

УДК 621.745.55

**С.В. Петриченко**, здобувач вищої освіти;

e-mail: [serg.petrichenko@gmail.com](mailto:serg.petrichenko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0007-6394-1026>

**О.А. Наріжний**, здобувач вищої освіти, [olexsandrnarizhnyi@gmail.com](mailto:olexsandrnarizhnyi@gmail.com)

**М.М. Ямшинський**, докт. техн. наук, проф., завідувач кафедри;

e-mail: [yamshinskiy@ukr.net](mailto:yamshinskiy@ukr.net); <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

**Є.Г. Биба**, канд. техн. наук, доцент, доцент;

e-mail: [byba.evgen@gmail.com](mailto:byba.evgen@gmail.com); <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

**А.В. Мініцький**, докт. техн. наук, проф.; e-mail: [aminitsky@gmail.com](mailto:aminitsky@gmail.com);

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

**М.Ю. Барабаш**<sup>1, 2</sup>, докт. техн. наук, стар. наук. співроб., проф.;

e-mail: [mbarabash@nasu.kiev.ua](mailto:mbarabash@nasu.kiev.ua), <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

**Б.В. Кивгило**, асистент; e-mail: [kyvhylo.bohdan@gmail.com](mailto:kyvhylo.bohdan@gmail.com);

<http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

**І.В. Лук'яненко**, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [lukianenkoiv@gmail.com](mailto:lukianenkoiv@gmail.com);

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

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

<sup>2</sup> Технічний центр НАН України, (Київ, Україна)

## ПЕРЕРОБЛЕННЯ АЛЮМІНІЄВОГО БРУХТУ З ВІЙСЬКОВОГО СЕКТОРА: ЕКОЛОГІЧНІ Й ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ

У роботі проаналізовано можливості раціонального використання алюмінієвого брухту, отриманого внаслідок руйнування військової техніки під час збройної агресії проти України. Цей вид відходів становить не лише значний екологічний виклик, але й відкриває перспективи для відновлення та розвитку ресурсоефективних технологій. Зокрема, накопичення залишків техніки на відкритих майданчиках створює реальну загрозу довкіллю через корозійне руйнування металів, яке супроводжується вивільненням токсичних компонентів у ґрунт, водні ресурси та атмосферне повітря. Такий процес несе загрозу порушення екологічної рівноваги регіонів, що постраждали від воєнних дій. У той же час цей брухт містить значний економічний потенціал, оскільки містить легкі та цінні конструкційні метали, зокрема алюміній, придатний для повторного використання шляхом переплаву та легування. Дослідження показали, що алюмінієвий сплав, отриманий шляхом перероблення такої техніки, за хімічним складом наближається до широко вживаних промислових марок, як-от 1925 та В95. Цей факт свідчить про його придатність до подальшого застосування у виробництві литих деталей із підвищеними експлуатаційними характеристиками. Механічні випробування отриманого сплаву засвідчили його задовільні характеристики: тимчасовий опір розриву до 140 МПа та відносне подовження до 2,42 %, що підтверджує доцільність його використання для виробництва конструктивних елементів, які працюють в умовах статичних та квазістатичних навантажень. Потенційними напрямками застосування такого сплаву є виготовлення корпусних деталей, литих елементів двигунів, а також інших виробів, що потребують поєднання високої питомої міцності та корозійної стійкості. Запропонована технологія вторинної переробки алюмінієвого брухту є екологічно орієнтованою та ресурсозберігаючою. Її впровадження дозволяє зменшити навантаження на довкілля шляхом утилізації проблемних військових відходів, одночасно зменшуючи залежність металургійної промисловості від первинної сировини. Це відповідає принципам циркулярної економіки та сталого розвитку, а також сприяє посиленню матеріального суверенітету України в умовах обмеженого доступу до традиційних джерел

металів. Таким чином, результати дослідження є підґрунтям для подальшого вдосконалення технологій перероблення алюмінієвих відходів, розроблення відповідних регламентів і стандартів, а також створення замкнених технологічних циклів у національній металургії. Застосування вторинного алюмінію у виробничій практиці сприятиме зниженню енергоспоживання, зменшенню викидів вуглецевого сліду та економічній доцільності виробництва конструкційних матеріалів нового покоління.

**Ключові слова:** вторинний алюміній, перероблення брухту, військова техніка, механічні властивості, екологічна безпека.

### Вступ

Війна в Україні призвела до знищення величезної кількості військової техніки, зокрема бойових машин піхоти, бронетранспортерів, танків та іншого обладнання. Пошкоджена та знищена техніка накопичується у великих обсягах на відкритих територіях, створюючи значні екологічні й економічні проблеми. Корозія металів, яка неминуче виникає в умовах відкритого зберігання, призводить до забруднення ґрунтів, водойм та атмосфери важкими металами й іншими токсичними речовинами. Разом із тим така техніка має нереалізований економічний потенціал, адже вона може бути використана як вторинний матеріал для виготовлення нової сучасної продукції [1, 2].

Починаючи з 1960-х років броня з алюмінієвих сплавів у вигляді катаних гомогенних плит з алюмінієвих сплавів системи Al–Zn–Mg широко застосовується в конструкціях легких бойових броньованих машин сухопутних військ [1, 2].

У світовому танкобудуванні для виготовлення гомогенної алюмінієвої броні застосовують дві групи зварюваних алюмінієвих сплавів із різними рівнями міцності й твердості. До першої групи належать нетермозміцнювані сплави алюміній-магній та термозміцнювані сплави алюміній-цинк-магній середньої твердості. Сплави цієї групи характеризуються міцністю  $\sigma_b$  300–420 МПа, твердістю за Бринеллем, HB 80–120 одиниць і мають найкращі показники проти осколкової стійкості. До них належать сплави: 5083 і Alcan D54S, Alcan D74S (7020) і 7018.

До другої групи сплавів, сплавів підвищеної твердості, належать сплави Al–Zn–Mg із рівнем міцності  $\sigma_b$  450–500 МПа, якій відповідає твердість за Бринеллем, HB 130–150 од. Ця група сплавів (7039-T64, E74S (7017), AlZnMg<sub>3</sub>) перевершує сплави першої групи за протикільною та протиснарядною стійкістю, але поступається їм за протиосколковою стійкістю [1, 2].

Щорічно у світі виробляється близько 100 Мт алюмінію, ~35 % з якого отримують із вторинної сировини (брухту), а ~40 % — зі звороту власного виробництва [3, 4].

Алюміній має низку переваг, що робить його одним із найпопулярніших матеріалів у промисловості. Низька густина (2,7 кг/м<sup>3</sup>), висока технологічність та експлуатаційні властивості дозволяють використовувати його для виробів, отриманих усіма відомими методами лиття й термопластичної обробки. Однак виробництво алюмінію є одним із найбільш енергоємних процесів у металургії та супроводжується значними викидами парникових газів. Основна сировина для виробництва — боксити, що піддаються енерговитратному електролізу. Це створює одночасно переваги (економічна ефективність у використанні) та екологічні виклики (високий вуглецевий слід) [5, 6]. Його викиди парникових газів (ПГ) включають вуглекислий газ, метан, оксид азоту та інші сполуки. У всьому світі виробництво алюмінію продукує ~3 % усіх викидів ПГ (~15 % усіх викидів у промисловому секторі), що еквівалентно близько 1,1 Гт вуглекислого газу на рік [1, 7–10]. Це означає, що первинне виробництво алюмінію генерує близько 12–16,5 т ПГ на тону виробленого металу [9–10]. Близько 65 % цих викидів відбувається тому, що ~67 % електроенергії, яка використовується для електролізу, виробляється з вкопного палива [3, 8, 9]. Виробництво алюмінію вимагає приблизно 13 ЕДж енергії на рік, що становить ~1 % від загального світового споживання енергії [11].

Перероблення алюмінієвих сплавів передбачає повторне плавлення, що вимагає

лише 5 % енергії, яку використовують для отримання первинного алюмінію з бокситової руди [8]: первинний синтез алюмінію з руд вимагає 45 кВт·год/кг через велику ентальпію його оксиду, а продукується 12 кг  $\text{CO}_2$ /кг готової продукції. Під час повторного синтезу алюмінію витрачається лише 2,8 кВт·год/кг через його низьку температуру плавлення (в середньому 660 °C) і близько 0,6 кг  $\text{CO}_2$ /кг [12]. Це означає, що перероблення має потенціал для суттєвого зміщення енергетичного та вуглецевого балансу алюмінію в бік набагато більшої екологічності [3]. У середньому третина алюмінію, який використовується сьогодні, виробляється з переробленого брухту [13]. Прогнозується, що до 2050 р. ця частка зросте і досягне 50 %, згідно з даними Міжнародного інституту алюмінію (International Aluminum Institute, 2019) [3, 13]. Величезні відмінності між первинним і вторинним синтезом з погляду викидів парникових газів і споживання енергії роблять алюмінієві сплави — значущу основу економіки замкнутого циклу — важливим об'єктом для досліджень сталої металургії [6, 13].

Нині перероблення алюмінію здійснюється в основному в рамках конкретних марок сплавів, і тільки невелику частку брухту змішують з іншими марками [14].

У деформованих сплавах [15–17] оксидні включення та інші неметалеві або інтерметалідні включення погіршують не тільки механічні властивості матеріалів, але також впливають на корозію.

Для перероблення алюмінію та отримання високого виходу металу необхідно зменшити реакцію з киснем під час зберігання, транспортування, плавлення, витримування та лиття. Ступінь окиснення дуже залежить не тільки від складу розплаву, але також від температури плавлення й часу витримування. Важливими факторами, що впливають на це, є наявність оксидів, рівень вологості та склад домішок у вихідній сировині; контроль температури під час плавлення; тривалість контакту з атмосферою, яка містить кисень і вологу; умови плавлення, транспортування й заливання; склад флюсів, які використовуються, а також співвідношення площі поверхні ванни до об'єму розплаву.

Щоб розплавити алюмінієвий брухт із мінімальними втратами, мають бути виконані такі умови [16, 17]:

- запобігання окисненню та поглинанню вологи сировиною (зберігання в сухих умовах у закритому приміщенні);
- плавлення необхідно проводити при мінімально можливій температурі;
- час плавлення має бути коротким, і слід уникати непотрібного часу витримування;
- використання правильно підібраних флюсів.

Остання умова є особливо важливою, оскільки оксидні шари мають бути максимально видалені з брухту.

Під час перероблення брухту з алюмінію переважно використовують суміш із хлориду натрію ( $\text{NaCl}$ ) і хлориду калію ( $\text{KCl}$ ) з додаванням фторидів, таких як плавіковий шпат ( $\text{CaF}_2$ ) або кріоліт ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), або інші лужні фториди ( $\text{NaF}$ ,  $\text{KF}$ ). У ЄС застосовують звичайну суміш із 70 масових %  $\text{NaCl}$  і 30 масових %  $\text{KCl}$ . У США та Канаді використовується еквімолярна евтектична суміш 50 мол.%  $\text{NaCl}$  і 50 мол.%  $\text{KCl}$ , що відповідає 44 мас.%  $\text{NaCl}$  і 56 мас.%  $\text{KCl}$  [18, 19].

Війна в Україні призвела до значного знищення військової техніки, що спричинило накопичення великої кількості пошкоджених машин на відкритих територіях. Це створює складні екологічні проблеми, як-от забруднення ґрунтів, водойм і атмосфери важкими металами й іншими токсичними речовинами через корозію металів. Однак така техніка має великий економічний потенціал, оскільки її можна переробляти на вторинні матеріали для виробництва нових сучасних продуктів.

Алюмінієві сплави, що їх активно використовують у бронетехніці, мають різні властивості залежно від складу та міцності, що визначає їх стійкість до куль і снарядів. Водночас виробництво алюмінію є енергетично затратним і спричиняє значні викиди парникових газів, однак перероблення алюмінієвих сплавів значно зменшує ці показники, що робить його більш екологічно стійким матеріалом [1–3].

Завдяки вдосконаленню технологій перероблення алюмінієвих сплавів, зокрема через мінімізацію окиснення та використання спеціальних плавильних флюсів, можна значно знизити енергетичні витрати й екологічний вплив на навколишнє середовище, що є важливим кроком до сталого розвитку металургії.

Метою роботи є дослідження можливості отримання якісного алюмінієвого сплаву шляхом переплавлення цільного зразка зруйнованої військової техніки без попереднього розділення та сортування шихти.

Основним завданням дослідження є отримання сплаву системи алюміній-цинк-магній, який максимально відповідає наявним промисловим аналогам, зокрема тим, які регулює стандарт ГОСТ 4784-97.

### *Постановка задачі*

Розробити ефективний метод перероблення алюмінієвого брухту для зниження енергоспоживання та викидів ПГ. Оптимізувати використання флюсів для підвищення ефективності процесу плавлення. Проаналізувати мікроструктуру, фазовий і хімічний склад та визначити рівень фізико-механічних властивостей алюмінієвих сплавів.

### *Результати дослідження.*

Для плавлення використовували залишки знищеного БМП-1 (рис. 1). Було відібрано різні елементи корпусу в невеликих об'ємах в рівних пропорціях з метою відтворити переплав алюмінієвого корпусу в меншому масштабі. У результаті було відібрано 8,5 кг шихти, з яких власне і складався корпус, а також сталеві болти, сторонні домішки у вигляді елементів електроніки, гільзи, пластик тощо.

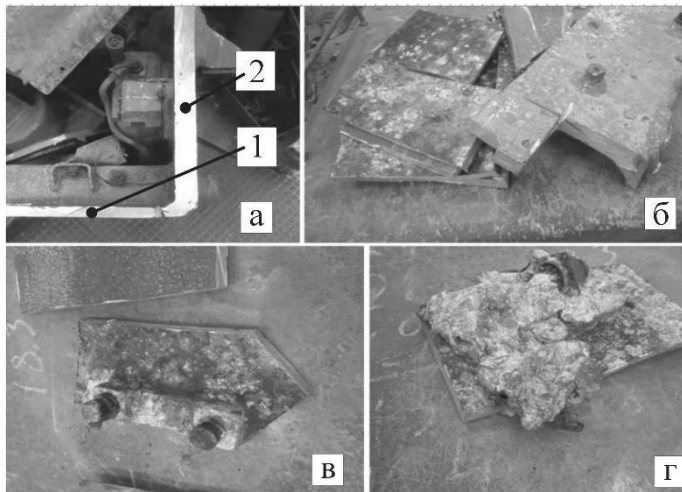


Рис. 1. Загальний вигляд перерізу корпусу (а); подрібнена шихта (б); частина корпусу зі сталевими болтами (в); елемент плавленого корпусу з різними домішками (г)

Хімічний склад корпусу БМП-1 із різних місць наведено в таблиці табл. 1.

Для рафінування було підготовлено суміш солей NaCl–KCl у пропорції 50 / 50 %. Попередньо суміш було висушено при температурі 120 °С протягом 30 хв. Сформовано наважки та загорнуто у фольгу для запобігання передчасному розсипанню суміші та забезпечення зручності введення флюсу в розплав.

Заливання зразків здійснювалось у металевий кокіль, який попередньо підігріто до температури 200 °С. На внутрішню поверхню кокіля було нанесено декілька шарів антипригарної фарби. Для визначення рівня механічних властивостей зразків на тимчасовий опір розриванню від виливків відокремлювали надливи. Діаметр робочої частини зразка становив 12,5 мм. Дослідження міцності на тимчасовий опір розриванню здійснювали на універсальній розривній машині МР-100. За результатами випробувань визначали відносне подовження. Особливу увагу

Узагальнений хімічний склад частин корпусу

| Місце | Хімічний склад, % |       |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
|       | Mg                | Al    | Si   | Ti   | Cr   | Mn   | Fe   | Cu   | Zn   |
| 1     | 6,33              | 92,23 | 0,25 | 0,04 | 0,01 | 0,69 | 0,37 | 0,02 | 0,02 |
| 2     | 2,55              | 89,14 | 0,35 | 0,05 | 0,17 | 0,26 | 0,26 | 0,03 | 6,92 |

буде приділено визначенню механічних характеристик у литому стані, таких як міцність і пластичність, що дозволить оцінити придатність сплаву для подальшого використання в промисловості.

Хімічний аналіз зразків проводили за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу на приладі Expert 4L. Дослідження мікроструктури проводили на скануючому електронному мікроскопі TESCAN VEGA 3.

За результатами хімічного аналізу складу брукху встановлено, що корпус бойової машини піхоти БМП-1 є біметалевою конструкцією, яка поєднує два різних алюмінієвих сплави. Одна частина виготовлена зі сплаву марки АМг6, рис. 1, місце 1, що характеризується високою корозійною стійкістю та міцністю, інша — зі сплаву системи алюміній-цинк-магній, рис. 1, місце 2, у складі якого вміст цинку складає 6–7 %. Інші залишки за хімічним складом відповідають алюмінієвому сплаву В95.

Аналіз хімічного складу брукху показує наявність цинку, вміст якого визначається співвідношенням масових часток залишкових елементів корпусу. Встановлено, що повне видалення цинку з розплаву неможливе. Зниження його концентрації досягається шляхом продування розплаву аргоном або плавленням у вакуумі, проте ці методи є технічно складними. У даному дослідженні якість отриманого сплаву оцінюється на основі хімічного складу, механічних властивостей, а також фазового складу та мікроструктурного аналізу.

Попередньо з аналізу літературних джерел [14, 18] визначено, що кількість модифікатора має складати 5 % і 10 % від маси розплаву з подальшим легуванням розплаву чистим гранульованим цинком.

На першому етапі до розплаву було додано 5 % суміш солей (50 % NaCl + 50 % KCl) від його маси. Для забезпечення ефективною гомогенізації, змішування та видалення газів від неметалевих включень розплав активно перемішували. Після введення рафінувальної суміші розплав витримували протягом 15 хв, що забезпечувало завершення реакції між рафінувальним агентом та розплавом. Наступним кроком було заливання розплаву в попередньо підігріту металеву форму для виготовлення серії зразків. На другому етапі рафінування масову частку суміші збільшували до 10 % від загальної маси розплаву. Після завершення процесу рафінування було виготовлено наступну серію зразків.

Після введення суміші солей у розплав і завершення їх взаємодії з металом на поверхні утворився захисний шар, який ізолював розплав від впливу навколишнього середовища. Таким чином, утворився покривний шар, який захищав розплав алюмінію від контакту з атмосферою. Додатковий шлак у результаті рафінування не утворювався.

Встановлено, що у складі вихідної шихти і, відповідно, у розплаві міститься до 1,5 % цинку. Оскільки в результаті роботи бажано наблизитись до хімічного складу сплавів за ГОСТ 4784-97, який регламентує сплави системи алюміній-цинк-марганець, вміст цинку в розплаві необхідно підвищити до 4 %. Для цього в розплав було додано 150 г чистого гранульованого цинку. Легування здійснювали при температурі 720 °С, розплав витримували протягом 10 хв із постійним перемішуванням, що дозволило досягти стабільного складу сплаву. Після цього була виготовлена партія зразків для подальших досліджень.

Крім того, захисний шар ізолює розплав від взаємодії з атмосферним киснем, запобігаючи утворенню оксидів алюмінію, які складно видалити і які можуть негативно впливати на якість сплаву. Також він захищає алюмінієвий розплав від можливого утворення неметалевих включень, таких як  $AlN$ , і від насичення воднем.

Дослідження тимчасового опору розриванню зразків показали, що процеси рафінування мають незначний вплив на механічні властивості сплаву (рис. 2). Однак вони відіграють важливу роль у забезпеченні чистоти розплаву, сприяючи видаленню неметалевих включень і зниженню вмісту газів, як-от водень. Рафінування також позитивно впливає на структуру сплаву, покращуючи її однорідність, і на якість поверхні зразків, зменшуючи ризик утворення дефектів, зменшенню залишкових напружень, рис. 2. Крім того, утворений покривний шар під час рафінування захищає розплав від взаємодії з атмосферним киснем, запобігаючи утворенню оксидів і забезпечуючи стабільну якість матеріалу.

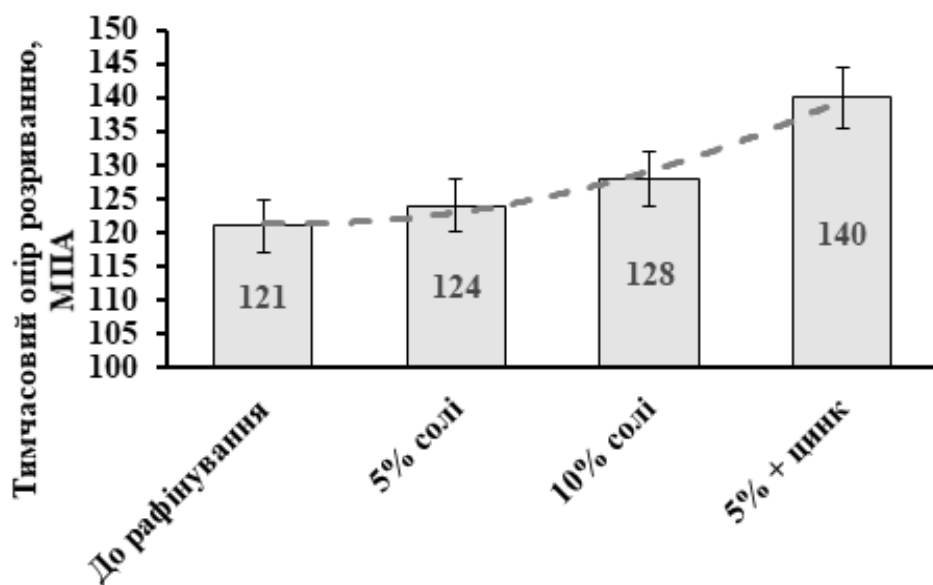


Рис. 2. Тимчасовий опір розриванню алюмінієвого сплаву залежно від методу оброблення

Розчинений водень є головним джерелом газової пористості в алюмінієвих сплавах. Суміш солей, що вводиться в розплав, виділяє інертні або активні гази, які витісняють водень і сприяють його видаленню з розплаву. Видалення водню суттєво знижує ризик утворення пор у затверділих зразках, що критично для покращення механічних властивостей.

Додавання цинку до алюмінієвого розплаву покращує механічні властивості матеріалу до 140 МПа (рис. 2) завдяки декільком важливим хімічним та фізичним ефектам. Цинк змінює фазову структуру алюмінієвого сплаву, утворюючи нові міжметалеві фази, як наприклад,  $Al_2Zn$ ,  $AlZn$  та  $AlZn_2$  [4, 6], що покращують механічні властивості сплаву. Ці фази, завдяки своїй твердості, запобігають пластичній деформації, що, у свою чергу, підвищує тимчасовий опір розтягу розтягуванню. Така зміна структури також дозволяє досягти кращого балансу між міцністю та пластичністю сплаву [4].

Цинк у значних кількостях кількість розчиняється в алюмінії, утворюючи твердий розчин заміщення. Це спричиняє спотворення кристалевої ґратки алюмінію, рис. 3 та рис. 4. Після оброблення сумішшю солей та легування цинком відбувається подрібнення структури з 45 мкм до 30 мкм, див. рис. 4, в. Атоми цинку, які мають більший атомний радіус, ніж алюміній, викликають локальне напруження в кристалічній ґратці, що ускладнює рух дислокацій та підвищує міцність сплаву.

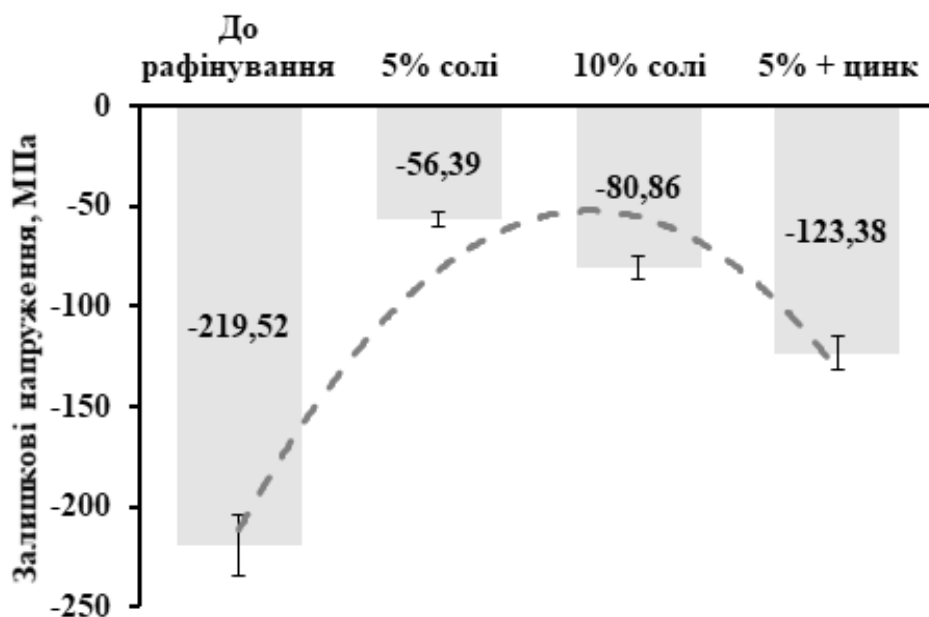


Рис. 3. Макронапруження алюмінієвого сплаву залежно від методу оброблення

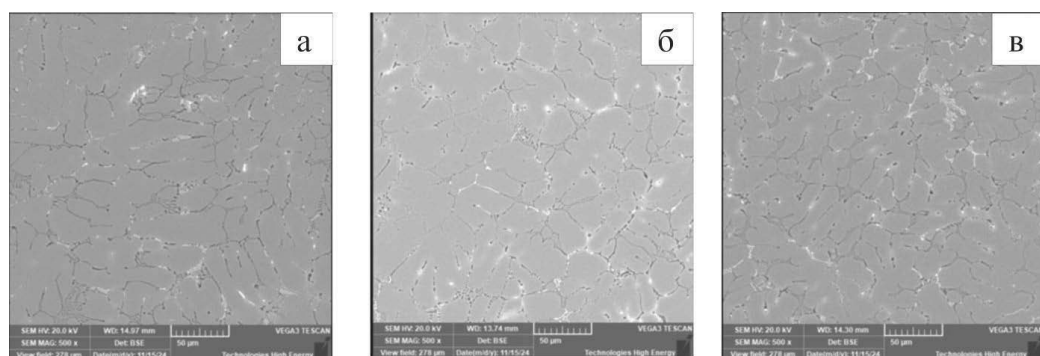


Рис. 4. Мікроструктура зразків: а — до рафінування; б — після рафінування (5 %); в — після рафінування і легування цинком

Введення цинку змінює енергію зв'язків між атомами, що сприяє збільшенню опору пластичній деформації.

У сплавах алюмінію з цинком під час охолодження можливе утворення вторинних фаз, як-от  $Al_2Zn_3$  або інші інтерметалічні з'єднання  $Al_2Zn$ ,  $AlZn$  та  $AlZn_2$  [4, 6]. Дрібнодисперсні включення вторинних фаз працюють як бар'єри для руху дислокацій, збільшуючи міцність. Наявність вторинних фаз сприяє дрібнозернистій структурі, що забезпечує кращу механічну міцність, рис. 4.

Легування цинком у поєднанні з попереднім рафінуванням сприяє додатковому видаленню водню. Уведення гранульованого цинку в розплав спричиняє його інтенсивне перемішування, що допомагає видалити залишковий водень, а це, у свою чергу, знижує пористість і призводить до більш однорідної структури матеріалу, яка краще витримує навантаження.

Температура легування (720 °C) і активне перемішування забезпечують рівномірний розподіл цинку в розплаві, що запобігає локальним перегрупуванням або сегрегації цинку. Це забезпечило однорідність хімічного складу, рис. 5, та відсутність структурних дефектів.

Відносне видовження вихідного сплаву складає 0,61 %, що пов'язано з великими залишковими напруженнями. Після рафінування сіллю у кількості 5 % збільшується в середньому до 3 %. Легування цинком дещо зменшує цей показник до 2,42 % (рис. 6). Усі зразки демонструють крихкий тип руйнування, характерний для матеріалів із високою міцністю, але низькою пластичністю (рис. 7).

Металографічними дослідженнями встановлено, що цинк утворює в структурі сплаву інтерметалідні фази Al–Zn–Mg із різним співвідношенням елементів, рис. 8 і табл. 2.

Додавання цинку дозволило привести хімічний склад сплаву до рівня, що відповідає вимогам ГОСТ 4784-97 для алюмінієво-цинкових сплавів, які характеризуються підвищеною міцністю. У цих сплавах співвідношення цинку й алюмінію розраховане на

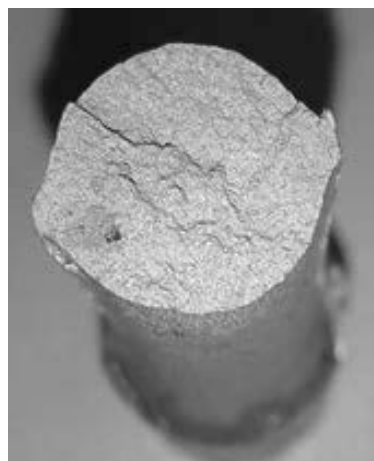


Рис. 5. Макроструктура зламу після легування цинком

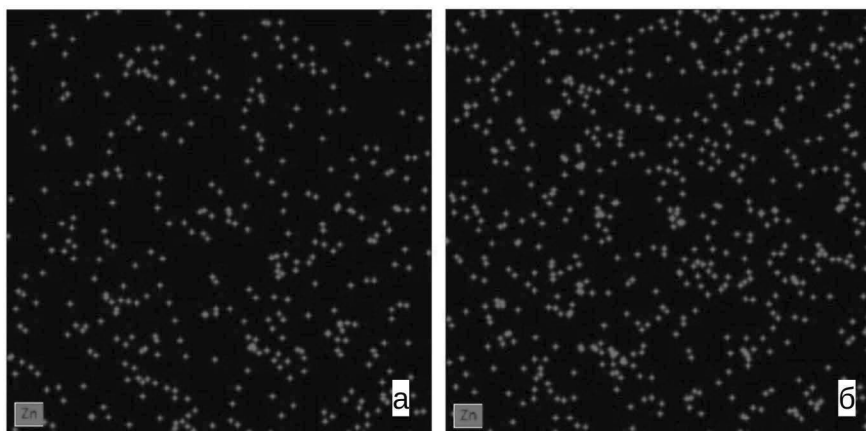


Рис. 6. Розподіл цинку по матриці сплаву до легування (а) і після (б)

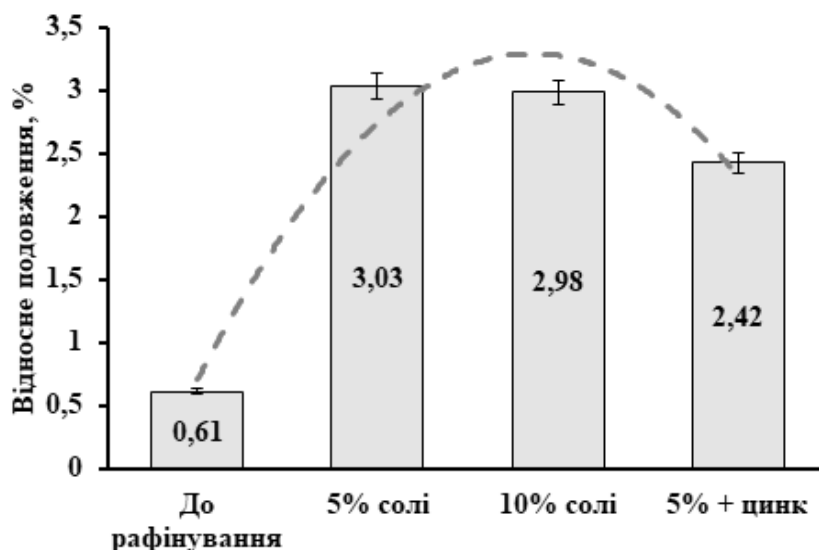


Рис. 7. Відносне видовження зразків з алюмінієвого сплаву залежно від методу оброблення

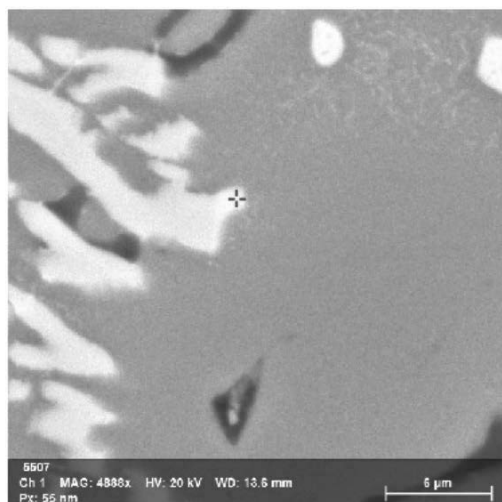


Рис. 8. Інтерметалідна фаза Al–Zn–Mg

основі бажаного хімічного складу, який відповідає вимогам стандартів, таких як ГОСТ 4784-97 для алюмінієво-цинкових сплавів.

Це співвідношення визначається з урахуванням необхідної міцності. Для цього здійснюється аналіз вихідних матеріалів з урахуванням вмісту цинку в алюмінієвому розплаві та необхідності досягнення оптимальних властивостей сплаву під час легування цинком. Зазвичай, після введення цинку здійснюють коригувальні розра-хунки для досягнення стабільного складу сплаву, який відповідає технологічним вимогам, щоб забезпечити оптимальну комбінацію високої міцності (за рахунок зміцнення твердого розчину та вторинних фаз) та низької пластичності, див. рис. 6 (завдяки уникненню надлишкової сегрегації цинку).

Таблиця 2

**Хімічний склад інтерметалідної фази з цинком**

| Елемент  | Mg    | Al    | Cu   | Zn    |
|----------|-------|-------|------|-------|
| Вміст, % | 23,37 | 53,15 | 1,15 | 27,91 |

За результатами роботи отримано алюмінієвий сплав, за хімічним складом наближений до деформованих алюмінієвих сплавів 1925 та В95 за ГОСТ 4784-97 (табл. 3).

У роботі розроблена технологія перероблення відходів алюмінієвої броні знищеної військової техніки. Ця технологія дозволяє отримати сплави, хімічний склад яких наближений до стандартних деформованих алюмінієвих сплавів (1925 та В95), що сприяє економії енергоресурсів і легувальних елементів. Механічні властивості отриманого сплаву, порівняно зі стандартними деформованими сплавами, є нижчими, але можуть бути покращені шляхом подальших досліджень.

Таблиця 3

**Порівняння хімічного складу експериментального сплаву зі стандартними деформованими алюмінієвими сплавами 1925 та В95 за ГОСТ 4784-97**

| Сплав             | Хімічний склад, % |        |         |          |           |         |         |         |         |
|-------------------|-------------------|--------|---------|----------|-----------|---------|---------|---------|---------|
|                   | Fe                | Si     | Mn      | Cr       | Al        | Cu      | Zr      | Mg      | Zn      |
| 1925              | до 0,7            | до 0,7 | 0,2–0,7 | до 0,2   | 90,8–95,0 | до 0,8  | 0,1–1,2 | 1,3–1,8 | 3,4–4,0 |
| В95               | до 0,5            | до 0,5 | 0,2–0,6 | 0,1–0,25 | 86,3–91,5 | 1,4–2,0 | –       | 1,8–2,8 | 5,0–7,0 |
| Експериментальний | 0,67              | 0,61   | 0,39    | 0,066    | 89,48     | 0,21    | 0,053   | 2,66    | 5,68    |

Запропонована технологія перероблення перспектива з погляду екологічної доцільності та економічної вигоди. Вона сприяє ефективному використанню вторинних ресурсів із мінімальним впливом на довкілля, що є важливим кроком до сталого розвитку металургійної галузі.

Робота виконана в рамках держбюджетної тематики №2805п. Автори роботи висловлюють щирю подяку Т. Наріжній за надану допомогу у проведенні досліджень

та підтримку в роботі над проектом. Також висловлюємо вдячність ТОВ «ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ» за технічну допомогу, яка суттєво сприяла успішному завершенню дослідження.

### Список літератури

- 1 Жирохов М. Алюмінієва броня десанту. Київ: Patriot Book, 2020. 80 с.
- 2 Сучасні перспективні металеві матеріали для бронеперешкод (огляд) / Г. А. Кононенко, Т. В. Кімстач, О. А. Сафронова, Р. В. Подольський, О. В. Пучіков, О. П. Клинова. Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. 2022. Вип. 36. С. 325–342. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-325-342.
- 3 International Aluminium Institute. Global Aluminium Cycle 2019. Alucycle 2020. <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/>.
- 4 Bertram M, Ramkumar S, Rechberger H, Rombach G, Bayliss C, Martchek KJ, et al. A regionally-linked, dynamic material flow modelling tool for rolled, extruded and cast aluminium products. / Bertram M, Ramkumar S, Rechberger H, Rombach G, Bayliss C, Martchek KJ, et al. Resour Conserv Recycl. 2017. No. 125. P. 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.014>.
- 5 Allwood JM, Cullen JM, Milford RL. Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050 / Allwood JM, Cullen JM, Milford RL. Environ Sci Technol. 2010. No. 44. P. 1888–1894, <https://doi.org/10.1021/es902909k>.
- 6 Gutowski TG, Sahni S, Allwood JM, Ashby MF, Worrell E. The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand / Gutowski TG, Sahni S, Allwood JM, Ashby MF, Worrell E. Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci. 2013. No. 371, <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>.
- 7 Ritchie H, Roser M. CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions / Ritchie H, Roser M. OurWorldInDataOrg. 2020. No. 1, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- 8 Cullen JM, Allwood JM. Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods / Cullen JM, Allwood JM. Environ Sci Technol. 2013. No. 47. P. 3057–3064, <https://doi.org/10.1021/es304256s>.
- 9 Пожуєв В.І., Іващенко В.І., Червоний І.Ф., Грицай В.П. Металургія кольорових металів: підручник. Ч. 1. Сировинні ресурси і виробництво. Запоріжжя: ЗДІА, 2007. 351 с.
- 10 Пригунова А.Г., Тубольцев Л.Г., Нарівський А.В., Сокол Л.В. Алюмінієва промисловість України: від занепаду до потенційного зростання. *Метал та лиття України*. 2022. № 3 (330). С. 8–20. DOI: 10.15407/steelcast2022.03.008.
- 11 International Aluminium Institute. Prim Alum Smelt Power Consum 2020. <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-powerconsumption/>.
- 12 Das SK, Green JAS, Kaufman JG, Emadi D, Mahfoud M. Aluminum recycling-An integrated, industrywide approach / Das SK, Green JAS, Kaufman JG, Emadi D, Mahfoud M. JOM. 2010. No. 62. P. 23–26, <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0026-6>.
- 13 Schlesinger M. The Recycling Industry / Schlesinger M. Alum Recycl. 2006. P. 163–170, <https://doi.org/10.1201/9781420006247.ch11>.
- 14 Buchner H, Laner D, Rechberger H, Fellner J. Potential recycling constraints due to future supply and demand of wrought and cast Al scrap—A closed system perspective on Austria / Buchner H, Laner D, Rechberger H, Fellner J. Resour Conserv Recycl. 2017. No. 122. P. 135–142 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.014>.
- 15 Krone K. Vereinigung Deutscher Schmelzhütten e.V. Aluminiumrecycling — Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung. Düsseldorf: Aluminiumverlag, 2000.
- 16 Martens H. Recyclingtechnik Fachbuch für Lehre und Praxis / Martens H. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2011. Vol. 11, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>.

- 17 Petryshyn M.M., Sezonenko A.Yu., Yamshinskij M.M., Byba Ie.G., Lukianenko I.V., Leonov D.S., Kolesnichenko A.A., Lytvyn R.V., Barabash M.Yu. Injection of Excess Pressure during the Crystallization Process on the Structure and Power of the Alloy of the Al–Si–Cu System for Aviation Technology, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 46, No. 4: 325–341 (2024). DOI: 10.15407/mfint.46.04.0325.
- 18 Prillhofer R, Prillhofer B, Antrekowitsch H. Treatment of residues during aluminum recycling / Prillhofer R, Prillhofer B, Antrekowitsch H. TMS Annu Meet. 2009. P. 857–862.
- 19 Kammer C. Aluminiumtaschenbuch — 1. Teil. Düsseldorf, Deutschland: Aluminiumverlag, 2002.

Надійшла 10.03.2025

### References

- 1 Zhirohov, M. (2020). Aluminum armor of the airborne troops. Kyiv: Patriot Book. [in Ukrainian].
- 2 Kononenko, H. A. et al. (2022). Modern prospective metallic materials for armor barriers (review). *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 36, pp. 325–342. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-325-342>. [in Ukrainian].
- 3 International Aluminium Institute. (2020). Global Aluminium Cycle 2019. Alucycle. <https://alucycle.international-aluminium.org/public-access/>.
- 4 Bertram, M. et al. (2017). A regionally-linked, dynamic material flow modelling tool for rolled, extruded and cast aluminium products. *Resources, Conservation and Recycling*, 125, pp. 48–69. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.014>.
- 5 Allwood, J. M. et al. (2010). Options for achieving a 50% cut in industrial carbon emissions by 2050. *Environmental Science & Technology*, 44(6), pp. 1888–1894. <https://doi.org/10.1021/es902909k>.
- 6 Gutowski, T. G. et al. (2013). The energy required to produce materials: Constraints on energy-intensity improvements, parameters of demand. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0003>.
- 7 Ritchie, H., & Roser, M. (2020). CO<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*, 1. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- 8 Cullen, J. M., & Allwood, J. M. (2013). Mapping the global flow of aluminum: From liquid aluminum to end-use goods. *Environmental Science & Technology*, 47(7), pp. 3057–3064. <https://doi.org/10.1021/es304256s>.
- 9 Pozhuev, V. I. et al. (2007). Non-ferrous metallurgy: Textbook. Part 1. Raw materials and production. Zaporizhzhia: ZDIA. [in Ukrainian].
- 10 Pryhunova, A. H. et al. (2022). Aluminum industry of Ukraine: From decline to potential growth. *Metal and Casting of Ukraine*, 3(330), pp. 8–20. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.008>. [in Ukrainian].
- 11 International Aluminium Institute. (2020). Primary Aluminium Smelting Power Consumption. <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-powerconsumption/>.
- 12 Das, S. K. et al. (2010). Aluminum recycling—An integrated, industrywide approach. *JOM*, 62(2), pp. 23–26. <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0026-6>.
- 13 Schlesinger, M. (2006). The recycling industry. *Aluminum Recycling*, pp. 163–170. <https://doi.org/10.1201/9781420006247.ch11>.
- 14 Buchner, H. et al. (2017). Potential recycling constraints due to future supply and demand of wrought and cast Al scrap—A closed system perspective on Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, pp. 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.014>.

- 15 Krone, K. (2000). Aluminum recycling — From raw material to finished alloy. Düsseldorf: Aluminiumverlag.
- 16 Martens, H. (2011). Recycling technology: Textbook for teaching and practice (Vol. 11). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-02786-5>.
- 17 Petryshyn, M. M. et al. (2024). Injection of excess pressure during the crystallization process on the structure and power of the alloy of the Al–Si–Cu system for aviation technology. *Metallophysics and Latest Technologies*, 46(4), pp. 325–341. <https://doi.org/10.15407/mfint.46.04.0325>.
- 18 Prillhofer, R., Prillhofer, B., & Antrekowitsch, H. (2009). Treatment of residues during aluminum recycling. TMS Annual Meeting, pp. 857–862.
- 19 Kammer, C. (2002). Aluminum Handbook — Part 1. Düsseldorf, Germany: Aluminiumverlag.

Received 10.03.2025

**Serhii Petrychenko**<sup>1</sup>, graduate student; e-mail: [sarg.petrichenko@gmail.com](mailto:sarg.petrichenko@gmail.com);  
<https://orcid.org/0009-0007-6394-1026>

**Oleksandr Narizhnyi**<sup>1</sup>, higher education student;  
e-mail: [oleksandrnarizhnyi@gmail.com](mailto:oleksandrnarizhnyi@gmail.com)

**Mykhailo Yamshinskij**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Department Chair;  
e-mail: [yamshinskiy@ukr.net](mailto:yamshinskiy@ukr.net), <http://orcid.org/0000-0002-2293-2939>

**Evgeny Byba**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor;  
e-mail: [byba.evgen@gmail.com](mailto:byba.evgen@gmail.com); <http://orcid.org/0000-0002-1696-300X>

**Anatolii Minitskyi**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor;  
e-mail: [aminitzky@gmail.com](mailto:aminitzky@gmail.com); <http://orcid.org/0000-0001-5767-4071>

**Maksym Barabash**<sup>1, 2</sup>, Dr. Sci. (Engin Senior Researcher, Professor,  
e-mail: [mbarabash@nasu.kiev.ua](mailto:mbarabash@nasu.kiev.ua); <https://orcid.org/0000-0001-5054-5031>

**Bohdan Kyvhylo**<sup>1</sup>, graduate student; e-mail: [kyvhylo.bohdan@gmail.com](mailto:kyvhylo.bohdan@gmail.com);  
<http://orcid.org/0000-0001-5890-9020>

**Ivan Lukianenko**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Associate Professor; e-mail: [lukianenkoiv@gmail.com](mailto:lukianenkoiv@gmail.com);  
<http://orcid.org/0000-0002-1043-9688>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine),

<sup>2</sup>Technical Centre, N.A.S. of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

## RECYCLING OF ALUMINUM SCRAP FROM THE MILITARY SECTOR: ENVIRONMENTAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

*This study examines the possibility of recycling aluminum scrap from military equipment destroyed due to warfare in Ukraine, which has led to significant environmental and economic challenges. The accumulation of damaged equipment in open areas poses a threat of environmental pollution due to metal corrosion, which causes the release of hazardous substances into the soil, water bodies, and atmosphere. However, despite these issues, such equipment also has significant untapped economic potential, as it can be recycled into secondary materials for the production of new modern products. The study revealed that the obtained aluminum alloy is close in its chemical composition*

to commercially available alloys such as 1925 and V95, which increases its feasibility for use in new cast products with adequate mechanical properties. The determined mechanical properties of the alloy, including its strength (up to 140 MPa) and elongation (2.42%), confirm the alloy's potential for further use in industry, particularly in structures requiring high mechanical properties. Specifically, the obtained alloy can be applied for the manufacture of structural elements that require high specific strength and corrosion resistance, such as cast engine components, housing parts, and other structural elements. The proposed technology for recycling aluminum scrap ensures efficient use of secondary resources with minimal environmental impact, which is an important aspect of the sustainable development of the metallurgical industry. The study confirmed the possibility of obtaining an aluminum alloy that is close in its chemical composition and mechanical properties to industrially used alloys such as 1925 and V95. Thus, the research results can serve as a basis for further improvement of aluminum recycling technologies and their implementation into practice. The use of secondary aluminum alloys in production will not only allow for reducing the environmental footprint of the metallurgical industry but also contribute to economic development, optimization of resource consumption, and reduction of dependence on primary raw materials.

**Keywords:** secondary aluminum, scrap recycling, military equipment, mechanical properties, environmental safety.

### **Шановні читачі**

#### **Науково-технічний журнал**

##### **«Процеси лиття»**

зареєстрований у категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук

#### **До уваги читачів та передплатників!**

Журнал виходить 4 рази на рік.

Для регулярного одержання журналу потрібно оформити підписку через редакцію, надіславши лист-запит на адресу редакції для оформлення **рахунку-фактури**.

Вартість одного журналу — 200 грн., передплата на рік — 800 грн.  
Доступні також архівні номери журналу.

**Адреса:** бульвар Вернадського, 34/1  
03142, Київ-142  
proclit@ptima.kiev.ua