

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет

(повне найменування факультету)

інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій

(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

Магістр

(ступінь вищої освіти)

на тему «Підвищення зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів»

(назва теми)

Виконав: студент 2 курсу магістратури,
групи ІФ-312м

Спеціальності 131 «Прикладна механіка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Технології та устаткування зварювання

Керівник



Д. К. Гусак


(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)



О. В. Лютова

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент



О. А. Мітяєв

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023_р

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет інженерно-фізичний

Кафедра інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»


(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) технології та устаткування зварювання

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри О. Є. Капустян


14 «грудня» 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

ГУСАКУ Дмитру Костянтиновичу

(ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) підвищення зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів

керівник проєкту (роботи) канд. техн. наук, доцент, ЛЮТОВА Ольга Валеріївна

(науковий ступінь, вчене звання, ПРІЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затвержені наказом закладу вищої освіти від «15» грудня 2023 року № 509

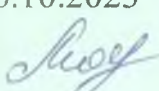
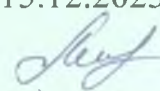
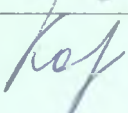
2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 20.12.2023

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) дані випробувань зі зварюваності вторинного алюмінієвого сплаву АК9М2

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) вступ (обґрунтування актуальності досліджень); розділ 1(літературний огляд), розділи 2 та 3 (розробка методики зварювання вторинних алюмінієвих сплавів, здійснення контролю якості зварний з'єднань); розділ 4 (аналіз отриманих результатів)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) презентація з кількістю слайдів не менше 10, обов'язково графічне відображення впливу досліджуваних факторів на зварюваність сплаву АК9М2

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Технічний	ЛЮТОВА О. В., доцент	16.10.2023 	15.12.2023 
Нормоконтроль	КОРНІЄНКО О. Б.		

7. Дата видачі завдання «16» жовтня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1.	Вступ, розділ 1	22.11.2023	
2	Розділ 2	30.11.2023	
3	Розділ 3	01.12.2023	
4	Розділ 4	15.12.2023	
5	Презентація	20.12.2023	

Студент(ка) групи ІФ-312м

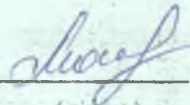


(підпис)

Дмитро ГУСАК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи)



(підпис)

Ольга ЛІТОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Алюміній та алюмінієві сплави. хіміко-металургійні та технологічні особливості	8
1.1 алюміній.....	8
1.2 алюмінієві сплави.....	9
1.3 поверхнева оксидна плівка.....	11
1.4 зварюваність алюмінієвих сплавів.....	12
1.5 хіміко-металургійні особливості зварювання алюмінієвих сплавів..	13
1.6 типи зварних з'єднань алюмінієвих сплавів.....	18
1.7 технологія отримання вторинних алюмінієвих сплавів.....	19
1.8 рідко-тверде формування деталей кінцевої форми та виливків.....	24
1.9 композиційні конструкційні матеріали на базі вторинних алюмінієвих сплавів	30
2 Застосовувані методи зварювання.....	39
2.1 зварювальні матеріали для алюмінієвих сплавів.....	39
2.1.1 гази та газові суміші.....	39
2.1.2 електроди, що не плавляться.....	40
2.1.3 присадочні матеріали.....	41
2.2 загальна концепція зварювання тiг. устаткування для зварювання тiг	45
2.3 зварювання тiг з подачею підігрітого дроту присадки.....	47
2.3.1 режими подачі присадного дроту.....	47
3 Контроль якості зварних з'єднань.....	48
3.1 вимоги до методів та контролю зварних з'єднань.....	48
3.2 вибір методів та обсягу контролю зварних з'єднань	58
3.3 вимоги до якості зварних з'єднань	59
4 Дослідження зварюваності вторинних алюмінієвих сплавів	61
4.1 технологічні особливості зварювання плавленням алюмінієвого сплава В91(1913).....	61
4.2 зварюваність сплаву АК9М2.....	71
Висновки	80

Список використаних джерел	80
----------------------------------	----

ВСТУП

Металеві сплави, виготовлені з алюмінію, часто використовуються в різних продуктах, від сучасних систем, таких як реактивні літаки, до побутової техніки. Зварювання є основним методом з'єднання алюмінієвих сплавів у цих конструкціях.

Зварювання алюмінію є складним багатоступеневим технологічним циклом. Так як необхідне хороше очищення кромки, що зварюється, і видалення шару оксидної плівки що перешкоджає зварюванню. Крім цього, алюміній є досить рідким матеріалом, що вимагає від зварювальника високої кваліфікації в процесі зварювання. Також при зварюванні алюмінію висока ймовірність виникнення пір у зварних з'єднаннях та можлива наявність гарячих та холодних тріщин. Звідси випливає, що для отримання якісного зварного з'єднання необхідно врахувати багато нюансів, які дуже впливають на кінцевий результат зварного з'єднання. Отримання якісного зварного з'єднання з алюмінію та його сплавів це складний технологічний процес.

Метою роботи є розгляд технологій та досліджень по підвищенню продуктивності та якості зварних з'єднань вторинних алюмінієвих сплавів.

1 АЛЮМІНІЙ ТА АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ. ХІМІКО-МЕТАЛУРГІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ

1.1 Алюміній

Алюміній - один із найлегших металевих конструкційних матеріалів, його густина становить $2,7 \text{ г/см}^3$. Чистий алюміній має невисоку температуру плавлення ($657 \text{ }^\circ\text{C}$), низьку твердість, високу пластичність, хорошу електропровідність (60 % електропровідності міді). Алюміній має високу корозійну стійкість до впливу води та кислот. Корозійні властивості пояснюються високою хімічною активністю алюмінію, він швидко окислюється з утворенням поверхневої плівки Al_2O_3 , яка має високу щільність, твердість та температуру плавлення. Однією з найбільш цінних властивостей алюмінію - висока пластичність та гарна деформованість; він добре піддається обробці тиском у холодному та гарячому стані [1].

Корозійна стійкість алюмінію та його сплавів визначається наявністю на поверхні виробів щільної окисної плівки. Алюміній абсолютно нетоксичний, чим визначається широке застосування їх у харчовій промисловості. Він дуже стійкий в окисних середовищах. У зв'язку з цим його використовують у судинах для транспортування та одержання азотної кислоти тощо. Як правило, чим менше домішок у технічному металі, тим вища його корозійна стійкість [1, 2].

Чистий алюміній рідко застосовується як конструкційний матеріал (за винятком використання як електропровідний матеріал в електротехнічній промисловості та в окремих випадках у хімічній та харчовій промисловості), що пов'язано з його низькою міцністю. Але в результаті сплавлення з магнієм, міддю, цинком, кремнієм та іншими елементами алюміній здатний утворювати різноманітні сплави, що мають достатню міцність і хороші технологічні властивості [2].

1.2 Алюмінієві сплави

Алюмінієві сплави використовують у зварних конструкціях різного призначення. Основними перевагами їх як конструкційних матеріалів є мала щільність, висока питома міцність, висока корозійна стійкість. Як конструкційні матеріали в основному використовують напівфабрикати з алюмінієвих сплавів. За показниками відношення міцності та плинності до щільності високоміцні алюмінієві сплави значно перевершують чавун, низьковуглецеві та низьколеговані сталі, чистий титан і поступаються лише високолегованим сталям підвищеної міцності та сплавам титану.

Алюмінієві сплави поділяють на ливарні та деформовані за межі розчинності елементів у твердому розчині. У зварних конструкціях переважно використовують напівфабрикати (листи, профілі, труби та ін.) з деформованих сплавів [3]. Концентрація легуючих елементів деформованих сплавів менша.

Алюмінієві сплави поділяють на ливарні та деформовані за межі розчинності елементів у твердому розчині. У зварних конструкціях переважно використовують напівфабрикати (листи, профілі, труби та ін.) з деформованих сплавів. Концентрація легуючих елементів деформованих сплавів менше межі розчинності, і при нагріванні ці сплави можуть бути переведені в однофазний стан, при якому забезпечується їхня висока деформаційна здатність. Більшість елементів, що входять до складу алюмінієвих сплавів, мають обмежену розчинність, що змінюється з температурою [3, 4]. Це повідомляє сплави здатність зміцнюватися термічною обробкою. У зв'язку з цим сплави, що деформуються, поділяють на сплави, не зміцнювані термічною обробкою з концентрацією легуючих елементів нижче межі розчинності при 20 °С), і сплави, що зміцнюються термічною обробкою (мають концентрацію легуючих

елементів понад цю межу). До деформованих сплавів, що не зміцнюються термічною обробкою, відносяться:

Таблиця 1.1 – Технічний алюміній АД0, АД1 [3]

сплав Al-Mn	АМц (Al + 1,3 % Mg)
сплави Al-Mg	АМг1, АМг2, АМг3, АМг5, АМг61

У зварних з'єднаннях ці сплави здатні зберігати до 95 % міцності основного металу за високої пластичності та високої корозійної стійкості.

Термічно зміцнювані алюмінієві сплави, що деформуються, можуть бути розділені на кілька груп.

Таблиця 1.2 – Термічно зміцнювальні сплави, що деформуються [4]

сплави Al-Cu-Mg (дюралюміні)	Д1, Д16, Д19, ВАД1, ВД17, М40, Д18
сплави Al-Mg-Si та Al-Cu-Mg-Si (авіалі)	АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АК6-1, АК8
сплави Al-Cu-Mg-Fe-Ni	АК2, АК4, АК4-1
сплави Al-Cu-Mn	Д20, Д21
сплави Al-Zn-Mg-Cu	В93, В95, В96, В94
сплави Al-Mg-Zn	В92, В92Ц
сплави Al-Cu-Mn-Li-Cd	ВАД 23

З перерахованих сплавів до зварюваних відносяться: АТ, АД1, АМц, АМг, АМг3, АМг5В, АМг6, АВ, АД31, АД33, АД35, М40, Д20, ВАД1, В92Ц.

Найбільша частка алюмінієвих сплавів знаходить своє застосування в пакувальній промисловості та транспортному машинобудуванні, тобто там, де найбільш важливими є проблеми захисту харчових продуктів від корозії та зниження маси конструкцій. Друге місце із застосування алюмінієвих сплавів - будівництво. Азія та Північна Америка споживають сумарно більше половини всіх алюмінієвих сплавів, що обумовлено масовим будівництвом житлових та адміністративних будівель та бурхливим розвитком транспортного машинобудування.

1.3 Поверхнева оксидна плівка

При 1000 °C реакція окислення алюмінію може протікати при дуже низькому парціальному тиску кисню. Оксид алюмінію Al_2O_3 , що утворюється, покриває поверхню деталей щільною і міцною плівкою. При 20 °C процеси окислення алюмінію протікають за параболічним законом. Оксидна плівка погано проводить електричний струм. Важливою характеристикою оксидної плівки алюмінію є її здатність адсорбувати гази, особливо водяну пару. Волога утримується оксидною плівкою до температури плавлення металу [4].

Коефіцієнт теплового розширення оксидної плівки майже в 3 рази менший за коефіцієнт розширення алюмінію, тому при нагріванні металу в ній утворюються тріщини. За наявності в алюмінії добавок, що легують, склад оксидної плівки може істотно змінюватися [4, 5, 6]. Виникаюча складна оксидна плівка в більшості випадків є більш пухкою, гігроскопічною і має гірші захисні властивості.

Ще однією особливістю оксидної плівки алюмінію є її висока щільність, внаслідок чого в розплавленому металі зварювальної ванни вона опускається на

дно і згодом може спричиняти дефекти шва – внутрішніх кристалізаційних тріщин, особливо небезпечних при знаковому навантаженні.

1.4 Зварюваність алюмінієвих сплавів

Зварні конструкції виготовляють з сплавів, що деформуються, відомості про які наведені в ГОСТ4784-74. Найважливішим показником зварюваності алюмінієвих сплавів є здатність не утворювати при зварюванні гарячих тріщин. Сплави, вкрай чутливі до гарячого тріщиноутворення, вважаються незварюваними. Застосування в зварних конструкціях не рекомендується.

Сплави, що не зміцнюються термічною обробкою (системи Al-Mn та

Al-Mg) та технічний алюміній добре зварюються. Заготовки з цих сплавів випускаються у відпаленому та холоднодеформованому (нагартваному) стані [5].

Сплави, що зміцнюються термічною обробкою (загартування з подальшим старінням), мають зазвичай більш високий ступінь легування та механічну міцність. Це сплави Al-Mg-Si (авіалі) та Al-Zn з добавками інших елементів. Вони гірше зварюються (деякі зовсім не зварюються) і мають низьку корозійну стійкість. Авіалі зварюються лише з використанням присадного матеріалу [5,6].

Сплави Al-Cu та Al-Cu-Mg (більшість відносяться до дюралюмінів) відносяться до незварюваних сплавів. Єдиний зварювальний сплав Al-Cu-1201 та його закордонні аналоги [6].

Потрійні сплави Al-Zn-Mg добре зварюються тільки в тому випадку, якщо сумарний вміст легуючих елементів не перевищує 7,0 – 7,5 %. До зварюваних відноситься вітчизняний сплав 1915 та його зарубіжні аналоги [5].

Для ливарних сплавів зварювання застосовується лише з ремонтною метою, а також для виправлення дефектів лиття. З усіх ливарних сплавів найбільшого поширення набули сплави Al-Si (силуміни), які відносяться до групи, що обмежено зварюються [6].

1.5 Хіміко-металургійні особливості зварювання алюмінієвих сплавів

Оксидна плівка на поверхні алюмінію та його сплавів ускладнює процес зварювання. Маючи високу температуру плавлення (2050 °C), оксидна плівка не розплавляється в процесі зварювання і покриває метал міцною оболонкою, що утруднює утворення загальної ванни. Внаслідок високої адсорбційної здатності до газів та пар води оксидна плівка є джерелом газів, що розчиняються в металі, і непрямою причиною виникнення в ньому тріщин різного роду. Частинки оксидної плівки, що потрапили у ванну, а також частина плівок з поверхні основного металу, не зруйнованих у процесі зварювання, можуть утворювати оксидні включення у швах, що знижують механічні властивості з'єднань та їхню працездатність.

Для здійснення зварювання повинні бути вжиті заходи щодо руйнування та видалення оксидної плівки та захисту металу від повторного окислення. З цією метою використовують спеціальні зварювальні флюси або зварювання здійснюють в атмосфері інертних захисних газів. Внаслідок великої хімічної міцності сполуки Al_2O_3 відновлення алюмінію з оксиду в умовах зварювання практично неможливе [7]. Не вдається також зв'язати Al_2O_3 у міцні сполуки

сильною кислотою чи лугом. Тому дія флюсів для зварювання алюмінію заснована на процесах розчинення та змивання диспергованої оксидної плівки розплавленим флюсом. У разі електродугового зварювання в інертних захисних газах видалення оксидної плівки відбувається у результаті електричних процесів, які у катода (катодне розпилення). У цих умовах виникає необхідність підвищення вимог до якості попередньої обробки деталей перед зварюванням з метою отримання тонкої та однорідної плівки по всій поверхні кромки, що зварюються. Для попередження додаткового окислення та засмічення ванни оксидами необхідно застосовувати захисний газ високої чистоти.

Водень, на відміну від інших газів, має здатність розчинятися в алюмінії та за певних умов утворювати пори у металі швів. Розчинність водню в алюмінії змінюється за різних температур. Концентрація розчиненого у металі водню $[H]$ залежить від тиску молекулярного водню, що знаходиться з ним у рівновазі.

У реальних умовах парціальний тиск молекулярного водню в газовій фазі дуги дуже мало. Тому основним джерелом водню, що розчиняється у зварювальній ванні, є реакція взаємодії вологи, що міститься в окисній плівці з металом. В результаті протікання цієї реакції концентрація атомарного водню в поверхневому шарі атмосфери, яка контактує з металом, може відповідати великому тиску молекулярного водню, що знаходиться в рівновазі з металом [8]. Тому за наявності пари води в зоні ванни концентрація розчиненого в металі водню може виявитися набагато більш рівноважною. При охолодженні розчинений водень у зв'язку з зниженням розчинності прагне виділитися з металу. Бульбашки водню, що виділяється, не встигаючи спливати з ванни, залишаються у шві, утворюючи пори. Тому основним заходом боротьби з пористістю при зварюванні алюмінію є зниження концентрації розчиненого в ньому водню до межі нижче 0,69 – 0,70 м/100 г металу. Основним джерелом водню, що розчиняється в металі шва при зварюванні, є волога, адсорбована поверхнею металу і входить до складу оксидної плівки у вигляді гідратованих

оксидів [7]. Кількість її визначається станом поверхні металу та залежить від його обробки перед зварюванням.

Попередження пористості при зварюванні алюмінію може сприяти скорочення питомої поверхні дроту присадки за рахунок збільшення її діаметра і зменшення частки участі присадкового металу в утворенні шва. Раціональну обробку поверхні дроту і основного металу застосовують з метою зменшення товщини оксидної плівки та запасу вологи, що є в ній. Магній збільшує розчинність водню в алюмінії, тому підвищена схильність до пористості при зварюванні алюмінієво-магнієвих сплавів пояснюється іншим механізмом утворення пір. На поверхні сплавів, що містять магній, є оксидна плівка, що складається з оксидів Al_2O_3 і MgO . Така плівка має більшу товщину, меншу щільність через дефекти її будови та більший запас вологи, ніж плівка з

Al_2O_3 [9]. У процесі зварювання при розплавленні основного та присадного металів частина вологи, що міститься у внутрішніх дефектах плівки, не встигає прореагувати. Частки плівки, що потрапляють у ванну, містять залишки вологи, яка розкладається з виділенням водню. Водень, що утворився в дефектах плівки, переходить у молекулярну форму і потім виділяється в рідкому металі ванни у вигляді бульбашок, минаючи стадію розчинення. При такому механізмі утворення пор як заходи зменшення пористості, крім звичайних, пов'язаних із застосуванням раціональної обробки поверхні дроту і основного металу, а також скорочення питомої поверхні дроту, що бере участь у утворенні шва, ефективним заходом боротьби з пористістю стає жорсткість режимів зварювання [10]. Однак при посиленні режимів виникає небезпека збільшення тиску водню в тріщинах, що ускладнює виконання багат шарових швів та підварювання.

Кристалічна структура металу шва визначає його механічні властивості. Чистий алюміній при кристалізації має здатність утворювати в металі швів грубу крупнокристалічну структуру [11].

При зварюванні алюмінієвих сплавів кристалічна структура та механічні властивості металу швів можуть змінюватись в залежності від складу сплаву, використовуваного присадного металу, способів та режимів зварювання. Для всіх способів зварювання характерна наявність великих швидкостей охолодження та спрямованого відведення тепла. При кристалізації у умовах часто розвивається дендритна ліквация, що призводить до появи у структурі металу евтектики. Евтектика знижує пластичність та міцність металу. У зв'язку з цим у швах можливе виникнення кристалізаційних тріщин у процесі кристалізації. Поліпшення кристалічної структури металу швів при зварюванні алюмінію та деяких його сплавів може бути досягнуто модифікуванням у процесі зварювання. Тому як присадний метал при зварюванні все більше застосування знаходять спеціальні дроти з добавками модифікаторів. Введення цих елементів у невеликих кількостях дозволяє покращити кристалічну структуру металу швів та знизити їхню схильність до тріщиноутворення [12]. Перемішування металу зварювальної ванни у процесі зварювання за допомогою зовнішнього магнітного поля також знижує схильність металу швів до тріщиноутворення.

Властивості зварних з'єднань також залежать від процесів, що протікають у навколошовних зонах. При зварюванні чистого алюмінію та сплавів, що не зміцнюються термічною обробкою, у зоні теплового впливу спостерігається зростання зерна та деяке їх розуміцнення, викликане зняттям нагартування. Зростання зерна і зміцнення нагартуваного металу при зварюванні змінюється в залежності від способу зварювання, режимів і ступеня попереднього нагартування сплаву. Зварюваність сплавів Al-Mg ускладнюється їх підвищеною чутливістю до нагрівання та схильністю до утворення пористості та спучування в ділянках основного металу, що безпосередньо примикають до шва. Здатність цих сплавів утворювати пористість у зонах термічного впливу пов'язується з наявністю у злитках молекулярного водню. Після обробки таких злитків (пресування або прокатки) [13] у металі утворюються тріщини у вигляді

каналів або колекторів, у яких водень знаходиться під високим тиском. Для перевірки якості металу, призначеного для зварювання, рекомендується проводити спеціальну пробу.

При зварюванні сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, у навколошовній зоні відбуваються зміни, що погіршують властивості металу, що зварюється. Вимірювання твердості та вивчення структури металу в зоні термічного впливу сплавів цієї групи дозволяють виявити в ній ділянки металу з різним ступенем розпаду твердого розчину та коагуляції зміцнювача. Однак найбільш небезпечною зміною, що різко погіршує властивості металу і сприяє утворенню тріщин, є оплавлення меж зерен. Поява рідких прошарків між зернами знижує механічні властивості металу в нагрітому стані та сприяє утворенню кристалізаційних тріщин [14].

Незалежно від способу зварювання та вихідного стану металу у безпосередній близькості від шва спостерігається зона оплавлення меж зерен. Ширина цієї зони змінюється залежно від способу та режимів зварювання. Найбільш широка зона з'являється при газовому зварюванні і вужча - при способах зварювання з жорстким термічним впливом (дуговий). Розподіл евтектики у цій зоні змінюється залежно від вихідного стану металу. У зварних з'єднаннях, отриманих при зварюванні загартованого сплаву, евтектика розташовується у вигляді суцільного прошарку навколо зерен, тоді як у з'єднаннях з відпаленого металу в заляганні евтектики з'являються тріщини [15]. Наступною термічною обробкою не вдається відновити властивості металу в зоні, що прилягає до шва, що призводить до великої зміни міцності з'єднань і робить ненадійними ці з'єднання в експлуатації.

Сплави Д20, ВАД1, М40 та інші подібні мають кращу зварюваність. Особливо перспективними є сплави потрійної системи Al-Mg-Zn, що самозагартовуються. При зварюванні цих сплавів вдається отримати з'єднання з міцністю до 80-90 % від міцності основного металу в загартованому та зістареному стані [16].

Алюміній та його сплави відрізняються високою тепло- та електропровідністю, що викликає необхідність застосування великих струмів та потужних машин для електричного контактного зварювання, особливо при точковому зварюванні. Для підвищення ефективності нагрівання та плавлення доцільно зварювати ці метали при малій тривалості імпульсів струму або на великих швидкостях при зварюванні плавленням [17].

Зварні конструкції з алюмінію та його сплавів схильні до жолоблення, що пояснюється відносно високим коефіцієнтом теплового розширення. Зниження деформацій у конструкціях може бути досягнуто за рахунок використання технологічних заходів (вибір відповідного способу зварювання, підбір оптимальних режимів, підігрів та ін.) [17, 18].

1.6 Типи зварних з'єднань алюмінієвих сплавів

Типи з'єднань, що застосовуються при зварюванні алюмінієвих сплавів, розміри та форма підготовки кромки в основному регламентовані ГОСТ 14806-80 та ГОСТ 23792-79. При зварюванні плавленням алюмінієвих сплавів найбільш раціональним типом сполук є стикові, виконати які можна будь-якими способами зварювання. Для усунення оксидних включень у металі швів застосовують підкладки з канавкою раціональної форми або обробку кромки зі зворотного боку шва, що в деяких випадках забезпечує видалення оксидних включень зі стику формуючу канавку або обробку.

Застосування при зварюванні флюсів, що наносяться на торцеві поверхні перед зварюванням у вигляді дисперсної суспензії фторидів у спирті, також сприяє зменшенню кількості оксидних включень у металі шва.

При обробці кромки кут її розкриття необхідно обмежувати з метою зменшення обсягу наплавленого металу в з'єднанні, а отже, і ймовірності утворення дефектів. Конкретний вибір конструктивних елементів підготовлених кромки деталей, що зварюються, їх розмірів і розмірів виконаних швів для основних типів з'єднань повинен проводитися згідно з ГОСТ 14806-69.

Для точкового та шовного контактного зварювання характерні нахльосткові з'єднання, розміри яких встановлені ГОСТ 15878-70. При цьому співвідношення товщин деталей, що зварюються, як правило, не перевищує 1:2. Для стикового зварювання оплавленням використовуються стикові з'єднання. Форма деталей повинна забезпечувати надійне закріплення їх у затискачах машини та струмопідведення поблизу стику. Площі перерізу деталей у зоні з'єднання мають бути приблизно однаковими.

1.7 Технологія отримання вторинних алюмінієвих сплавів

Найважливішою сферою застосування вторинних сплавів є виробництво фасонного алюмінієвого лиття. У DIN 1725, лист 2 (DIN – це технічні норми, що розробляються, приймаються та публікуються Німецьким інститутом зі стандартизації) поряд зі стандартними марками сплавів наведено численні марки сплавів, що виробляються ливарними заводами. Перелік сплавів, які випускаються цими заводами, містить, крім стандартних, деякі нестандартні сплави [18].

Бездоганне приготування алюмінієвого скрапу у найрізноманітніших пропорціях можна здійснювати лише спеціально обладнаних плавильних заводах. Уявлення про складний робочий процес на такому заводі дає

рисунок 1.1.

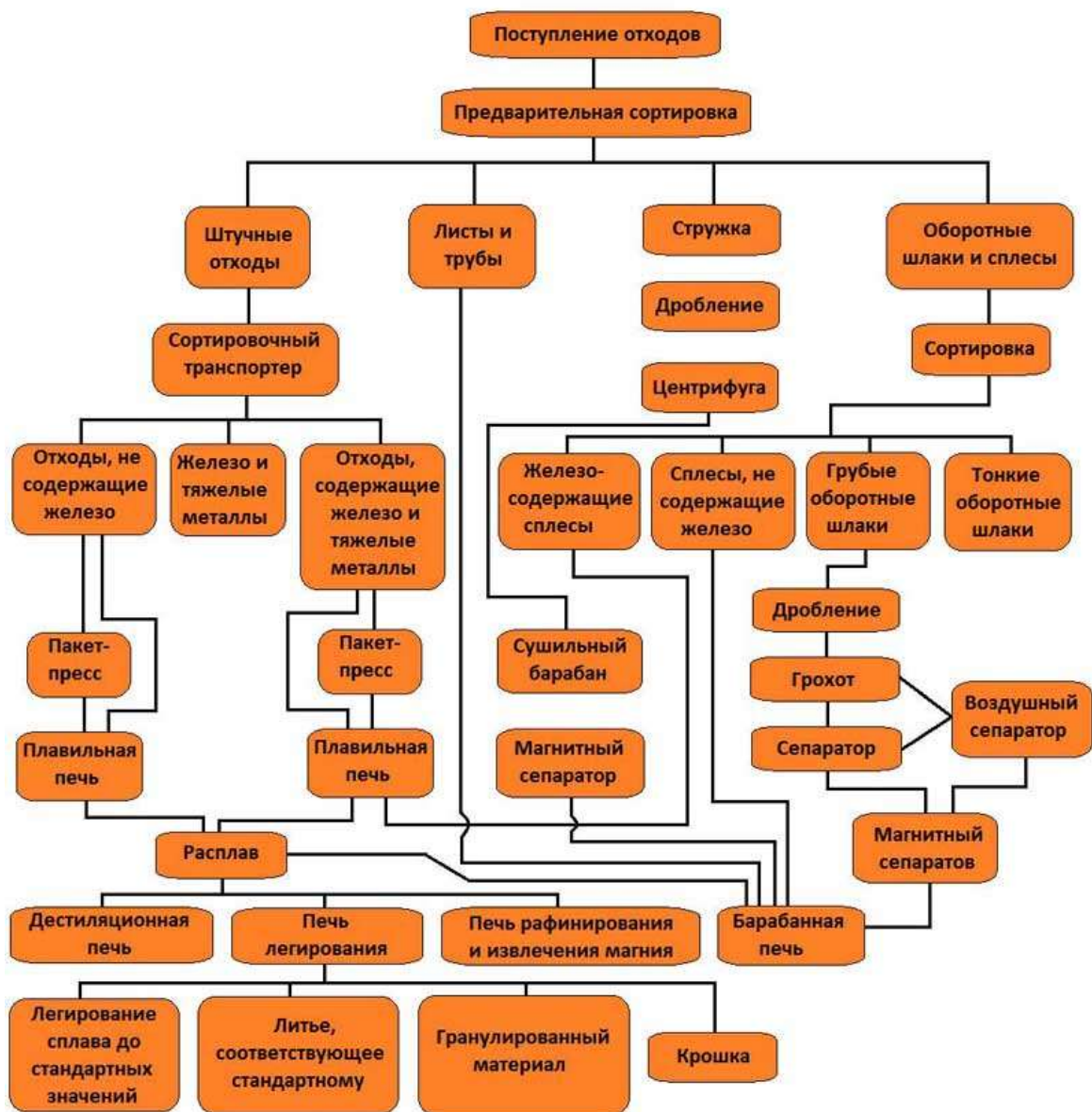


Рисунок 1.1 – Робочий процес підготовки алюмінієвого скрапу
(за Фульдом - Гінзбергом)

Відходи переплавляють після грубого попереднього сортування. Залізо, нікель або мідь, що містяться в цих відходах, точка плавлення яких вище точки плавлення алюмінію, при плавці в плавильній пороговій печі залишаються в ній, а алюміній виплавляється. Для видалення з відходів неметалевих включень типу оксидів, нітридів, карбідів або газів застосовують обробку розплавленого

металу солями або (що раціональніше) продування газом – хлором або азотом [18].

Для видалення металевих домішок з розплаву відомі різні методи, наприклад, присадка магнію і вакуумування - метод Бекша (Becksche); присадка цинку або ртуті з наступним вакуумуванням - субгалогенний метод [18]. Видалення магнію обмежується введенням у розплавлений метал хлору. Шляхом введення добавок, що точно визначаються складом розплаву, отримують заданий ливарний сплав.

Лом та відходи алюмінію класифікуються за фізичними ознаками на класи, за хімічним складом – на групи та марки, за показниками якості – на сорти.

Лом та відходи алюмінію та алюмінієвих сплавів розділені на три класи (ГОСТ 1639-93):

- група I. Алюміній чистий (нелегований), що містить Al – не менше 99 %, домішок – не більше 1 %;
- група II. Алюмінієві сплави деформуються з низьким вмістом магнію, не більше (%): Mg – 0,8; Cu – 4,8; Fe – 0,7; Si – 0,7; Zn – 0,3;
- група III. Алюмінієві сплави деформуються з високим вмістом магнію не більше (%): Mg – 1,8; Cu – 4,9; Fe – 0,7; Si – 0,7; Zn – 0,3;
- група IV. Алюмінієві сплави ливарні з низьким вмістом міді, не більше (%): Si – 13,0; Fe – 1,5; Cu – 1,5; Mg – 0,6; Zn – 0,5;
- група V. Алюмінієві сплави ливарні з високим вмістом міді, не більше (%): Si – 8,0; Fe – 1,6; Mg – 0,8; Zn – 0,6;
- група VI. Алюмінієві сплави деформуються з високим вмістом магнію не більше (%): Mg – 6,8; Fe – 0,5; Si – 0,8; Cu – 0,2; Zn – 0,2;
- група VII. Алюмінієві сплави ливарні з високим вмістом магнію, не більше (%): Mg – 13,0; Si – 1,3; Fe – 1,5; Cu – 0,3; Zn – 0,2;

- група VIII. Алюмінієві сплави, що деформуються з високим вмістом цинку, не більше (%): Zn – 7,0; Mg - 2,8; Cu - 2,0; Fe – 0,7; Si – 0,7;
- група IX. Алюмінієві сплави ливарні з високим вмістом цинку, не більше (%): Zn – 12,0; Si - 8,0; Cu - 5,0; Fe - 1,3; Mg – 0,3;
- група X. Низькоякісні брухт та кускові відходи алюмінію та алюмінієвих сплавів, що не відповідають вимогам усіх груп.

Якість брухту та відходів визначає можливість їх застосування замість первинної сировини для отримання готової продукції. Найбільш ефективно використовувати брухт і відходи алюмінію на випуск тих марок сплавів, при обробці яких вони утворилися, тому що в даному випадку сировина вже легована необхідними компонентами, що зменшує або повністю виключає застосування присадок, що легують. Приготовлені внаслідок цього вторинні сплави після рафінування мало поступаються первинним [8].

Не весь метал, використовуваний у виробництві, перетворюється на готову продукцію – частина йде у відходи, а частина – безповоротно губиться.

Лом та відходи алюмінію формуються у всіх галузях промисловості, що споживають як безпосередньо кольорові метали, так і вироби та обладнання, що містить алюміній [19].

Відходи алюмінію та його сплавів переважно утворюються під час виробництва:

- металів та сплавів (шлаки, сплеси, знімання, сміття тощо);
- прокату та екструзії (кінці, обрізки, тирса, обдирна стружка);
- фасонного лиття (шлаки, литники, випори, сплеси);
- кабельної продукції (кінці та обріз кабелю та дроту, плутанка).

Амортизаційний брухт виходить у результаті ліквідації основних засобів (устаткування) у промисловості, на транспорті, у будівництві та сільському господарстві, при капітальному та поточному ремонті обладнання, агрегатів та конструкцій; внаслідок зносу чи припинення користування домашнього вжитку.

Лом і відходи металів поділяють на оборотні (перероблювані у місцях освіти) і товарні, направляються для переробки інші підприємства. Переробка брухту та відходів у місцях їх утворення – головний напрямок їх раціонального використання. Проте обсяги переробки брухту та відходів у місцях їх формування обмежуються технічними та технологічними можливостями цих підприємств. У середньому частка відходів по вторинному алюмінію становить 75%, а частка брухту амортизованого – 25 % [19].



а



б

а – алюмінієві відходи;

б – пресований алюмінієвий брухт.

Рисунок 1.2 – Різні види алюмінієвого брухту

Найбільш повне та комплексне використання всіх цінних компонентів, що містяться в брухті, може бути досягнуто за умови їх переробки на сплави, аналогічні або близькі за своїм складом до вихідної сировини. Однак значна частина брухту алюмінію разом із брухтом чорних металів надходить на виробництво сталі, що погіршує її якість.

Велика кількість брухту практично не залучається до заготівлі. Практично не використовується брухт консервної тари, в якій поставляється величезна кількість напоїв. Багато алюмінію вивозиться на звалища, залишається у відпрацьованих шахтах, на будівництві та інших підприємствах [8].

1.8 Рідко-тверде формування деталей кінцевої форми та виливків

З урахуванням типового хімічного складу амортизаційного («старого») брухту, що є виробами з алюмінієво-кремнієвих сплавів, практично на кожному відносно великому підприємстві є можливість виробляти сплави з вмістом 6–8% вага. Si, 0,4–0,6% Mg та сумарним вмістом домішок 1,5–2,0%. Структура доевтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву, що твердне у звичайних умовах (рис. 1.3), складається з двох компонентів – дендритів α -твердого розчину кремнію в алюмінії (1,65% Si) та евтектики алюміній-кремній із вмістом 12% Si [20].

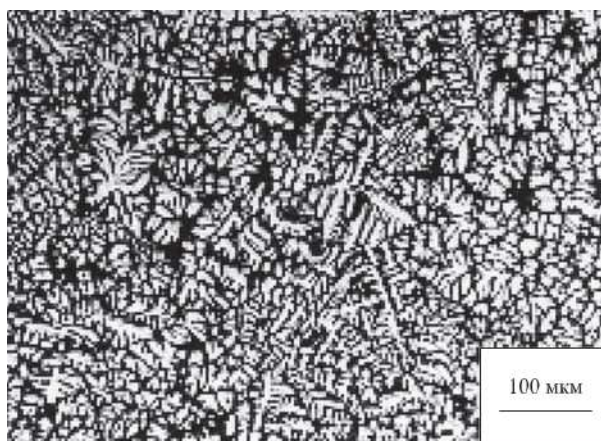


Рисунок 1.3 – Структура металу Al – Si 7 % [20]

При вмісті у сплаві 7% Si температура солідуса становить 577°C , температура ліквідусу 610°C . Якщо нагріти сплав до температури між ліквідусом і солідусом, евтектика буде рідкою, а дендрити твердого розчину - твердими. У цьому стані сплав легко деформується, проте розгалужені дендрити при цьому ламаються, виникають мікротріщини, і отримати якісний фасонний виріб видавлюванням рідко-твердого сплаву з дендритною структурою в прес-форму неможливо. Морфологію дендритів можна кардинально змінити за рахунок перемішування розплаву, що твердіє, зокрема, в процесі лиття циліндричного зливка-заготівлі. При перемішуванні розплаву над фронтом затвердіння гілки дендритів, що ростуть, змиваються рухомим розплавом, тверді частинки стають зародками кристалізації вже в обсязі розплаву, а подальше зростання частинок твердого розчину відбувається не по дендритному типу. Внаслідок такого механізму затвердіння структура твердого сплаву складається з частинок «вироджених» дендритів, оточених евтектикою (рисунок 1.3) [20].

При навантаженні сплаву з такою структурою, яка називається тиксотропною, при температурі між ліквідусом і солідусом відбувається прослизання частинок твердого розчину по рідкій евтектиці без руйнування частинок. У той же час частинки твердого розчину утворюють своєрідний скелет або каркас, що дозволяє зберігати форму заготовки для видавлювання в прес-форму рідко-твердому стані. Видавлювання сплаву в прес-форму не вимагає великих зусиль,

оскільки ковзання йде рідкою фазою. В силу високої в'язкості сплаву в рідко-твердому стані в процесі заповнення прес-форми не відбувається захопування бульбашок, заворотів оксидних полон та інших небажаних явищ, властивих практично всім відомим способам лиття фасонних виробів [20, 21].

Таким чином, процес рідко-твердого формування (РТФ) виробів включає два етапи:

- одержання циліндричного зливка-заготівлі з алюмінієво-кремнієвого сплаву з тиксотропною недендритною структурою;
- власне формування фасонних виробів у рідко-твердому стані сплаву видавлюванням заготовки з контейнера в прес-форму.

Циліндричний злиток зі сплаву Al - 7 % Si - 0,5 % Mg з тиксотропною структурою був отриманий литтям в кристалізатор з тепловою насадкою і магнітогідродинамічним перемішуванням розплаву, що твердне, на звичайній ливарній машині. Злиток певного діаметра розрізали на заготовки, обсяг яких відповідав обсягу готового виробу.

Заготівлі нагріваються в індукційній печі до температури 595 °C протягом 25-30 с, переносяться в контейнер преса, з'єднаний каналом з прес-формою, і видавлюються в прес-форму, робоча порожнина якої відповідає формі готового виробу.

Після формування та відрізки прес-залишку виріб піддають термічній обробці за режимом Т6 (загартування на твердий розчин з наступним штучним старінням) [20, 21].

Властивості виробів, отриманих методом РТФ, визначаються двома факторами: якістю злитків-заготівель для РТФ та якістю, що формується на стадії РТФ виробів. Схема процесу напівбезперервного лиття циліндричних злитків-заготовок з тиксотропною структурою для подальшого рідко-твердого формування фасонних виробів показана на рисунку 1.4.

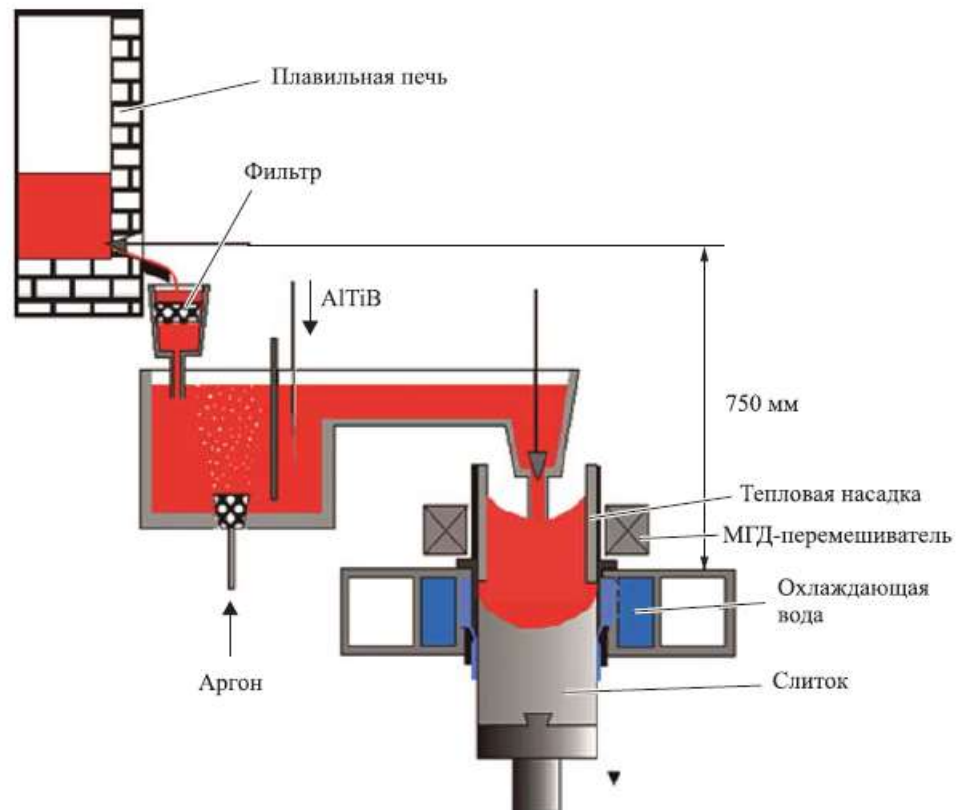


Рисунок 1.4 – Схема лиття зливків з тиксотропною структурою

Розплав алюмінієво-кремнієвого сплаву з роздавальної печі-міксера по жолобу надходить до кристалізатора. На цьому шляху він фільтрується та рафінується від неметалевих включень та водню. Над кристалізатором знаходиться тепла насадка висотою 250 мм, оточена МГД-індуктором для перемішування розплаву над фронтом затвердіння. Наявність МГД-індуктора і відносно високий стовп розплаву над фронтом затвердіння є єдиною відмінністю процесу від звичайного лиття циліндричних зливків кристалізатори з тепловою насадкою. Потужність МГД перемішувача близько 10 кВт. Параметри структури зливка визначаються температурою розплаву в тепловій насадці, напрямом та інтенсивністю перемішування розплаву над фронтом затвердіння та швидкістю лиття [21]. З урахуванням особливостей процесу рідко-твердого формування основними критеріями якості зливка є:

- рівномірність розподілу компонентів сплаву за перерізом злитка;
- морфологія зерен твердого розчину;

- дрібнодисперсна структура евтектики.

Розподіл компонентів сплаву за перерізом зливка обумовлено характером перебігу розплаву поблизу фронту затвердіння. У процесі охолодження розплаву при одночасному перемішуванні відбувається утворення зародків кристалізації як частинок твердого розчину кремнію в алюмінії, температура затвердіння якого становить 610°C . У міру просування розплаву до фронту затвердіння частка частинок твердого розчину збільшується, і розплав поблизу фронту затвердіння є суспензією з часткою рідкої фази 45-50 % [21]. При перемішуванні розплаву тільки в горизонтальній площині над фронтом затвердіння біля стінок теплової насадки виникають вихори у вертикальній площині, при цьому напрямок руху розплаву в цих вихорах визначається напрямом перемішування горизонтальної площини.

Оскільки рідка фаза є евтектикою з вмістом кремнію близько 12 %, а тверда фаза – зерна твердого розчину з вмістом кремнію 1,65 %, розподіл компонентів по перерізу зливка визначається характером руху рідкої та твердої фаз та їх розподілом безпосередньо біля фронту затвердіння, де їх "миттєве" положення фіксується в результаті різкого охолодження в кристалізаторі [21]. Таким чином, розподіл компонентів сплаву за перерізом зливка може змінюватися і регулюватися в залежності від характеру перемішування розплаву теплової насадки.

Рідко-тверде формування виробів здійснюється на устаткуванні, подібному до машин лиття під тиском.

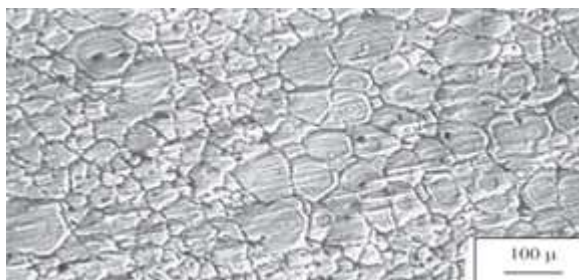
Формування виробів у рідко-твердому стані сплаву дозволяє мінімізувати усадку в процесі затвердіння, використовувати поліровані сталеві стрижні для формування готової поверхні внутрішніх отворів виробу і, таким чином, мінімізувати або виключити необхідність подальшої механічної обробки виробу. Саме ця особливість процесу рідко-твердого формування забезпечує високу економічну ефективність технологічного комплексу від розплаву до готового

виробу при виробництві тонкостінних деталей, деталей з протяжними внутрішніми отворами типу головних гальмівних циліндрів, деталей підвісок автомобілів, радіаторів, корпусів гаджетів різного типу і т.п. (рисунок 1.5) [21].



Рисунок 1.5 – Деталі, виготовлені методом рідко-твердого формування [21]

Технологія лиття злитків з перемішуванням твердне розплаву в кристалізаторі в силу характеру об'ємного твердіння забезпечує високу якість структур, а отже, підвищення всіх структурно-чутливих властивостей будь-яких типів широкоінтервальних алюмінієво-кремнієвих і сплавів, що деформуються. Як приклад можна навести результати розробки МГД-лиття злитків діаметром 200 мм з деформованого сплаву 6061. Перемішування розплаву, що твердіє, зумовило подрібнення зерна в 3-4 рази, отримання недендритної структури злитка і підвищення пластичних властивостей сплаву, що дозволило скоротити кількість дисків для важких вантажівок із 5 до 3. На рисунку 1.6 показана порівняльна структура злитків зі сплаву 6061, отриманих за звичайною технологією (а) та технологією МГД-лиття (б) [20,21].



а



б

а – злиток зі сплаву 6061, отриманий за звичайних технологій;

б – злиток зі сплаву 6061, отриманий за технологією МГД - лиття.

Рисунок 1.6 – Мікроструктура злитка діаметром 200 мм із сплаву 6061, відлитого зі швидкістю 110 мм/хв [20]

1.9 Композиційні конструкційні матеріали на базі вторинних алюмінієвих сплавів

Відомо, що показники міцності термічно зміцнених сплавів серій 2XXX, 6XXX, 7XXX, деяких алюмінієво-кремнієвих сплавів (356, 357) досягаються в результаті загартування (розчинення компонентів сплаву в твердому стані) з подальшим старінням та нанорозмірів). Основним недоліком таких сплавів є низька термостабільність в умовах підвищених температур і змінних навантажень, як наслідок розчинення фаз, що виділилися при старінні [22].

Крім того, алюмінієві сплави мають низьку зносостійкість, що змушує конструкторів двигунів внутрішнього згорання використовувати в алюмінієвих блоках циліндрів сталеві або чавунні гільзи, що контактують з поршнем.

Як жароміцність, так і зносостійкість алюмінієвих сплавів можуть бути значно підвищені за рахунок введення в їх структуру мікро-і нанорозмірних

армуючих частинок, що мають високу термостабільність (жароміцність) і високу твердість (зносостійкість). Такий матеріал є композиційним алюмінієвим сплавом (КАС). Розробки технології одержання КАС почалися близько 20 років тому і зараз активно продовжуються в багатьох дослідницьких організаціях та промислових компаніях у всьому світі.

Відомо, що через високу активність розплавленого алюмінію до кисню введення будь-яких порошкових матеріалів у алюмінієві розплави становить складну технічну проблему через утворення на поверхні частинок, що вводяться в розплав, щільної плівки оксиду алюмінію, що виключає контакт речовини частинки і матричного розплаву. Всі відомі російські та зарубіжні центри з розробки нових матеріалів композиційного типу зі зміцнювачами у вигляді частинок високої міцності та твердості, що є керамікою різного виду (оксиди, карбіди, нітриди металів та металоїдів) орієнтуються виключно на три способу отримання матеріалів [22, 23]:

- механічне замішування попередньо оброблених частинок кераміки в магнійвмісні алюмінієві розплави при температурі рідко-твердого стану;
- метод порошкової металургії, що полягає в механічному змішуванні порошків основи матеріалу з порошками зміцнювальних частинок кераміки з подальшим компактуванням, дегазацією та пресуванням або штампуванням матеріалу;
- плазмове осадження (plasma deposition) частинок матеріалу у вигляді суміші частинок матричного сплаву та частинок кераміки, у тому числі синтезованої в результаті плазмохімічних реакцій.

Але перелічені технологічні методи мають значні недоліки, пов'язані з високими виробничими витратами і низьким металургійним якістю одержуваних товарів.

Принциповою відмінністю та перевагою технології синтезу, розробка якої була здійснена раніше, є використання для введення порошкових компонентів у

матричні алюмінієві розплави методу плазмової інжекції через плазмотрон спеціальної конструкції.

Плазмотрони різного виду широко застосовуються в техніці для різання металів, напилення порошоків на поверхню деталей для підвищення їхньої зносостійкості, іонного травлення поверхні металів та інших процесів. Плазмотрон є досить простим пристроєм у вигляді камери з соплом, в якій є катодний пристрій, а анодом служить стінка камери плазмотрона. Між катодом і анодом запалюється електрична дуга, і камеру подається плазмостворюючий газ. У зоні дуги газ розігрівається до кількох тисяч градусів та іонізується, внаслідок чого швидкість закінчення іонізованого газу із сопла плазмотрону досягає швидкості звуку.

Корпус плазмотрону та сопло охолоджуються водою (рисунок 1.7) [22].

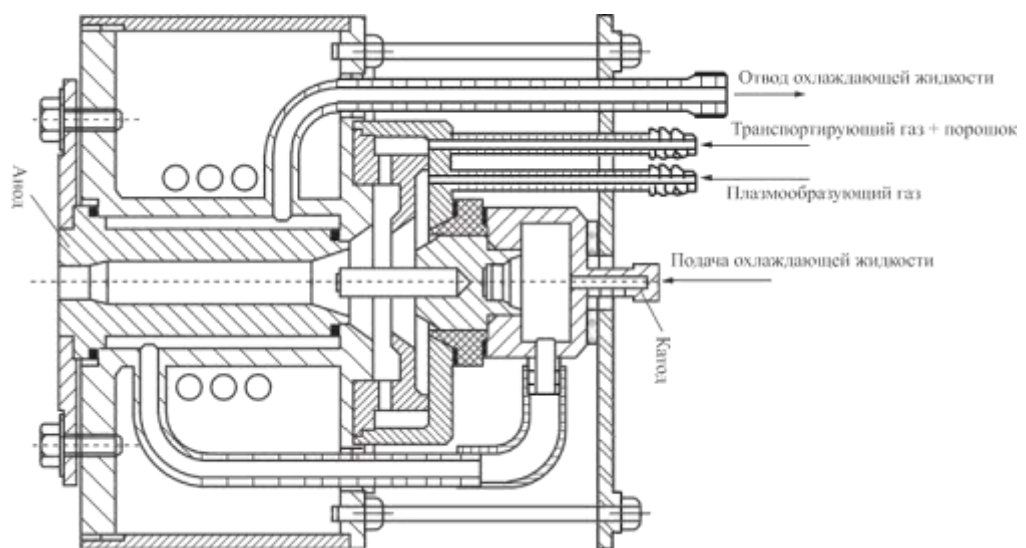


Рисунок 1.7 – Схема плазмотрону [22]

Якщо активну зону плазмового факела подати порошок будь-якого компонента, поверхню частинок піддаватиметься іонному травленню з видаленням адсорбованого на поверхні кисню. Крім того, частки нагріватимуться і розганятимуться до швидкості газового потоку.

Таким чином, застосування плазмотрона дозволяє реалізувати три основні умови введення частинок у матричний розплав – очищення поверхні частинок,

необхідну швидкість частинок для впровадження їх у розплав та нагрівання частинок, необхідний для здійснення реакцій синтезу композиційного матеріалу. Рівномірний розподіл частинок обсягом синтезованого матеріалу забезпечується електромагнітним перемішуванням розплаву в процесі інжекції компонентів. Схема установки синтезу показано на рисунку 1.8 [22].

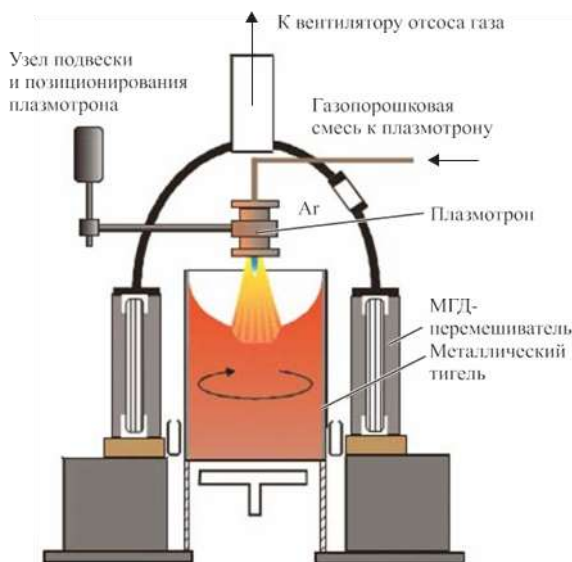


Рисунок 1.8 – Схема установки синтезу [22]

Отримані композиційні матеріали з урахуванням алюмінієвих сплавів, зокрема нові матеріали, виробництво яких відомими методами неможливе.

До таких матеріалів відносяться композити типу «метал – метал», одержувані інжекцією частинок заліза, хрому, цирконію та інших малорозчинних металів в алюмінієвий розплав при температурі, близької до температури затвердіння матричного розплаву. В результаті хімічних реакцій у матричному розплаві утворюються частки інтерметалідних фаз – зміцнювачів з керованою морфологією та величиною частинок фаз, що дозволяє одержувати матеріали із заданою структурою та властивостями.

Плазмотрони забезпечують можливість введення будь-яких порошкових матеріалів у різні матричні металеві розплави, що застосовуються, у тому числі і з вторинної сировини. Тому технологія універсальна і може бути використана

для виробництва композиційних матеріалів широкого асортименту на будь-якій основі.

Всі матеріали, які можуть бути отримані методом плазмової інжекції порошкових компонентів матричні розплави, можна розділити на 3 групи [22, 23]:

- Композиційні матеріали на металевій основі, що являють собою сплави, у тому числі алюмінієві, зміцнені частинками карбіду кремнію, оксиду алюмінію та іншими неметалевими частинками розміром від декількох до десятків мікронів (КММп), рисунок 1.9.

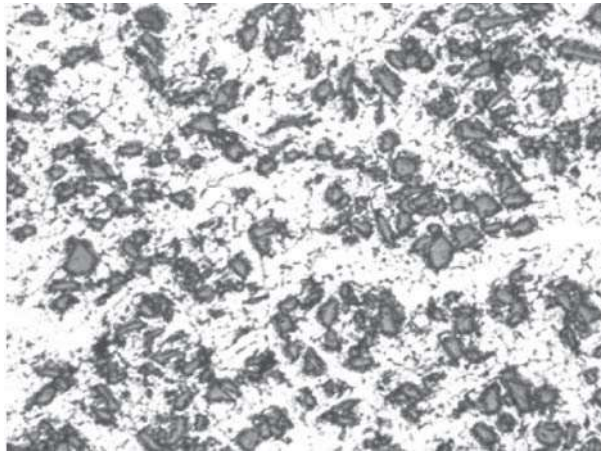


Рисунок 1.9 – Мікроструктура композиційного матеріалу на основі алюмінієво-кремнієвого сплаву з 15% мас. SiC, S100 [23]

- Композиційні матеріали на металевій основі, що є як відомими, так і новими сплавами, у тому числі алюмінієвими, зміцненими неметалевими частинками нанометричних розмірів (КММнп), рисунок 1.10;

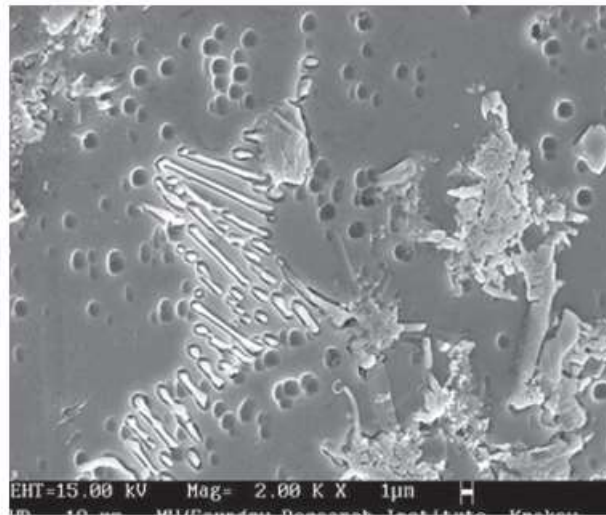


Рисунок 1.10 – Структура композиційного матеріалу Al-4,7% Cu-4,7% Fe-1% Ni(TiCxNyOz)p [23]

- Нові матеріали композиційного типу, що є алюмінієвими сплавами, зміцнені частинками інтерметалідних сполук ендогенного походження (КММп), рисунок. 1.11.

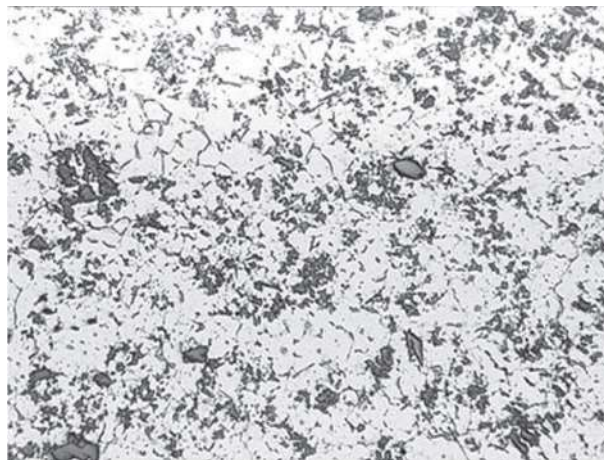


Рисунок 1.11 – Структура композиційного матеріалу Al - 4,5 % Cu – 6 % Fe, S100 [23]

Можливе одержання матеріалів комбінованого типу, наприклад 2- та 3-ї груп. КММп – це вже добре відомі на рисунку матеріали, наприклад, під назвою Duralcan®, що випускаються фірмою Duralcan, Канада. КММп відрізняються високою зносостійкістю та підвищеним модулем пружності. Виходять матеріали методом механічного змішування порошку SiC

матричний розплав. Тривалість процесу замішування (45-60 хв) пояснюється необхідністю механічного видалення оксидної плівки з поверхні частинок, що замішуються, і обумовлює дуже високу вартість матеріалу. З цієї причини матеріали типу Duralcan

не знаходять широкого застосування в промисловості [23].

Технологія синтезу методом плазмової інжекції компонентів матричний розплав забезпечує отримання КММп з властивостями і якістю на рівні відомих матеріалів, при цьому виробничі витрати нижчі, ніж при використанні інших технологій.

Матеріали типу КММп містять у своїй структурі тугоплавкі неметалеві частинки кераміки нанометричних розмірів, які є найбільш ефективними компонентами структури, що забезпечують підвищення межі міцності матеріалу при кімнатній та підвищеній температурах. Важливо підкреслити, що ефект підвищення межі міцності алюмінієвих сплавів на 25 – 30 % досягається при об'ємному вмісті частинок трохи більше 0,1 % [23].

При введенні частинок оксикарбонітриду титану розміром 100-500 нм при вмісті 0,1 % об. межа міцності сплаву Al – 7 % Si – 0,5 % Mg–2 % у порівняно зі сплавами аналогічного складу, що не містять ультрадисперсних частинок, збільшується на 20 – 25 %,

а при температурі 350 °C зростає майже вдвічі (рисунок 1.12, 1.13) [23].

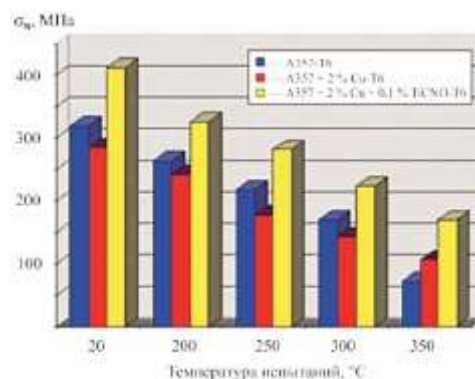


Рисунок 1.12 – Властивості сплаву A357(Cu/TiC_xNyO_z)кМ [23]

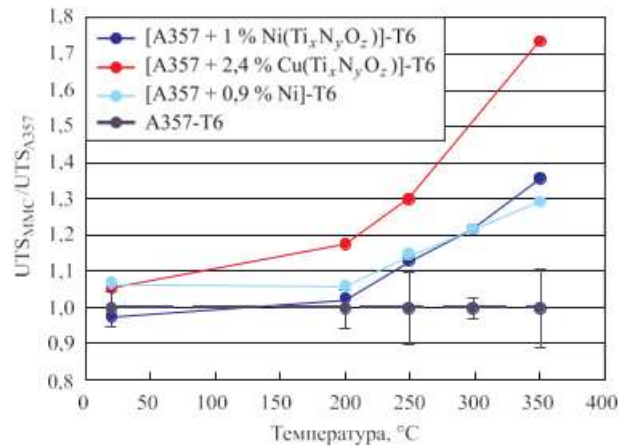


Рисунок 1.13 – Порівняльний вплив міді, нікелю та армуючих комплексів на їх основі на міцність сплаву А357 [23]

Найбільш складною проблемою виробництва КММнп, особливо на основі алюмінієвих сплавів, є проблема введення в матричні розплави частинок, що мають нанометричні розміри. До цього часу відомий лише один спосіб введення таких частинок в алюмінієві сплави шляхом змішування порошкових компонентів (механічне легування) з наступними операціями компактування, дегазациї та спікання, однак у зв'язку з високими виробничими витратами цей метод застосовується в обмежених масштабах тільки в авіакосмічній промисловості. Для вирішення цієї проблеми були проведені експериментальні роботи із синтезу композиційного матеріалу складу Al-Fe-Ni методом плазмового інжектування суміші порошоків заліза та нікелю у співвідношенні 1:1 у кількості 5 % мас. в матричний алюмінієвий розплав. В результаті реакцій між матричним металом, залізом і нікелем у структурі матеріалу отримані потрібні інтерметалідні сполуки $Al_xFe_yNi_z$ у вигляді частинок фаз високої твердості, переважно тетрагональної сингонії (рисунок 1.14) [23, 24], що підтверджує можливість синтезу таких матеріалів заданого складу та властивостей, які відомими методами не можуть бути одержані. Важливо відзначити, що розміри інтерметалідних фаз істотно менші за введені в розплав.

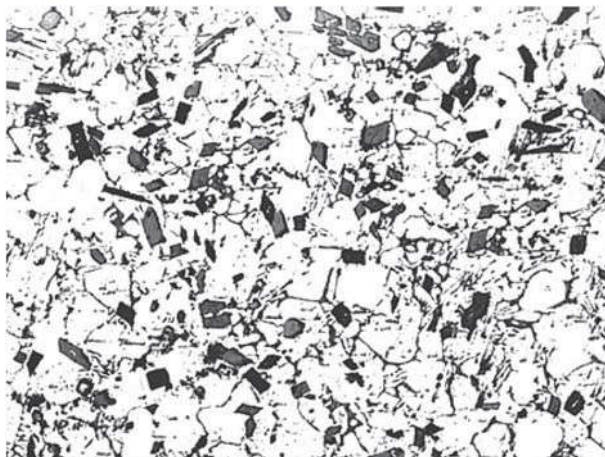


Рисунок 1.14 – Структура композиційного матеріалу Al – 2,5 % Fe –
2,5 % Ni, S100 [23]

2 ЗАСТОСОВУВАНІ МЕТОДИ ЗВАРЮВАННЯ

Для зварювання алюмінієвих сплавів використовуються такі методи зварювання:

- газове зварювання;
- зварювання штучними електродами з покриттям;
- зварювання електродом, що не плавиться, в середовищі інертних захисних газів (TIG);
- зварювання електродом, що плавиться, в середовищі інертних захисних газів (MIG);
- плазмове зварювання (PAW);
- зварювання електродом, що плавиться, по шару флюсу.

Найбільш поширеними є методи TIG, MIG та PAW.

2.1 Зварювальні матеріали для алюмінієвих сплавів

2.1.1 Гази та газові суміші

При дуговому зварюванні алюмінію та його сплавів, для запобігання окисленню, використовуються інертні захисні газы - аргон або його суміші з гелієм (гелій підвищує температуру дуги та збільшує проплавлення). Особливу увагу слід звертати на чистоту захисного газу: допущено застосування аргону чистотою не менше 99,9 % за ГОСТ 10157-73, сорти: вищий, перший та другий. При зварюванні електродом, що плавиться, іноді застосовують аргон з добавкою до 5% O₂ [25].

Підвищений вміст вологи в захисному газі підвищує можливість утворення дефектів зварювання. Тому, якщо постачальник газів не може гарантувати їх чистоту та вологість, рекомендується застосування газових фільтрів.

2.1.2 Електроди, що не плавляться

Для зварювання методом TIG використовуються вольфрамові електроди, що не плавляться. Для алюмінієвих та магнієвих сплавів використовуються електроди [26]:

- марка WP чистий вольфрам 99,95 % зелене маркування;
- марка WT 20 легування 2 % оксид торію ThO_2 червоне маркування;
- марка WZ 10 легування до 1 % оксиду цирконію ZrO_2 коричневе маркування;
- марка WC 20 легування 2 % оксиду церію CeO_2 помаранчеве маркування;
- марка WL 20 легування 2% оксид лантану LaO_2 жовте маркування.

При цьому електроди з чистого вольфраму є кращими; електроди з церієвим легуванням є універсальними і можуть використовуватися для зварювання як на змінному, так і постійному струмі; лантановані електроди застосовуються лише зварювання постійному струмі.

Одним з найважливіших елементів якісного TIG зварювання є підготовка електродів, що не плавляться. Шліфування стрижня робиться на заводі-виробнику; шліфування проводиться в поздовжньому напрямку для виправлення дефектів, що виникають під час прокатування стрижнів. Підготовка геометрії полягає у заточенні вістря та проводиться безпосередньо перед зварюванням. Чим гостріше заточений електрод, тим більшим є тиск

електричної дуги. При заточенні також важливими є напрямок заточування і певна шорсткість вістря електрода. Заточення електрода обов'язково має проводитися вздовж осі електрода [27]. Електроди, у яких заточування виконано «поперек» і має сильну шорсткість, негативно впливають на вістря електрода внаслідок впливу надрізу.

2.1.3 Присадочні матеріали

Зварювання, з подачею матеріалу для присадження, рекомендується як основний метод для алюмінієвих сплавів. Подача додаткового присадного матеріалу дозволяє уникнути газонасиченню та пористості металу шва та уникнути підвищеного вмісту розчиненого водню у шві та у навколошовній зоні [28].

При дуговому зварюванні більшості з'єднань потрібен дріт, метал якого заповнює зазори, а також забезпечує формування шва відповідно до розмірів, встановлених ГОСТ 14806-80. Крім того, дріт дозволяє змінювати склад шва, що особливо важливо при зварюванні різних алюмінієвих сплавів. Необхідний для легування склад дроту вибирають з урахуванням хімічного складу кромок, що зварюються, і частки участі дроту в утворенні шва. Для дугового зварювання в інертних газах вміст кожного елемента у дроті можна розрахувати з рівняння:

$$C_{\text{п}} = \frac{C_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{п}} k_{\gamma}} - \frac{C_0}{\gamma_{\text{п}}} + C_0$$

де: $C_{\text{п}}$ - розрахунковий вміст елемента у дроті,

C_0 - вміст елемента в металі, що зварюється.

$C_{ш}$ - вміст елемента в металі шва,

k_{γ} - сумарний коефіцієнт засвоєння елемента металом шва при зварюванні,

$\gamma_{п}$ - частка дроту у металі шва.

При виборі присадного металу слід враховувати можливість появи у структурі металу швів різних хімічних сполук. При зварюванні сплавів алюмінію, що містять магній, із застосуванням дроту присадки, що містить кремній, в металі шва і особливо в зоні сплавлення з'являються голкоподібні виділення Mg_2Si , що знижують пластичні властивості зварних сполук. Несприятливо впливають властивості сполук з сплавів системи Al-Mg мізерно малі добавки натрію, які можуть потрапляти в метал шва через флюси [29].

Присадним матеріалом служить зварювальний дріт або прутки. Вітчизняний зварювальний дріт відповідно до ГОСТ 7871-75 складається з:

- чистого технічного алюмінію марки СВА99, СВА97, СВА85Т, СВА5;
- сплаву Al-Mn марка СВАМц;
- сплавів Al-Mg марки СВАМг3, СВАМг5, Св1557, СВАМг6, СВАМг61, СВАМг63;
- сплавів Al-Si марки СВАК5, СВАК10 сплаву Al-Cu марка Св1201.

Крім того, за спеціальними технічними умовами випускають дріт 1437 (алюміній, легований хромом) і АВч (сплав алюмінію з кремнієм і магнієм). За кордоном найбільш широко використовується дріт марки 4043 (вітчизняний аналог СВАК5) та 5356 (вітчизняний аналог СВАМг5). Загальним правилом при зварюванні алюмінієвих сплавів є те, що метал зварювального дроту повинен приблизно відповідати за хімічним складом деталі. Винятком є сплави алюмінію з магнієм, для зварювання яких через інтенсивне випаровування магнію при зварюванні слід використовувати дріт із вмістом магнію більшим, ніж у деталі [30].

Для зварювання авіалей та ремонту та виправлення дефектів виливків із низьколегованого силуміну широко застосовується дріт СВАК5. Метал дроту має відносно низьку температуру плавлення та хорошу рідину. Порівняно з дротом із алюмінієво-магнієвих сплавів, при зварюванні, вона дає менше диму та аерозолів і, тому полегшує візуальне спостереження за зварювальною ванною. Слід пам'ятати, що зварний шов цього дроту має низьку пластичність [30, 31].

Для зварювання найбільш широко поширених алюмінієво-магнієвих сплавів, а також для потрібних сплавів алюміній-цинк-магній, що зварюються, використовуються дроти СВАМг5 і СВАМг61. Обмеженнями у її застосуванні є те, що зварний шов не повинен під час експлуатації піддаватися дії температур, що перевищують 80°C [31].

Свого часу промисловість не мала достатньої кількості присадних матеріалів для зварювання алюмінієвих сплавів, і як присадка використовувалися прутки, виготовлені механічною різкою безпосередньо з відходів листів, що зварюються (так звана «локшина»), які потім піддавалися гальванічному очищенню або травленню. Такий підхід є принципово неправильним, тому що не враховує необхідність компенсації легуючих елементів, що вигоряють при зварюванні - насамперед це стосується магнію та кремнію, присутніх у найпоширеніших сплавах типу Al - Mg та Al - Si [31, 32, 33].

Поверхня алюмінієвого дроту не повинна мати слідів стружки, задирів, тріщин, рубців, напливів та інших дефектів, в яких можуть накопичуватися забруднення. Незадовільний стан поверхні дроту, тобто присутність на ньому бруду, пилу, масляних плям, призводить до утворення шкідливих домішок у процесі зварювання, що, своєю чергою, може змінити характеристики горіння дуги та знизити якість зварного шва. Також, неприпустима зміна діаметра дроту за її довжиною (підвищені відхилення, овальність). Зміна діаметра дроту навіть у межах діапазону відхилень, що допускаються виробником, може порушити

стабільність горіння дуги і вплинути на основні параметри зварювального процесу - довжини дуги (тобто напруги), площі плями нагріву (порушення концентрації дуги) та його розташування на стику (неконтрольовані переміщення дуги по зварюваних) крайкам). Перекручений дрід і з вигинами дрід також може впливати на стабільність горіння дуги [32].

Для зварювання з ручною подачею присадного дроту, обов'язково використання спеціальних прутків, що поставляються в герметичній тарі і повністю готові до використання, тобто не потребують додаткового очищення або будь-якої іншої підготовки. У тих випадках, коли упаковка прутків не була використана повністю протягом 2 - 3 годин, вона повинна бути закрита герметично і зберігатися в сухому приміщенні при температурі 20 – 25 °С. Стандартна упаковка для прутків - зазвичай жерстяна банка з пластиковою кришкою, яка забезпечує задовільні умови зберігання протягом 2-3 діб після розкриття [32, 33].

При зварюванні, з механізованим подаванням присадного дроту, котушки з дротом повинні обов'язково мати герметичну упаковку. Алюмінієвий дрід, що застосовується, повинен мати рівну рядну намотування на котушках і обов'язково повинен поставлятися у вологонепроникній упаковці. Перед придбанням партії дроту слід вивчити досвід використання дроту саме цього виробника, а при закупівлі обов'язково запросити усі необхідні сертифікати [32, 34].

Також, можна надати рекомендації щодо захисту дроту безпосередньо під час зварювання. Враховуючи постійну наявність у повітрі виробничих приміщень струмопровідного пилу, водяної та масляної пари, при зварюванні алюмінію з механізованою подачею дроту присади рекомендується застосовувати блоки подачі дроту закритого типу з горизонтальним розташуванням осі котушки з дротом. Для додаткового очищення дроту перед вхідною втулкою механізму подачі дроту можна закріпити пористу м'яку речовину (наприклад, поролон), змочену розчинником [33].

2.2 Загальна концепція зварювання TIG.

Наявність оксидної плівки, що має високу тугоплавкість і погану електропровідність, дуже ускладнює зварювання алюмінієвих сплавів. Крім того, алюміній має таку велику хімічну спорідненість до кисню, що механічне очищення поверхні основного матеріалу перед зварюванням діє протягом нетривалого часу, після чого поверхні дуже скоро знову утворюється оксидна плівка. Оскільки, зруйнувати плівку нагріванням електричним струмом складно через її погану електропровідність, можна вдаватися до руйнування плівки методом катодного розпилення. Це зумовлює необхідність застосування зварювання на змінному струмі [35].

Зварювання методом TIG - найбільш поширений спосіб зварювання, що застосовується для виготовлення зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів відповідального призначення. Основною перевагою процесу дугового зварювання вольфрамовим електродом серед захисного газу є відсутність шлакових включень, можливість роботи на малих струмах дуги (від 5 А) [35, 36], можливість зварювання тонких листів, висока стійкість горіння дуги у всьому діапазоні струмів, технологічність процесу.

При зварюванні TIG дуга горить між вольфрамовим електродом, що не плавиться, і виробом, що зварюється. При цьому відсутнє перенесення розплавленого металу через дуговий проміжок, що полегшує умови горіння дуги та обумовлює її високу стабільність, виключає розбризкування розплавленого металу, скорочує втрати на випаровування та покращує якість зварного шва за рахунок обмеження взаємодії розплавленого металу з газами [36].

При зварюванні TIG на змінному струмі відкривається можливість зруйнувати та усунути оксидний шар за допомогою носіїв заряду в електричній дузі [37]. Для цього підходять тільки іони, оскільки електрони через свою малу масу не мають достатньої для такого процесу кінетичної енергії.

Коли негативний полюс знаходиться на електроді, електрони переміщуються від електрода до виробу, а залишкові іони від виробу до електрода. При такій полярності ефект, що очищає, неможливий. При зворотній полярності важчі іони повертаються поверхню виробу. При цьому за рахунок своєї високої кінетичної енергії вони можуть зруйнувати та усунути оксидний шар на поверхні виробу.

Якби зварювання виконувалося на гарячому позитивному полюсі, то електрод мав би дуже низьку струмонесучу здатність. Тому, цей варіант зварювання TIG застосовується тільки для зварювання дуже тонких алюмінієвих конструкцій (з товщиною стінки до 2,5 мм) [38]. Змінний струм пропонує компромісне рішення. Коли на електроді знаходиться позитивна напівхвиля, виникає ефект, що очищає. Наступна за нею негативна напівхвиля знову охолоджує електрод. Тому, можна говорити про очищувальну і охолодну напівхвилі. Струмонесуча здатність, при зварюванні змінним струмом менше, ніж при зварюванні постійним струмом на негативному полюсі, але вона значно вища, ніж при зварюванні на позитивному полюсі [37, 38].

В даний час, застосовують варіант зварювання TIG на негативному полюсі, при якому використовується захисний газ з високим вмістом гелію (наприклад, 90 % He / 10 % Ar) [38]. При зварюванні на негативному полюсі, як було описано, оксидна плівка лежить на поверхні не руйнується. Однак, вона розплавляється за високої температури потужної гелієвої дуги. Тому, вона лише трохи ушкоджується. Зварювання TIG постійним струмом на негативному полюсі в середовищі гелію завдяки кращому провару застосовується в першу чергу при ремонтних зварюваннях литих деталей з алюмінієво-кремнієвих сплавів [37, 38].

2.3 Зварювання TIG з подачею підігрітого дроту присадки

Все викладене вище стосувалося зварювання TIG з подачею холодного (електрично нейтрального) дроту присадки: процес TIG-CW (Cold Wire). Подача на присадний дріт електричного потенціалу дає більші можливості при зварюванні. Така технологія носить назву подачі підігрітого (або гарячого) дроту присадки: процес TIG-HW (Hot Wire).

2.3.1 Режими подачі присадного дроту

Принцип зварювання TIG із подачею гарячого дроту наступний. Плавлення основного металу відбувається під впливом електричної дуги, що виникає між електродом, що не плавиться, і зварюваним металом, від джерела постійного струму або джерела, що працює як на постійному, так і на змінному струмі. Система подачі дроту забезпечує постійну подачу матеріалу у зварювальну ванну. Завдяки додатковому джерелу струму, напруга через контактний наконечник подається на дріт і за рахунок опору на вільному кінці дроту, що подається, відбувається її нагрівання. Для цього може бути використане джерело постійного струму або джерело, що працює на постійному та змінному струмах. Збільшення довжини вільоту дроту, що подається, веде до підвищення продуктивності наплавлення. Причиною є збільшення електричного опору на цьому відрізку дроту та пов'язане з цим підвищення температури вільного кінця дроту. Кількість теплоти, що виділяється, пропорційно квадрату сили струму і обернено пропорційно опору дроту [39]:

$$G = I^2 \times R$$

3 КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

3.1 Вимоги до методів та контролю зварних з'єднань

Огляд виробу проводиться неозброєним оком з метою виявлення полон, заходів, розшарування, тріщин, а також напливів, підрізів, пор на зварних швах та інших дефектів, що знижують якість виробів та погіршують товарний вигляд.

Місця розташування та утримання маркування виробу та його складових частин, а також наявність та утримання клейм на зварних з'єднаннях виробу перевіряються зовнішнім оглядом.

Геометричні розміри перевіряються за допомогою універсального вимірювального інструменту, що забезпечують похибку не більше ніж 30 % від встановленого допуску на виготовлення.

Контроль якості зварних з'єднань здійснюється наступними методами:

- зовнішнім оглядом та вимірюванням;
- механічними випробуваннями;
- випробуванням на стійкість проти міжкристалічної корозії;
- металографічним дослідженням;
- радіографією або ультразвуковою дефектоскопією;
- гідравлічним (пневматичним) випробуванням (при випробуванні апарату);
- іншими методами (струмовихревим, кольоровим, рентгенотелевізійним тощо), якщо вони передбачені технічним проектом.

Для апаратів, що піддаються термообробці, остаточний контроль якості зварних з'єднань повинен проводитись після термообробки виробів.

Результати контрольних випробувань зварних з'єднань повинні заноситись у паспорт апарату або його додаток.

У процесі виготовлення апарату слід перевіряти:

- відповідність стану та якості зварюваних деталей та зварювальних матеріалів вимогам стандартів та технічних умов;
- відповідність якості підготовки кромки та складання під зварювання вимогам стандартів та креслень;
- дотримання технологічного процесу зварювання та термообробки, розробленого відповідно до вимог стандартів та креслень.

Зовнішній огляд та вимірювання зварних швів.

Зовнішньому огляду та виміру належать усі зварні з'єднання; для виявлення зовнішніх дефектів, які не допускаються цим розділом.

«Візуальний та вимірювальний контроль зварних швів проводиться після того, як зварні шви та прилеглі до них поверхні основного металу по обидва боки шва шириною не менше 20 мм будуть очищені від шлаку, бризок та інших забруднень».

Огляд проводиться з лицьового та зворотного боку швів на всій їх протяжності.

Дефекти зварних швів, виявлені зовнішнім оглядом, слід усунути до проведення контролю швів з метою виявлення внутрішніх дефектів.

Механічні випробування:

- випробування на статичне розтягування окремих зразків із зварних трубних стиків можна замінити випробуванням на розтягування стиків зі знятим посиленням;

- випробування на статичний згин зварних зразків труб з ДК до 100 мм може бути замінено випробуванням на сплющення за ГОСТ 6996 (зразки типу ХХІХ, ХХХ);
- при випробуванні на згинання зразків товщиною більше 50 мм допускається доведення товщини зразків до 50 мм за допомогою зняття стружки або фрезерування контрольних пластин з обох сторін порівну. Тип зразків ХХVІІ згідно з ГОСТ 6996, діаметр оправлення – 50 мм;
- випробування на ударний згин проводяться тільки для алюмінієвих сплавів АМг5 та АМг6.

Механічні випробування на ударний вигин проводяться при товщині металу щонайменше 12 мм.

Для апаратів групи 3 механічні випробування зварних зразків не допускається, якщо підприємство-виробник гарантує якість зварних швів виробів.

«У разі отримання незадовільних результатів з якого-небудь виду механічних випробувань необхідно проведення повторних випробувань при подвоєній кількості зразків на зразках, вирізаних із тієї ж контрольної пластини або шва зварного виробу. При незадовільних випробуваннях шви вважаються непридатними».

Випробування на стійкість проти міжкристалічної корозії (МКК).

Випробування зварних з'єднань на стійкість проти МКК повинні проводитись для апаратів та їх елементів, виготовлених з алюмінію та його сплавів за наявності вимог у технічному проекті.

У разі виготовлення апаратів, призначених для експлуатації з азотною кислотою та іншими середовищами, що викликають МКК, проведення випробувань на стійкість проти МКК є обов'язковим.

Випробування на стійкість проти МКК зварних з'єднань з алюмінію проводять за методикою, викладеною в додатку 4, а з алюмінієвих сплавів – за ГОСТ 9.021.

При незадовільних результатах корозійних випробувань проводять повторні випробування з подвоєною кількістю зразків. У разі незадовільних результатів повторних випробувань з'єднання бракуються.

Методика випробувань на стійкість проти міжкристалітної корозії поковок, виливків та зварних з'єднань деталей з алюмінію марок А99, А85, А8, А7, А5, АТ 00, АТ 0, АТ 1.

Виготовлення зразків.

Зразки виготовляють із контрольних пластин.

Початкові та кінцеві частини шва (по 50мм кожна) відрізають. З середньої частини виготовляють три зразки довжиною 50мм та шириною 30мм. Схема розкрою контрольної пластини повинна відповідати зазначеній на рисунку 3.1.

Підготовку поверхні зразків для випробувань проводять наступним чином: знімають посилення шва з двох сторін, потім з контрольованої поверхні знімають механічним способом шар товщиною 1 мм, забезпечуючи шорсткість поверхонь Ra 2,5 ГОСТ 2789. Перед випробуванням зразки знежирюють етиловим спиртом, уайт-спірит або ацетоном.

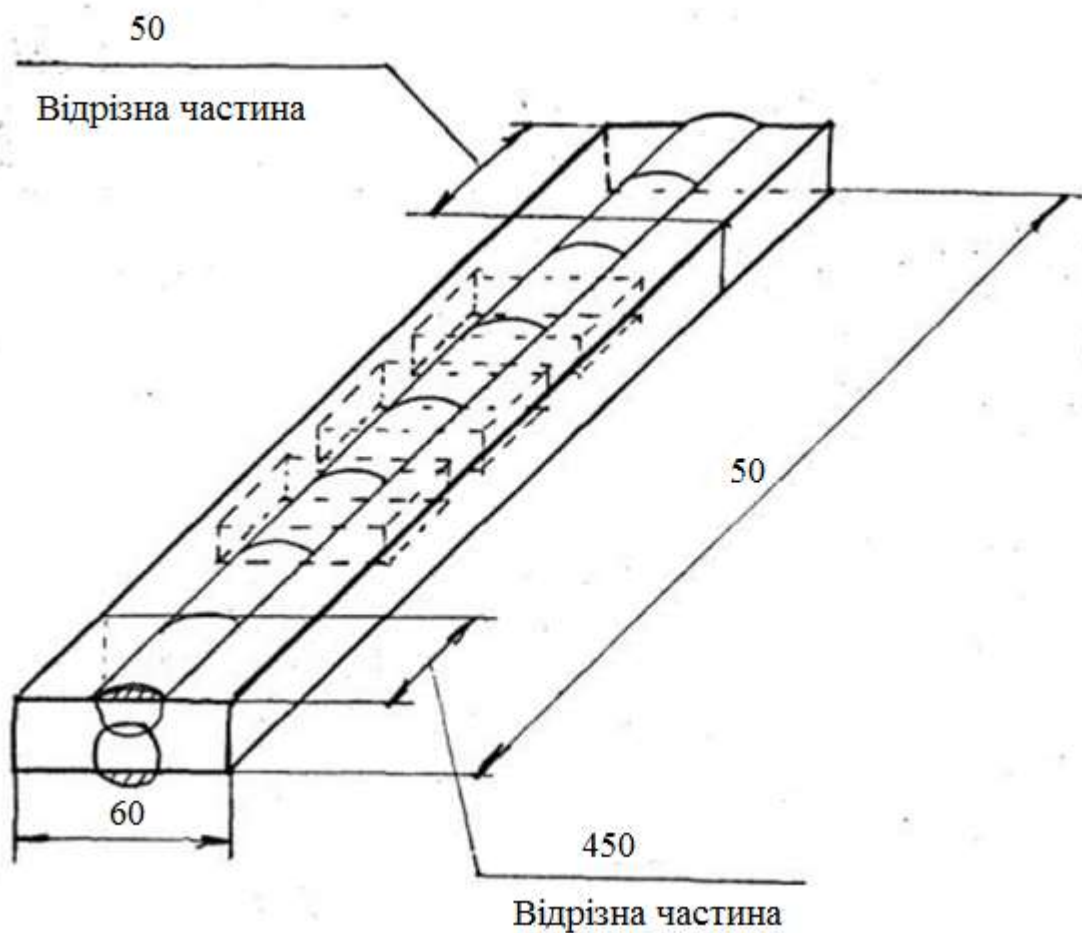


Рисунок 3. 1 – Схема розкрою контрольної пластини

Розчин, в якому проводять травлення, повинен містити 0,6% натрію фтористого в 5% (за масою) розчині азотної кислоти. Фтористий натрій додають розчин азотної кислоти перед завантаженням зразків при досягненні температури 80. Після додавання натрію фтористого розчин перемішують.

Випробування проводять у скляних або поліпропіленових склянках, які для підтримки постійної температури встановлюють у водяній бані, з контактним термометром типу ТПК за ГОСТ 9871. Склянки накривають скляною або поліпропіленовою кришкою. Усі роботи проводять у витяжній шафі при включеній вентиляції. Травлення зразків проводять при температурі розчину 80.

Зразки завантажують таким чином, щоб вони не торкалися один одного і до контрольованої поверхні був вільний доступ розчину.

Травлення зразків проводять протягом 1 години, при цьому кількість розчину повинна бути такою, щоб рівень розчину над контрольованою поверхнею був не менше 20 мм.

Після травлення вивантажені зразки промивають проточною водою та сушать фільтрованим папером.

Оцінка результатів випробування

Оцінку стійкості проти міжкристалічної корозії проводять після огляду поверхні зразків зі збільшенням у 12 - 24 рази.

Свідченням схильності до міжкристалічної корозії є наявність хоча б одного зразка на контрольованій поверхні чіткої безперервної сітки розтравлених меж зерен.

За відсутності безперервності сітки бракувальною ознакою не є наявність смужкості, різнотравимості поверхні, крапок, переривчастої сітки та сітки, позначеної одиничними точками.

У разі отримання незадовільних результатів проводять повторні випробування на подвоєній кількості зразків.

При отриманні незадовільних результатів хоча б в одному зразку, при повторних випробуваннях, зварні сполуки вважаються нестійкими проти міжкристалічної корозії.

Металографічні дослідження.

Металографічні дослідження повинні піддаватися зварні з'єднання апаратів групи 1. Металографічні дослідження для апаратів груп 2 і 3 проводяться на вимогу технічного проекту.

Металографічні дослідження макро- та мікроструктури повинні проводитися відповідно до ГОСТ 26-1379 на одному зразку з кожної контрольної зварної сполуки.

Якість зварної сполуки за результатами металографічних досліджень має відповідати вимогам цього розділу.

При виявленні неприпустимих дефектів при металографічних дослідженнях допускається проведення повторних випробувань на подвоєній кількості зразків. У разі незадовільних результатів повторних випробувань з'єднання бракуються.

Контрольні зварні з'єднання.

Вимоги до зразків, вирізаних з КСС для механічних та корозійних випробувань, та металографічних досліджень, повинні відповідати ГОСТ 6996, ОСТ 26-3 та вимогам цього стандарту.

Контрольні зразки для контролю якості поздовжніх швів виробу повинні виготовлятися таким чином, щоб шов був продовженням поздовжнього шва виробу, що зварюється.

«Контрольні зразки для перевірки якості поперечних (кільцевих) швів повинні виготовлятися при обов'язковому дотриманні тих самих режимів зварювання, із застосуванням тих же присадних матеріалів та з максимальним наближенням до положення шва при зварюванні».

Для проведення металографічних досліджень із кожної контрольної пластини вирізається поперек один зразок.

Для металографічного контролю кутових та таврових з'єднань вварювання штуцерів та люків у корпус апарату кожен зварювальник, який виконує ці операції, повинен зварити одне КСС на виріб.

З КСС кутових та таврових швів повинні вирізати зразки (шліфи) тільки для металографічного дослідження.

Для контролю КСС у трубчастих елементах одночасно з виробом повинні зварюватися контрольні з'єднання.

При неможливості виготовити плоскі зразки зі зварного стику трубчастого елемента, дозволяється проводити випробування зразків-сегментів, а також зразків, вирізаних із контрольних пластин, зварених за вказівкою відділу технічного контролю.

При виготовленні виробів із застосуванням деталей, конфігурація та розміри яких не дозволяють виготовити зразки для механічних випробувань, визначення механічних властивостей не проводять, але при цьому підприємство-виробник повинен відпрацювати технологію зварювання, яка гарантуватиме необхідні механічні властивості зазначених зварних з'єднань.

Контроль якості таких зварних сполук проводять радіографією або ультразвуковою дефектоскопією обсягом 100% їх довжини.

Матеріал, конструкція, розміри та підготовка кромek під зварювання на контрольних з'єднаннях повинні відповідати прийнятим при виготовленні апарату.

При виготовленні виробу ручним зварюванням, випробування якості поперечних (кільцевих) швів не проводиться, якщо поздовжні та поперечні шви виконувались одним зварником.

При ручному зварюванні стикових з'єднань виробу кількома зварювальниками, кожен зварювальник повинен виконати зварювання однієї контрольної пластини.

При виготовленні виробів автоматичним, напівавтоматичним зварюванням на кожен виріб повинне зварюватися одне КСС (на кожен вид процесу, що застосовується) при використанні однакових присадних матеріалів, режимів зварювання та термообробки.

У разі, коли протягом робочої зміни зварюється кілька однотипних судин, дозволяється на кожен вид зварювання зварювати по одному КСС на початку і кінці зміни.

Якщо багатопрохідний шов виконується декількома зварювальниками, на цей шов має зварюватися КСС, причому проходи виконуються тими ж зварювальниками та в аналогічному порядку.

При серійному виготовленні однотипних не підвідомчих апаратів з листового матеріалу, що працюють з середовищами, що не викликають міжкристалічної корозії, у разі контролю стикових зварних з'єднань ультразвуковою або радіографічною дефектоскопією в обсязі 100 % довжини швів допускається на кожен вид зварювання. При цьому, в одну партію можуть бути об'єднані апарати одного виду з листового матеріалу однієї марки, що мають однакову форму оброблення кромки, виконані за єдиним технологічним процесом і підлягають термообробці по одному режиму, якщо цикл виготовлення всіх виробів по складально-зварювальних роботах, термообробці та контрольним операціям вбирається у 3 місяців.

КСС повинні бути піддані зовнішньому огляду, ультразвуковому контролю та радіографії по всій довжині, а при неможливості поєднання двох методів контроль проводиться одним з цих методів.

При виявленні дефектів в КСС зварні, з'єднання виробу повинні бути піддані додатковому контролю обсягом 100 % швів, контрольованих цим контрольним з'єднанням.

Термообробка КСС повинна проводитися з виробом (при загальній термообробці) або окремо від нього (при місцевій термообробці) із застосуванням тих самих методів та режимів обробки.

КСС та вирізані з них зразки повинні мати тавра однакові з клеймами зварних швів виробу.

Ультразвукова дефектоскопія, радіографія.

Контроль зварних з'єднань ультразвуковою дефектоскопією та радіографією має на меті виявлення внутрішніх дефектів зварних з'єднань та визначення якості зварювання.

Ультразвукова дефектоскопія (УЗД) повинна проводитись відповідно до вимог ГОСТ Р 55724-2013, ОСТ 26-01-167-85 та іншої НТД, що діє.

Радіографія (РГК) зварних з'єднань повинна проводитись відповідно до ГОСТ 7512-82 та ОСТ 26-11-03-84. Метод контролю (УЗД, РГК та їх поєднання) повинен вибиратися, виходячи з можливостей більш повного і точного виявлення неприпустимих дефектів з урахуванням особливостей фізичних властивостей металу, а також особливостей методики контролю для даного виду зварних з'єднань і виробів.

Місця перетину зварних швів підлягають обов'язковому контролю РГК та УЗД.

Перед контролем відповідні ділянки зварних з'єднань повинні бути замарковані для можливості виявлення на картах контролю або рентгено-гамма-знімках.

При неможливості здійснення контролю методом РГК або УЗД через недоступність окремих зварних з'єднань або при неефективності зазначених методів контроль якості цих зварних з'єднань повинен проводитись іншим методом дефектоскопії відповідно до інструкції, затвердженої в установленому порядку.

Дефектні ділянки зварних швів, виявлені під час контролю, мають бути видалені та знову заварені. Повторне виправлення допускається трохи більше трьох разів.

3.2 Вибір методів та обсягу контролю зварних з'єднань

Перед виконанням зварних з'єднань алюмінієвого виробу зварювальники повинні заварити допускні стики КСС. Зразки КСС повинні бути однотипними за діаметром і товщиною. Зварювання повинне проводитися при дотриманні тих самих режимів зварювання, із застосуванням тих же присадних матеріалів та з максимальним наближенням до положення шва при зварюванні.

Допускні стики повинні бути проконтрольовані візуальним та вимірювальним контролем, радіографічними випробуваннями, а також зварні стики повинні бути піддані механічним випробуванням.

Всі поздовжні та поперечні стикові шви при виготовленні стінок корпусу, днища, обіцянок, переходів та відводів повинні контролюватись візуально-вимірювальним, радіографічним контролем в обсязі 100 %.

Кутові зварні шви при виготовленні вузлів повітроводу, що сприймають робочі навантаження, контролюються візуально-вимірювальним та ультразвуковим контролем в обсязі 100 %.

Розміри зварних швів вибираються згідно з ГОСТ 14806 - 80 або за необхідності ГОСТ 27580 - 88 [27 - 30]. Катет зварних швів приймається рівним товщині тоншої деталі (у вузлі, що виготовляється). Допуски на розміри катета приймати згідно з ГОСТ 14806 - 80 або, за необхідності, ГОСТ 27580 - 88 [27 - 30].

Зварні шви, що не сприймають робочих навантажень, повинні бути проконтрольовані візуально-вимірювальним та ультразвуковим контролем обсягом 10 %.

3.3 Вимоги до якості зварних з'єднань

В якості нормативно-технічної документації з розбракування приймаємо ОСТ 26-01-1183-82 Посудини та апарати алюмінієві. Загальні технічні умови

У зварних з'єднаннях не допускаються такі зовнішні дефекти:

- тріщини всіх видів та напрямків;
- пористість зовнішньої поверхні шва, непровари, підрізи, напливи, пропали та незаварені кратери;
- зміщення та спільне зведення кромки елементів, що зварюються, понад норми, встановлені згідно з ОСТ 26-01-1183-82;
- невідповідність форм та розмірів зварних швів вимогам стандартів та технічної документації.

У зварних з'єднаннях не допускаються такі внутрішні дефекти:

- тріщини всіх видів та напрямків, рихлоти;
- нориці;
- непровари (несплавлення) у перерізі шва, підрізи за винятком:

а) у двосторонніх кутових та таврових з'єднаннях патрубків з внутрішнім діаметром не більше 250 мм апаратів групи 2 і 3 допускається місцевий внутрішній непровар, розташований в області змикання корневих швів глибиною (висотою) не більше 10% товщини стінки корпусу, але не більше 2 мм та сумарною довжиною трохи більше 5% довжини шва.

б) у кільцевих стикових зварних з'єднаннях апаратів групи 3, доступних для зварювання тільки з одного боку і виконаних без підкладного кільця допускається непровар у корені шва глибиною (висотою) не більше 10% номінальної товщини елементів, що зварюються, але не більше 2 мм і сумарною довжиною не понад 20% довжини шва.

- пори, порожнини, шлакові та вольфрамові включення, що перевищують параметри, встановлені класами дефектності зварних швів за ГОСТ 23055.

Пори або включення довжиною менше 0,2 мм при розшифровці радіограм не враховується. Чутливість контролю – за ГОСТ 7512. При цьому, значення чутливості не повинні перевищувати: для зварних з'єднань 5-7 класів – значень, наведених для 3-го класу чутливості згідно з ГОСТ 7512.

Міцність зварних з'єднань з різномірних марок матеріалу повинна бути не нижче міцності менш міцного матеріалу, а пластичність – не нижче пластичності менш пластичного матеріалу.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗВАРЮВАНОСТІ ВТОРИННИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

4.1 Технологічні особливості зварювання плавленням алюмінієвого сплаву В91(1913)

Всі роботи з дослідження зварюваності сплаву В91(1913) проводили на листових напівфабрикатах товщиною 2,0 мм [40].

Таблиця 4.1 – Склад сплаву марки В91(1913) [40]

Вміст елементів, % (за масою)											Домішки, %(за масою), не більше	
Al	Mg	Sc	Mn	Zr	Zn	Ni	Cr	Ti	Fe	Cu	Si	In
Ос	5,2	0,1	0,5	0,0	0,5	0,1	0,0	0,0	0,1			0,0
но	–	8–	–	9–	–	0–	5–	1–	–	0,1	0,1	0,0
ва	5,7	0,2	0,8	0,1	0,8	0,1	0,1	0,0	0,1			0,05
		2		3		5		5	5			

Як присадочні матеріали для дослідження стійкості до утворення гарячих тріщин і для зварювання алюмінієвого сплаву В91(1913), використовували зварювальні дроти системи Al-Mg різних складів – Св-АМг5, Св-АМг6, Св-АМг61, Св-1597 - по ГОСТ 7871-75 [40].

Автоматичне аргоно-дугове електрозварювання (ААрДЕЗ) проводили на установці КДС-29, оснащеної джерелом живлення зварювальної дуги з максимальним струмом 450 А (рисунок 4.1, а) [40].

Лазерне зварювання проводили на роботизованому лазерному комплексі. Електронно-променеє зварювання (ЕПЗ) проводили на комплексі електронно-променевого зварювання АЕЛТК-11-486, оснащеному системою ЧПУ і енергоблоком ЕЛА 40/60 потужністю 40 кВт з прискорювальною напругою 60 кВ, що дозволяє в процесі зварювання, за допомогою програми електронно-променевої гармати, технологічні параметри процесу ЕПЗ, такі як швидкість зварювання, струм променя, струм фокусування, напруга, що прискорює, і робочу відстань (рисунок 4.1, в). Як катод, використовували таблетку з гексабориду лантану (LaB_6) з діаметром активної зони 6 мм.

Для основного та присаджувальних матеріалів, як підготовка поверхні, застосовується хімічне травлення безпосередньо перед зварюванням за

ПІ 1.4.890–2004 «Підготовка поверхні металів і сплавів під контактну і дугову зварювання».



а



б



в

а – технологічний комплекс автоматичного аргано-дугового зварювання

б – роботизований технологічний комплекс лазерного гібридного зварювання Laser Weld 8R60;

в – комплекс електронно-променевого зварювання на базі установки АЕЛТК-11-486.

Рисунок 4.1 – Комплекси для здійснення зварювання [40]

При виготовленні зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів методами зварювання плавленням, одним з основних дефектів є пористість швів. Основною причиною утворення пір при зварюванні алюмінієвих сплавів є наявність водню в розплаві металу [41,42]. Імовірними джерелами надходження водню у зварювальну ванну можуть бути: водень, що знаходиться в основному металі; водень, що міститься в захисному газі, і водень, що утворюється в результаті дисоціації в дузі парів води, присутніх в ньому або потрапляють в зону дуги з атмосфери, а також водень, що утворюється в результаті взаємодії основного і присадкових металів і вологи, що входить до складу гідратованих оксидів. Найбільш небезпечним є останнє джерело водню, саме тому слід звернути увагу на питання підготовки поверхні під зварювання [43].

Досліджували: вплив часу витримки після травлення на пороутворення при зварюванні. Оцінювали: два варіанти підготовки – з шабрінням і без шабріння кромки [40, 44]. Зварювання проводили безпосередньо після травлення і через 5; 10 і 15 днів після травлення [40,45]. Кількість пір визначали за результатами рентгенівського контролю. Встановлено, що пористість у зварних з'єднаннях сплаву В91(1913) відсутня, якщо зварювання проводиться не пізніше ніж через одну добу після хімічного травлення. Застосування

шабріння кромки безпосередньо перед зварюванням дозволяє збільшити розрив між операціями травлення і зварюванням до п'яти діб [40,46].

Аналіз результатів випробувань на стійкість до утворення гарячих тріщин показав, що застосування присадного матеріалу значно підвищує даний показник. Найбільшого значення досягається при використанні присадного матеріалу марки Св-1597, що також має у своєму складі скандій(табл. 4.1) [40,47].

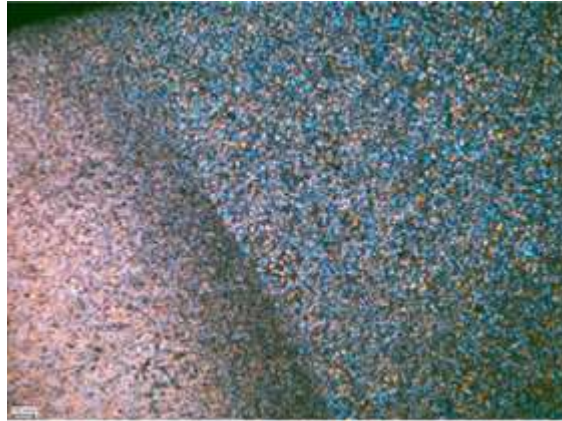
Таблиця 4.1 – Результати випробувань на стійкість до утворення гарячих тріщин у сплаву В91(1913) [40]

Присадний дріт	Швидкість зварювання $V_{кр}$, мм/хв
Без присадки	3,9
Св-АМГ5	9,7
Св-АМГ6	9,0
Св-АМГ61	10,5
Св-1597	12

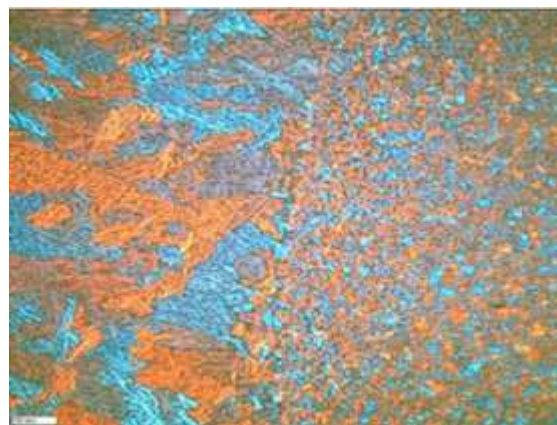
Сплав В91(1913) має високу плинність розплаву, що призводить до необхідності використовувати при автоматичному аргано-дуговому зварюванні високі швидкості - більше 20 м/год [40,48].

Дослідження зміни мікроструктури зварного з'єднання показало, що застосування зварювального дроту марки Св-1597 забезпечує одержання більш дрібнозернистої структури зварного шва [49]. Застосування оптимальних режимів зварювання забезпечує формування вузької зони термічного впливу, що представляє собою рекристалізовану структуру, яка формується при впливі високих температур при ААрДЕЗ у процесі утворення та кристалізації зварного з'єднання. Зміна характеру структури пов'язана з короткочасним локальним

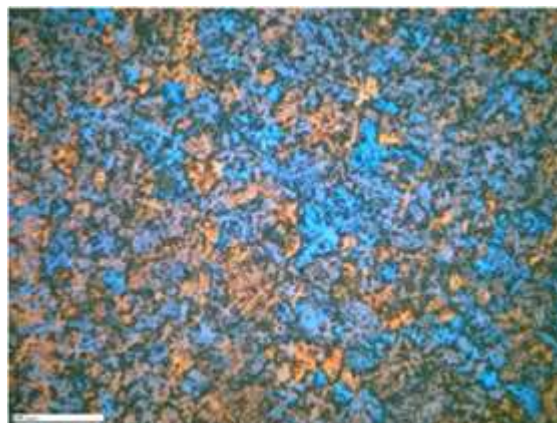
підвищенням температури по межі шва, що призводить до розвитку процесів рекристалізації. Типові мікроструктури зварних з'єднань представлені на рисунку 4.2 [40,50].



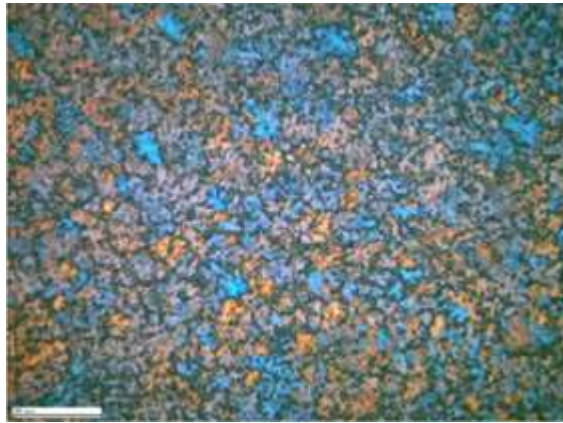
а



б



в



Г

- а – навколошовна зона ($\times 50$);
 б – навколошовна зона (100);
 в – зварний шов із присадкою Св-АМГ6 (200);
 г – зварний шов із присадкою Св-1597($\times 200$)[40].

Рисунок 4.2 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву В91(1913) при ААрДЕЗ

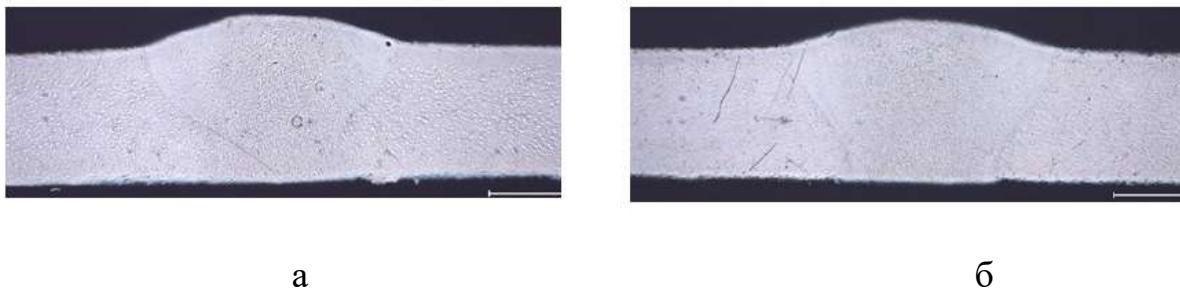
Аналіз результатів механічних випробувань зварних з'єднань показав, що застосування дроту марки Св-1597 дозволяє підвищити міцність, ударну в'язкість та пластичність шва (табл. 4.2) [40,51].

Таблиця 4.2 – Механічні властивості зварних з'єднань листів зі сплаву В91(1913) [51]

Присадний дріт	$\sigma_{\text{в.св}}$, МПа	$K = \sigma_{\text{в.св}} / \sigma_{\text{в}}$	K_{CU} , кДж/м ²	Кут вигину α , градус
Св-АМГ6	345	0,8	272	105
Св-1597	395	0,9	330	115

При лазерному зварюванні, своєю чергою, встановлено позитивний впливом геть ресурсні характеристики малих швидкостей зварювання. Зниження швидкості зварювання в досліджуваному діапазоні не призводить до додаткового розміцнення, проте виникають такі негативні особливості, як інтенсивне кипіння металу зварювальної ванни з подальшою фіксацією газових бульбашок у вигляді пористості [51]. Це пов'язано з вигоранням легуючого елементу, що легко випаровується - Mg. Крім того, зварювання на малих швидкостях призводить до провисання зварювальної ванни [52].

Для мінімізації цих негативних факторів проводилося зварювання розфокусованим променем (зі зниженою щільністю потужності) разом із застосуванням дроту присадки. При цьому, дослідження мікроструктури показало, що лита зона зварних швів сплаву В91(1913), виконаних на швидкості зварювання $V_{св} = 0,04$ м/с, характеризується звуженням в нижній частині на відміну від зразків, виконаних на швидкості зварювання $V_{св} = 0,02$ м/с, на яких проплав ширший, що позитивно позначається на характеристиках міцності і ресурсних (рисунок 4.3) [53].



а – макроструктура ($\times 12,5$) зварних з'єднань сплаву В91(1913) на швидкості зварювання 0,04 м/с;

б – макроструктура ($\times 12,5$) зварних з'єднань сплаву В91(1913) на швидкості зварювання 0,02 м/с.

Рисунок 4.3 – Макроструктура ($\times 12,5$) зварних з'єднань сплаву В91 (1913) на швидкості зварювання 0,04 (та 0,02 м/с [53]

Застосування присадок обох марок при зварюванні сплаву В91(1913) дозволяє отримати дрібнозернисту структуру зварного шва з розміром зерна 10 - 20 мкм залежно від швидкості зварювання (рисунок 4.4) [54].



а



б

а – виконаних на швидкості зварювання $V_{св}=0,02$ м/с присадними дротами Св-АМг5 (а – $\times 200$);

б – виконаних на швидкості зварювання $V_{св}=0,02$ м/с присадними дротами Св-АМг61 (б – $\times 2000$).

Рисунок 4.4. – Мікроструктура центру шва зварних з'єднань сплаву В91(1913) [54]

При лазерному зварюванні сплаву В91 (1913) застосування різних технологічних варіантів (режимів зварювання в заданих діапазонах і складу присадного матеріалу) незначно впливає на пластичність, виміряну по куту вигину (до 15%), і міцність (до 3%) зварних з'єднань (табл. 4.3) [55, 56].

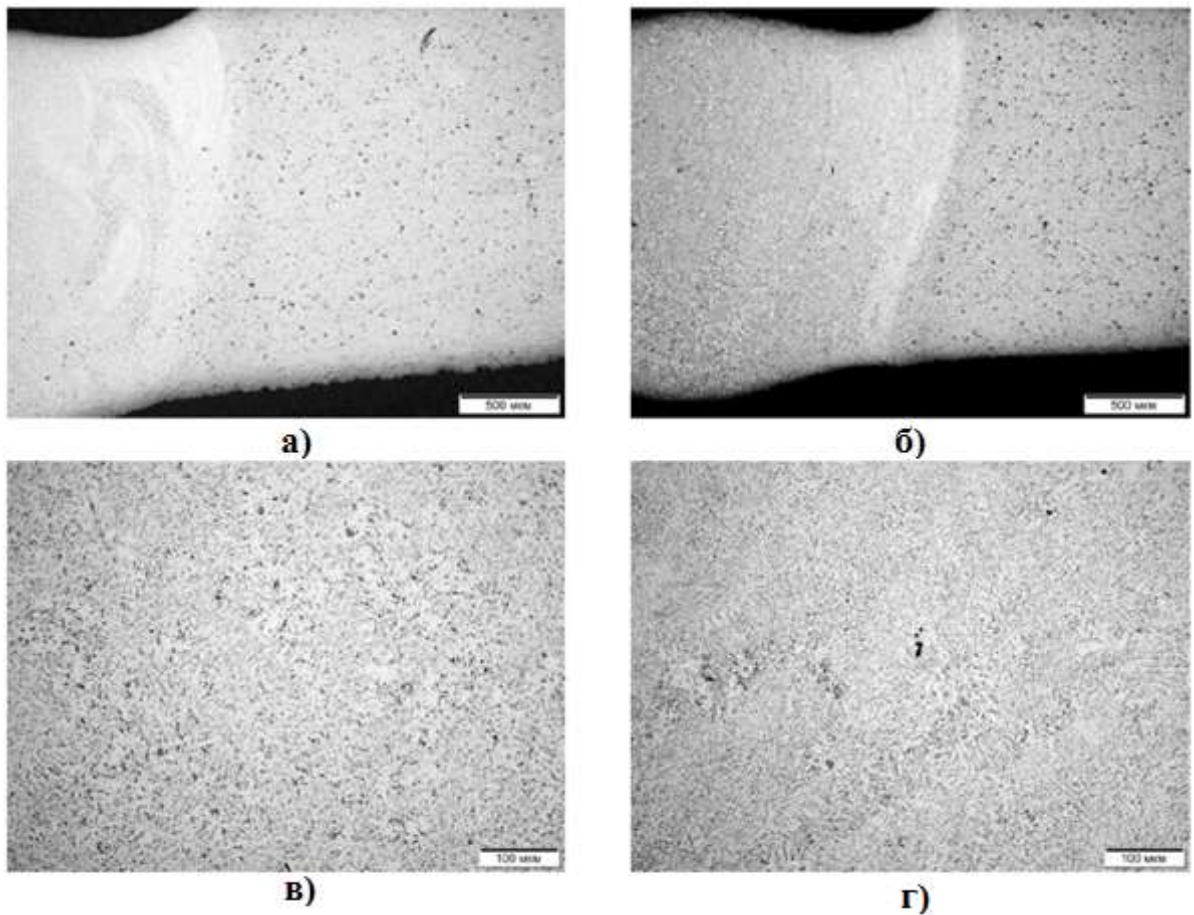
Таблиця 4.3 – Механічні характеристики зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних лазерним зварюванням з присадками [55, 56]

Присадний дріт	$\sigma_{св}$, МПа	$V_{св}$, м/с	$K=\sigma_{св}/\sigma_{св}$	KCU , кДж/м ²	Кут вигину α , градус
Св-АМг5	370	0,04	0,93	235	94
	375	0,02	0,94	220	102
Св-АМг61	380	0,04	0,95	220	108
	375	0,02	0,94	190	96

Застосування зварювального дроту складу Св - АМг5 замість складу

Св-АМг61 дозволяє підвищити ударну в'язкість зварних з'єднань до 24 %.

Зварний шов, виконаний електронно-променевим зварюванням, характеризується відсутністю лускатості, паралельними стінками зварювальної ванни та незначним провисанням розплаву [57]. Дендритна структура литої зони шва більш рівномірна порівняно зі структурою, отриманою при лазерному зварюванні (рисунок 4.5) [58].



а – мікроструктура зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних електронно-променевим зварюванням при швидкості зварювання 0,025 м/с перехідної зони;

б – мікроструктура зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних електронно-променевим зварюванням при швидкості зварювання 0,03 м/с, перехідної зони;

в – мікроструктура зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних електронно-променевим зварюванням при швидкості зварювання 0,025 м/с, центру шва (в, г);

г – мікроструктура зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних електронно-променевим зварюванням при швидкості зварювання 0,03 м/с, центру шва (в, г).

Рисунок 4.5 – Мікроструктура зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних електронно-променевим зварюванням при швидкості зварювання 0,025 та 0,03 м/с, перехідної зони та центру шва [58]

Дослідження впливу швидкості ЕПЗ сплаву В91(1913) на механічні характеристики показало, що зі збільшенням швидкості зварювання підвищується міцність та пластичність зварних сполук, при цьому показники ударної в'язкості знижуються (табл. 4.4) [59].

Таблиця 4.4 – Дослідження впливу швидкості ЕПЗ сплаву В91(1913) на механічні характеристики

Швидкість зварювання $V_{св}$, м/с	$\sigma_{св}$, МПа	KCU , кДж/м ²	Кут вигину α , градус
0,016	315	321	103
0,025	325	323	118
0,033	350	305	127

Відмінною особливістю зварних з'єднань сплаву В91(1913), виконаних ЕПЗ, є більш високий рівень ударної в'язкості в порівнянні з лазерним зварюванням, пов'язаний з вакуумним переплавом металу шва [60].

4.2 Зварюваність сплаву АК9М2

Зварюваність вторинних силумінів досліджували на сплаві АК9М2, шихта виготовлення якого містила від 1 до 19 % стружки. Вміст заліза у сплаві змінювалося від 0,66 до 2,34 %, присадка модифікатора – від 0,02 до 0,22 % [61, 62]. Зі злитків з різним вмістом заліза і різними присадками модифікатора виготовляли пластини розміром 120x100x5 мм і відповідно до ГОСТ 14806-80

виконували обробку кромки. Перед зварюванням, пластини були оброблені травником, який містив HNO_3 і HF , протягом 20-30 з промиті проточною водою і просушені сухим повітрям з температурою $+20-25$ °С. Технологію зварювання обирали з урахуванням рекомендацій, наведених у роботах [63, 64].

Зварювання проводили на установці УДГУ-251 серед аргону змінним струмом. Режим зварювання характеризувався силою зварювального струму

$I_{\text{св}} = 120-140$ А та напругою на дузі $U_{\text{д}} = 20-24$ В. Присадним металом служив сплав АК9М2 того ж складу, що й основний метал. З отриманих зварних з'єднань виготовляли стандартні плоскі зразки за ГОСТ 6996-66 з концентратором напруги для випробувань на розтягування (рисунок 4.6). Випробування на стійкість проти утворення гарячих тріщин проводили за методикою "точковий шов" [65], що імітує технологічний процес усунення дефектів лиття та зварного шва. Згідно з цією методикою, випробування проводили у два етапи. На першому етапі у зразках розміром $200 \times 150 \times 6$ мм свердлили поглиблення діаметром 10 мм і глибиною 3-5 мм, які заварювали аргонно-дуговим способом з присадкою металу того ж складу, що і основний метал. На другому етапі отримані точкові шви зачищалися і піддавалися повторному розплавленню. При цьому режим зварювання характеризувався такими параметрами: $I_{\text{св}} = 300$ А, $U_{\text{д}} = 13$ В, $t_{\text{св}} = 20$ с, що забезпечувало локальне розплавлення металу. Наявність тріщин визначали візуально по межі сплавлення та в кратері шва [66].

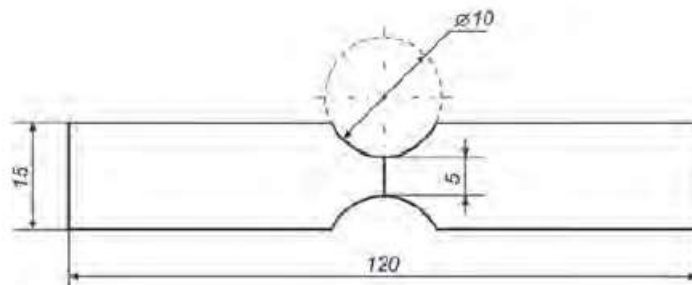
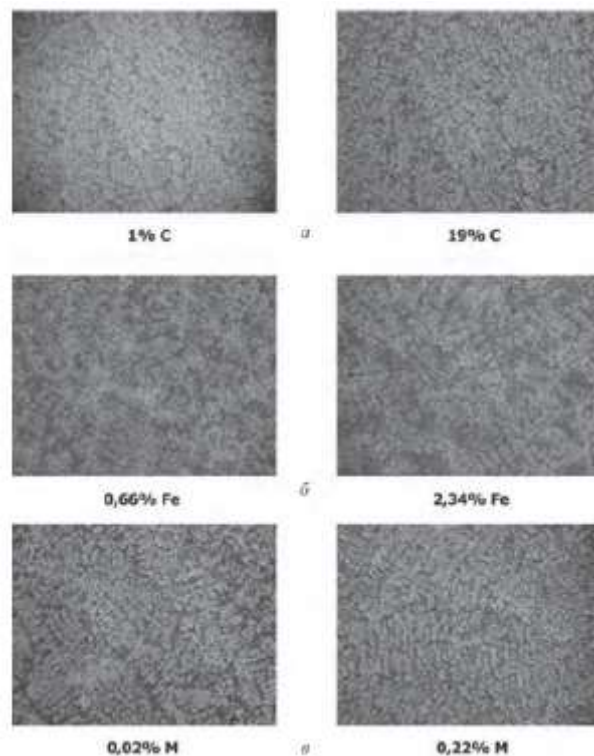


Рисунок 4.6 – Зразок для випробувань зварного з'єднання на розрив [67]

У ході проведення роботи, всі дослідження проводили на зразках, виготовлених з литого металу без термічної обробки та після термічної обробки (т. о.) за режимом Т6 (загартування + штучне старіння), оскільки цей режим передбачено ДСТУ 2839–94 (ГОСТ 1583–93)) для сплаву АК9М2. Дослідження впливу кількості стружки, заліза та модифікатора на мікроструктуру зварного шва без термічної обробки дозволило зробити висновок, що підвищення вмісту стружки та заліза негативно впливало на структуру металу, яка ставала менш упорядкованою та менш щільною зі значною кількістю інтерметалідних фаз несприятливої морфології (рисунок 4.7. а, б) [67]. Зі збільшенням кількості заліза, внаслідок його низької розчинності в алюмінію, значно підвищувалася об'ємна частка залізовмісних фаз пластинчастої форми (рисунок 4.7, б) [67]. Модифікатор, крім модифікуючої дії, надавав рафінуючий вплив, що сприяло отриманню щільного металу з дисперсною структурою та рівномірним розподілом структурних складових за обсягом (рисунок 4.8, в) [67].



а – вплив стружки С; б – вплив заліза Fe; в – вплив модифікатора М

Рисунок 4.7 – Вплив стружки, заліза та модифікатора на мікроструктуру зварного шва без термічної обробки, $\times 500$ [67]

В цілому, аналізуючи структуру металу зварного шва, слід зазначити, що в порівнянні з основним металом вона відрізняється підвищеною щільністю та дисперсністю. Це можна пояснити високою швидкістю охолодження металу внаслідок значної теплопровідної здатності алюмінію та його сплавів, а також позитивною дією високого аргону чистоти, який є ефективним захисним газом для алюмінієвих сплавів. Проведення термічної обробки показало, що порівняно з основним металом макро- та мікроструктура зварного шва була дисперснішою і не піддавалася значним змінам (рисунок 4.8) [67] під дією високих температур.

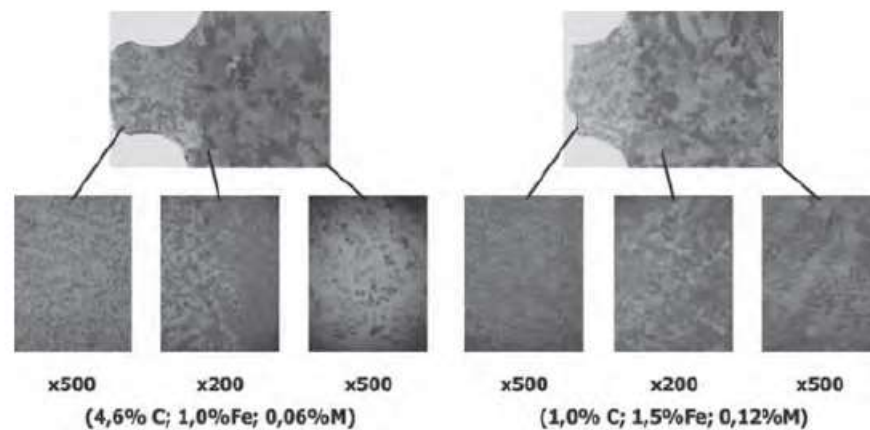
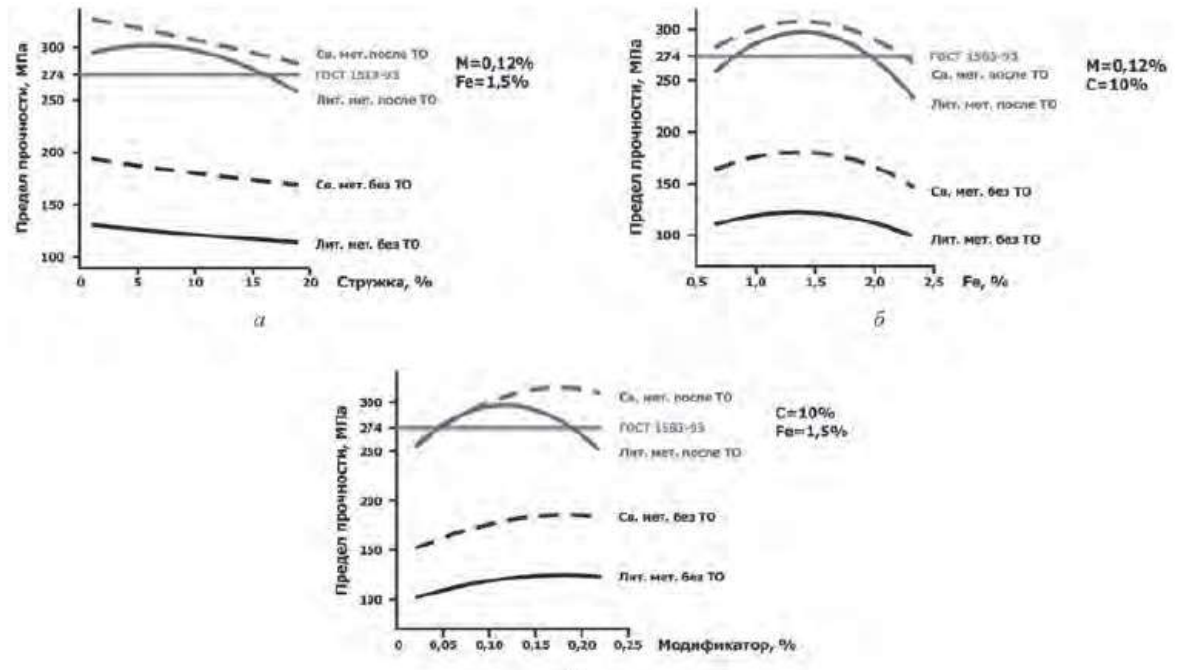


Рисунок 4.8 – Вплив термічної обробки на макро- та мікроструктуру зварного шва [67]

Термічна обробка, метою якої є досягнення максимальної міцності, сприяла підвищенню межі міцності як литого металу, так і зварного металу з'єднання. При цьому, збереження різниці за цим показником, після термічної обробки, підтверджує дані щодо наявності спадковості структури та властивостей в алюмінієвих сплавах. У той же час, спостерігався негативний вплив стружки, яка вносила значну кількість неметалевих включень, а також заліза. При його концентрації більше 1,5 мас.% збільшувалася кількість пластинчастих інтерметалідних фаз Al_5FeSi і Al_7Cu_2Fe зі значним параметром форми (відношення максимальної довжини включення до його товщини), що досягав значень 30-46. Оптимальна кількість модифікатора при обробці литого металу становила 0,10-0,15%, а для зварного з'єднання – 0,15-0,20%. Вищий

вміст модифікатора, необхідне для зварного металу (рисунок 4.9, в) [67], обумовлено меншою концентрацією його компонентів у складі електрода та їх частковим вигоранням у процесі зварювання.



а – вплив вмісту стружки на межу міцності зварної сполуки;

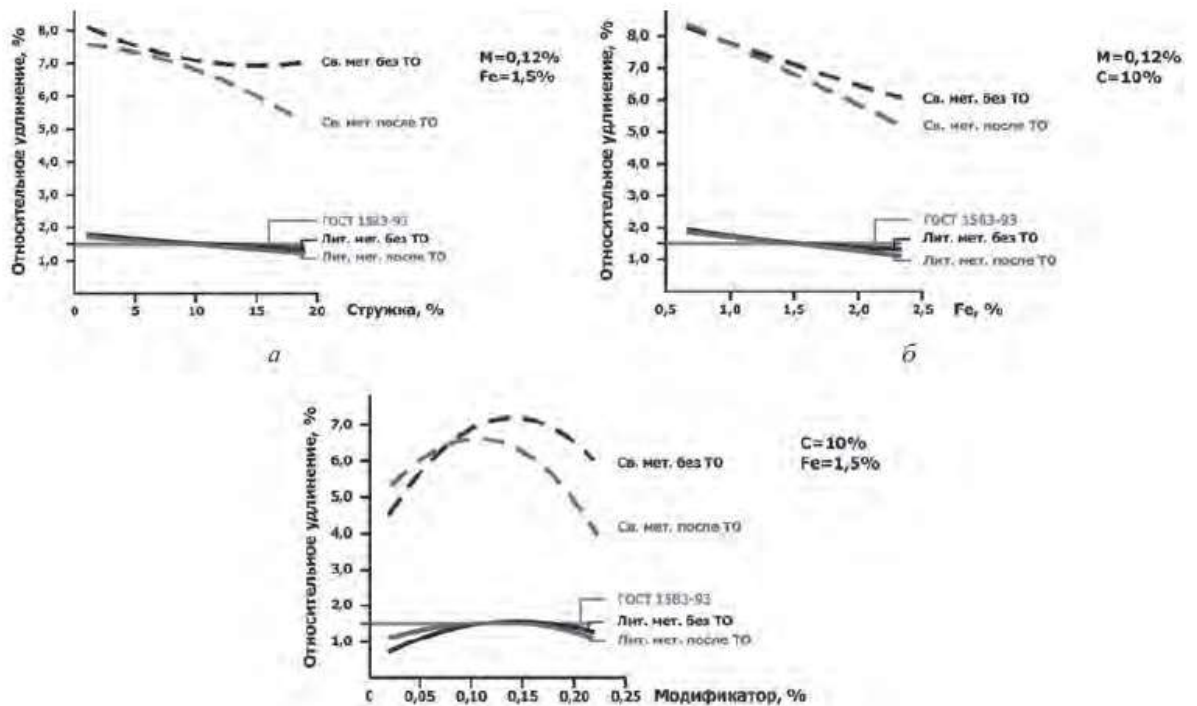
б – вплив вмісту заліза на межу міцності зварної сполуки;

в – вплив вмісту модифікатора на межу міцності зварної сполуки.

Рисунок 4.9 – Вплив вмісту стружки, заліза та модифікатора на межу міцності зварної сполуки [67]

Збільшення вмісту стружки у шихті призводило до зниження показників пластичності. Однак, вони були вищими у зварної сполуки (рисунок 4.10, а) [67], ніж у литого основного металу. Зумовлено це отриманням сприятливої дисперсної структури металу зварного шва, його меншою газонасиченістю за рахунок рафінуючої здатності аргону, який застосовувався як захисний газ у процесі зварювання. Підвищення вмісту заліза у сплаві провокувало збільшення кількості крихких інтерметалідних включень, що негативно впливали на

пластичність (рисунок 4.10, б) [67]. Аналіз отриманих залежностей показав, що максимальні значення відносного подовження зварної сполуки в нетермообробленому та термообробленому станах були досягнуті при присадці модифікатора, що дорівнює 0,10-0,15% (рисунок 4.10, в) [67]. За такої концентрації модифікатора забезпечувався рівень властивостей, що регламентується вимогами ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93).



а – вплив вмісту стружки на відносне подовження зварної сполуки;

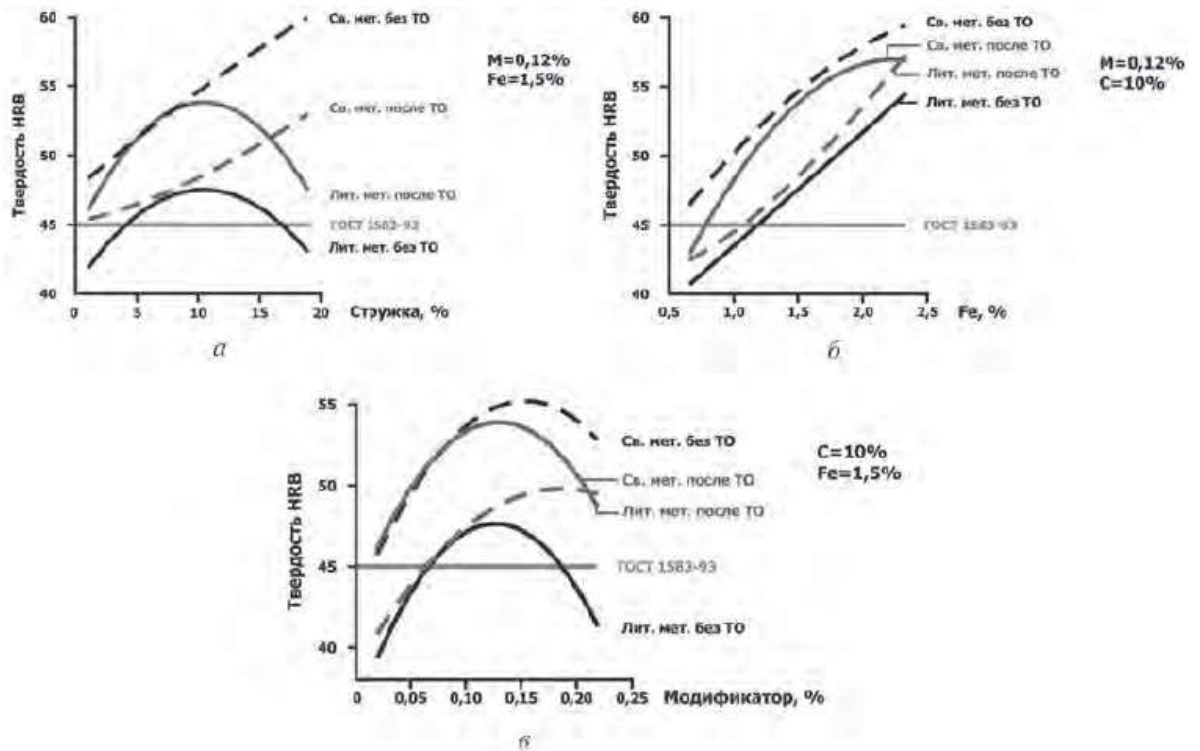
б – вплив вмісту заліза на відносне подовження зварної сполуки;

в – вплив вмісту модифікатора на відносне подовження зварної сполуки.

Рисунок 4.10 – Вплив вмісту стружки, заліза та модифікатора на відносне подовження зварної сполуки [67]

При збільшенні вмісту модифікатора спостерігалось зниження механічних властивостей металу, що зумовлено ефектом перемодифікування. До складу модифікатора входять елементи, що переходять у газоподібний стан у рідкому металі (сірка) та дисоціюють з утворенням газоподібних продуктів (Na_2CO_3). Завдяки цьому, відбувається перемішування металу та видалення з

нього газів (водню) і, як результат, поліпшення механічних властивостей, але одночасно з цим перемішування сприяє збільшенню контакту рідкого металу з повітрям і має його окислення, що сприяє зниженню його властивостей. Можна припустити, що при надмірному вмісті модифікатора, у нашому випадку $>0,15\%$, негативний ефект перемішування переважає над позитивним. При дослідженні твердості було встановлено, що при збільшенні кількості стружки до 10% твердість литого металу підвищувалася незалежно від стану (нетермообробленого і термообробленого). Зумовлено це внесенням стружкою значної кількості тугоплавких та твердих сполук, зокрема Al_2O_3 . При більшому вмісті стружки спостерігалось підвищення пористості, що сприяло зниженню твердості металу литого (рисунок 4.11, а) [67]. У той самий час, у зварному металі немає зниження твердості, що можна пояснити відсутністю у ньому пористості та її високої щільністю. Підвищення вмісту заліза забезпечило збільшення кількості залізовмісних інтерметалідних включень Al_3FeSi і Al_7Cu_2Fe , що мають високу мікротвердість ($5,8$ і $5,95$ ГПа відповідно [66, 68]), які виконували роль зміцнювальних фаз і забезпечували підвищення твердості у всьому діапазоні, що вивчається (рисунок 4.11, б) [67]. Оптимальною кількістю модифікатора з точки зору отримання максимальної твердості литого та зварного металів слід вважати $0,10-0,15\%$ (рисунок 4.11, в) [67].



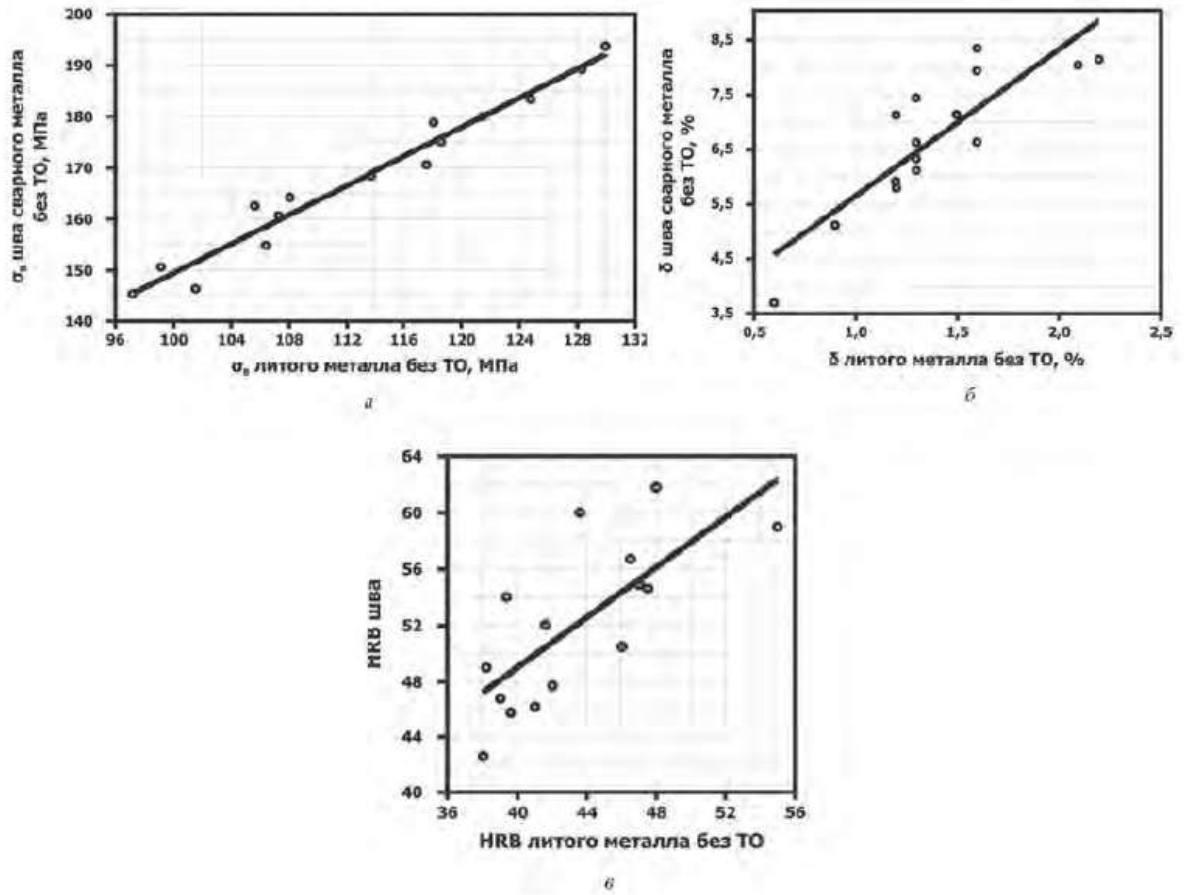
а – вплив вмісту стружки на твердість зварної сполуки;

б – вплив вмісту заліза на твердість зварної сполуки;

в – вплив вмісту модифікатора на твердість зварної сполуки.

Рисунок 4.11. – Вплив вмісту стружки, заліза та модифікатора на твердість зварної сполуки [67]

Аналіз характеру зміни механічних властивостей литого та зварного металів як без термообробки, так і після неї свідчить про подібність отриманих залежностей (рисунок 4.9-4.11.) [67]. При цьому, спостерігаються пряmlinійні графічні залежності між механічними властивостями литого та звареного металу (рисунок 4.12) [67].



а – межа міцності;

б – відносне подовження;

в – твердість.

Рисунок 4.12 – Співвідношення між механічними властивостями литого та зварного металів сплаву АК9М2 [67]

ВИСНОВКИ

Розглянуті дослідження показали.

Найбільш високою стійкістю до утворення гарячих тріщин мають зварні з'єднання сплаву В91(1913), виконані з присадками Св-АМг5, Св-АМг61 та Св-1597.

Формування зварних сполук сплаву В91(1913) відбувається без дефектів, якщо зварювання проводили не пізніше ніж через одну добу після хімічного травлення. Застосування шабріння кромки безпосередньо перед зварюванням дозволяє збільшити проміжок між операціями травлення та зварювання до п'яти діб.

Використання дроту Св-1597 при ААрДЕЗ забезпечує отримання більш дрібно-зернистої структури зварного шва та підвищення міцності зварного з'єднання (до 0,9σв) порівняно з присадкою Св-АМг6.

Застосування присадних матеріалів при лазерному зварюванні сплаву В91(1913) дозволяє виключити подрізи та отримувати шви з більшою величиною проплаву та посилення та підвищити рівень міцності до 0,95σв. Застосування присадки Св-АМг5 замість присадки Св-АМг61 дозволяє підвищити ударну в'язкість зварних з'єднань сплаву В91(1913) до 24%.

Електронно-променеве зварювання дозволяє отримувати зварні з'єднання з міцністю (0,7–0,8) у поєднанні з високими показниками ударної в'язкості та пластичності.

Високі значення коефіцієнтів парної кореляції між досліджуваними показниками свідчать про високий рівень спадковості алюмінієвих сплавів, і навіть досить високої точності результатів випробувань.

Метал зварних з'єднань сплаву АК9М2 по міцності, відносному подовженню і твердості не тільки не поступається, а й перевищує показники основного металу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Barnes TA, Pashby IR. Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part I - solid and liquid phase welding. *J Mater Process Technol.* 2000. Vol. 99. P. 62 – 71.
2. Sonsino CM. Fatigue assessment of welded joints in Al-Mg- 4.5Mn aluminium alloy AA 5083 by local approaches. *Int J Fatig.* 1999. Vol. 21, no. 9. P. 85 – 99.
3. Jing-Shiang Shih, Yih-Fong Tzeng, Yang Jin-Bin. Principal component analysis for multiple quality characteristics optimization of metal inert gas welding aluminium foam plate. *Mater Des.* 2011. Vol. 32, no. 12. P. 53 – 61.
4. Fernie JA, Threadgil PL, Watson MN. *Weldign Met. Fabricat.* 1991. Vol. 1, no. 1. P. 79 – 84.
5. Huang Jiankang, He Xiaoying, Guo Yanning, Zhang Zhengpeng, Shi Yu, Fan Ding. Joining of aluminum alloys to galvanized mild steel by the pulsed DE-GMAW with the alternation of droplet transfer. *J Manuf Process.* 2017. Vol. 25. P. 16 – 25.
6. Zhu Chenxiao, Cheon Jason, Tang Xinhua, Suck-Joo Na, Cui Haichao. Molten pool behaviors and their influences on welding defects in narrow gap GMAW of 5083 Al-alloy. *Int J Heat Mass Tran.* 2018. Vol. 126, no. 12. P. 6 – 21.
7. Cross CE, Kohn ML. Selection and weldability of non-heattreatable aluminium alloys”, welding brazing and soldering, ASM handbook vol. 6. Ohio, USA: ASM International, Materials Park. 1993.
8. Zhu Chenxiao, Tang Xinhua, Yuan He, Lu Fenggui, Cui Haichao. Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy. *J Mater Process Technol.* 2018. Vol. 251, no. 2. P. 14 – 24.

9. Samiuddin Muhammad, Li Jing-long, Taimoor Muhammad, Siddiqui Mohammad Nouman, Siddiqui Sumair Uddin, Xiong Jiang-tao. Investigation on the process parameters of TIG-welded aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization. *Defence Technology*. 2021.

Vol. 17(4), no. 12. 34 – 48.

10. Han Yilong, Xue Songbai, Fu Renli, Zhang Peng. Effect of hydrogen content in ER5183 welding wire on the tensile strength and fracture morphology of AlMg MIG weld. *Vacuum*. 2019. Vol. 166, no. 2. P. 18 – 25.

11. Ghosh PK, Sharma Vijay. Chemical composition and microstructure in pulsed MIG welded AlZnMg alloy. *J Mater Trans*. 1991. Vol. 32, no. 1. P. 45 – 50.

12. Qiang Wei, Wang Kehong. Double-sided coaxial GTA flatoverhead welding of 5083 aluminum alloy. *J Mater Process Technol*. 2019.

Vol. 27, no. 2. P. 9 – 16.

13. Hong Seong Min, Tashiro Shinichi, Bang Hee-Seon, Tanaka Manabu. Numerical analysis of the effect of heat loss by zinc evaporation on aluminum alloy to hot-dip galvanized steel joints by electrode negative polarity ratio varied AC pulse gas metal arc welding. *J Manuf Process*. 2021. Vol. 69, no. 6. P. 71 – 83.

14. Silvayeh Zahra, Domitner Josef, Sommitsch Christof, Hartmann Matthias, Werner Karner, G€otzinger Bruno. Mechanical properties and fracture modes of thin buttjoined aluminum-steel blanks for automotive applications. *J Manuf Process*. 2020. Vol. 59, no. 4. P. 56 – 67.

15. Barrick Erin J, DuPont John N. Microstructural characterization and toughness evaluation of 10 wt% Ni steel weld metal gas tungsten arc and gas metal arc weld fusion zones. *Mater Sci Eng, A*. 2020. Vol. 796, no. 1. P. 40 – 43.

16. Jia Yazhou, Wen Tao, Huang Ning, Zhang Junlin, Xiao Jun, Chen Shujun, Huang Wenhao. Research on aluminum alloy welding process based on high frequency and low power pulsed Laser-MIG hybrid welding. *Opt Laser Technol*. 2022.

Vol. 150, no. 10. P. 78 – 99.

17. Li Fukang, Wang Tao, Peng Genchen, Qu Jinyu, Li Liqun. Behavior and stability of droplet transfer under laser-MIG hybrid welding with synchronized pulse modulations. *J Manuf Process*. 2020. Vol. 54. P. 7 – 9.

18. Ambriz RR, Jaramillo D, Garcí'a C, Curiel FF. Fracture energy evaluation on 7075-T651 aluminum alloy welds determined by instrumented impact pendulum. *Trans Nonferrous Metals Soc China*. 2016. Vol. 26(4), no. 9. P. 74 – 83.

19. Zhou Jia-liang, Shu Feng-yuan, Zhao Hong-yun, Lu Yao-hui, Liu Yu-xin, He Peng. Microstructure and mechanical properties of heat affected zone in multi-pass GMA welded AlZnMgCu alloy. *Trans Nonferrous Metals Soc China*. 2019.

Vol. 29(11), no. 22. P. 73 – 80.

20. Balasubramanian V, Ravisankar V, Madhusudhan Reddy G. Effect of pulsed current and post weld aging treatment on tensile properties of argon arc welded high strength aluminium alloy. *Mater Sci Eng*. 2007. Vol. 45, no. 9. P. 19 – 34.

21. Zhang HT, Feng JC, He P, Zhang BB, Chen JM, Wang L. The arc characteristics and metal transfer behaviour of cold metal transfer and its use in joining aluminium to zinc-coated steel. *Mater Sci Eng*. 2009. Vol. 49, no. 9. P. 11 – 13.

22. Xie Weifeng, Huang Te, Yang Chunli, Fan Chenglei, Lin Sanbao, Xu Wanghui. Comparison of microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of Gas Metal Arc (GMA) and Ultrasonic-wave-assisted GMA (U-GMA) welded joints of AlZnMg alloy. *J Mater Process Technol*. 2020.

Vol. 277, no. 11. P. 64 – 70.

23. Calcraft RC, Wahab MA, Viano DM, Schumann GO, Phillips RH, Ahmed NU. The development of the welding procedures and fatigue of butt-welded

structures of aluminium-AA5383. *J Mater Process Technol.* 1999. Vol. 92(93), no. 6. P. 1 – 5.

24. Rodríguez-Hernández T, Cruz-Hernández VL, García-Rentería MA, Torres-Gonzalez R, García-Villarreal S, Curiel-López FF, Falcón-Franco LA. First assessment on the microstructure and mechanical properties of GTAW-GMAW hybrid welding of 6061-T6 AA. *J Manuf Process.* 2020. Vol. 59, no. 6. P. 58 – 67.

25. Arora Hitesh, Singh Rupinder, Brar Gurinder S. Finite element simulation of weld-induced residual stress in GTA welded thin cylinders”, reference module in materials science and materials engineering. Elsevier. 2018.

26. Imam Fauzi ER, Che Jamil MS, Samad Z, Muangjunburee P. Microstructure analysis and mechanical characteristics of tungsten inert gas and metal inert gas welded AA6082-T6 tubular joint: a comparative study. *Trans Nonferrous Metals Soc China.* 2017. Vol. 27(1). P. 17 – 24.

27. Reyna-Montoya JS, García-Rentería MA, Cruz-Hernández VL, Curiel-López FF, Dzib-Pérez LR, Falcón-Franco LA. Effect of electromagnetic interaction on microstructure and corrosion resistance of 7075 aluminium alloy during modified indirect electric arc welding process. *Trans Nonferrous Metals Soc China.* 2019.

Vol. 29(3), no. 4. P. 73 – 84.

28. Tamasgavabari Reza, Ebrahimi Ali Reza, Abbasi Seyed Mehdi, Yazdipour Ali Reza. Effect of harmonic vibration during gas metal arc welding of AA-5083 aluminum alloy on the formation and distribution of intermetallic compounds. *J Manuf Process.* 2020. Vol. 49, no. 4. P. 13 – 22.

29. Kumar Tinku, Kiran Degala Venkata, Cheon Jason, Arora Navneet. Probing the influence of cold wire gas tungsten arc welding current waveforms on the aluminumsteel joining. *J Manuf Process.* 2020. Vol. 5, no. 3. P. 78 – 88.

30. Vasu K, Chelladurai H, Ramaswamy Addanki, Malarvizhi S, Balasubramanian V. Effect of fusion welding processes on tensile properties of armor grade, high thickness, non-heat treatable aluminium alloy joints. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15(3), no. 3. P. 53 – 62.
31. Balasubramanian V, Ravisankar V, Madhusudhan Reddy G. Effect of pulsed current welding on fatigue behavior of high strength aluminium alloys joints. *Mater Des*. 2008. Vol. 29. P. 492 – 500.
32. Gunarai V, Murugan N. Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process-part 1. *Weld J*. 2000. Vol. 79, no. 2. P. 86 – 94.
33. Dutta Prikshit, Kumar Pratihar Dilip. Modeling of TIG welding process using conventional regression analysis and neural network-based approaches. *J Mater Process Technol*. 2007. Vol. 184. P. 56 – 68.
34. Karadeniz Erdal, Ozsarc Ugur, Yildiz Ceyhan. The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes. *Mater Des*. 2007. Vol. 28, no. 6. P. 49 – 56.
35. Nagesh DS, Datta GL. Genetic algorithm for optimization of welding variables for height to width ratio and application of ANN for prediction of bead geometry for TIG welding process. *Applied Science Computing*. 2010. Vol. 10. P. 897 – 907.
36. Sripriyan K, Ramu M, Thyla PR, Anantharuban K, Karthigha M. Characteristic of weld bead using flat wire electrode in GMAW inline during the process: an experimental and numerical analysis. *Int J Pres Ves Pip*. 2022. Vol. 196, no. 10. P. 23 – 46.
37. Kumar A, Sundarrajan S. Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminium alloy weldments. *Mater Des*. 2009. Vol. 30, no. 12. P. 88 – 97.

38. Balasubramanian V, Ravisankar V, Madhusudhan Reddy G. Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behavior of AA7075 aluminium alloys joints. *Int J Fatig.* 2008. Vol. 30, no. 4. P. 5 – 16.
39. Praveen P, Yarlagadda PKDV. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. *J Mater Process Technol.* 2005. Vol. 164(165), no. 11. P. 6 – 12.
40. Babu S, Senthil Kumar T, Balasubramanian V. Optimizing pulsed current gas tungsten arc welding parameters of AA6061 aluminium alloy using Hooke and Jeeves algorithm. *Trans Nonferrous Met Soc China.* 2008. Vol. 18, no. 10. P. 28 – 36.
41. Balasubramanian V, Ravisankar V, Madhusudhan Reddy G. Influences of pulsed current welding and post weld aging treatment on fatigue crack growth behavior of AA7075 aluminium alloy joints. *Int J Fatig.* 2008. Vol. 30, no. 4. P. 5 – 16.
42. Das A, Shome M, Goecke Sven-F, De A. Joining of aluminium alloy and galvanized steel using a controlled gas metal arc process. *J Manuf Process.* 2017. Vol. 27, no. 1. P. 79 – 87.
43. Wang LL, Wei HL, Xue JX, DebRoy T. Special features of double pulsed gas metal arc welding. *J Mater Process Technol.* 2018. Vol. 251, no. 3. P. 69 – 75.
44. Hilton DE, Norrish J. Shielding gases for arc welding. *J.Weld.Met. Fabrication.* 1988. Vol. 5(6), no. 1. P. 89 – 96.
45. Nakamura T, Hiraoka K, Takahashi M, Sasaki T. GMA welding process with periodically controlling shielding gas composition. *J. Jpn. JWS.* 2002. Vol. 20(2), no. 2. P. 37 – 45.
46. Kazuo H, Akira O, Michio I. Effect of helium gas on arc characteristic in gas tungsten arc welding. *J.JWS.* 1985. Vol. 3(2). P. 5 – 10.

47. Kuk JM, Jang KC, Lee DG, Kim IS. Effect of temperature and shielding gas mixture on fatigue life of 5083 aluminium alloy. *J Mater Process Technol.* 2004. Vol. 155, no. 14. P. 8 – 14.
48. Kang BY, Prasad Yarlagadda KD V, Kang MJ, Kim HJ, Kim IS. Characteristics of alternate supply of shielding gases in aluminium GMA welding. *J Mater Process Technol.* 2009. Vol. 209, no. 47 P. 16 – 21.
49. Chen Dong, Cai Yuhua, Luo Yi, Wang Xinxin, Chi Luxin, Tang Fanshun. Measurement and analysis on the thermal and mechanical transfer characteristics of GTA arc affected by arc length. *Measurement.* 2020. Vol. 153, no. 10. P. 24 –31.
50. Cai Xiaoyu, Lin Sanbao, Wang Benze, Dai Hongbin, Fan Chenglei, Yang Chunli. Droplet transfer and weld formation of MIG welding with Ar-He alternating gas for aluminum alloy. *J Manuf Process.* 2020. Vol. 49. P. 94 – 101.
51. Dhakal Binod, Swaroop S. Review: laser shock peening as post welding treatment technique. *J Manuf Process.* 2018. Vol. 32, no. 7. P. 21 – 33.
52. Fadaeifard Firouz, Matori Khamirul Amin, Garavi Farhad, Al- Falahi Muath, Sarrigani Gholamreza Vahedi. Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded AA6061-T6 alloy. *Trans Nonferrous Metals Soc China.* 2016. Vol. 26(12), no. 3. P. 12 – 14.
53. Mrowka G, Sreniawski J. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. *J Mater Process Technol.* 2005. Vol. 162, no. 3. P. 67 – 72.
54. Temmar M, Hadji M, Sahraoui T. Effect of post weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints. *Mater Des.* 2011. Vol. 32, no. 3 P. 53 – 62.
55. Ahmad R, Bakar MA. Effect of post-weld heat treatment on the mechanical and microstructure properties of AA6061 joints welded by the gas metal arc welding cold metal transfer method. *Mater Des.* 2011. Vol. 32, no. 5. P. 12 – 16.

56. Malviya Rakesh, Kumar Pratihari Dilip. Tuning of neural networks using particle swarm optimization to model MIG welding process. *Swarm Evol Comput.* 2011. Vol. 1, no. 2. P. 23 – 35.
57. Tarang YS, Wu JL, Yeh SS, Juang SC. Intelligent modeling and optimization of the gas tungsten arc welding process. *J Intell Manuf* 1999;10:73e9.
58. Benyounis KY, Olabi AG. Optimization of different welding processes using statistical and numerical approaches-A reference guide. *Adv Eng Software.* 2008. Vol. 39, no. 4. P. 83 – 96.
59. Ross Phillip L. *Taguchi techniques for quality engineering*". McGraw Hill Education (India) Private Limited. 2014.
60. Lakshminarayanan AK, Annamalai VE, Elangovan K. Identification of optimum friction stir spot welding process parameters controlling the properties of low carbon automotive steel joints. *J Mater Res Technol.* 2015. Vol. 4(3), no. 2. P. 62 – 72.
61. Elatharasan G, Senthil Kumar VS. Modeling and optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminium alloys using RSM. *Procedia Eng.* 2012. Vol. 383, no. 4. P. 77 – 81.
62. Correia DS, Goncalves CV, Junior, Cunha SSD, Ferraresi VA. Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization. *J Mater Process Technol.* 2005. Vol. 160(1) P. 70 – 76.
63. Kim D, Rhee S, Park H. Modeling and optimization of a GMA welding process by genetic algorithm and response surface methodology. *Int J Prod Res.* 2002. Vol. 40(7). P. 699 – 711.
64. Raja Dhas J Edwin, Kumanan S. Optimization of parameters of submerged arc weld using non conventional techniques. *Appl Soft Comput.* 2011. Vol.11, no 5. P. 198 – 204.

65. Ambriz RR, Mesmacque G, Ruiz A, Amrouche A, Lopez VH. Effect of welding profile generated by the modified indirect electric arc technique on the fatigue behavior of 6061-T6 aluminium alloy. Mater Sci Eng. 2010. Vol. 527, no. 20 P. 57 – 64.
66. Luijendijk T. Welding of dissimilar aluminium alloys. J Mater Process Technol. 2000. Vol. 10, no. 3. P. 29 – 35.
67. О. В. Лютова. Литье и металлургия 45/ 4 (73), 2013.
68. Bajpei Tapas, Chelladurai H, Zahid Ansari M. Experimental investigation and numerical analyses of residual stresses and distortions in GMA welding of thin dissimilar AA5052-AA6061 plates. J Manuf Process. 2017. Vol. 25, no.3. P. 40 – 50.