіршення ливарних характеристик, зниження пластичності, а також виникнення внутрішніх дефектів у виробі.

У промисловій практиці отримання вторинного сплаву, одним з найефективніших і найбільш поширених методів очищення алюмінієвих розплавів вважається використання флюсів на основі хлоридів натрію (NaCl) і калію (KCl). Ці двокомпонентні сольові суміші виконують комплексну функцію в металургійному процесі, забезпечуючи не лише очищення, але і стабілізацію термічного та хімічного середовища плавлення. Зокрема, вони сприяють зниженню поверхневого натягу між шлаковою і мета-

левою фазами, що активізує флотувальний механізм виведення неметалевих включень на поверхню розплаву.

Крім того, суміш NaCl-KCl виконує захисну функцію, ізолюючи розплавлений метал від дії атмосферного кисню та знижуючи інтенсивність окиснювальних процесів. Це сприяє зменшенню утворення вторинної оксидної плівки, яка погіршує якість металу. Завдяки термічній стабільності і відносно низькій температурі плавлення дана суміш забезпечує ефективний тепловий режим у плавильній ванні, що є важливим чинником енергоощадності процесу. Водночас, такий флюс виступає носієм, який активно поглинає залишкові продукти окиснення та сприяє формуванню шлаку, що легко видаляється з поверхні розплаву.

Таким чином, використання флюсів на основі NaCl-KCl у процесі очищення вторинного алюмінію не лише оптимізує технологічний процес, але й підвищує якість кінцевого металу, зменшуючи втрати основного матеріалу та забезпечуючи відповідність сучасним промисловим стандартам [4–6].

Хлориди натрію (NaCl) та калію (KCl) вирізняються високим рівнем хімічної інертності відносно алюмінію, що дозволяє використовувати їх у процесах плавлення без ризику вступу в небажані реакції з основним металом. Ця інертність є важливою умовою збереження чистоти металевої фази. Водночас, дані сполуки виявляють виражені змочувальні властивості щодо оксидних включень, які зазвичай присутні у вторинному алюмінії внаслідок його попередньої експлуатації. Завдяки такій змочуваності, оксидні домішки, зокрема Al_2O_3 , MgO, SiO_2 та інші неметалеві залишки — активно взаємодіють із соляною фазою та переходять у шлак. Такий ефект сприяє очищенню металевих розплавів та покращенню якості кінцевого продукту.

Сформований у присутності суміші NaCl-KCl шлак характеризується високою плинністю та стабільною структурою за температур плавлення, що значно спрощує його відокремлення від металевої маси. Завдяки цьому забезпечується ефективність механічного видалення шлакових мас з поверхні розплаву, знижуються витрати часу та енергії на завершальній стадії обробки, а також зменшуються втрати алюмінію, пов'язані з його утримуванням у шлаковій фазі.

Поєднання NaCl і KCl утворює евтектичну систему з температурою плавлення нижчою, ніж у кожного з компонентів окремо, що забезпечує додаткову енергетичну вигоду у процесі плавлення. Зниження температури плавлення суміші дозволяє зменшити загальні витрати теплової енергії на обробку вторинної сировини та покращити умови роботи обладнання. Крім того, ця бінарна основа може бути вдосконалена шляхом введення додаткових функціональних компонентів, таких як флюориди (CaF_2 , Na_3AlF_6), кріоліт або сульфати, з метою адаптації флюсу до конкретного хімічного складу вихідної сировини. Такі модифікації дозволяють покращити селективність видалення домішок, регулювати в'язкість шлаку, а також оптимізувати умови процесу рафінування відповідно до заданих технологічних вимог. Таким чином, використання соляної суміші NaCl-KCl під час перероблення вторинного алюмінієвого сплаву є обґрунтованим і доцільним з погляду металургійної ефективності, збереження ресурсів та зменшення негативного екологічного впливу. Необхідно відзначити, що евтектична суміш NaCl-KCl характеризується помірною температурою плавлення ($\sim 665^\circ\text{C}$) та високою хімічною інертністю до алюмінію, що робить її безпечною й економічно доцільною для використання в умовах ливарного виробництва. Водночас ефективність флюсу залежить від його дисперсності, способу введення, тривалості обробки та температурного режиму, що обумовлює необхідність системного дослідження цих параметрів [6].

Ефективність методу рафінування визначається здатністю зменшувати вміст оксидів, газів і включень у рідкому стані та під час кристалізації. Стандартизовані флюси використовуються для покращення процесів очищення [4].

Під час перероблення брухту з алюмінію переважно використовують суміш з хлориду натрію (NaCl) і хлориду калію (KCl) з додаванням фторидів, таких як плавиковий шпат (CaF_2) або кріоліт (Na_3AlF_6), або інші лужні фториди (NaF , KF). У Європейських країнах застосовується звичайна суміш із 70 масових % NaCl і 30 масових % KCl. У США та Канаді використовується еквімолярна евтектична суміш 50 мол. % NaCl і 50 мол. % KCl, що відповідає 44 мас. % NaCl і 56 мас. % KCl [7, 8].

Метою роботи є комплексний аналіз ефективності застосування суміші солей NaCl-KCl під час очищення вторинних алюмінієвих сплавів. Особливу увагу приділено впливу флюсів на якість вторинного алюмінію, зменшення втрат металу та підвищення технологічної ефективності процесу. Оцінювання ефективності ґрунтується на дослідженні змін хімічного складу розплаву та фізико-механічних характеристик одержаного металу.

Постановка задачі. Оптимізувати використання флюсів для підвищення ефективності процесу очищення вторинного алюмінієвого сплаву. Проаналізувати особливості мікроструктури, фазовий та хімічний склад та визначити рівень фізико-механічних властивостей алюмінієвих сплавів.

Результати дослідження. З урахуванням пози-

тивного досвіду провідних виробників алюмінію в США та Канаді [7, 8], у даному дослідженні для очищення алюмінієвого сплаву та оцінювання ефективності дії флюсу було застосовано бінарну суміш солей у молярному співвідношенні 50 мол. % NaCl і 50 мол. % KCl. Дослідження передбачало варіювання дозування флюсу в межах 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 % та 15 % від маси рідкого металу.

Попередньо підготовлена суміш була висушена за температури 120°C протягом 30 хв для видалення залишкової вологи. Після сушіння сформовані наважки флюсу загортали у фольгу з метою запобігання передчасному розсипанню під час транспортування та дозування.

Заливання зразків проводили у металевий кокіль, попередньо підігрітий до температури 200°C . Для зниження зчеплення металу з формою внутрішню поверхню кокіля обробляли антипригарною фарбою.

Для визначення рівня механічних властивостей зразків на тимчасовий опір розриванню від виливків відокремлювали надливи. Діаметр робочої частини зразка складав 12,5 мм. Дослідження міцності на тимчасовий опір розриванню здійснювали на універсальній розривній машині MP-100. За результатами випробувань визначали відносно подовження та звуження. Особливу увагу приділено визначенню механічних характеристик у литому стані, таких як міцність та пластичність, що дозволило оцінити придатність сплаву для подальшого використання в авіаційній промисловості.

Хімічний аналіз зразків проводили за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу на приладі Expert 3L. Дослідження мікроструктури проводили на скануючому електронному мікроскопі REM-106I.

В якості сировини для плавлення алюмінію було використано різнотипний алюмінієвий брухт, що включав: 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 дозволив оцінити можливості вторинного використання алюмінієвих відходів різного походження з метою формування литих заготовок із підвищеними механічними властивостями.

Усереднені результати хімічного аналізу алюмінієвих сплавів, виплавлених та оброблених флюсами в однакових технологічних умовах, наведено в табл. 1. За результатами плавлення отримано модифікований сплав $\text{AlSi2Mg}(\text{Zn})$, який позначено умовно як: Al-2,5Si-3,7Mg-0,5Mn-0,8Zn (без Ti). Зазначений хімічний склад не відповідає жодному з уніфікованих стандартів EN 1706, проте в межах цього дослідження він розглядається як вихідний сплав, за своїм легувальним складом та структурою наближений до сплаву EN AC-51400.

Хімічний склад досліджуваних сплавів визначали за допомогою спектрометра Expert 3L у трьох точках на поверхні щонайменше трьох реплік кожного зразка. Отримані результати були усереднені для підвищення достовірності та зменшення впливу ло-

Хімічний склад виплавлених алюмінієвих сплавів

№	Кількість флюсу, %	Вміст хімічних елементів, %					
		Al	Si	Mg	Mn	Ti	Zn
1	Вихідний сплав	88,31	2,53	3,66	0,50	—	0,78
2	1	90,11	0,57	4,66	0,42	—	2,03
3	2	92,94	0,72	3,30	0,76	—	0,52
4	3	93,61	0,73	2,40	0,58	0,28	1,06
5	4	93,49	0,55	3,58	0,32	—	1,27
6	5	94,33	0,73	2,52	0,88	0,46	0,33
7	10	93,09	0,90	2,31	1,47	0,28	—
8	15	95,13	0,54	2,75	0,70	0,16	—

кальних флуктуацій складу (табл. 1).

Результати аналізу хімічного складу отриманих алюмінієвих сплавів свідчать, що підвищення вмісту флюсу до 15 % значно підвищує вміст алюмінію з 88,31 до 95,13 % (рис. 1). Така тенденція демонструє те, що флюс сприяє очищенню сплаву від домішок, що, відповідно, підвищує частку основного компонен-

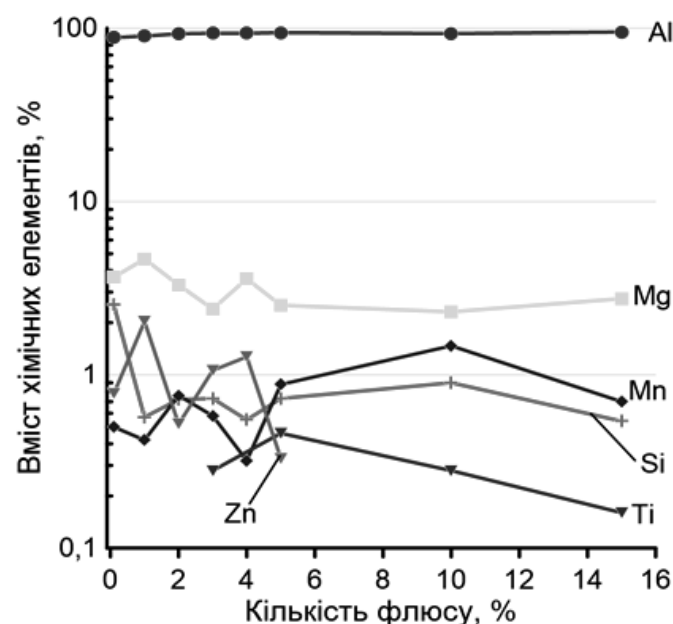


Рис. 1. Інтегральна зміна хімічного складу алюмінієвого сплаву після опрацювання флюсом

та — алюмінію.

Зростання вмісту алюмінію з додаванням флюсу пояснюється здатністю видаляти неметалеві включення, оксиди та інші домішки, які знижують частку чистого алюмінію в сплаві. Флюс, ймовірно, сприяє флотації домішок або їх хімічній взаємодії з розплавом, що дозволяє очищати сплав. Максимальний вміст алюмінію при 15 % флюсу вказує на те, що ця концентрація є найбільш ефективною для очищення.

Додавання 1 % флюсу різко знижує вміст кремнію до 0,57 % і залишається низьким для всіх подальших концентрацій флюсу. Така поведінка свідчить про високу ефективність флюсу у видаленні кремнію зі сплаву. Кремній, ймовірно, реагує з компонентами

флюсу, утворюючи сполуки, які виводяться у шлак, або видаляється у вигляді неметалевих включень. Стабільно низький вміст кремнію від 0,54 до 0,90 % вказує на те, що навіть мінімальна кількість флюсу до 1 % є достатньою для значного очищення сплаву від кремнію.

Така суміш солей є надзвичайно ефективною для зниження вмісту кремнію в алюмінієвих сплавах. Для сплавів, де низький вміст кремнію є бажаним (наприклад, для підвищення пластичності або корозійної стійкості), використання флюсу в концентраціях від 1 % є доцільним. Найнижчий вміст кремнію спостерігається за вмісту флюсу 15 %.

Стосовно інших елементів, які присутні в сплаві Mg, Mn, Ti та Zn, відбувається зменшення їхнього вмісту із збільшенням кількості флюсу. Наприклад, для Mg оптимальним вмістом флюсу є 3 %. В той же час початкове зростання вмісту магнію під час додавання флюсу до 1 % може бути пов'язане з тим, що флюс на початковому етапі сприяє видаленню домішок, які перешкоджають точному визначенню вмісту магнію, або з можливою стабілізацією магнію в розплаві. Однак за вищих концентрацій флюсу від 2 % і більше магній, ймовірно, вигорає через його високу реакційну здатність або вступає в хімічну взаємодію з компонентами флюсу, що призводить до зниження його вмісту. Магній є легким елементом, і його втрати пов'язані з окисненням або випаровуванням за високих температур у присутності флюсу.

При додаванні флюсу вміст марганцю демонструє нелінійну залежність (див. рис. 1). Максимальний вміст марганцю спостерігається при кількості флюсу 10 %, тоді як мінімальний — при 4 % флюсу. Нелінійна поведінка вмісту марганцю може бути пов'язана з комплексною взаємодією флюсу з розплавом. На початковому етапі марганець частково втрачається, можливо, через реакцію з флюсом або видалення у вигляді шлаку. Зростання вмісту марганцю від 2 % і особливо при 10 % може свідчити про те, що флюс у цих концентраціях сприяє стабілізації марганцю в розплаві або зменшує його втрати через окиснення. Зниження вмісту марганцю при 15 % флюсу може бути пов'язане з надмірною реакцією марганцю з флюсом або його видаленням разом із домішками.

Збільшення кількості флюсу знижує вміст цинку.

Ймовірно, цинк втрачається через високу леткість та реакцію з флюсом, що призводить до його видалення у вигляді газоподібних сполук або шлаку. Повна відсутність цинку при 10 % і 15 % флюсу свідчить про те, що високі концентрації флюсу ефективно видаляють цинк зі сплаву.

Дослідження механічних та ливарних властиво-

стей отриманих сплавів дало можливість підтвердити ефективність очищення розплаву після додавання флюсів. Отримані властивості наведено в табл. 2.

Встановлено, що зі збільшенням кількості флюсу NaCl-KCl, використаного під час рафінування алюмінієвого сплаву, відбувається суттєве зниження пластичності матеріалу, зокрема — відносного подо-

Таблиця 2

Механічні та ливарні властивості отриманих алюмінієвих сплавів

Кількість флюсу, %	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Тимчасовий опір розриванню, МПа	Рідкотекучість, мм
0	4,41	4,52	142	108
1	3,45	3,87	155	153
2	2,82	3,21	210	265
3	2,54	1,84	231	397
4	2,45	1,27	235	465
5	2,24	0,85	221	585
10	1,56	1,05	185	535
15	1,32	0,85	160	413

вження (з 4,41 до 1,87 %) та звуження (з 4,52 до 0,85 %). Така закономірність пояснюється зміною хімічного та структурного стану сплаву внаслідок дії флюсу. Зокрема, із ростом концентрації флюсу спостерігається зменшення вмісту кремнію в металі, що, в свою чергу, призводить до зниження об'єму кремнієвих евтектик у мікроструктурі сплаву. Кремнієві евтектики, зазвичай, формуються у вигляді дрібних включень, що рівномірно розподіляються за об'ємом металу та забезпечують сприятливе поєднання міцності і

пластичності. Їх зменшення негативно позначається на здатності сплаву до пластичної деформації.

Одним із ключових завдань дослідження є забезпечення високих ливарних та механічних властивостей обробленого флюсом алюмінієвого сплаву, що визначає перспективність його застосування у виробництві литих конструкцій.

Дослідження мікроструктури поверхні зламу зразків алюмінієвого сплаву, оброблених флюсом NaCl-KCl у різних концентраціях (0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 %, 15 %)

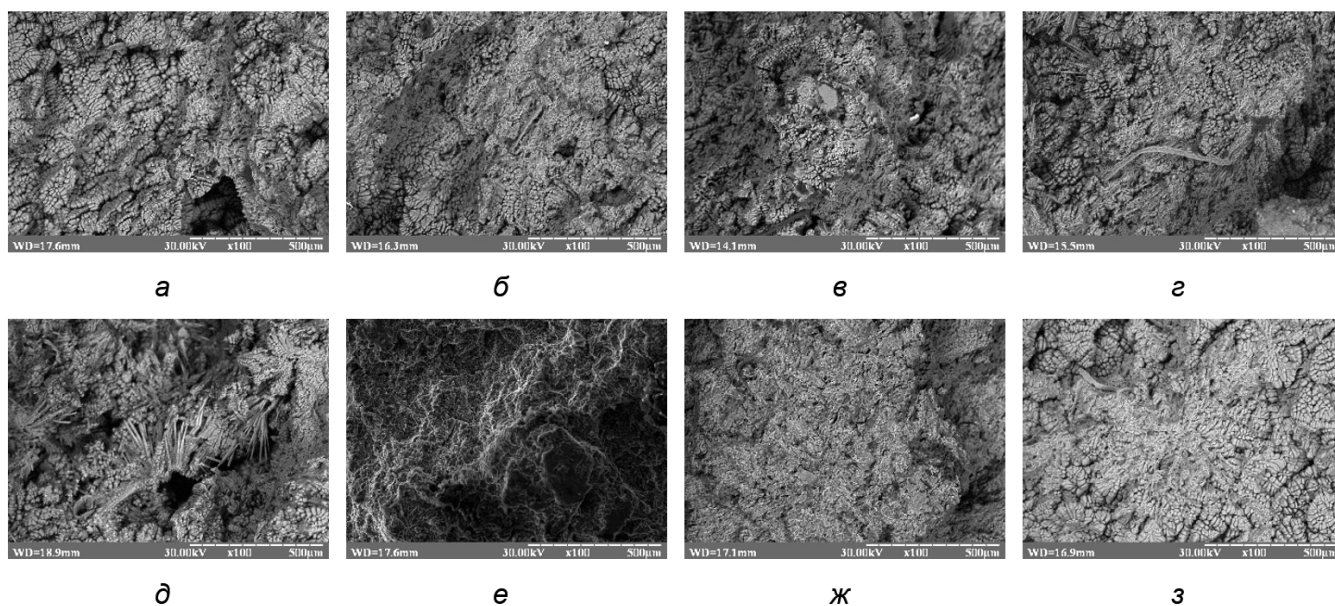


Рис. 2.

Злами зразків залежно від кількості флюсу: а — 0 %; б — 1 %; в — 2 %; г — 3 %; д — 4 %; е — 5 %; ж — 10 %; з — 15 %

3 %, 4 %, 5 %, 10 % та 15 %, рис. 2), проведено з використанням скануючого електронного мікроскопа РЕМ-106І. Аналіз базується на морфологічних особливостях поверхні зламу, що дозволяють ідентифікувати механізми руйнування (пластичне, крихке або змішане) та оцінити вплив концентрації флюсу на структурні та механічні властивості сплаву.

Вихідний зразок характеризується змішаним типом руйнування, з комбінацією западин структури та чітких мікротріщин, що вказує на наявність пластичної деформації перед руйнуванням, тоді як тріщини свідчать про локальні крихкі зони (рис. 2, а). Така морфологія пов'язана з високим вмістом оксидних включень і пористістю, зумовленими відсутністю обробки флюсом, що призводить до неоднорідного розподілу напружень у матеріалі.

Додавання флюсу до 1 % переважно показує крихке руйнування з вираженими ознаками міжкристалітного розтріскування (рис. 2, б). Поверхня зламу демонструє грубу текстуру з мережею тріщин, що перетинають межі зерен. Низька концентрація флюсу (1 %) забезпечує лише часткове видалення домішок, що сприяє сегрегації залишкових включень (наприклад, заліза) і підвищує схильність до крихкого руйнування.

Поверхня зламу після додавання 2 % флюсу демонструє пластичний механізм руйнування, представлений розвинутою ямковою структурою з розтягнутими волокнами (рис. 2, в). Така морфологія свідчить про значну пластичну деформацію перед руйнуванням, що зумовлено ефективним очищенням розплаву від оксидів і шлаків, що сприяє однорідності мікроструктури.

Алюмінієвий сплав, оброблений 3 % флюсу, демонструє крихкий характер руйнування транскристалітними тріщинами, що перетинають зерна (рис. 2, г). Така особливість є результатом надмірного накопичення флюсових залишків або реакції флюсу з легуючими елементами, що призводить до утворення небажаних фаз і локальних напружень у структурі. Наведена морфологія поверхні зламу є характерною для матеріалів, де пластична деформація перед руйнуванням мінімальна, а руйнування відбувається переважно через розщеплення всередині зерен, що свідчить про зниження в'язкості сплаву в умовах даної обробки.

Після оброблення 4 % флюсом поверхня зламу демонструє пластичне руйнування з вираженою ямковою структурою, що свідчить про високу пластичність матеріалу (рис. 2, д). Концентрація флюсу 4 % забезпечує оптимальне очищення розплаву, зменшуючи пористість і сприяючи рівномірному розподілу напружень, що позитивно впливає на механічні властивості.

Крім того, мікроструктурний аналіз свідчить про формування більшої кількості крихких інтерметалідних фаз (наприклад, Al_3Fe , Al_3Mg_2 або $Al_6(Fe,Mn)$) на основі заліза та магнію, які є типовими супутниками в процесах вторинної переробки (рис. 2, д). В той же час за присутності кисню, можливі сліди оксидів (Al_2O_3 або FeO) через окиснення або

оброблення флюсами. Ці фази характеризуються високою твердістю, але низькою тріщиностійкістю, що сприяє концентрації напружень, і є місцями зародження мікротріщин під час механічного навантаження. Їх присутність додатково спричиняє зниження показників пластичності, особливо в умовах статичного розтягу.

Збільшення кількості флюсу до 5 % надає сплаву змішаного руйнування з комбінацією ямкової структури зламу і мікротріщин (рис. 2, е). Така морфологія відображає перехідний етап, де очищення розплаву досягає піку, але надлишок флюсу починає утворювати шлак, викликаючи локальні дефекти й неоднорідність структури.

Поверхня зламу після оброблення 10 % флюсу характеризується пластичним руйнуванням із розвинутою ямковою структурою зламу (рис. 2, ж). Висока концентрація флюсу забезпечує глибоке очищення розплаву від включень, сприяючи дрібнозернистій структурі та підвищеній пластичності матеріалу.

Збільшення вмісту флюсу до 15 % сприяє формуванню у сплаві характерного крихкого типу зламу з вираженими ознаками міжкристалітного розтріскування (рис. 2, з). Надмірна концентрація флюсу обумовлює інтенсивне утворення шлакових включень та активізацію реакційного взаємодіяння флюсу з основним металом, що, у свою чергу, призводить до сегрегації легуючих елементів і суттєвого зниження пластичних властивостей сплаву.

Результати аналізу свідчать, що концентрація флюсу $NaCl-KCl$ суттєво впливає на механізм руйнування алюмінієвого сплаву. Оптимальна концентрація флюсу має складати від 2 до 4 %, що забезпечує ефективне очищення розплаву, сприяючи пластичному руйнуванню з розвинутою ямковою структурою, що корелює з підвищенням пластичності та однорідності мікроструктури. Надмірне збільшення концентрації флюсу до 15 % погіршує властивості через утворення шлаків або хімічної взаємодії, що викликає крихке руйнування. Зазначені спостереження узгоджуються з літературними даними про вплив флюсової обробки на алюмінієві сплави, де оптимальна кількість флюсу (2—5 %) сприяє покращенню механічних характеристик, тоді як надлишок (>10 %) призводить до деградації структури [4, 8].

Таким чином, надмірне флюсування від 5 до 15 % хоч і сприяє очищенню розплаву, водночас супроводжується структурними змінами, що погіршують здатність сплаву до деформації, обмежуючи його подальше застосування в конструкційних виробках, де критичними є саме показники пластичності.

Зростання тимчасового опору розриванню алюмінієвого сплаву із збільшенням вмісту флюсу $NaCl-KCl$ у межах до 5 % пояснюється покращенням якості розплаву внаслідок ефективного очищення від неметалевих включень, газів та оксидних плівок (табл. 2). Фізико-хімічна дія флюсу полягає у створенні рідкого шлаку на поверхні розплаву, який активно взаємодіє з домішками та включеннями (Al_2O_3 , MgO , шлаки, оксиди заліза тощо), сприяє їхній коагуляції та подальшому спливанню в шлакову фазу. Це зменшує

кількість дефектів у твердому металі, таких як пори, неметалеві включення та оксидні плівки, які є концентраторами напружень і точками зародження тріщин під час навантаження.

Зниження газонасиченості розплаву, особливо воднем, також є критичним чинником. Відомо [8], що атомарний водень легко розчиняється в рідкому алюмінії, але утворює мікропухирці під час кристалізації, що знижують міцнісні характеристики. Флюс NaCl-KCl утворює захисний шар, який перешкоджає подальшому поглинанню водню з атмосфери, одночасно сприяючи дегазації за рахунок дифузійного переносу через флюсову плівку.

Таким чином, покращення чистоти металу внаслідок флюсування прямо корелює з підвищенням його тимчасового опору розриванню, оскільки видалення внутрішніх дефектів сприяє більш рівномірному розподілу напружень у структурі матеріалу. Це дозволяє сплаву витримувати більші навантаження без руйнування.

Важливо підкреслити, що в межах зазначеної концентрації (3—5 % флюсу) досягається оптимальний баланс між ефективністю очищення та уникненням надмірної втрати легувальних елементів (наприклад, кремнію або магнію), що також відіграють роль у зміцненні сплаву. Перевищення цього діапазону може, навпаки, призвести до зниження міцності через структурні зміни або формування крихких фаз.

Збільшення кількості флюсу понад оптимальний рівень від 5 до 15 % сприяє зниженню тимчасового опору розриванню досліджуваного алюмінієвого сплаву через накопичення шлакових включень, хімічну взаємодію з легуючими елементами, зміну розміру зерен, утворення пористості та локальні напруження. Це зумовлено кількома взаємопов'язаними факторами, які впливають на мікроструктуру та чистоту металу. По-перше, надлишок флюсу призводить до зниження вмісту легувальних елементів, зокрема кремнію та магнію, за рахунок їх часткового переходу в шлакову фазу. Це особливо актуально для вторинних сплавів, чутливих до зміни хімічного складу. Кремній, наприклад, відіграє ключову роль у формуванні евтектичної структури Al-Si та забезпечує підвищену міцність завдяки твердому розчину й дисперсним включенням. Його зменшення призводить до менш щільної евтектичної сітки, зниження твердості та межі міцності на розрив.

По-друге, надмірна кількість флюсу може призвести до надлишкового утворення шлакових фаз і мікропорожнин, які під час кристалізації залишаються в металі й погіршують його щільність і суцільність. Такі дефекти є осередками концентрації напружень, що прискорюють зародження та поширення тріщин під навантаженням. Крім того, флюси у великій кількості можуть призводити до утворення крихких інтерметалідних фаз або зниження ступеня модифікування структури, якщо в процесі використовується модифікатор (наприклад, Na). Це призводить до утворення голчастих або дендритних включень, які погіршують механічні властивості сплаву.

Відповідно, зниження тимчасового опору розриванню з підвищенням вмісту флюсу від 5 до 15 % свідчить про набуття зворотного ефекту від очищення, коли шкідливі побічні процеси переважають над ефективним очищенням. Таким чином, можна стверджувати, що для досліджуваної системи NaCl-KCl існує оптимальний діапазон концентрацій флюсу, перевищення якого негативно позначається на міцнісних властивостях сплаву.

Встановлення оптимального вмісту флюсу NaCl-KCl для покращення рідкотекучості алюмінієвих сплавів є критично важливим етапом вдосконалення технології лиття, особливо під час перероблення вторинної сировини. Рідкотекучість, як відомо [4, 7], є інтегральним параметром, що відображає здатність розплаву заповнювати форму до моменту кристалізації. Вона залежить переважно від в'язкості, поверхневого натягу, наявності неметалевих включень, ступеня очищення розплаву, газовмісності та температурного інтервалу кристалізації.

Дослідження впливу вмісту NaCl-KCl-флюсу на рідкотекучість показали, що найсприятливіші умови для формування потоку металу спостерігаються за вмісту флюсу в межах від 5 до 10 %. У цьому інтервалі відбувається ефективне очищення розплаву від неметалевих включень, оксидних плівок та газів (головним чином водню), які значною мірою впливають на в'язкість розплаву та перешкоджають безперешкодному руху металу каналами ливарної форми.

Концентрація флюсу на основі NaCl-KCl до 10 % забезпечує оптимальний баланс між дегазацією та шлакоутворенням. Саме за таких значень забезпечується достатнє охоплення всієї поверхні розплаву шлаковою плівкою, що захищає метал від повторного окиснення та сприяє термодинамічно вигідному зв'язуванню оксидних включень (Al_2O_3 , MgO , SiO_2) у шлак. Очищення розплаву призводить до зниження ефективної в'язкості, зменшення сил тертя між фронтом кристалізації потоку металу та стінками форми, а також підвищення здатності розплаву проникати в тонкі канали.

Згідно з результатами низки експериментальних робіт [8—10], вміст флюсу нижче 5 % є недостатнім для досягнення суттєвого очищення розплаву, через що рідкотекучість сплаву залишається низькою. Натомість перевищення концентрації понад 10 % не дає додаткових переваг, а навпаки спричиняє утворення надлишкових шлакових фаз, що залишаються в металі та призводять до погіршення якості виливків.

Зниження температури початку кристалізації призводить до того, що розплав кристалізується швидше і не встигає заповнити форму повністю. Це також знижує ефективну рідкотекучість, попри зниження в'язкості. Таким чином, надлишок флюсу може мати і зворотний ефект.

Збільшення вмісту флюсу понад 10 % призводить до зниження рідкотекучості алюмінієвого розплаву. Така тенденція пояснюється кількома фізико-хімічними факторами, які починають переважати за надмірного вмісту флюсу. Перш за все, надлишковий флюс утворює занадто густу шлакову плівку

на поверхні розплаву, що ускладнює теплообмін та масообмінні процеси між рідким металом і навколишнім середовищем (на тиглі спостерігається наплавлення густого шлаку, що ускладнює його видалення). Це призводить до локального охолодження розплаву та зниження температури його надлишкового перегрівання, що, своєю чергою, зменшує тривалість рідкого стану металу в металевій формі. Крім того, надмірна кількість флюсу інтенсифікує процес шлакоутворення, що призводить до накопичення залишкових шлакових включень у металі, особливо в разі недостатнього видалення продуктів реакції. Ці включення збільшують ефективну в'язкість розплаву та створюють перешкоди для його руху, тим самим знижуючи рідкотекучість. Також варто зазначити, що з підвищенням вмісту флюсу можуть утворюватися вторинні тверді фази (наприклад, $MgCl_2$, Al_2Cu , $NaAlCl_4$) або згустки флюсу, які погіршують однорідність потоку металу і можуть слугувати осередками передчасної кристалізації.

Таким чином, надлишок флюсу понад 10 % не тільки не покращує, але й значною мірою погіршує рідкотекучість розплаву. Це підтверджує необхідність оптимізації дозування флюсів із урахуванням балансу між очищенням розплаву та збереженням його реологічних властивостей на відповідному рівні. Отже, діапазон від 5 до 10 % флюсу можна вважати оптимальним для забезпечення механічних властивостей та підвищення рідкотекучості алюмінієвих сплавів, оскільки саме в цих межах спостерігається максимальна ефективність очищення розплаву, стабілізація температурного режиму лиття та покращення умов заповнення ливарної форми.

Висновки

1. Показано, що оброблення флюсами сплаву на основі алюмінію призводить до часткового видалення активних неметалевих домішок (Mg, Zn) та

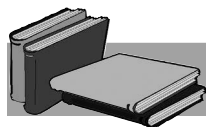
стабілізації основного легувального елемента (Si), що впливає на процес кристалізації та структуру сплаву. Зниження вмісту магнію зменшує ймовірність утворення шкідливих включень і фаз, які погіршують механічні властивості досліджуваного алюмінієвого сплаву.

2. Визначено, що застосування флюсів сприяє зростанню тимчасового опору розриванню алюмінієвого сплаву у межах концентрації від 3 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.

3. Визначено рівень механічних властивостей досліджуваних алюмінієвих сплавів (наближений до сплаву EN AC-51400 відповідно до класифікації стандарту EN 1706) та показано, що відносно 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.

4. З'ясований оптимальний вміст флюсу, який становить від 3 до 5 %. У зазначеному діапазоні забезпечується найкращий баланс між очищенням розплаву, покращенням тимчасового опору розриванню (до 235 МПа) та забезпеченням високої рідкотекучості (від 390 мм до 585 мм).

5. Застосування флюсів у рекомендованих межах є ефективним способом очищення вторинного алюмінію, дозволяє покращити фізико-механічні характеристики матеріалу вторинного алюмінієвого сплаву, стабілізувати хімічний склад та забезпечити придатність сплаву для прецизійного лиття.

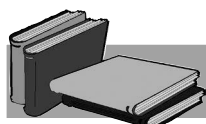


ЛІТЕРАТУРА

1. Українська армія перетворила 5 тисяч одиниць техніки РФ на металобрухт — Forbes. Укрінформ. 2022. 12 квіт. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3455625-ukrainska-armia-peretvorila-5-tisac-odinic-tehniki-rf-na-metalobruht-forbes.html> (дата звернення: 17.07.2025).
2. Teixeira A.B., Ambrós W.M., Sampaio C.H., Raposo F.L.Q., De Brum I.A.S., Moncunill J.O. Optimization of Water Leaching of Chlorides from Aluminum Salt Slag. *Minerals*. 2022. Vol. 12. Iss. 9. 1141. <https://doi.org/10.3390/min12091141>
3. Verfahren zur Aufarbeitung von Aluminumschrott: пат. EP 0155906 A1; Європейське патентне відомство, заявка № EP 85810062, 1985.
4. Xiao Y., Reuter M., Vonk P., Vonken J., Orbon H., Probst Th., Boin U. Experimental Study on Aluminum Scrap Recycling. Proceedings of the 4th Int. Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials, 22—25th October 2000. P. 1075—1087. <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch93>
5. Zhang G., Lu W., Wu X., Yang B., Tan Y., Xu Z., Tang H., Zeng J., Wang J. A New Strategy on Designing Fluxes for Aluminum Alloy Melt Refinement. *Materials*. 2023. Vol. 16. Iss. 6. 2322. <https://doi.org/10.3390/ma16062322>
6. Capuzzi S., Timelli G., Capra L., Romano L. Study of fluxing in Al refining process by rotary and crucible furnaces. *International Journal of Sustainable Engineering*. 2019. Vol. 12. Iss. 1. P. 38—46. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1393022>

7. Prillhofer R., Prillhofer B., Antrekowitsch H. Treatment of residues during aluminum recycling. TMS Annual Meeting. 2009. P. 857—862.
8. Kammer C. Aluminium-Taschenbuch. Band 1. Grundlagen und Werkstoffe. 16-е вид. Düsseldorf: Aluminium-Verlag, 2002. 783 с. ISBN 978-3-87017-274-9.
9. Huo W., Hou L., Zhang Y., Zhang J. Warm formability and post-forming microstructure/property of high-strength AA 7075-T6 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 675. P. 44—54. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.054>
10. Choi S.W., Cho H.S., Kumai S. Effect of the precipitation of secondary phases on the thermal diffusivity and thermal conductivity of Al-4.5Cu alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 688. Part A. P. 897—902. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.137>

Надійшла 12.08.2025



REFERENCES

1. Ukrinform (2022, April 12). Ukrainian Army turns 5000 Russian military vehicles into scrap – Forbes. <https://www.ukrinform.net/rubric-economy/3455671-ukrainian-army-turns-5000-russian-military-vehicles-into-scrap-forbes.html> [in Ukrainian].
2. Teixeira, A. B., Ambrós, W. M., Sampaio, C. H., Raposo, F. L. Q., De Brum, I. A. S., & Moncunill, J. O. (2022). Optimization of Water Leaching of Chlorides from Aluminum Salt Slag. *Minerals*, 12(9), 1141.
3. Verfahren zur Aufarbeitung von Aluminumschrott [Process for recycling aluminum scrap]. EP 0155906 A1. European Patent Office. Application No. EP 85810062. (1985). [in German].
4. Xiao, Y., Reuter, M., Vonk, P., Vonken, J., Orbon, H., Probst, T., & Boin, U. (2000, October 22–25). Experimental study on aluminum scrap recycling. In Proceedings of the 4th International Symposium on Recycling of Metals and Engineered Materials (pp. 1075-1087). <https://doi.org/10.1002/9781118788073.ch93>
5. Zhang, G., Lu, W., Wu, X., Yang, B., Tan, Y., Xu, Z., Tang, H., Zeng, J., & Wang, J. (2023). A New Strategy on Designing Fluxes for Aluminum Alloy Melt Refinement. *Materials*, 16(6), 2322. <https://doi.org/10.3390/ma16062322>
6. Capuzzi, S., Timelli, G., Capra, L., & Romano, L. (2019). Study of fluxing in Al refining process by rotary and crucible furnaces. *International Journal of Sustainable Engineering*, 12(1), 38-46. <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1393022>
7. Prillhofer R., Prillhofer B., & Antrekowitsch, H. (2009). Treatment of residues during aluminum recycling. TMS Annual Meeting, 857-862.
8. Kammer, C. (2002). Aluminium-Taschenbuch. Band 1. Grundlagen und Werkstoffe [Aluminum Pocketbook. Volume 1. Fundamentals and Materials] (16th ed.). Düsseldorf, Germany: Aluminium-Verlag. ISBN 978-3-87017-274-9 [in German].
9. Huo, W., Hou, L., Zhang, Y., & Zhang, J. (2016). Warm formability and post-forming microstructure/property of high-strength AA 7075-T6 Al alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 675, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.054>
10. Choi, S. W., Cho, H. S., & Kumai, S. (2016). Effect of the precipitation of secondary phases on the thermal diffusivity and thermal conductivity of Al-4.5Cu alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 688(Part A), 897-902. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.137>

Received 12.08.2025

Summary

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

V.V. Kovalenko¹, PhD student,
 e-mail: vitaly.kovalenko1983@gmail.com,
<https://orcid.org/0009-0009-9120-6533>

M.M. Yamshinskij¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair,
 e-mail: yamshinskiy@ukr.net,
<https://orcid.org/0000-0002-2293-2939>,
 Web of Science ResearcherID: I-4267-2017

Ye.H. Byba^{1,2}, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department,
 e-mail: byba.evgen@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1696-300X>,
 Web of Science ResearcherID: AAK-1757-2020

I.V. Lukianenko¹, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of the Department,
 e-mail: lukianenkoiv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1043-9688>,
 Web of Science ResearcherID: J-7294-2017

A.V. Minitskyi¹, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor of the Department,
 e-mail: aminitsky@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-5767-4071>,
 Web of Science ResearcherID: AAK-1245-2020

B.V. Kyvhylo¹, Assistant of the Department,
 e-mail: kyvhylo.bohdan@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

M.Yu. Barabash^{1,3,4}, Dr. Sci. (Engin.), Senior Researcher, Professor of the Department,
 e-mail: mbarabash@nasu.kiev.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>,
 Web of Science ResearcherID: JOK-2828-2023

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

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

³*Technical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

⁴*The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, Ukraine)*

Optimization of the Composition of NaCl-KCl Flux to Improve the Quality of Aluminum Alloy Purification

The study is devoted to optimizing the composition of flux based on sodium chloride (NaCl) and potassium chloride (KCl) to improve the quality of secondary aluminum alloys obtained from various types of aluminum scrap, including armor scrap, household scrap, industrial chips, and return scrap from own production. The aim of the work is to analyze the effect of a binary eutectic mixture of NaCl-KCl (50 mol% NaCl and 50 mol% KCl) on the chemical composition, microstructure, mechanical and casting properties of alloys, as well as to determine the optimal flux dosage to ensure high quality castings

suitable for use in the aviation industry.

During the study, different types of aluminum scrap were used, which made it possible to evaluate the effectiveness of the flux in the processing of raw materials with varying levels of contamination. The flux was added in concentrations of 1 %, 2 %, 3 %, 4 %, 5 %, 10 %, and 15 % of the melt mass after drying at 120 °C to remove moisture. The samples were poured into a metal mold pre-treated with non-stick paint at a temperature of 200 °C.

The results showed that the use of NaCl-KCl flux contributes to a significant purification of the melt from non-metallic inclusions, oxides (Al_2O_3 , MgO , SiO_2) and gases, in particular hydrogen, which improves the quality of the alloy. The maximum aluminum content (95.13 %) was achieved with 15 % flux, which indicates the effective removal of impurities such as silicon, magnesium, manganese, and zinc. In particular, the silicon content is reduced to 0.54-0.90 % already at a flux content of 1 %, which indicates its high efficiency in removing silicon inclusions. However, excessive fluxing (over 5 %) leads to a decrease in the content of alloying elements, which negatively affects the plasticity of the alloy.

Studies of temporary tensile strength showed that the optimal flux concentration range (3-5 %) provides maximum strength up to 235 MPa and fluidity up to 585 mm, which is associated with effective melt cleaning and viscosity reduction. At the same time, an increase in flux concentration to 15 % contributes to a decrease in plasticity (relative elongation decreases from 4.41 % to 1.32 %, narrowing from 4.52 % to 0.85 %) due to a decrease in silicon eutectics and the formation of brittle phases. Microstructural analysis confirmed that at a flux content of 2-4 %, a homogeneous structure with a plastic type of fracture is formed, while at 15 %, brittle intergranular cracking is observed due to excessive slag formation.

The fluidity of the alloy increases in the range of 5-10 % flux due to a decrease in viscosity and the removal of inclusions, but excess flux (over 10 %) reduces this indicator due to the formation of thick slag films and local cooling of the melt. An optimal flux content of 3 to 5 % provides a balance between purification, preservation of alloying elements, and high fluidity, making the alloy suitable for precision casting.

Thus, NaCl-KCl flux is effective for cleaning secondary aluminum, allowing for increased aluminum content, reduced impurities, and improved mechanical properties. An optimal flux concentration of 3 to 5 % is recommended for industrial use, as it ensures high alloy quality, energy efficiency, and compliance with standards for high-tech applications.

Keywords

Secondary aluminum alloys; NaCl-KCl flux; melt purification; microstructure; mechanical properties; non-metallic inclusions; casting properties.