

# АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНИХ ДЕФОРМОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СИСТЕМ Al–Li, Al–Cu–Mn, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В АЕРОКОСМІЧНІЙ ГАЛУЗІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЗВАРНИХ КОНСТРУКЦІЙ (Огляд)

В.І. Загорніков

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [zagornikov@technobeam.com.ua](mailto:zagornikov@technobeam.com.ua)

У статті представлено основні напрямки розвитку в області перспективних алюмінієвих сплавів. Розглянуто сплави нового покоління з удосконаленими хімічним складом, технологіями виготовлення та термічної обробки напівфабрикатів. Висвітлюється питання зв'язку між структурною будовою сплавів та їх експлуатаційними властивостями, вплив режимів термічної обробки, легування на механічні властивості, зварюваність алюмінієвих сплавів з метою отримання заданих прогнозованих експлуатаційних властивостей. Описано результати застосування алюмінієвих сплавів в авіаційно-космічній техніці. Проводиться огляд промислових деформованих сплавів системи Al–Li та Al–Cu–Mn, порівняльних характеристик зварюваності різних перспективних алюмінієвих сплавів (1460, B-1469, 1201 та їх аналогів 2090, 2195, 2219). Бібліогр. 30, табл. 1.

*Ключові слова:* термічна обробка, легування шва, оцінка зварюваності, заходи запобігання пористості, перспективні методи отримання зварних сполук, електронно-променево зварювання

**Вступ.** Темпи зростання промислового авіа- та ракетобудівного виробництва в Україні та світі диктують темпи використання сучасних та інноваційних технологій і матеріалів. Одним з найважливіших завдань, що стоїть сьогодні перед авіакосмічною галуззю, є підвищення вагової ефективності техніки та її міцності, що дозволить збільшити вагу корисного вантажу, що виводиться на орбіту.

Сучасні вимоги до матеріалів стають дедалі жорсткішими. Проте алюмінієві деформовані сплави залишаються базовими конструкційними матеріалами для перспективних виробів авіаційно-космічної техніки завдяки низькій щільності, комплексу експлуатаційних характеристик, хорошій технологічності, зварюваності та освоєння в металургійному виробництві. Крім значного виграшу у вазі, ці сплави повинні мати більш високі питомі та експлуатаційні характеристики, що дозволить використовувати більш ефективні конструкторські рішення, такі як електронно-променево, лазерне зварювання, тертя з перемішуванням, автоматичне аргонодугове зварювання з використанням нових присадних матеріалів.

Для конструкцій літальних апаратів важливі не абсолютні, а питомі значення міцності характеристик ( $\sigma_b/\rho$ ,  $\sigma_{02}/\rho$ ). Тому дисперсійно-твердіючі алюмінієві сплави системи Al–Li та Al–Cu–Mn завдяки високій питомій міцності широко використовуються у конструкції виробів космічної та

авіаційної техніки, зокрема, виробів криогенного призначення – паливних баків ракет, оболонки фюзеляжу та несучих елементів конструкції літаків. Для роботи при криогенних та підвищених умовах застосовують сплави, які не схильні до уповільненого руйнування і мають високу пластичність основного металу за температури рідкого гелію та водню [1–3].

Незважаючи на всі переваги розроблених сплавів, стоїть завдання підвищення характеристик тріщиностійкості за збереження високого рівня міцності і корозійної стійкості. Їх склад, структура, режими виготовлення, зокрема, термомеханічної обробки, продовжують постійно удосконалюватися відповідно до зростаючих вимог до конструкцій. Це завдання вирішується завдяки розробці та впровадженню новітніх надлегких високоміцних матеріалів та технологій їх з'єднання.

Мета цієї статті полягає у формулюванні сучасних вимог до властивостей напівфабрикатів деформованих алюмінієвих сплавів 1460, B-1469, 1201 та їх аналогів 2090, 2195, 2219. Обґрунтувати пріоритетність застосування сплаву, що деформується, типу 1201(2219) при отриманні якісних зварних з'єднань за допомогою ЕПЗ у конструкції виробів космічної та авіаційної техніки.

**Обговорення проблем в області технології термічної обробки та зварювання алюмінієвих сплавів системи Al–Li і Al–Cu–Mn для виробів авіаційно-космічної техніки.**

З розвитком авіаційно-космічної техніки до вимоги конструкторського матеріалу висуваються такі вимоги:

- сплав повинен мати достатній рівень міцності і ресурсних характеристик;
- висока технологічність і енергозбереження при металургійному виробництві;
- можливість здобуття різних видів напівфабрикатів;
- технологічність при виготовленні деталей і збірці різних вузлів конструкції, у тому числі із застосуванням зварювання;
- сплав не повинен містити високотоксичних компонентів (кадмій, свинець, ртуть, берилій), елементи, які випаровуються при зварюванні.

Поліпшити властивості алюмінієвих сплавів можна як у процесі зміни їх складу, так і в результаті застосування нових технологій їх отримання та обробки. Для забезпечення оптимальних механічних властивостей в залежності від умов роботи (нормальна – криогенна температура) для кожного виду напівфабрикатів є певний режим старіння при термообробці. При цьому у структурі металу утворюється певний фазовий склад. Строго регламентована деформація після загартування у перерізі з певним режимом остаточного старіння має забезпечити необхідний комплекс фізико-механічних властивостей.

Розглянуті конструкційні алюмінієві сплави, що деформуються, це, головним чином, сплави алюмінію з чотирма компонентами: Cu, Mn, Mg, Zn. До них відносно недавно додалися Li, Sc, Zr і Ag (таблиця).

Усі перелічені компоненти обрані за однією ознакою – вони мають найбільшу порівняно з іншими відомими елементами розчинність у твердому алюмінії. Вона різко знижується зі зниженням температури, внаслідок при охолодженні сплавів із цими компонентами з твердого розчину виділяються інтерметалідні фази, а при нагріванні – розчиняються. Це фазове перетворення (єдине в твердих алюмінієвих сплавах) відкрило можливість суттєво впливати на структуру і властивості

сплавів за допомогою термічної обробки. Сплави мають високий комплекс властивостей після зміцнюючої термічної обробки (загартування та старіння), коли матрицею сплаву є твердий розчин, зміцнений дисперсними частинками інтерметалідних фаз, що виділилися з твердого розчину при старінні. Це стосується сплавів всіх систем, тобто механізми зміцнення всіх сплавів єдині: обробка на твердий розчин + дисперсійне твердіння. Відмінність сплавів, що розглядаються, один від одного визначається складом, кристалічною структурою і властивостями дисперсних частинок інтерметалідів, що виділяються з пересиченого твердого розчину, від яких залежить ефект зміцнення. Головною властивістю цих частинок є дуже висока, порівняно з матрицею, твердість. Вторинні дисперсні виділення цих інтерметалідних фаз визначили високий рівень характеристик міцності, досягнутий для алюмінієвих сплавів і визначив можливість їх застосування для відповідальних конструкцій [4].

Оскільки природне старіння не викликає змін, то після загартування напівфабрикати піддають штучному старінню. Це дозволило не регламентувати час перерви між загартуванням та старінням [5].

Мета старіння алюмінієвих сплавів зазвичай полягає у додатковому підвищенні міцності загартованих сплавів. Для досягнення максимальної міцності сплавів, що термічно зміцнюються, необхідно за рахунок регламентованих нагрівань отримати деяку проміжну структуру, яка відповідає початковим стадіям розпаду пересиченого твердого розчину.

Початковим стадіям розпаду пересиченого твердого розчину відповідає структура, що поєднує кластери (зони Гінґс-Престона) і ці кластери мають вигляд виділень з твердого розчину у формі пластинок рівномірно розподіленої по зерну у вигляді дрібних голчастих включень, а також уздовж їх меж у формі великих пластівців. На цій стадії коагуляційні процеси (укрупнення) частинок зміцнюючої фази не спостерігаються.

Старіння промислових алюмінієвих сплавів умовно поділяють на низькотемпературне

Хімічний склад сплавів систем легування та Al–Cu–Li та Al–Cu (1460, В-1469, 1201 і їх аналогів 2090, 2195, 2219)

| Марка сплаву   | Масова частка елементів, % |           |             |            |             |             |             |            |            |      |      |
|----------------|----------------------------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------|------|
|                | Cu                         | Li        | Zr          | V          | Ti          | Mn          | Sc          | Mg         | Ag         | Si   | Fe   |
| 1460 (СРСР)    | 2,6...3,3                  | 1,9...2,3 | 0,1         | –          | 0,1         | 0,05...0,1  | 0,06...0,1  | 0,06...0,1 | –          |      |      |
| 2090 (США)     | 2,4...3,0                  | 1,9...2,6 | 0,1         | –          | 0,15        | 0,05        | –           | 0,25       | –          |      |      |
| В-1469 (Росія) | 3,2...4,5                  | 1,0...1,7 | 0,02...0,26 | –          | 0,05...0,07 | 0,05...0,08 | 0,02...0,28 | 0,01...0,5 | 0,45       |      |      |
| 2195 (США)     | 3,7...4,3                  | 0,8...1,2 | 0,12        | –          | 0,1         | 0,25        | –           | 0,25...0,8 | 0,25...0,6 |      |      |
| 1201 (СРСР)    | 5,8...6,8                  | –         | 0,1...0,25  | –          | 0,02...0,1  | 0,20...0,40 | –           | 0,02       | –          | 0,20 | 0,30 |
| 2219 (США)     | 5,8...6,8                  | –         | 0,1...0,25  | 0,05...0,1 | 0,02...0,1  | 0,20...0,40 | –           | 0,02       | –          | 0,20 | 0,30 |

(20...140 °C) і високотемпературне (140...220 °C). Продуктами розпаду пересиченого твердого розчину при низькотемпературному старінні є, як правило, когерентні дисперсні або частково когерентні виділення, гомогенно розподілені в обсязі зерен. У деяких алюмінієвих сплавах (Al–Cu–Mn) підготовка до розпаду та початкові стадії розпаду відбуваються лише при нагріванні загартованого сплаву до температур, зазвичай, в інтервалі 100...200 °C. Сенс цього нагріву – термічна активація дифузійних процесів.

Це стадія, що забезпечує максимальні властивості міцності (T1), або ж режими штучного старіння з регламентованим знеміцненням в порівнянні з режимом T1 – режими T2 і T3, в порівнянні зі стадією старіння, що забезпечує максимальне зміцнення (отримання максимальної межі плинності). Стани T2 і T3, як правило, реалізуються за допомогою двоступеневого старіння. При режимах старіння, відповідних висхідній гілці кривої зміцнення, можливе різке зменшення опору корозійного розтріскування. Таке явище спостерігається, наприклад, у сплавів систем Al–Cu та Al–Cu–Mg [6].

Без експериментів не можна передбачити, яка має бути в даному сплаві конкретна структура, що забезпечує максимальне зміцнення. Відповідь залежить від того, які стадії розпаду можливі в цьому сплаві при даній температурі старіння, яка структура виділень, щільність виділень кожного типу та інших факторів.

Намітилися два основні шляхи отримання оптимального комплексу властивостей, необхідних для надійної роботи високоміцних алюмінієвих сплавів, що термічно зміцнюються:

1. Підвищення чистоти сплавів за основними металевими домішками (Fe і Si), тобто зниження в сплавах допустимого вмісту домішок заліза та кремнію. У більшості алюмінієвих сплавів за ГОСТ 4784-74 допускається до 0,5 % Fe та до 0,5 % Si. Зниження допустимого вмісту заліза та кремнію до 0,1...0,3 %, а ще краще до сотих часток відсотка призводить до різкого зменшення об'ємної частки нерозчинних інтерметалідних фаз [Al<sub>3</sub>Fe, α(Al–Fe–Si), α(Al–Fe–Si–Mn) та ін.] та значному підвищенню в'язкості руйнування. При цьому інші властивості сплавів ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$  і  $\sigma_{кр}$ , корозія, що розшаровує) змінюються несуттєво. У зв'язку з цим останніми роками почали застосовувати сплави підвищеної чистоти.

2. Застосування режимів старіння, які зумовлюють деяке перестарювання металу. Такі режими називають «пом'якшувальними режимами» старіння і для сплавів, що деформуються, позначають цифрами T2 і T3 (старіння на максимальну міцність позначають шифром T1, а загартування з

наступним природним старінням – T); T3 відповідає більш сильному перестарюванню, ніж T2. Пом'якшувальне старіння в порівнянні зі старінням на максимальну міцність, призводячи до часткового або повного порушення когерентності виділень зміцнювальних фаз і матриці і більш рівномірного їх розподілу, обумовлює деяке зниження міцності, але суттєве підвищення в'язкості руйнування, стійкості проти корозії під напругою та корозії, що розшаровує [7].

Термічною обробкою можна досягти великої різноманітності структур і в сплавах, що не мають фазових перетворень у твердому стані, але тільки в тому випадку, коли вихідний нерівноважний стан отримано або за лиття (у процесі нерівноважної кристалізації), або шляхом деформації. Для досягнення максимальної міцності для алюмінієвих сплавів широкого поширення набули три види термообробки: відпал, загартування та старіння, що дозволяють реалізувати збалансований комплекс механічних властивостей та термостійкості.

Прийнята наступна система позначень станів алюмінієвих сплавів, що деформуються, після зміцнювальної обробки:

T1 – штучне старіння у чистому вигляді. Дозволяє підвищити механічну міцність напівфабрикатів та виробів, особливо якщо надалі планується їх механічна обробка. При цьому такий вид обробки негативно позначається на корозійній та механічній стійкості дюралюмінію та по відношенню до нього використовується рідко.

T2 – відпал. Дозволяє зняти ливарні та термічні напруги в матеріалі, підвищує його пластичність і застосовується у випадку, коли заготовка буде оброблятися тиском в холодному стані.

T3 – загартування. Застосовується підвищення міцнісних властивостей сплавів та для забезпечення необхідної стійкості проти корозійного розтріскування.

T8: Стан, при якому за термічною обробкою на розчин слідує холодна обробка, а потім штучне старіння. Він застосовується до виробів, підданих холодній обробці, випрямленню або вирівнюванню для підвищення міцності.

T81: Він застосовується до виробів, які штучно зістарені після термообробки на розчин, при цьому міцність підвищується приблизно на 1 % деформації холодної обробки.

T87: Застосовується до виробів з деформацією холодної обробки близько 7 % для підвищення міцності після термообробки на розчин та подальшого штучного старіння.

T62: Застосовується до продуктів зі штучним старінням після термообробки в розчині у стані О або F. Він також застосовується до виробів, механічні властивості яких досягають стану T62

після термічної обробки оброблених продуктів будь-якого стану.

Не менш перспективним є шлях подальшого підвищення міцності, жароміцності, корозійної стійкості та інших експлуатаційних та технологічних характеристик за рахунок легування алюмінієвих сплавів металами, які мало розчиняються або практично не розчиняються в твердому алюмінії, але утворюють з алюмінієм різні інтерметалідні сполуки [8].

**Переваги сплаву 2219.** Розглянемо алюмінієвий сплав 2219. Перевагами сплаву 2219 є покращені механічні властивості основного металу та зварних конструкцій при температурах, що значно нижчі від нуля (до  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Сплав має хороші показники міцності на розрив і текучості, а також хороші властивості до втоми та руйнування при повзучості (до  $-315\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Він добре обробляється тиском. Ці властивості залишаються незмінними після термічної обробки. У Центрі Джорджа С. Маршала експериментально доведено, що алюмінієвий конструкційний сплав 2219 досить загартований, щоб дефекти, спричинені ядерною та космічною радіацією, суттєво не впливали на механічні та фізичні властивості як при кімнатній температурі навколишнього середовища, так і при підвищених температурах нижче накопичених доз приблизно  $10^{22}$  частинок  $\text{с/см}^2$  [9]. Можливість отримання дози такого порядку надзвичайно мала, за винятком випадків дії пульсарів у безпосередній близькості. Висока стійкість до підвищених температур, жорсткого вакууму, високоенергетичного випромінювання і мікрометеоритів, що впливають на характеристики поверхні сплаву 2219 шляхом процесів десорбції та ерозії, робить такий сплав дуже перспективним для використання в якості обшивки космічних кораблів.

Недоліки зазначеного металу полягають у наступному. Нагрів понад  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  призводить до сильного знеміцнення через огрублення основної фази зміцнювача  $\text{Al}_2\text{Cu}$ . Крім того, спосіб виробництва напівфабрикатів, що деформуються, зі злитків вимагає складної технології, що включає високотемпературний гомогенізуючий відпал, обробку тиском, нагрівання напівфабрикатів понад  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  під загартування, у воді і старіння, що істотно дорожчає вартість кінцевого виробу.

Слід зазначити широкий спектр можливостей для з'єднання елементів конструкцій, виготовлених з такого сплаву. Сплав 2219 демонструє найкращу зварюваність із алюмінієвих сплавів серії 2xxx, що пов'язано з відсутністю в ньому магнію і кремнію в якості легуючих елементів. Ці елементи утворюють потрібну та четвертинну евтектику з низькими температурами плавлення та таким чином збільшують інтервал плавлення сплаву. Ві-

домо, що широкий діапазон температур плавлення, як і присутність фаз з низькою температурою плавлення призводять до розтріскування зварного шва, цей недолік відсутній в сплаві 2219.

Зважаючи на велике значення коефіцієнта лінійного розширення та суттєвої усадки металу, що кристалізується, поряд з його низькими механічними властивостями вже при температурі  $236.85\ldots 246.85\text{ }^{\circ}\text{C}$  технологія складання та зварювання алюмінієвих сплавів повинна передбачати мінімальні зварювальні деформації та напруги. Процес зварювання та термічної обробки після зварювання впливає на деформаційні властивості листів сплаву 2219 [10, 11]. Мінімальні зварювальні деформації та напруги (у 2...4 рази менше ніж при аргонодуговому зварюванні) досягаються при однопрохідному електронно-променевому зварюванні великогабаритної конструкції, проведеному з певною послідовністю накладання швів [12]. У ситуаціях, коли загартування всієї великогабаритної конструкції не завжди допустимо через габарити конструкції та деформації, що виникають при термообробці застосування електронно-променевих швів малої ширини, незамінне.

Ці результати вказують на те, що 2219 є найбільш легко зварюваним і найменш чутливим до змін у процедурах зварювання з усіх високоміцних алюмінієвих сплавів, що піддаються термообробці. При повторній термічній обробці після зварювання сплав стабільно розвиває міцність, що дорівнює міцності на розрив основного металу. Відпустки T81 і T87 рекомендуються для вузлів, які залишаються в стані «як зварені». Для вузлів, які підлягають термічній обробці після зварювання, рекомендується загартувані F (без будь-якої додаткової обробки після виготовлення) через його меншу вартість. Інші характеристики, однак, є також задовільними. Рекомендована практика обробки після зварювання – T62 для максимальної міцності та зменшення жолоблення [13, 14].

**Алюмінієво-літєві сплави третього покоління.** В останні роки у світовій космонавтиці здійснено рішучий перехід на алюмінієво-літєві сплави. У порівнянні зі звичайними алюмінієвими сплавами, такими як сплав 2219, який широко застосовується в криогенних резервуарах космічних апаратів, а також у негерметичних конструкціях, алюмінієво-літєві сплави відрізняються вдалим поєднанням зниженої щільності з підвищеним модулем пружності, гарною зварюваністю, а також механічними властивостями, що перевершують властивості алюмінієвих сплавів, що не містять літій.

На властивості промислових сплавів впливають різноманітні чинники. Працездатність алюмінієво-літєвих сплавів визначається головним чином такими ресурсними характеристиками, як



швидкість зростання тріщини втоми, коефіцієнт інтенсивності напруг у вершині тріщини ( $K_c$ ,  $K_{Ic}$ ), малоциклова втомна довговічність, опір корозійному розтріскуванню, міжкристалітна корозія.

До найбільш важливих факторів, що надають великий вплив на рівень зазначених властивостей, належать:

- характер структури зерна: ступінь рекристалізації, анізотропії форми зерна, наявність та щільність виділень на межах зерен та субзерен, наявність прикордонних зон, вільних від виділень;
- холодна деформація розтягування між гартуванням і старінням напівфабрикатів;
- режим штучного старіння.

*Вплив структури зерна на властивості сплавів.* Напівфабрикати з переважно рекристалізованою структурою мають більш високі характеристики в'язкості руйнування і тріщиностійкості при декілька знижених властивостях міцності в порівнянні з нерекристалізованою структурою. Основним механізмом формування дрібнозернистої структури є рекристалізація.

*Вплив холодної деформації між загартуванням та старінням.* Значний ефект у підвищенні властивостей міцності, характеристик в'язкості руйнування і тріщиностійкості, опору корозії спостерігається на сплавах систем Al–Cu–Li і Al–Li–Mg–Cu при використанні регламентованої холодної деформації розтягуванням загартованих напівфабрикатів перед штучним старінням. В результаті такої обробки збільшуються щільність і дисперсність виділень гетерогенно зміцнюючих фаз, зменшується ширина прикордонних зон, вільних від виділень, розмір і кількість частинок стабільних фаз на межах.

*Вплив режимів старіння.* Алюмінієво-літєві сплави можуть бути зістарені до трьох станів: недостатньо зістарене (м'який режим), до максимальної міцності («пик» старіння) і перестареного. Щоб забезпечити необхідне поєднання міцності, пластичності, в'язкості і корозійної стійкості, розроблялися оптимальні режими старіння. Встановлено, що для більшості сплавів висока пластичність і в'язкість руйнування в поєднанні із середнім рівнем властивостей міцності досягаються після низькотемпературного старіння в м'якому режимі – недостатній стан. Однак найкраща корозійна стійкість забезпечується внаслідок перестарювання або старіння на максимальну міцність. Найкращий комплекс властивостей (механічні властивості при розтягуванні – в'язкість руйнування) отримано при поєднанні високої деформації (2...8 %) після гарту з низькотемпературним старінням.

При виборі температурно-часових режимів, що забезпечують отримання максимальних міцнос-

ті та твердості в промислових напівфабрикатах, враховуються в комплексі перераховані особливості поряд з економічними міркуваннями. При встановленні промислових режимів перевагу віддають таким, за яких забезпечується розтягнутий максимум на кривих старіння [15]. Як випливає з отриманих результатів, найкращий рівень механічних властивостей мають листи після штучного старіння при температурі 160 °C – межа міцності і умовна межа плинності вище не менше ніж на 25...35 МПа в порівнянні з іншими режимами, що досліджуються.

Алюмінієво-літєві сплави займають особливе положення серед інших старіючих алюмінієвих систем. Однак при цьому їм властивий недолік – низька пластичність у стані максимальної міцності. Для його подолання проведено багато досліджень впливу різних факторів на пластичність та характеристики руйнування алюмінієво-літєвих сплавів. З'ясовано, що причинами зниженої пластичності та в'язкості руйнування є неоднорідність деформації; наявність зон, вільних від виділень зміцнюючої фази, поява пір біля великих частинок і наявність природних домішок, таких як K, Na, S, H<sub>2</sub>, Fe, Si, що утворюють легкоплавкі евтектики по межах зерен, або виділення по них фаз. Перерахуємо основні заходи, запропоновані на вирішення цієї проблеми (підвищення пластичності). У першу чергу це легування алюмінієво-літєвих сплавів міддю та магнієм, які утворюють потрібні фази з літєм та викликають твердорозчинне зміцнення. Ці фази поряд з проміжною сприяють зміцненню сплавів при старінні і більш однорідної його деформації. Цій же меті служить і легування алюмінієво-літєвих сплавів цирконієм та скандієм, що дозволяє подрібнити мікроструктуру та забезпечити додаткове структурне зміцнення за рахунок утворення ультрадрібних частинок-інтерметалідів. За рахунок формування фази типу Al<sub>3</sub>Sc, що володіє досить високою невідповідністю параметрів решітки з матрицею, фази, що утворюються, ефективно блокують рух дислокацій [16]. Сучасні алюмінієві сплави багатокомпонентні, тому в разі їх легування скандієм слід враховувати вплив інших елементів, що зміцнює, і істотно коригувати режими термомеханічної обробки сплавів. Ще є спосіб двоступеневого старіння. Таке старіння викликає більш рівномірний розподіл фаз виділення та стабілізацію дисперсної структури.

Можливості підвищення міцності алюмінієвих сплавів традиційними шляхами за рахунок легування та старіння близькі до вичерпання. Однак слід сказати, що ще не вичерпано всіх можливих способів поліпшення пластичності сплавів Al–Li. Поєднання високих характеристик міцності та

в'язкості руйнування в цих сплавах забезпечується завдяки вмісту мінімальної кількості домішок, введенню невеликої кількості рідкісноземельних елементів-модифікаторів, додаванню срібла, зниженому вмісту літію. Сплав 2195, що містить срібло, застосовують для виготовлення баків ТКА, забезпечуючи близько 13 % зниження маси в порівнянні з раніше застосовуваним сплавом 2219 [17]. З іншого боку встановлено, що допоміжні добавки малих кількостей літію до алюмінієвих сплавів, що мають контрольовані кількості міді і магнію, забезпечують високу тріщиностійкість і високу міцність матеріалу, який також володіє еквівалентним або поліпшеним опором розвитку втомної тріщини в порівнянні з алюмо-мідно-магнієвими сплавами. Збільшення вмісту літію призводить до підвищення характеристик міцності алюмінію. При вмісті літію до 2 % міцність сплавів зростає без зниження пластичності, при подальшому збільшенні вмісту літію пластичність різко знижується. Літій при концентраціях до 0,8 % надає алюмінієвим сплавам підвищену стійкість до корозії, більшу, ніж у чистого алюмінію. Крім того, добавки літію забезпечують поліпшення ударної в'язкості за підвищеного рівня міцності. Отже, суттєво покращується поєднання властивостей тріщиностійкості та міцності. Цей ефект є несподіваним, оскільки відомо, що добавки літію знижують тріщиностійкість у традиційних алюмо-мідно-магній-літієвих сплавах [18].

У технічній літературі неодноразово зазначалося, що скандій є найбільш ефективним легуючим компонентом алюмінієвих сплавів. Основною перешкодою на шляху розширення його використання є висока вартість скандію, що вводиться до сплавів у вигляді лігатури Al–2% Sc. При використанні скандію, його введення в алюмінієві сплави підвищує їхню вартість у 5...10 разів. Що, як наслідок, призводить до падіння їх конкурентоспроможності щодо широко використовуваних в авіації алюмінієвих сплавів інших систем легування. Враховуючи дефіцит та високу вартість лігатури Al–Sc, для економії дефіцитного скандію та покращення властивостей алюмінієвих сплавів рекомендується їх легувати невеликими добавками скандію спільно з цирконієм у рівних кількостях [19]. Легування скандієм алюмінієво-літієвих сплавів слід здійснювати з обережністю, враховуючи, що ця добавка сприяє охрупченню сплавів та зниженню характеристик в'язкості руйнування.

З недоліків слід зазначити, що екстравагантні легуючі елементи сплавів цієї серії роблять їх непридатними для переробки в інші сплави. Дорожня літію змушує переробляти сплави з літієм тільки з самих себе [20]. Застосування літіє-

євих сплавів ускладнюється багатьма факторами виробничого та металургійного характеру. При пластичній деформації відбувається формування та розвиток смуг зсуву, можлива їх трансформація в тріщини, що зумовлює зрештою руйнування. Руйнування по смугах зсуву – це особливість алюмінієво-літієвих сплавів [21].

При визначенні області застосування Al–Li сплавів необхідно враховувати дані про стійкість твердого розчину та прожарювання. Найбільш поширеною помилкою є застосування сплаву з низькою стійкістю твердого розчину для виготовлення товстостінних напівфабрикатів, наприклад, штампувань складної форми. У цьому випадку на поверхні масивних елементів з'являються «темні плями», а в центральній частині – зони неповного гарту, що знижують характеристики статичної та циклічної тріщиностійкості.

**Обговорення проблем в області зварювання алюмінієвих сплавів.** Впровадження технологій зварювання є однією з найбільш високопродуктивних та економічних методів створення нероз'ємних з'єднань, що дозволяє виробляти елементи конструкцій, найбільш раціональні за формами та розмірами, що робить їх ремонтпридатними. Розглянемо існуючі проблеми зварювання конструкцій із алюмінієвих сплавів. Стримуючими факторами застосування алюмінієвих сплавів, що розглядаються, в зварних з'єднаннях є:

- значне знеміцнення (до 50 %) під впливом термічного циклу зварювання плавленням;
- низький опір утворенню гарячих тріщин;
- знижені значення пластичності та в'язкості руйнування у висотному напрямку;
- багатостадійна процедура виготовлення напівфабрикатів та/або виробів;
- необхідність легування присадних матеріалів дефіцитною та дорогою лігатурою для формування шва з підвищеними значеннями стійкості до утворення гарячих тріщин, а також механічних властивостей (особливо МЦВ) зварних з'єднань;
- за високого ступеня деформації в них з'являється схильність до крихкості.

Для запобігання виникненню тріщин та інших дефектів у зварних швах при зварюванні сплавів застосовуються наступні технологічні рішення:

- створення такої структури, яка дає змогу суттєво подрібнити розмір зерна (зокрема, за допомогою застосування електронно-променевих технологій);
- обмеження проникнення в зварний шов шкідливих домішок, таких як водень (H);
- регулювання процесу кристалізації при використанні способів зварювання, що характеризуються мінімальною погонною енергією;
- легування шва.

Загальною закономірністю всіх алюмінієвих сплавів є утворення зони знеміцнення, розмір якої залежить від природи сплаву, його хімічного складу і тепловкладення при зварюванні. При отриманні зварного з'єднання з необхідними параметрами глибини та ширини шва зазвичай висувається і вимога мінімізації зони термічного впливу (ЗТВ), з метою мінімізації погіршення фізико-механічних властивостей внаслідок рекристалізації [22]. При зварювальному нагріванні має місце широка гама структурних та фазових перетворень, включаючи подальший розпад твердого розчину та його повторне утворення. Це призводить до того, що різні ділянки ЗТВ перебувають у стані повернення, штучного старіння, часткового відпау, повторного загартування. Від ступеня розвитку того чи іншого процесу залежать властивості зварної сполуки, а також можливість зміцнення при повторному штучному старінні і, відповідно, рівень властивостей по відношенню до вихідного стану [23].

Металографічні дослідження показують, що руйнація металу шва та пришовних зон відбувається внаслідок зміни вихідної структури напівфабрикатів. При ЕПЗ і, можливо, лазерному зварюванні такі зміни виражені меншою мірою, завдяки чому забезпечується більш високий рівень досліджених характеристик зварних сполук. До переваг електронно-променевого процесу зварювання алюмінієвих сплавів слід віднести можливість металургійного впливу на зварювальну ванну з мінімальним легуванням шва, завдяки чому зварні з'єднання за теплофізичними властивостями виявляються близькими до основного металу. Структура зварного шва характеризується в 4...5 разів дрібнішим зерном порівняно з основним металом, і в цьому полягає їхня основна відмінність. Крім дрібної рівноосної структури зерен спостерігається і рівномірний розподіл міді в матриці. Має місце також велика щільність та дисперсність надлишкових фаз, що обумовлено високими швидкостями кристалізації металу шва. Збільшення ступеня попередньої деформації перед загартуванням призводить до зменшення розмірів рекристалізованого зерна, що утворюється в результаті наступного загартування, що забезпечує вищі механічні властивості.

При зварюванні важливим є процес формування шва однорідного складу, що забезпечує високу якість зварних з'єднань, необхідні механічні властивості та мінімізацію залишкових напруг. Для забезпечення відповідності характеристик матеріалу, що зварюється і металу шва найчастіше рекомендують використовувати присадний матеріал того ж складу, що і основний, або близький до нього. Зі сплавами системи Al–Cu–Li такий під-

хід не є доцільним через низький опір утворенню гарячих тріщин. Тому для цього класу сплавів у ФДУП «ВІАМ» розроблено присадні матеріали на основі сплаву системи Al–Cu з добавками ефективних модифікаторів, у тому числі з рідкісноземельними металами (РЗМ) [24]. Дослідження з оптимізацію кількості модифікаційних добавок, що вводяться в сплав, проводяться для умов промислового виробництва, де швидкості кристалізації злитків невисокі та надалі вони піддаються обробці тиском (пресування, екструзія, прокатка). У випадку з металом зварного шва ситуація дещо інша. Шов має литу структуру, яка надалі не піддається обробці тиском, а швидкості кристалізації розплаву на 1...2 порядку вищі, ніж при промислому виробництві сплавів. У роботі [25] зазначено, що застосування висококонцентрованих джерел енергії, таких як електронний промінь, дозволить оптимізувати кількість добавок, що модифікують (скандію), введених в сплав. Стверджується, що у цьому випадку підвищення механічних властивостей металу швів забезпечуватиметься за рахунок подрібнення зерна та твердорозчинного зміцнення литого металу.

Пористість у зварних з'єднаннях, виконаних ЕПЗ, у ряді випадків може бути серйозною перешкодою для ефективного використання цього способу зварювання в промисловості. Основною причиною пористості вважається стрибкоподібне зменшення розчинності водню в металі шва при затвердінні (кристалізації). Поява такої пористості зазвичай є наслідком грубих порушень оптимальних умов зварювання, включаючи підготовку основного металу та зварювальних дротів, а також високого вмісту газів у металі, що зварюється. Усунення такої пористості утруднено навіть при багаторазовому перепаї шва.

Значно менше труднощів викликає зварювання з наступною зміцнювальною термообробкою, що забезпечує рівномірність металу зварного з'єднання та основного металу. Можливе проведення зварювання сплаву в гарячедеформованому стані або після загартування з проведенням повторної термозміцнювальної обробки. При цьому збільшується міцність зварної сполуки, але зменшується пластичність.

При ЕПЗ термічно зміцнюваних сплавів алюмінію особливо помітні переваги цього способу порівняно з дуговим зварюванням. Значною мірою отримання щільних швів забезпечується при легуванні зварювальної ванни елементами, що знижують розчинність газів у рідкому металі або зв'язують їх у стійкі сполуки. При цьому подача легуючих елементів у зварювальну ванну здійснюється різними способами: через присадний дріт, що подається під електронний промінь



у процесі зварювання, або через металеву фольгу або пластини, що попередньо вставляються в зварювальний стик, а також напилюванням легуючих елементів на кромки, що зварюються, або нанесенням металоорганічного з'єднання [26].

Характерно, що алюмінієво-літєві сплави за рахунок поєднання високих питомої міцності та питомого модуля пружності, забезпечуючи отримання міцних швів, як правило, не задовольняють вимогам рівномірності зварних з'єднань. Як відомо, коефіцієнт міцності таких матеріалів після аргонодугового зварювання зазвичай становить 0,5...0,65 від тимчасового опору розриву основного матеріалу. Отримання рівномірності основного металу і зварного з'єднання може досягатися за рахунок посилення зони зварювання або додаткового нагартування. Для компенсації втрати міцності при цьому та забезпечення рівномірності зварних з'єднань з основним металом стик розташовують на ділянці з потовщеними кромками, що зварюються. Потовщення зазвичай становить до 100 % товщини металу, що зварюється, а ширина потовщеної ділянки завжди повинна перевищувати ширину зони термічного впливу ЗТВ. Це суттєве зростання маси зварних конструкцій. З'єднання ж, виконані ЕПЗ, мають тимчасовий опір розриву на 15...25 % вище, а ширину ЗТВ 2...3 рази менше, ніж за дугових способів. Це дозволяє значно зменшити масові характеристики зварювальних конструкцій. Зварювання алюмінієвих сплавів електронним променем можна здійснити у всякому положенні та в різних просторових положеннях без застосування підкладних або формуючих пристроїв, оскільки внаслідок високої теплопровідності цих сплавів зварювальна ванна має малий об'єм рідкого металу. Це важливо при зварюванні конструкцій, що вимагають гарантоване проплавлення стику на всю товщину за відсутності доступу до зворотного боку стику. Ударна в'язкість металу шва на алюмінієвих сплавах завжди вища, ніж у основного металу, а умовна межа плинності практично зберігається на рівні цих властивостей основного металу. Тимчасовий опір розриву із збільшенням кількості проходів знижується на 10...30 МПа незалежно від вихідного стану матеріалу до зварювання, навіть на відпаленому матеріалі [12].

Вплив початкового відпустку перед зварюванням та обробки після зварювання на міцність та подовження зварних з'єднань залежить і від їх товщини [27–30]. Як основний метал, так і міцність зварного шва зростають зі зменшенням подовження. Руйнування відбувається у зоні термічного впливу зварного шва доти, як у основному металі відбудеться будь-яке значне подовження.

Підсумовуючи можна відзначити, що для алюмінієвих сплавів широкого поширення набули три

основних види термічної обробки: відпал, загартування, термомеханічна обробка та старіння як способи покращення функціональних властивостей. Застосування термічної обробки (загартування + штучне старіння) після зварювання забезпечує вирівнювання зеренної структури зварного з'єднання при рекристалізації та зміну морфології виділень по межах зерен, що підвищує міцність зварних з'єднань до 0,9 від міцності основного матеріалу. Незважаючи на деяке зниження показників пластичності, істотні переваги нових сплавів по жорсткості і тимчасовому опору розриву очевидні. Однак при застосуванні літєвих сплавів помічено, що досягнення високих властивостей міцності алюмінієвих сплавів найчастіше йде на шкоду їх технологічності.

Надалі розробка та впровадження сплавів, що мають суттєво вищі міцнісні характеристики при збереженні технологічності, дозволить ще більш підвищити надійність та ресурс конструкцій, знизити їхню масу та металомісткість.

Таким чином, виготовлення високотехнологічних зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів передбачає два взаємопов'язані напрями досліджень: створення нових високотехнологічних сплавів, а також розробку різних технологічних процесів їхнього з'єднання з використанням сучасних технологій зварювання, що, в кінцевому підсумку, визначає можливість створення перспективних виробів авіакосмічної промисловості.

## Висновки

1. Загалом алюмінієві сплави, що зварюються, залишаються основними конструкційними матеріалами для авіа- та космічної промисловості. Їх застосування забезпечує, при суттєвому зниженні маси, зростання вагової ефективності, підвищення міцності та надійності конструкцій. З іншого боку, підвищення зазначених характеристик базується на ускладненні хімічного складу, режимів термічної обробки та інших технологічних прийомах, що призводять до зниження пластичних властивостей матеріалів.

2. Результати проведеного літературного огляду свідчать, що в даний час металознавцями створені оригінальні композиції складнолегованих алюмінієвих сплавів різних систем легування з мікродобавками ефективних модифікуючих елементів типу РЗМ, які відрізняються вищими характеристиками технологічності та міцності.

3. Сплави третього покоління систем Al–Mg–Li–Zr та Al–Cu–Li–Zr, незважаючи на низку технологічних труднощів, є перспективними матеріалами в авіабудуванні. Але при всій технологічності використання алюмінієво-літєвих сплавів в авіакосмічній галузі не слід забувати про



досить високу токсичність зварювання цих сплавів для людини.

4. Облік всіх наведених факторів у сукупності забезпечують досягнення не тільки підвищеного рівня жароміцних та міцності сплавів, їх малої анізотропії, а й добру технологічність. При виготовленні зварних виробів кріогенного призначення літальних апаратів алюмінієвий сплав 2219 на даний момент залишається найкращим вибором серед дисперсійно-твердіючих сплавів.

## Список літератури

- Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник*. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, Коминтех.
- (2018) *Справочник технического специалиста по техническому обслуживанию авиации – Планер. Т.1. Министерство транспорта США, Служба летных стандартов Федерального управления гражданской авиации*, Оклахома-Сити, 2018 г. URL: <http://www.faa.gov>.
- Davis J.R. (1993) *Aluminum and aluminum alloys*. ASM Specialty Handbook, ASM International; 1993 Дэвис Дж.Р. Алюминий и алюминиевые сплавы. *Справочник по специальностям ASM*, ASM International.
- Стефанович В.А., Позняк И.Г., Стефанович А.В. (2021) *Основы легирования конструкционных материалов» для студентов специальности: 1-36 01 02 «Материаловедение в машиностроении»*. Белорусский национальный технический университет. Кафедра «Материаловедение в машиностроении». Минск.
- Сетьков О.А. (2013) Алюминиевый сплав 1201 в конструкции космического корабля «Буран». *Авиационные материалы и технологии. Спец. выпуск*, 15–18.
- Бер Л.Б. (2013) О стадиях старения алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 4, 66–76.
- Меркулова Г.А. (2008) *Металловедение и термическая обработка цветных сплавов*. Уч. пособие. Красноярск, Сиб. федер. ун-т
- Маркашова Л.И., Григоренко Г.М., Лозовская А.В. и др. (2006) Влияние добавок скандия на структурно-фазовое состояние металла шва соединений алюминиевых сплавов после термообработки. *Автоматическая сварка*, 6, 9–14.
- Овчинников В.В., Дриц А.М., Крымова Т.В. (1997) Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминий-литиевого сплава 1460. *Сварочное производство*, 12, 26–29.
- Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология.
- Рабкин Д.М., Игнатьев В.Г., Довбищенко И.В. (1982) *Дуговая сварка алюминия и его сплавов*. Машиностроение.
- Дударь Л.А. (1995) *Особенности электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов, используемых в производстве летательных аппаратов: учеб. пособие.*, Самарский. гос. аэрокосмический ун-т им. С.П. Королева. Самара.
- Луц А.Р., Суслина А.А. (2013) *Алюминий и его сплавы: Учебное пособие*. Самара, Самар. гос.техн.ун-т.
- Довбищенко И.В., Ищенко А.Я., Машин В.С. (1997) Применение гелия при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 2, 14–19.
- TALAT Lecture 1204 Precipitation Hardening 47 pages, 60 Figures prepared by M H Jacobs' Interdisciplinary Research Centre in Materials The University of Birmingham, UK Date of Issue: 1999. EAA - European Aluminium Association TALAT 1204.
- Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. (2017) Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы. *Авиационные материалы и технологии*, 195–211. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211
- Телешов В.В., Головлева А.П. (2011) Результаты исследований высокопрочных алюминиевых сплавов традиционных систем легирования. *Технология легких сплавов*, 1, 108–141.
- Способ повышения ударной вязкости алюминий-литиевых сплавов при криогенных температурах. Бейбел Хенри У. (US), Санкаран Кришнан Дк. (US) Сова, Брайан Дж. (US), 2012–2023.
- Захаров В.В., Фисенко И.А. (2013) Об экономии скандия при легировании им алюминий-литиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 4, 52–60.
- Шмитц К. (2014) *Справочник по переработке алюминия. Механическая подготовка, металлургическая обработка, термообработка*.
- Лимаренко А.Л., Ситало В.Г., Литвишко Т.Н. (2002) Свойства и структура высокопрочного свариваемого алюминий-литиевого сплава 1460. Державне конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля. *Космічна наука і технологія*. Додаток, 8, 1, 123–126.
- Литвинов В.В., Ярмилко А.В. (2013) Многопараметрическое адаптивное управление технологическим процессом электронно-лучевой сварки. *Математичні машини і системи*, 2, 130–138.
- Гуреева М.А., Грушко О.Е., Овчинников В.В., Шиганов И.Н. (2007) *Механические свойства и структура сварных соединений алюминий-литиевого сплава В-1341 в зависимости от режимов лазерной сварки*. ВИАМ, ноябрь.
- Скупов А.А., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. (2016) *Новые присадочные материалы для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов*, 9, ВИАМ.
- Федорчук В.Е., Кушнарева О.С., Алексеев Т.А., Фальченко Ю.В. (2014) Особенности легирования скандием металла швов сварных соединений высокопрочных алюминий-литиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, 5, 30–34.
- Кривцун И.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Ермолаев Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання: підручник*. Патон Б.Є. (ред.). Миколаїв, НУК.
- Патон Б.Е. (1995) Совершенствование способов сварки один из путей повышения качества и экономичности сварных конструкций. *Автоматическая сварка*, 11, 3–11.
- Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М. и др. (1984) *Промышленные алюминий-литиевые сплавы: 2-е изд., перераб. и доп.* Москва, Металлургия.
- Рабкин Д.М., Игнатьев В.Г., Довбищенко И.В. (1975) *Состояние и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в сварных конструкциях*. Киев, Наукова думка.
- Колобнев Н.И., Фридляндер И.Н. (1994) *Алюминий-литиевые сплавы новый этап снижения массы летательных аппаратов*. Авиационные материалы на рубеже XX-XXI веков. Научно-технический сборник. Москва, ГП ВИАМ, 89–92.

## References

- Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application): Refer. Book*. Ed. By I.N. Fridlyander. Kyiv, Komintekh [in Russian].
- (2018) *Aviation maintenance technician handbook. Airframe Vol. 1 - U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration Flight Standards Service, Oklahoma City* -2018. URL: <http://www.faa.gov>
- Davis J.R. (1993) *Aluminum and aluminum alloys*. ASM Specialty Handbook, ASM International.
- Stefanovich, V.A., Poznyak, I.G., Stefanovich, A.V. (2021) *Fundamentals of alloying structural materials*. Belarussian NTU, Minsk [in Russian].
- Setyukov, O.A. (2013) Aluminium alloy 1201 in the design of Buran spacecraft. *Aviats. Materialy i Tekhnologii. Spec. Issue*, 15–18 [in Russian].
- Ber, L.B. (2013) On aging stages of aluminium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 4, 66–76 [in Russian].
- Merkulova, G.A. (2008) *Metals science and heat treatment of nonferrous alloys. (здесь источник??)*
- Markashova, L.I., Grigorenko, G.M., Lozovskaya, A.V. et al. (2006) Effect of scandium additions on structure–phase state of weld metal in aluminium alloy joints after heat treatment. *The Paton Welding J.*, 6, 7–11.
- Ovchinnikov, V.V., Drits, A.M., Krymova, T.V. (1997) Technological features of the production of aircraft welded structures from aluminium-lithium alloy 1460. *Svaroch. Proizvodstvo*, 12, 26–29 [in Russian].

10. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M., Bernadsky, V.N., Makovetskaya, O.K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
11. Rabkin, D.M., Ignatiev, V.G., Dovbishchenko, I.V. (1082) *Arc welding of aluminium and its alloys*. Mashinostroenie [in Russian].
12. Dudar, L.A. (1995) *Features of electron beam welding of aluminium alloys used in the production of aircrafts: Manual*. Samara Gos. Aerokosm. Un-t. Samara [in Russian].
13. Luts, A.R., Suslina, A.A. (2013) *Aluminium and its alloys: Manual*. Samara GTU, Samara [in Russian].
14. Dovbishchenko, I.V., Ishchenko, A.Ya., Mashin, V.S. (1997) The use of helium in consumable electrode welding of aluminium alloys. *Avtomatich. Svarka*, 2, 14–19 [in Russian].
15. TALAT Lecture 1204: Precipitation Hardening Prep. by M. H. Jacobs. Interdisciplinary Research Centre in Materials, The University of Birmingham, UK Date of Issue: 1999. EAA - European Aluminium Association TALAT 1204.
16. Antipov, V.V., Klochko, Yu. Yu., Romanenko, V.A. (2017) Modern aluminium and aluminium alloys. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, 195–211 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211
17. Teleshov, V.V., Golovlyova, A.P. (2011) Results of the investigations of high-strength aluminium alloys of conventional alloying system. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 1, 108–141 [in Russian].
18. Beibel Henry W. (US), Sankaran Krishnan Dk. (US) Owl, Brian J. (US), Pat. 2012-2023. *Method for increasing the impact strength of aluminium-lithium alloys at cryogenic temperatures*.
19. Zakharov, V.V., Fisenko, I.A. (2013) On saving scandium in its doping to aluminium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 4, 52–60 [in Russian].
20. Schmitz, C. (2014) *Handbook on Aluminium Recycling. Mechanical Preparation, Metallurgical Processing, Heat Treatment* [in Russian].
21. Limarenko, A.L., Sitalo, V.G., Litvishko, T.N. (2002) Properties and structure of high-strength welded aluminium-lithium alloy 1460. State Design Bureau Yuzhnoe. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, Dodatok, 8(1), 123–126 [in Russian].
22. Litvinov, V.V., Yarmilko, A.V. (2013) Multiparameter adaptive control of the technological process of electron beam welding. *Matematychni Mashyny i Systemy*, 2, 130–138 [in Russian].
23. Gureeva, M.A., Grushko, O.E., Ovchinnikov, V.V., Shiganov, I.N. (2007) *Mechanical properties and structure of welded joints of aluminium alloy V-1341 depending on laser welding modes*. VIAM, November [in Russian].
24. Skupov, A.A., Ioda, E.N., Panteleev, M.D. (2016) New filler materials for welding of high-strength aluminium-lithium alloys. VIAM, 9 [in Russian].
25. Fedorchuk, V.E., Kushnaryova, O.S., Alekseenko, T.A., Falchenko, Yu.V. (2014) Peculiarities of alloying of weld metal of high-strength aluminium alloy welded joints with scandium. *The Paton Welding J.*, 5, 28–32.
26. Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Yu., Yermolaev, G.V. (2017) *Special methods of welding: Manual*. Ed. by B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Russian].
27. Paton, B.E. (1995) Improvement of welding methods is one of the ways to improve the quality and efficiency of welded structures. *Avtomatich. Svarka*, 11, 3–11 [in Russian].
28. Alieva, S.G., Altman, M.B., Ambartsumyan, S.M. et al. (1984) *Commercial aluminium alloys*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
29. Rabkin, D.M., Ignatiev, V.G., Dovbishchenko, I.V. (1975) *State-of-the art and prospects of application of aluminium alloys in welded structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
30. Kolobnev, N.I., Fridlyander, I.N. (1994) *Aluminium-lithium alloys as a new stage for weight reducing of aircrafts. Aviation materials at the threshold of 20-21 centuries: Scientific and Technical Collection*. Moscow, GP VIAM, 89–92 [in Russian].

## ANALYSIS OF THE PROPERTIES AND FEATURES OF HIGH-STRENGTH DEFORMABLE ALUMINIUM ALLOYS OF Al-Li, Al-Cu-Mn SYSTEMS USED IN THE AEROSPACE INDUSTRY IN MANUFACTURE OF WELDED STRUCTURES (Review)

V.I. Zagornikov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: zagornikov@technobeam.com.ua

The paper presents the main directions of development in the field of promising aluminium alloys. New generation alloys with improved chemical composition, technologies of production and heat treatment of semi-finished products are considered. The question of the relationship between the structure of the alloys and their operational properties, the influence of heat treatment modes and alloying on mechanical properties and weldability of aluminium alloys in order to obtain the specified predicted operational properties is highlighted. The results of the use of aluminium alloys in aviation and space technology are described. A review of industrial deformable alloys of Al-Li and Al-Cu-Mn system, and comparative characteristics of weldability of various promising aluminium alloys (1460, V-1469, 1201 and their analogues 2090, 2195, 2219) is conducted. 30 Ref., 1 Tabl.

**Key words:** heat treatment, weld alloying, weldability assessment, measures to prevent porosity, promising methods of producing welded joints, electron beam welding (EBW)

Отримано 01.11.2023

Отримано у переглянутому вигляді 10.12.2023

Прийнято 27.12.2023

### НОВА КНИГА



**Позняков В.Д. Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій.** — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 232 с.

У науково-технічному посібнику розглянуто питання щодо впливу різних факторів на структуру та механічні властивості металу швів і зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних низьколегованих та легованих високоміцних сталей з границею текучості 350...700 МПа. Розглянуто проблеми стосовно стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин і продемонстровано, як на цей процес впливають залишкові напруження, хімічний склад, структура, вміст дифузійного водню в наплавленому металі та технологічні параметри зварювання. Запропоновано способи зменшення рівня залишкових напружень у характерних для ремонтного зварювання жорстко закріплених з'єднаннях великої товщини, які реалізуються шляхом оптимізації технології зварювання. Розглянуто питання щодо впливу ремонтно-зварювальних технологій і змінюючих обробок на механічні властивості та циклічну довговічність зварних з'єднань високоміцних сталей. Викладено загальні рекомендації стосовно способів видалення дефектів і підготовки з'єднань до ремонтного зварювання, вибору зварювальних матеріалів, температури попереднього підігріву та режимів і техніки зварювання високоміцних сталей. Наведено приклади застосування ремонтно-зварювальних технологій при відновленні цілісності та працездатності металевих конструкцій кар'єрних екскаваторів і автосамоскидів великої потужності, резервуарів для переробки нафти, суцільнолитих масивних базових вузлів пресового обладнання та дробарок.

Посібник призначено для наукових працівників дослідних установ та ВУЗів, аспірантів, студентів, інженерних працівників, що спеціалізуються у галузі виготовлення і ремонту зварних металевих конструкцій тривалої експлуатації. Бібліогр. 126, табл. 54, рис. 159.

Замовлення на книги надсилати до редакції журналу.