



ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ЗАОЧНОЇ ТА ДИСТАНЦІЙНОЇ ОСВІТИ

КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»



КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему:

**«Підвищення ефективності усунення тріщин в корпусних деталях з
алюмінієвих сплавів у ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»**

Виконав:

магістрант групи AI(ТС)-22МЗ спеціальності 208
«Агроінженерія» ОПП «Технічний сервіс
сільськогосподарської техніки»

_____ Руслан ДЕЙНЕКА

Керівник:

к.т.н., доцент _____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент _____ Сергій МАГОПЕЦЬ

«__» _____ 2023 р.

Рецензент:

_____, _____ (наук. ст., вч. звання) _____ (підпис) _____ (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2023 р.

Кропивницький – 2023 р.

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЦЕНТР ЗАОЧНОЇ ТА ДИСТАНЦІЙНОЇ ОСВІТИ
КАФЕДРА «ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ МАШИН»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський) рівень вищої освіти

Галузь знань: 20 «Аграрні науки та продовольство»

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітньо-професійна програма: «Технічний сервіс сільськогосподарської техніки»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри «Експлуатація та
ремонт машин»

_____ Сергій МАГОПЕЦЬ
«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

ДЕЙНЕКА Руслану Станіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Підвищення ефективності усунення тріщин в корпусних деталях з алюмінієвих сплавів у ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький»

керівник роботи МАГОПЕЦЬ Сергій Олександрович, к.т.н, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові)

(науковий ступінь) (вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «__» _____ 2023 року № _____

2. Строк подання здобувачем роботи «30» грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Матеріали науково-дослідної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

4.1. Розділ 1. Дослідити особливості організації виробництва підприємства. Встановити можливі перспективні напрямки реорганізації його виробничої структури; сформулювати мету, об'єкт, предмет досліджень та завдання, які потребують вирішення.

4.2. Розділ 2. Описати основні властивості алюмінію та сплавів на його основі, які використовуються у машинобудуванні. Проаналізувати існуючі способи усунення тріщин в корпусних деталях виготовлених із алюмінієвих сплавів.

4.3. Розділ 3. Провести порівняльний аналіз основних методик зварювання алюмінію та його сплавів. Визначити особливості використання різних матеріалів для зварювання алюмінію. Визначити раціональний спосіб усунення тріщин на основі порівняльної оцінки способів дугового зварювання алюмінію і його сплавів.

4.4. Розділ 4. Навести основні правила та вимоги з техніки безпеки під час проведення зварювальних робіт. Визначити умови інтеграції розробленої технології у виробничий процес підприємства та перспективи практичного використання результатів проведених досліджень.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

5.1. Оцінка ефективності виробничої діяльності підприємства. 5.2. Обґрунтування актуальності досліджень магістерської роботи. Мета, об'єкт, предмет та задачі дослідження. 5.3. Властивості алюмінію та сплавів на його основі. 5.4. Результати порівняльного аналізу ефективності застосування різних технологій усунення тріщин. 5.5. Основні способи усунення тріщин зварюванням. 5.6. Матеріали для зварювання алюмінію та сплавів на його основі. 5.7. Результати порівняльної оцінки практичної ефективності зварювання тріщин в деталях виготовлених з алюмінієвих сплавів. 5.8 Загальні висновки по роботі.

ГРАФІК ВИКОНАННЯ ЕТАПІВ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1. Обґрунтування напрямку досліджень	28.11.2023	
2	Розділ 2. Аналіз існуючих методів усунення тріщин у деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію	11.12.2023	
3	Розділ 3. Методи зварювання тріщин у деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію	18.12.2023	
4	Розділ 4. Використання результатів дослідження	25.12.2023	
5	Загальні висновки по роботі	28.12.2023	
6	Оформлення структурних елементів МР	28.12.2023	
7	Ілюстративний матеріал до МР	30.12.2023	

Магістрант

(підпис)

Руслан ДЕЙНЕКА
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Сергій МАГОПЕЦЬ
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Метою дослідження є визначення найбільш ефективної технології усунення тріщин в деталях транспортних засобів виготовлених із сплавів на основі алюмінію.

В першому розділі роботи «Обґрунтування напрямку досліджень» проведена оцінка існуючого виробничого потенціалу підприємства та виконаний аналіз ефективності його діяльності; визначена потреба впровадження сучасної технології ремонту відповідальних деталей машин виготовлених із алюмінієвих сплавів; обґрунтована актуальність досліджень роботи; встановлено мету, об'єкт та предмет досліджень; визначенні основні задачі, які потребують вирішення у роботі.

Так *об'єктом дослідження* є технологія видалення зовнішніх тріщин на поверхнях деталей виготовлених із алюмінієвих сплавів, *а предметом* - виступає визначення раціональних параметрів процесу видалення тріщини на зовнішніх поверхнях.

Основними завданнями кваліфікаційної роботи було:

- проведення ґрунтового аналізу існуючих способів видалення тріщин у корпусних деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію;
- проведення порівняльного аналізу основних методик зварювання алюмінію та його сплавів;
- визначення особливостей використання різних матеріалів для зварювання алюмінію;
- визначення раціонального способу заварювання тріщин на основі порівняльної оцінки різних методик зварювання;
- оцінка особливостей впровадження прийнятої технології відновлення у виробничий процес підприємства тощо.

Другий розділ «Аналіз існуючих методів усунення тріщин у деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію» містить дослідження з основних властивостей алюмінію та сплавів на його основі, які використовуються у машинобудуванні та механічних методів й способів усунення таких тріщин.

В третьому розділі «Методи заварювання тріщин у деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію» досліджені основні методики зварювання алюмінію та сплавів на його основі; встановлено специфіку використання матеріалів для їх зварювання; виконаний порівняльний аналіз найбільш поширених способів зварювання алюмінію і його сплавів; на основі зробленої оцінки ефективності зварювання визначений раціональний спосіб заварювання тріщин.

Четвертий розділ «Використання результатів дослідження» містить основні правила та вимоги техніки безпеки під час виконання зварювальних робіт та аналіз особливостей практичного застосування результатів проведених досліджень.

Кваліфікаційна магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків; містить 76 сторінок тексту, 22 рисунки та 21 таблицю.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АТЗ	– автотранспортний засіб
ВАХ	– вольт-амперна характеристика
ГБЦ	– головка блоку циліндрів
ГРМ	– газорозподільчий механізм
ДВЗ	– двигун внутрішнього згорання
ДТП	– дорожньо-транспортна пригода
ЗІЗ	– засоби індивідуального захисту
ЕБК	– електронний блок контролю
КВ	– колінчастий вал
КП	– коробка передач
КШМ	– кривошипно-шатунний механізм
РВ	– розподільчий вал
САС	– спечені алюмінієві сплави
САП	– спечена алюмінієва пудра
ТЗ	- транспортний засіб
ТОВ	– товариство з обмеженою відповідальністю
ЦПГ	– циліндро-поршнева група

РЕФЕРАТ	
ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1. Аналіз особливостей виробничої діяльності ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький	
1.2. Обґрунтування напрямків актуальних досліджень кваліфікаційної роботи	
1.3. Визначення предмету, об'єкту дослідження, мети та задач дослідження	
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ УСУНЕННЯ ТРИЩИН У ДЕТАЛЯХ ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ	
2.1. Основні властивості алюмінію та сплавів на його основі, які використовуються у машинобудуванні	
2.2. Механічні методи і способи усунення тріщин в корпусних деталях виготовлених із алюмінієвих сплавів	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ЗАВАРЮВАННЯ ТРИЩИН У ДЕТАЛЯХ ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ	
3.1. Основні методики зварювання алюмінію та сплавів на його основі	
3.2. Особливості застосування матеріалів для зварювання алюмінію..	
3.3. Порівняльний аналіз найбільш поширених способів зварювання алюмінію і його сплавів	
3.4. Оцінка ефективності зварювання алюмінію різними способами та визначення раціонального способу зварювання тріщин	
РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ..	
4.1. Основні правила та вимоги із техніки безпеки під час організації та проведенні зварювальних робіт	
4.2. Особливості практичного застосування результатів проведених досліджень	
ВИСНОВКИ	
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Діюча в Україні ринкової система, гостро ставить питання високого рівня ефективності виробництва кожного підприємства: якості надання ним послуг, застосування передових методів організації та управління виробництвом, раціонального використання ресурсів, виявлення та реалізації потенційних можливостей та вимагає науково обґрунтованих підходів до їх вирішення.

На сучасному етапі функціонування спеціалізованих ремонтних підприємств нашої країни їх менеджмент повинен вирішувати комплекс завдань із ефективного поліпшення організаційно-технологічної та економічної роботи, забезпечення потреб та вимог підприємств різних форм власності та індивідуальних власників транспортних засобів під час виконанні ремонтно-обслуговуючих робіт із підвищенням їх якості, швидкості виконання, зниженням абсолютних й питомих затрат на такі види робіт.

Організаційно-економічна основа цих заходів повинна забезпечувати:

- виконання всіх замовлень на ремонтно-обслуговуючі роботи у найкоротші часові терміни за рахунок, в першу чергу, застосування у виробничому процесі підприємства максимально широкого переліку сучасних ремонтних технологій заснованих на ресурсозбереженні;

- впровадження новітніх технологій, ефективність яких підтверджена комплексними науковими дослідженнями, як причин втрати працездатного стану вузлів, систем, механізмів та/або деталей, так й можливостями використання цих технологій при ремонтних діях;

- максимально короткі часові терміни виконання ремонтних робіт при дотриманні стратегії лише обґрунтованої заміни деталей, які мають дефекти, та обов'язкове застосування технологій, які здатні забезпечити можливість їх повторного використання після відновлення із забезпеченням збереження ресурсних показників й показників надійності;

- зацікавленість працівників підприємства у своєчасному та якісному виконанні робіт за рахунок організації та функціонування на підприємстві дієвої системи їх мотивації, стимулювання, кар'єрного зростання та соціального захисту.

Розширення обсягів виробництва та інших параметрів ремонтних підприємств повинно здійснюватися в першу чергу за рахунок використання сучасного ремонтно-технологічного обладнання та пристроїв, технічного переозброєння нестандартним й оригінальним обладнанням тощо.

Загальновідомим та справедливим є й те, що ефективність ремонтних дій в першу чергу визначається співвідношенням витрачених на них коштів та тривалості післяремонтного терміну експлуатації механізмів (деталей, вузлів, систем та транспортних засобів) при напрацюванні на відмову. Можливість й доцільність застосування при ремонті відновлювальних технологій визначається наявністю у більшості деталей, що були в експлуатації, залишкових ресурсів довговічності закладених в них на етапі проектування та виготовлення. Для економії матеріальних ресурсів доцільно впроваджувати у виробництво й способи можливого вторинного використання деталей машин, що відпрацювали свій ресурс й були необґрунтовано вибракувані.

Отже, створення та дотримання науково обґрунтованих технічних умов провадження системи ремонту вузлів й механізмів транспортних засобів різного призначення, заснованої на ґрунтовному дослідженні особливостей організації їх робочих процесів та впровадження передових технологій відновлення складних дефектів базових та відповідальних деталей – створюють передумови одержання максимального напрацювання агрегатів й машини після проведення ремонтних впливів за найменших ремонтних та експлуатаційних витратах.

Розділ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз особливостей виробничої діяльності ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький

Компанія ТОВ «Калита-Нова» зареєстроване 12 липня 2018 р. за юридичною адресою: Україна, 25030, Кіровоградська обл., м. Кропивницький, вул. О.Олійника, буд. 49, а його матеріально-технічна база знаходяться на вул. С.Сенчева, 43 (рис. 1.1). Засновником та керівником підприємства є ЛУБЕНЕЦЬ Олександр Миколайович [1].

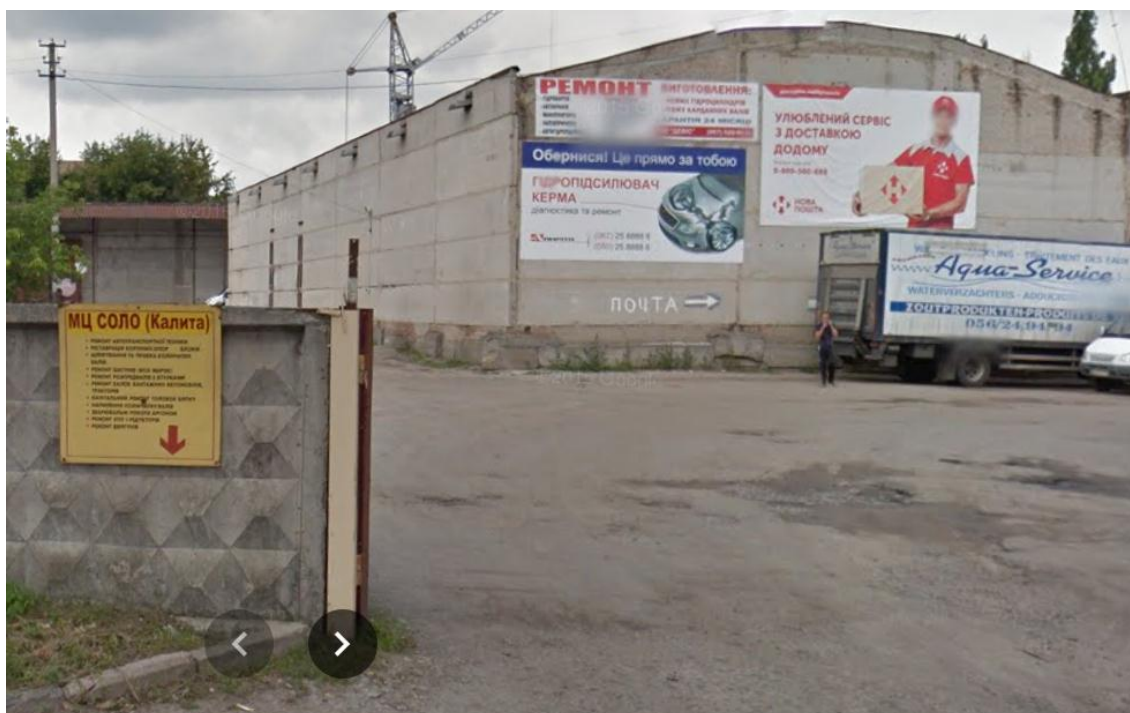


Рисунок 1.1. - Матеріально-технічна база ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький

Підприємство відноситься до спеціалізованих авторемонтних підприємств та забезпечує (у відповідності до КВЕД:9 748) провадження наступних видів виробничої діяльності [2]:

- основного 33.12 - ремонту і технічного обслуговування машин і устаткування промислового призначення;
- та інших:
- 45.31 - оптової торгівлі деталями та приладдям для автотранспортних засобів;
- 45.32 - роздрібної торгівлі деталями та приладдям для автотранспортних засобів;
- 45.20 - технічного обслуговування та ремонту автотранспортних засобів тощо.

Висока якість виконання ремонтних робіт, доступна цінова політика, сучасне виробниче обладнання, передові технології та висококваліфікований персонал є базисом для формування замовлень та функціонування підприємства, яке ефективно працює на ринку ремонтних послуг вже понад 30 років.

Початок власного становлення підприємство обліковує із 15 листопада 1993 р. - дати заснування науково-виробничої фірми «Калита», з якої й починалося товариство. Початковою спеціалізацією НВФ «Калита» було відновлення колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) перспективним на той час методом електродугового напилення, а вже з початку 1994 р. на підприємстві було впроваджено сучасну лінію відновлення блоків ДВЗ, яка була оснащена розточувальним обладнанням, що забезпечувало проведення обробки гільз циліндрів за новітньою технологією хонінгування алмазними різцями та хонінгувальними брусками. З 1995 р. на підприємстві впроваджено ділянку ремонту головок блоків циліндрів (ГБЦ) ДВЗ та технології відновлення шатунів й розподільчих валів. Наступним етапом розвитку підприємства була організація у 1997 р. дільниці ремонту паливної апаратури дизелів та розширення існуючих технологічних можливостей за рахунок застосування універсальних координатно-розточувальних верстатів підвищеної точності. В 1998 році на підприємстві впроваджено технологію відомої в світі компанії «NEWAY» із ремонту ГБЦ й дільниці ремонту систем живлення бензинових ДВЗ і т.д.

Основні виробничі потужності підприємства розміщені на площі близько 4000 м² та забезпечують виконання капітальних ремонтів ДВЗ всіх типів та їх систем вузлів і механізмів, елементів трансмісій (КП, роздавальних КП, ведучих мостів та редукторів); проведення робіт із відновлення колінчастих (КВ) та розподільчих валів (РВ), блоків-картерів ДВЗ, ГБЦ, шатунно-поршневі групи, елементів механізмів керування АТЗ. До структури підприємства входять: дільниця механічної обробки (рис. 1.1), яка оснащена сучасним верстатним обладнанням для виконання токарних, шліфувальних, полірувальних, розточувальних, хонінгувальних та фрезерних операцій; дільниця відновлення деталей технологіями зварювання; розбирально-складальна дільниця (рис. 1.2); мийно-очисна дільниця (рис. 1.3); випробувальна дільниця (рис. 1.4) та інші структурні підрозділи. Штатний склад підприємства складається із виробничих робітників різних професій та станом на 1.10.2023 р. налічує 25 осіб.



Рисунок 1.1 – Дільниця механічної обробки



Рисунок 1.2. – Розбирально-складальна дільниця



Рисунок 1.3. – Мийно-очисна дільниця

Рисунок 1.4. – Випробувальна дільниця

З метою визначення можливих напрямків реорганізації виробничої структури підприємства та збільшення рівня прибутковості, під час проходження науково-дослідної практики на підприємств був проведений аналіз слабких та сильних сторін організації його виробничої діяльності, результати якого представлені на рис. 1.4 [3].

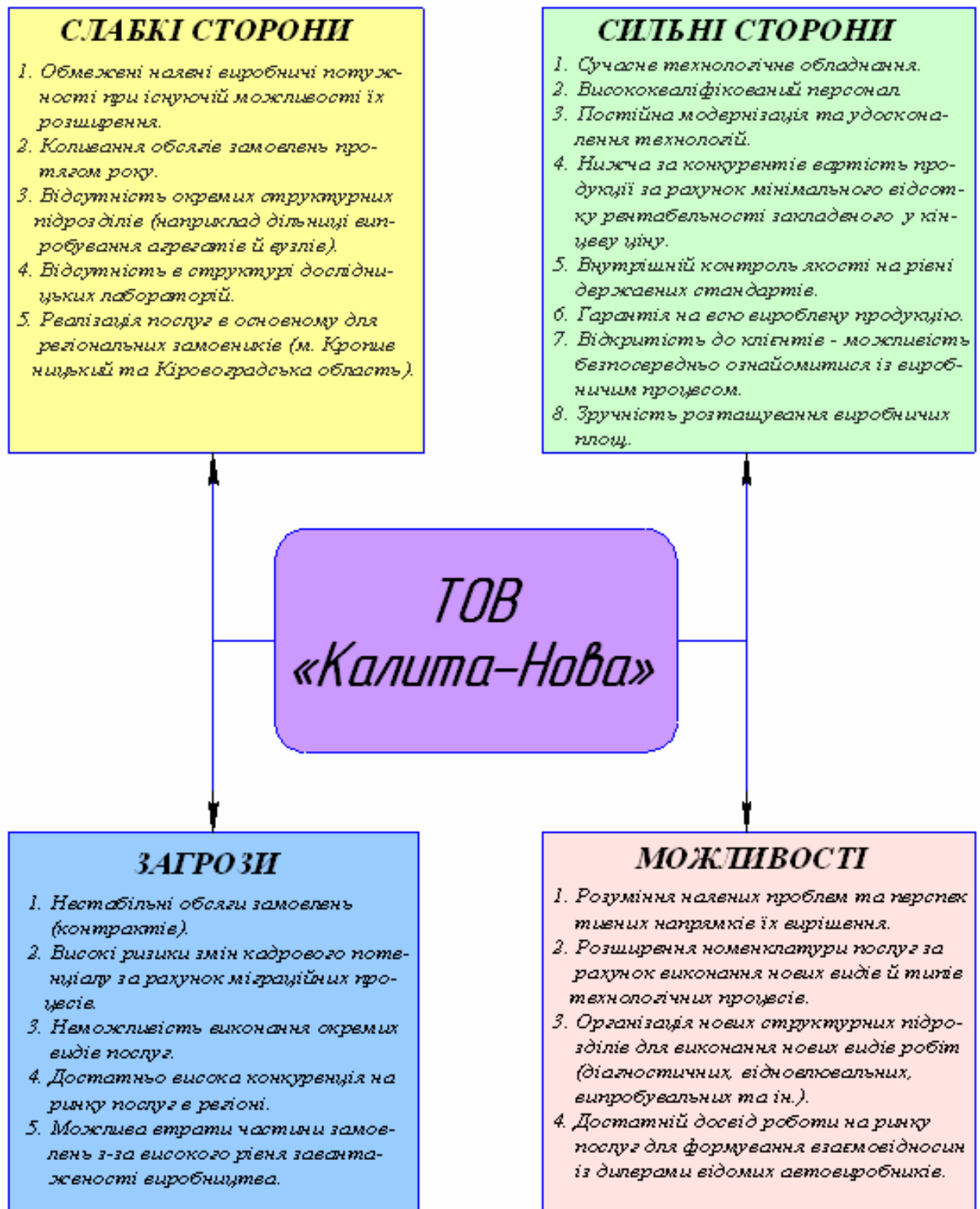


Рисунок 1.4. – Загальна оцінка ефективності функціонування ТОВ «Калита-Нова» (SWOT-АНАЛІЗ виробничої діяльності) за останні 5 років

Проведений аналіз наявних на підприємстві проблем та можливих напрямків збільшення обсягів виробництва показав, що найбільш перспективним для реалізації є розширення номенклатури послуг за рахунок виконання нових або вдосконалення вже існуючих на підприємстві технологій.

1.2 Обґрунтування напрямків актуальних досліджень кваліфікаційної роботи

Аналіз обсягів та структури ремонтних замовлень, які були реалізовані підприємством можна прослідкувати існуючі тенденції, які сформувалися за останні 3 роки (таблиця 1.1). Так, у 2023 році обсяги робіт перевищили фактично на 75% обсяги у 2021 р. та змінилася структура замовлень: зросла кількість об'єктів ремонту, яким потрібно виконати комплексний ремонтний вплив із проведенням розбирально-складальних, дефектувальних, мийно-очисних, відновлювальних та випробувальних робіт.

Таблиця 1.1. Усереднені щорічні обсяги та трудомісткості виконаних ремонтних робіт ТОВ «Калита-Нова» у 2021-2023 роках

Об'єкт ремонту*	Роки					
	2021		2022		2023	
	Кількість ремонтів, од.	Річна трудомісткість робіт**, люд-год.	кількість ремонтів, од.	Річна трудомісткість робіт**, люд-год.	кількість ремонтів, од.	Річна трудомісткість робіт**, люд-год.
1. Дизельні ДВЗ	40	1706,2	28	1216,3	65	2887,2
2. Бензинові ДВЗ	26	1136,6	31	1418,8	46	2511,5
3. Блоки циліндрів двигунів	56	277,2	39	224,8	53	285,2
4. ГБЦ двигунів	82	301,3	56	256,1	112	476,81
5. Колінчасті та розподільчі вали ДВЗ	215	247,1	135	171,2	328	417,0
6. Коробки передач	24	103,5	28	118,9	41	234,8
7. Ведучі мости АТЗ	38	206,1	24	167,7	55	301,3
8. Інші вузли й механізми	-	432,4	-	267,5	-	586,1
РАЗОМ		4410,4		3841,3		7699,9

Примітка: * - вузли й механізми АТЗ та с/г машин без врахування їх марок та моделей

** - за даними підприємства

Разом з тим, визначені й існуючі на підприємстві проблеми, які в окремих випадках не дозволяють реалізувати в повному обсязі замовлення й спричиняють значні виробничі складнощі. До таких випадків відносяться потреби у ремонті деталей виготовлених з алюмінієвих сплавів. Все більш часто такий вид матеріалів як алюміній (*Al*) та сплави на його основі використовуються у машинобудуванні й якщо раніше це стосувалося в білості агрегатів автомобілів класів С, D та інших, більш високих, то на сьогодні цей матеріал є «традиційним» й для виготовлення деталей вузлів й механізмів більшості транспортних засобів (ТЗ) включаючи й сільськогосподарську техніку. Доволі часто під час проведення дефектувальних операцій

виявляються скриті проблеми із такими деталями як: блоками циліндрів (рис. 1.5), ГБЦ (рис. 1.6); кришками ГРМ (рис. 1.7), піддонами картерів ДВЗ (рис. 1.8) та КП, які потребують проведення зварювальних та/або наплавлювальних операцій. На поточний момент підприємство, нажаль, не може забезпечити усунення таких дефектів – на підприємстві відсутні обладнання та технології зварювання деталей із сплавів *Al*, що під час проведення ремонтних дій вимагає залучення підрядних виконавців, суттєво збільшує як тривалість ремонтних дій так й кінцеву їх вартість, негативним чином впливає на оцінку ситуації замовником тощо.

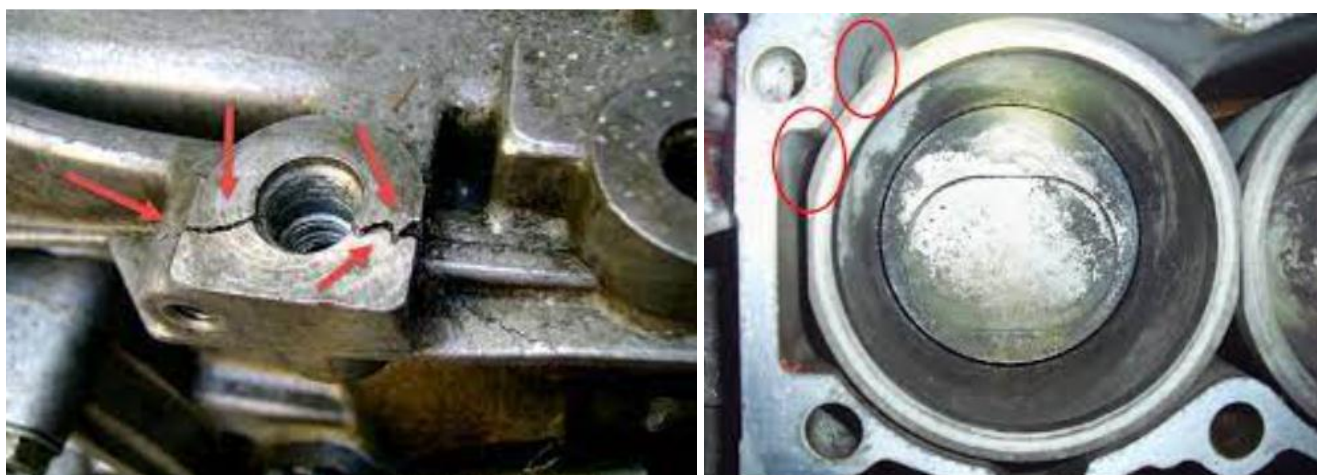


Рисунок 1.5. – Тріщини блоків циліндрів ДВЗ



а)

б)

Рисунок 1.6. – Найбільш часті дефекти ГБЦ:

а – раковини; б - тріщини



Рисунок 1.7. – Тріщини у кришках механізмів ГРМ



Рисунок 1.8. – Тріщини та руйнування піддонів блок-картерів ДВЗ

Основними експлуатаційними дефектами деталей ТЗ виготовлених із сплавів на основі *Al* (в чистому вигляді *Al* не використовуються з-за недостатніх фізико-механічних властивостей) є зовнішні або внутрішні тріщини стінок; дефекти пов'язані із руйнуванням елементів таких деталей, в більшості викликані дією ударних навантажень, які є результатом ДТП, демонтажних операцій, неправильних умов транспортування вузлів й агрегатів та неякісно проведеними розбирально-складальними операціями.

Основними причинами появи тріщин в експлуатаційних умовах в більшості є порушення навантажувальних та температурних режимів з-за використання неякісного палива (із підвищеними температурами горіння), втрати ефективності роботи системи охолодження ДВЗ (при забитому радіаторі, несправному термостаті, недостатньому рівні охолоджувальної рідини в системі, несправності електровентилятора, розгерметизації системи, обриву приводного пасу помпи або виходу її з ладу, використанні охолоджуючих рідин низької якості та ін.), робота на збіднених паливно-повітряних сумішах, поломок деталей КШМ, ЦПГ та ГРМ тощо.

Основною причиною застосування схильних до тріщиноутворення *Al*-сплавів замість сталей або чавунних, є їх безумовні переваги у одночасному поєднанні властивостей міцності та легкості (меншої питомої ваги), особливих механічних та антикорозійних властивостей при відносно низьких показниках вартості виробів (у порівнянні із матеріалами на основі магнію (*Mg*), титану (*Ti*) або карбону (вуглеволокна)); кількість деталей в конструкціях сучасних ТЗ, в тому числі й с/г призначення, виготовлених із сплавів на основі *Al* традиційно залишається стабільно високою. Однак процедура відновлення працездатного стану таких деталей має певні проблеми, а більш технічно проста для реалізації технологія заміни окремих деталей з *Al* - вартісна та тривала в часі.

Так як *Al* відноситься до групи металів, до нього можна застосовувати технології зварювання. Разом з тим, він характеризується високими показниками теплопровідності (фактично у 5 разів вищими за сталь), тому енергія із зварювальної ванни інтенсивно відводиться в о'єм деталі, що суттєво збільшує теплонавантаження на неї й може спричинити втрату форми й розмірів (короблення). Ситуацію можна покращити за рахунок застосування попереднього нагрівання деталей з *Al* сплавів, але низька температура їх плавлення, визначена властивостями *Al*, приводить до зниження міцності деталі під час та після температурного впливу [4]. Іншим негативним фактором є значна ливарна усадка зварювальної ванни (у 2 рази більша ніж у сталі), що формується при затвердінні металу та спричиняє появу внутрішніх напружень й деформацій, які можуть стати причинами утворення «гарячих» тріщин та високого ризику появи браку [4].

З технологічної точки зору при зварюванні алюмінію також є значні складнощі. Так, при взаємодії із киснем повітря на поверхні алюмінію миттєво утворюється тверда оксидна плівка, яка не дозволяє використовувати більш прості і доступні зварювальні технології, такі як, наприклад, електродугове зварювання. Зварювання алюмінію характеризується підвищеним рівнем складності, відповідальності роботи й потребою у фахівцях високої кваліфікації; практично всі існуючі технології зварювання *Al* передбачають потребу у використанні спеціального обладнання та захищенні зварювальної ванни інертними газовими середовищами [5].

Разом з тим, навіть при використанні сучасних технологій зварювання алюмінію, та дотриманні всіх технологічних й виробничих умов процесу, не можна в повній мірі бути впевненим у повному якісному проведенні ремонтних операцій. Нажаль не всі тріщини є видимими за допомогою візуального способу їх виявлення, а застосування інших є або фізично не можливим (наприклад, методу магнітного контролю) або ускладненою (ультразвуковий метод). Ремонтна практика підприємства виявила, що понад 23% деталей виготовлених зі сплавів на основі Al (в більшості це стосується суцільних об'ємних деталей із значною кількістю внутрішніх порожнин і каналів - блоків циліндрів та ГБЦ) мали скриті «внутрішні» дефекти у вигляді раковин й тріщин (рис. 1.9), які були виявлені під час випробування деталей на герметичність та підтверджені після проведення руйнівного контролю.



Рисунок 1.9. – Скриті дефекти ГБЦ ДВЗ

Виробничий процес ТОВ «Калита-Нова» не передбачає попередню оцінку технічного стану АТЗ та проведення контролю за роботою їх механізмів, які потім стануть об'єктами ремонту. Всі вузли й деталі потрапляють на підприємство лише у знятому (демонтованому) стані, тому спрогнозувати наявність тріщин без проведення вищеописаних робіт, фахівці підприємства не здатні. Разом з тим, власників автомобілів мають таку можливість й можуть надати інформацію, яка непрямым чином, але все ж таки буде свідчити про можливість існування скритих тріщин. До таких ознак для ДВЗ відносяться:

- поява емульсії в картері двигуна та на масляному щупі;
- плівка оливи у розширювальному бачку системи охолодження;

- падіння та/або збільшення рівнів оливи або охолоджувальної рідини відповідно у системах мащення та охолодження;
- перегорів двигуна та розгерметизації системи охолодження через різке зростання тиску з-за прориву відпрацьованих газів;
- наявність охолоджувальної рідини в циліндрі й на свічках запалення;
- проблеми із запуском та зниження потужності двигуна;
- зміна кольору відпрацьованих газів (сизий або білий дим із вихлопної труби) тощо.

Нажаль, деталі із дефектами внутрішніх перетинок та каналів не підлягають проведенню відновлювальних операцій й повинні бути вибраковані, що суттєво ускладнює процес відновлення механізму та збільшує вартість ремонтних робіт інколи у декілька разів.

Тому, для впровадження у виробничий процес підприємства будь-якої технології відновлення таких деталей із алюмінієвих сплавів, потрібно передбачити та забезпечити попереднє (в процесі дефектування та перед проведенням ремонтних впливів) та наступне (після відновлювальних робіт) обов'язкові їх випробування на відсутність внутрішніх витоків із використанням сучасного спеціалізованого виробничого обладнання – стендів або установок для перевірки на герметичність.

1.3. Визначення предмету, об'єкту дослідження, мети та задач дослідження

Отже метою досліджень є визначення найбільш ефективної технології усунення тріщин в деталях транспортних засобів виготовлених зі сплавів на основі алюмінію.

Об'єктом дослідження є технологія видалення зовнішніх тріщин на поверхнях деталей виготовлених із алюмінієвих сплавів.

Предметом дослідження є визначення раціональних параметрів процесу видалення тріщини на зовнішніх поверхнях.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних *задач*:

- 1) проведення ґрунтовного аналізу існуючих способів видалення тріщин у

корпусних деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію;

- 2) проведення порівняльного аналізу основних методик зварювання алюмінію та його сплавів;
- 3) визначення особливостей використання різних матеріалів для зварювання алюмінію;
- 4) визначення раціонального способу заварювання тріщин на основі порівняльної оцінки різних методик зварювання;

оцінка особливостей впровадження прийнятої технології відновлення у виробничий процес підприємства.

Розділ 2. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ УСУНЕННЯ ТРІЩИН У ДЕТАЛЯХ ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

2.1. Основні властивості алюмінію та сплавів на його основі, які використовуються у машинобудуванні

«Алюміній (Al) – легкий, пластичний метал сріблясто-білого кольору, проводить тепло й електричний струм, легко піддається обробці. За сировинними запасами алюміній найпоширеніший у природі елемент, що міститься в багатьох мінералах [6]». В залежності від хімічного складу, розрізняють Al особливої чистоти (містить 99,999% Al), високої чистоти (містить 99,995...99,95% Al) й технічної чистоти (містить 99,85% до 99% Al). Крім цього до складу Al входять й домішки заліза (Fe), кремнію (Si), міді (Cu), цинку (Zn), титану (Ti) та ін. [6]

Алюміній володіє високими показниками пластичності, корозійної стійкості (у прісній воді) під дією атмосферних й інших специфічних умов. При контакті із повітрям відбувається активна хімічна реакція металу із киснем (O_2) в результаті чого його поверхня покривається тонкою захисною плівкою оксиду алюмінію (Al_2O_3) [7].

В машинобудуванні Al у чистому вигляді не використовується, а деталі машин і механізмів виготовляють із сплавів на його основі. В залежності від технології виготовлення сплави на основі Al класифікують на ливарні (для відливків), такі що піддаються деформуванню (призначені для виробництва напівфабрикатів й виробів із обробкою тиском) і спечені сплави [8].

До першої групи входять силуміни (сплави Al і кремнієм (4...13%) та незначним вмістом домішок Cu , марганцю (Mn) і магнію (Mg)) [6, 9]. «Силуміни володіють кращими у порівнянні із Al механічними властивостями, гарною оброблюваністю, високою рідко текучістю і незначною усадкою при застиганні. Їх маркують літерами АЛ (Al ливарний) та цифрою, яка показує умовний номер сплаву (АЛ2, АЛ4 тощо) [6]».

Саме силуміни використовуються для виготовлення ливарними технологіями базових та інших деталей ДВЗ (блок-картерів, ГБЦ, впускних колекторів, кришок ГРМ, піддонів картерів), трансмісій (корпусів КП та картери ведучих мостів), механізмів керування (корпусів рульових рейок та гальмівних супортів) та

ходових частин (підрамників, балок тощо) [6, 10].

За здатністю до термічної обробки всі сплави поділяються на такі, що термічно не зміцнюються й термічно-зміцнені.

«Матеріали із спеченої алюмінієвої пудри (САП) й спечених алюмінієвих сплавів (САС) складаються із *Al*-порошків або його сплавів й окису алюмінію; отримують САП і САС послідовним брикетуванням, спіканням й пресуванням окисленої із поверхні алюмінієвої пудри [10]».

Зварні конструкції АТЗ (наприклад підрамники, опорні стакани та лонжерони, силові бруси бамперів, важелі підвіски, паливні баки тощо) виготовляють із деформованих алюмінієвих сплавів, які не проходять зміцнюючу термообробку. До таких сплавів відносяться алюмінієво-марганцевий сплав АМц (вміщує до 13% *Mn*) й група сплавів системи «*Al – Mg*» - магналії (АМг, АМг1 - АМг6).

До сплавів, що деформуються термічним зміцненням відносяться сплави системи «*Al – Si – Mn – Mg – Fe*» - дюралюмінії (містять близько 4% *Cu*, по 1% *Mn* й *Mg*, а також постійні домішки *Si* і *Fe*).

Дуже важливою конструктивною властивістю сплавів на основі *Al* всіх груп є здатність до зварювання (таблиця 2.1), показники якої є вирішальними для можливості проведення ремонтних робіт в експлуатаційних умовах.

Таблиця 2.1. Здатність до зварювання сплавів на основі *Al*

Група сплаву	Здатність до зварювання
Ливарні	висока
Отримані під тиском	найвища при забезпеченні до 95% міцності основного металу, високій пластичності й високій корозійній стійкості
Спечені	дуже погана
Термічно-зміцнені	погана (обмежена)

Однак, останнім часом в машинобудуванні, особливо під час виробництва найбільш відповідальних та базових деталей ДВЗ, використовуються новітні технології матеріалознавства, які можуть суттєво вплинути, а інколи й кардинально змінити можливість проведення ремонтних операцій. Так, отвори блоків циліндрів виготовлених із ливарного *Al*-сплаву силуміну, крім чавунних вставних гільз,

можуть бути хромовані, покриті нікасилом, алюсилком, або мати вставні алюсилкові гільзи. Конструктивно це дозволили суттєво зменшити їх масу, але значно ускладнило ремонтпридатність [11].

Ще з 80-х років минулого сторіччя поширилася технологія запресування тонкостінних чавунних або композитних гільз до отворів у алюмінієвого блоку циліндрів із забезпечення посадки з натягом по всій контактній площині. Однак, виявлені недоліки такої технології – різні коефіцієнти температурного розширення чавуну й алюмінієвого сплаву та потенційно низька довговічність блоку визначили передумови появи альтернативного підходу до вирішення цієї проблеми - використання суцільно-алюмінієвого блоку із стінками циліндрів кому зміцненими спеціальними технологіями. Так, компанія «Chevrolet» виготовляла блок циліндрів із алюмінієвого заевтектичного сплаву із вмістом до 17 % Si («silumal»), а спеціальна обробка стінок циліндрів здійснювалася хімічним травленням та збагачувала поверхневі шари кристалами Si , доводячи таким чином поверхневі шари до потрібних параметрів оливоємкості й твердості. Однак, досвід виявився невдалим: двигун був занадто чутливим до якості мастильних матеріалів та до перегріву; мав низький ресурс й виходив із ладу до регламентованого закінчення нормативного ресурсу саме через підвищене зношення стінок циліндрів, відновлення яких фактично було неможливим [10].

Аналогічний матеріал й технологію його обробки було доведено до досконалості європейськими автовиробниками «Mercedes», «BMW» та «VAG», які серійно запровадили отриманий литтям під низьким тиском сплав «Alusil» ($AlSi17Cu4Mg$). Структура такого сплаву є неоднорідною й сформована частинками Al із вкрапленням Si , що забезпечує пористу структуру поверхні гільзи циліндрів здатну затримувати оливу. Частинки Si забезпечують необхідну твердість й створюють потрібну пару тертя «стінка блоку - поршень». Такий блок циліндрів є ремонтпридатним й забезпечує можливість його розточування із повторним хімічним травленням після хонінгування спеціальними брусками, так як товщина зміцненого шару Al із підвищеною концентрацією Si оцінюється декількома мікронами. Тим не менше, чутливість таких блоків до перегріву і якості мастильних матеріалів є високою; ДВЗ побудовані на їх основі потребують

чіткого дотримання регламентованих експлуатаційних режимів й системи обслуговування, а їх температурне навантаження повинен оцінювати й контролювати електронний блок контролю (ЕБК) [10].

Відносно недавно відомий німецький виробник «Kolbenschmidt» розробив технологію запресування готових $Al-Si$ гільз циліндрів із зміцненими стінками та підвищеним (до 27%) вмістом Si (технологія «Locasil») до звичайного блоку виготовленого із Al -сплаву, що дозволило суттєво знизити вартість виробу й частково вирішити проблему ремонтпридатності. На даний час така технологія вже не використовується, але її ідея - локального використання Al -сплаву із потрібними властивостями у вигляді вставних гільз, набула подальшого розвитку й на тепер використовується під назвою «Locasil II». Технологія реалізує виготовлення пористих пресформ із вмістом 25% дрібнодисперсного (30...70 мкм) Si із гель-сублімаційного лиття та подальшим його спіканням із доевтектичним ливарним сплавом вторинного Al . Процес отримання відливки відбувається під високим тиском, який забезпечує як повільне заповнення форми так й належне взаємне проникнення матеріалу. Оптимальні трибологічні параметри поверхонь гільз циліндрів формуються спеціальним фінішним процесом хонінгування [10].

Інше рішення було реалізоване компанією «PEAK Werkstoff GmbH»Є, яка запатентувала й налагодила виробництво литтям під високим тиском гільз із сплаву $AlSi17Cu4Mg$. Автокомпанія «Daimler AG» запропонувала власну технологію «Silites», яка передбачала у запресуванні до звичайного Al -блоку – гільз із підвищеним вмістом Si , отриманих методом відцентрового відливання із подачею розпиленого розплаву. «При цьому Si в результаті швидкого охолодження при кристалізації й затвердінні набував дрібнозернистої щільної структури із високою однорідністю й довговічністю властивостей [10]».

Альтернативна технологія «Nicasil» - забезпечує формування покриття із Ni на алюмінієвих стінках гільз циліндрів із кристалами карбиду Si утвореними напиленням. Недоліком такого покриття є руйнування поверхні при протіканні хімічної реакції із сіркою, підвищений вміст якої спостерігається у низькоякісних сортах палива. Основним же недоліком «нікасилу» є тонкий шар нікелевого покриття,

який легко пошкоджується при механічному впливі (твердими частинками шлаку, відірваними електродами свічки запалення, частинками металу поршня та ін.) та повністю виключає технологічну можливість відновлення блоку циліндрів, навіть за умови відсутності таких дефектів як тріщини [10].

Один із найбільш поширених й актуальних до цього часу способів є технологія «Goedel», яка реалізує газотермічне напилення покриттів на алюмінієву поверхню циліндра. Таку технологію використовує компанія «VAG» при застосуванні плазмового напилення, в результаті чого формуються пористе покриття товщиною 0,18...0,22 мм, яке володіє високими показниками твердості й стійкості до зношування, зменшує витрату моторної оливи в експлуатаційних умовах, а у ремонтному виробництві - дозволяє розточувати гільзи до видалення слідів зношення й еліпсності під потрібний розмір із наступним хонінгуванням [10].

Більш сучасною є технологія лазерного легування поверхні циліндра («Tribosil»), що забезпечує її поверхневе зміцнення та реалізується для блоків циліндрів отриманих традиційними методами лиття при низьких тисках [10]. «Поверхні циліндрів при локальному розплавленні скануючим променем лазера збагачуються частинками кремнію (розміром < 10 мкм), що подається у зону розплавлення у вигляді струменя пудри, аж до створення заевтектичної структури у товщині шару до 0,6 мм, яка після хонінгування характеризується високою зносостійкістю [10]».

Альтернативою до цієї технології є технологія «Galnical» - отримання Ni -покриття із вмістом (близько 10%) кристалів (1...3 мкм) карбіду Si на стінках циліндрів виготовлених із Al гальванічним методом [10].

Всі описані вище технології забезпечують різні ймовірності тріщиноутворення й можливості проведення відновлювальних операцій. В залежності від місця розташування тріщини (на поверхні гільзи циліндрів або в об'ємі металу деталі), її форми, розмірів й властивостей зовнішнього шару, визначається можливість й доцільність проведення ремонтних впливів. Отже, при фактично однаковому основному матеріалі базових деталей – ливарному сплаві на основі Al - можливість й ефективність проведення ремонту фактично є різною.

2.2. Механічні методи і способи усунення тріщин в корпусних деталях виготовлених із алюмінієвих сплавів

2.2.1. Загальні положення. Як вже було зазначено вище, із сплавів на основі *Al* виготовляються базові й найбільш відповідальні деталі основних вузлів й механізмів сучасних АТЗ різного призначення. Від їх стану залежить як можливість виконання функціонального призначення машини так й економічні показники. Відновлення таких деталей визначає можливість їх повторного використання та зменшення експлуатаційних витрат [12]. На поточний момент розроблені й використовуються різні методи й способи видалення поверхневих тріщин (рис. 2.1) [13].



Рисунок 2.1. - Класифікація методів й способів видалення тріщин на поверхнях в деталей виготовлених із сплавів на основі *Al*

Різні методи та способи мають власні, відмінні від інших, технологічні можливості реалізації та ефективності їх застосування, недоліки та переваги, які потребують визначення і ґрунтовного аналізу. Лише порівняння та співставлення показників надасть можливість виділити найбільш ефективну технологію, яка за умови її реалізації на підприємстві, забезпечить відновлення даного виду дефектів у якомога більшій номенклатурі деталей вузлів й механізмів машин.

Розгляд методів й способів почнемо з історично найбільш давніх та відповідно й найменш ефективних й поширених у сьогочасній ремонтній практиці.

2.2.2. Видалення тріщин технологією нанесення полімерних композицій.

Дана технологія має значні обмеження й може бути реалізована лише при розташування тріщин на зовнішніх поверхнях деталей, які не є поверхнями спряження із іншими (наприклад, зовнішні панелі блок-картеру ДВЗ). Регламентується також й максимальна можлива для відновлення довжина тріщин, яка не повинна перевищувати 120 мм. Технологія реалізується при використанні спеціальних клеїв (паст) із встановлення додаткових деталей (латок) та їх фіксацією різьбовим з'єднанням. Найбільш поширеною є епоксидна клейова основа нанесена на попередньо оброблену тріщину (рис. 2.2) [14].

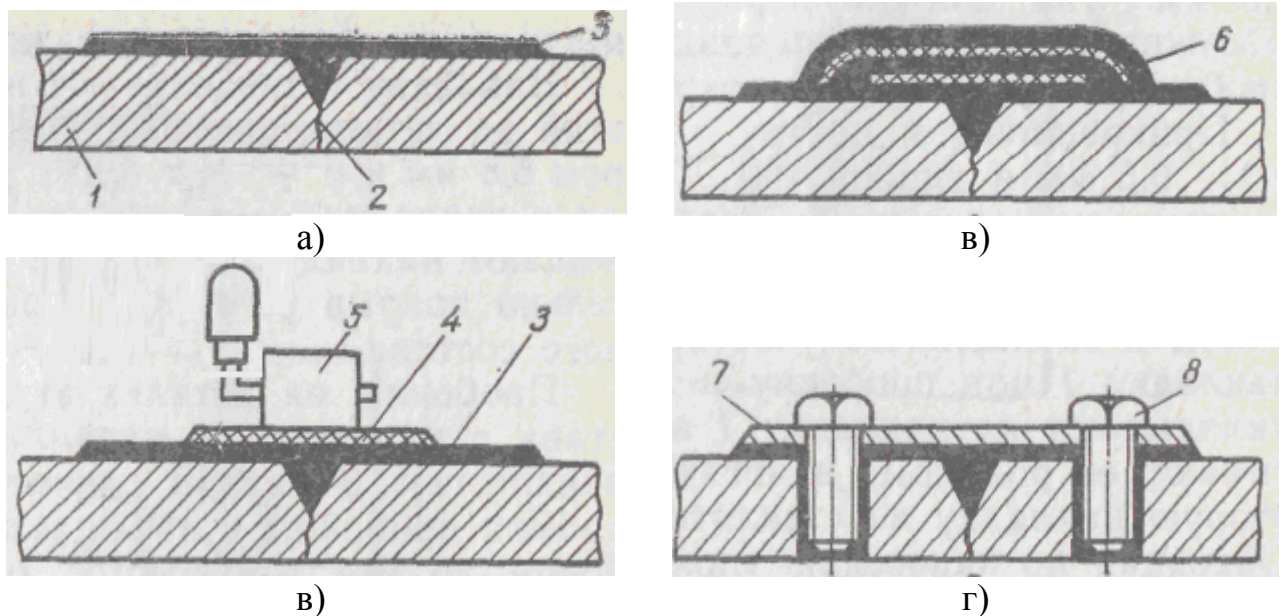


Рисунок 2.2. – Послідовність реалізації способу видалення тріщин встановленням латок на клейовій основі:

а – обробка тріщини та нанесення клейового компоненту; *б* – встановлення первинного покриття із фіксацією роликом; *в* – нанесення додаткових шарів покриття із прошарками клею; *г* – встановлення остаточної металевої латки із фіксацією болтовим з'єднанням.

1 - деталь; 2 - тріщина; 3 – клейова суміш; 4 і 6 – прошарки із склотканини; 5 – прикатний ролик; 7 - металева фінішна накладка; 8 - болти

Поверхня яка містить тріщину попередньо підлягає обов'язковому зачищенню та розширенню із застосуванням кернування тріщини за її довжиною. При цьому кінці тріщини фіксуються свердловими отворами для запобігання її подальшого розвитку під час нагрівання деталі в експлуатаційних умовах. У разі усунення дефекту в стінці товщиною понад 5 мм, потрібно попередньо обробити тріщину для забезпечення наступного її ефективного заповнення. Детально

методику попередньої обробки тріщини буде визначено у наступних пунктах при описанні методик видалення тріщин зварювальними технологіями. Місця поверхні деталі на які буде нанесена клейова суміші піддаються травленню кислотою (наприклад, сірчаною) із ретельним просушуванням до повного видалення вологи. Доцільним є проведення всіх підготовчих операцій безпосередньо перед нанесенням клейових композицій [14].

Безпосередньо перед заповненням обробленої тріщини клейовим складом, її поверхню потрібно ретельно знежирити (розчинником або ацетоном) й знову протягом 3...5 хв. якісно просушити. Клейову суміш потрібно не просто нанести на поверхню, а спочатку ретельно її втерти у підготовлену тріщину, використовуючи для цього шпатель. На другому етапі її нанесення - при формуванні другого шару, потрібно забезпечити перекриття тріщини на ширину 10...15 мм та сформувати клейовий валик висотою не менше 2...3 мм [14].

При реалізації даного способи найбільш часто застосовують метало-полімерні композиції на базі епоксидної смоли (марки ЕД-6 із вмістом 1% летючих речовин), яка при затвердінні формує усадку матеріалу лише на 0,28% із поглинанням вологи на 0,11% й забезпеченням щільності 1,17...1,19 т/м³. Затверджувачем виступає поліетиленполіамін з щільністю 0,97...1,05 т/м³, а наповнювачем – порошок *Al*. Суміш формується у складі: смоли ЕД-6 (приймається за 100%), поліетиленполіаміну (до 7%), дибутилфтолату (до 15%) та *Al* порошку (до 25%) [14].

Після нанесення клейової суміші та ретельного її ущільнення шпателем на неї встановлюють накладку (покриття) виготовлене, як правило із склотканини) із забезпеченням перекриття тріщини на 20...25 мм та наступним її ручним прикочуванням роликом. Попередньо необхідно обезжирити накладку та прокип'ятити її у воді протягом 10...20 хв. Друга накладка встановлюється аналогічно першій за відмінністю лише у зоні її перекриття – вона повинна забезпечити перекриття першої на 10...15 мм [9]. До повного затвердіння полімерної композиції, деталь, тріщина в якій була відновлена за такою технологією, повинна бути витримана протягом 48 год. в діапазоні температур 16...20 °С. Доцільним при цьому є розміщення деталі у спеціальних сушильних

камерах при температурі 100 °С, що фактично за 1 год. забезпечує затвердіння клею. Технологія обробки тріщини довжиною понад 150 мм додатково вимагає накладання металевої накладки із її різьбовим кріпленням [14].

2.2.3. Скріплення тріщин встановленням додаткових деталей.

Перспективним способом видалення тріщин є технологія їх скріплення встановленням поперечних «вставок-скріпок», виготовлених із матеріалу аналогічного за властивостями із матеріалом деталі у попередньо просвердлені не наскрізні отвори. Після обробки вставок тиском, наприклад їх проковування пневматичним інструментом, відбувається «стягування» тріщини й відновлення її герметичності [9]. Різновидом даного способу є використання конічних болтів, що загортаються у різьбові отвори попередньо зроблені вздовж усієї лінії тріщини. Методика реалізації способу передбачає певну послідовність виконання операцій, яка починається із визначення меж тріщини, наступного свердлування центральних (базових) отворів для скріпок та додаткових бічних (рис. 2.3 а).

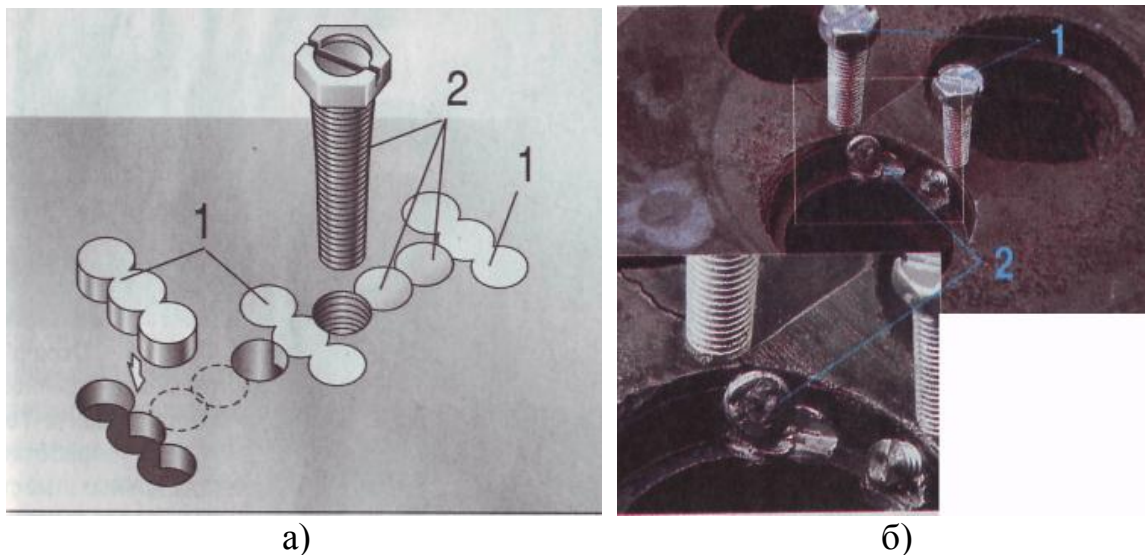


Рисунок 2.3. – Технологія видалення тріщин встановленням фіксуючих поперечних скріпок й конічних болтів:

а) схема способу; б) послідовність реалізації способу.

1 – поперечна скріпка; 2 – конічний болт, що розміщується у різьбовому отворі вздовж усієї лінії тріщини поміж скріпками

Кількість бічних отворів та відповідна кількість скріпок обирається в залежності від розмірів й характеру тріщини при забезпеченні різних відстаней від між скріпками, які визначаються місцем розташування тріщини та кількістю й діаметром зроблених отворів для встановлення конічних болтів.

Після проковування скріпок послідовно свердлять отвори, нарізають в них різьбу й закручують болти, на які попередньо наносять термостійкий клей-фіксатор із зусиллям, що забезпечує надійну фіксацію металу болтів у металі деталі, що піддається ремонтним діям (див. рис. 2.3 б).

Зайву частину болта із головкою зрізують залишивши лише невелику виступаючу частину, й тільки після цього закручують наступний, витки якого обов'язково повинні захопити метал попередньо встановленого болта. Оскільки болти конічні, вони намагаються розширити тріщину, але за рахунок встановлених скріпок й твердості матеріалу деталі – цього не відбувається. В зоні контакту металів «скріпка-болт-деталь» створюються напруження, що зберігаються при їх тепловому розширенні. Для забезпечення взаємної надійної фіксації з'єднання скріпок, болтів та деталі, отриманий шов проковують спеціальним пневматичним інструментом. Застосування такого способу в окремих випадках (за умови наявного доступу інструменту) дозволяє видалити тріщину на деталі без необхідності її демонтажу [14].

На рис. 2.4а представлений мікрошліф з'єднання «болт–різьбовий отвір ГБЦ» – відшліфований зразок вирізаний із матеріалу шва та протравлений 25% розчином азотної кислоти, а мікрограми з'єднання наведені на рис. 2.4б та 2.4в.

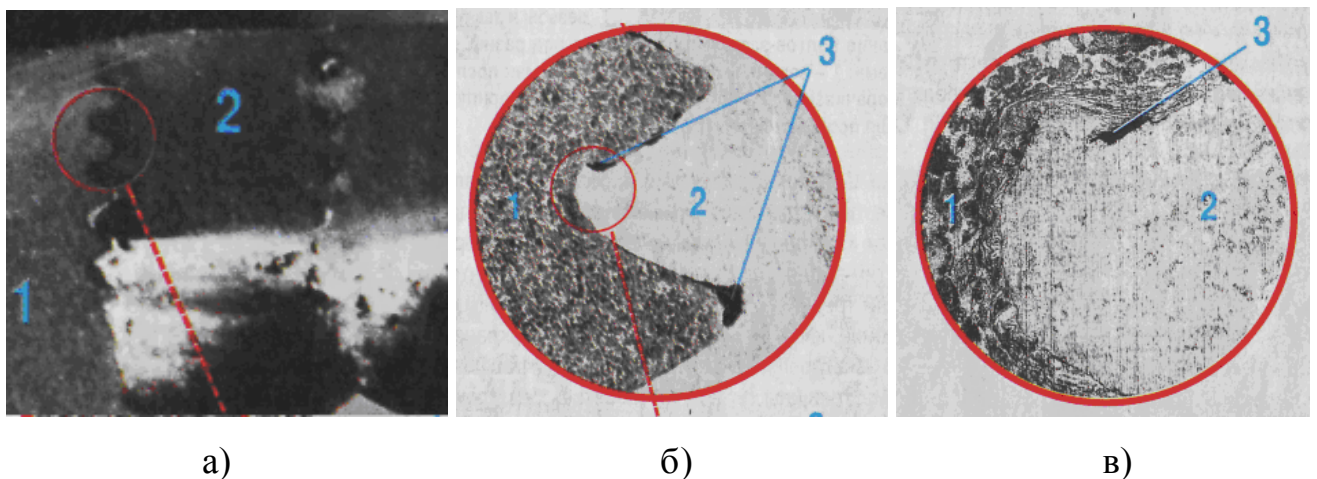


Рисунок 2.4. - Розріз шву, отриманого проковуванням завернутих конічних болтів-заглушок:

а - відшліфований зразок, вирізаний з матеріалу шва; б - границя ущільнення металів деталі та різьбової вставки; в - зона пластичної деформації, яка прилягає до границі ущільнення.

1 - деталь; 2 - конічний болт; 3 - термостійкий клей-фіксатор

Спосіб встановлення скріпок і конічних болтів вимагає (так само як і інші способи) гарних навичок свердлення отворів ручним інструментом, уміння використовувати різні пристосування, дотримання послідовності проведення операцій і високої якості застосовуваних матеріалів [14].

До ремонту для забезпечення доступу до тріщини часто необхідно видалити свердлінням або розточенням втулки і сідла клапанів, технологічні заглушки тощо. Після ремонту (особливо з використанням зварювання) потрібно відновлення геометрії і співвісності різних отворів, привальних площин, товщини і форми перегородок і т.д. [14].

Розділ 3. МЕТОДИ ЗАВАРЮВАННЯ ТРІЩИН У ДЕТАЛЯХ ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

3.1. Основні методики зварювання алюмінію та сплавів на його основі

3.1.1. Загальні положення. У більшості випадків зварювання залишається основним способом відновлення деталей машин виготовлених на основі *Al*, але при цьому не виключена й поява зварювальних дефектів, викликаних підвищеним температурним впливом та властивостями сплавів, що забезпечують більш інтенсивне відведення енергії із зони шва й менш інтенсивне при віддаленні від нього. Це спричиняє появу тимчасових механічних напружень безпосередньо у процесі зварювання й залишкових, після його закінчення, які суттєво підвищують ймовірність появи деформацій деталі (скривлення, скручування) та ризик утворення нових (гарячих або холодних) тріщин [15]. Останні залишаються найбільш небезпечним дефектом зварювального процесу.

Величини деформації залежать від способу зварювання; так газове зварювання спричиняє значно більші деформації, ніж електродугове, але у останнього є перевага - менші величини внутрішніх механічних напружень, що виникають на границях шву й основного металу деталі.

Беззаперечно, вже зараз можна попередньо стверджувати, що технології зварювання є кращими серед інших при видаленні зовнішніх тріщин на поверхнях деталей виготовлених із алюмінієвих сплавів. Разом з тим, визначення найбільш ефективного способу зварювання потребує ґрунтовного дослідження характеру протікання процесів формування зварювальної ванни та шва, які визначаються прийнятим способом нанесення матеріалу, властивостями основних матеріалів електродів та присадкового дроту, використаних захисних матеріалів (газів, флюсів) та режимів зварювання [16].

Існуючі технології зварювання *Al* й сплавів на його основі, досить різноманітна (див. рис. 2.1 та таблицю 3.1). Найбільшого поширення серед усіх способів здобув аргонодуговий спосіб на перемінному струмі електродом, що не плавиться. Обмеженням даного способу є те, що він не надає оптимальні властивості для всіх видів зварених з'єднань так як не володіє достатньо високою продуктивністю.

Таблиця 3.1. Характеристики процесу та області застосування різних методів зварювання алюмінію [19]

Метод зварювання	Основні характеристики процесу	Доцільна область застосування
Газове зварювання	Низька теплова потужність, значні деформації, низька продуктивність, підвищене шлакоутворення, можливі тріщини та інші дефекти	Зварювання листового металу та невідповідальні ремонтні роботи
Ручне дугове зварювання	Погана якість стиків	Зварювання об'ємних деталей із литого алюмінію
Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом	Компактний метал зварювання, висока міцність, хороша пластичність шва	Широка область застосування. Можливе для застосування на при товщині деталі від 1 мм до 20 мм
Електродугове зварювання в середовищі аргону електродом, що плавиться	Стабільний процес, високі потужність дуги та швидкість зварювання, компактне теплове навантаження та невелика деформація зварювальної поверхні	Універсальний процес. Товщина зварювання до 50 мм
Імпульсне зварювання аргоною дугою електродом, що плавиться	Незначні зварювальні деформації, хороша стійкість до пористості та тріщин, параметри процесу можна регулювати	Зварювання тонких пластин при всіх просторових положеннях, часто використовується для товщини заготовки 2...12 мм
Зварювання плазмовою дугою	Концентрований тепловий вплив, висока швидкість зварювання, незначні деформації зварювання та напруження у шві, складний процес	Застосовується для стикового зварювання із підвищеними вимогами, ніж для аргонодугового зварювання
Вакуумне електронне зварювання	Незначна за глибиною зона впливу, незначна деформація зварювання, висока якість	Використовується для зварювання деталей невеликих розмірів
Лазерне зварювання	компактний точковий нагрів, найменша деформація зварювання, висока ефективність процесу	Застосовується для зварювання деталей, що потребують високої точності з'єднання

Наприклад, механізоване зварювання в середовищі аргону електродом, що плавиться, забезпечує більшу у 4...5 разів вищі показники продуктивності, але гірші механічні властивості з'єднань за рахунок недостатньо ефективного видалення окисних плівок [17, 18].

Механізоване імпульсно-дугове зварювання електродом, що плавиться, в Україні не знайшло поширення, хоча в ньому й усунений вище описаний недолік, однак властивості зварних з'єднань отримані цим способом вивчені ще недостатньо. Сучасні джерела живлення, які з'явилися останнім часом (наприклад, ВД-306ДК) та використовують комбіновану вольт-амперну характеристику (ВАХ), яка має ряд ділянок, кожна із яких відповідає за певну стадію масопереносу, включаючи

формування краплі, її відрив від електроду й перенесення до зварювальної ванни), взагалі не досліджені в області технологічних властивостей при зварюванні Al та його сплавів. Інверторні джерела живлення, з-за мінімального поширення в нашій країні, також не мають практичного досвіду промислового застосування в області зварювання Al . Більш відомий метод плазмового зварювання Al має поширення в більшості за кордоном.

Аналізуючи основні особливості вищеописаних методів зварювання Al та сплавів на його основі можна виокремити й спільну рису - необхідність усунення з поверхні окисної плівки із ретельною підготовкою процесу зварювання та проведенні попереднього підігріву деталі [20]. Безпосередньо же під час формування зварювального шву, якісному протіканню процесу зварювання Al перешкоджають наступні фактори [21]:

- висока ймовірність утворення тугоплавких окислів Al_2O_3 із температурою плавлення понад $2050^{\circ}C$ та щільністю більшою за щільність Al , що суттєво ускладнює з'єднання кромки зварювального шву й обумовлює підвищений рівень забруднення металу цими окислами;

- суттєве зниження міцності за високих температур, збільшує ризик руйнування твердого металу кромки, що ще не розплавилася, під дією ваги зварювальної ванни;

- підвищена схильність до короблення, викликана підвищеними величинами коефіцієнту лінійного розширення ($\alpha = (21,0...24,7) \cdot 10^{-6}^{\circ}C^{-1}$) та низьким модулем пружності сплаву при γ 1,5...2 рази вищому за аналогічні сталеві конструкції зафіксованому рівні деформацій зварювання;

- потреба у забезпеченні максимального рівня хімічного очищення зварювального дроту й механічного очищення й знежирення крайок поверхні (тріщини), що зварюються; поява інтенсивної пористості шву з-за підвищеної насиченості H_2 , який затримується у металі при остиганні та викликає зниження міцності й пластичності металу шва. Натомість, застосування попереднього й операційного підігріву значно сповільнює процес кристалізації Al зварювальної ванни, що оказує позитивний вплив на більш повне видалення з неї газів та зниження рівня пористості;

- необхідність застосування потужних джерел енергії обумовлена високою теплопровідністю Al та попередній підігрів початкових ділянок шва до температур $120...150^{\circ}C$ або ж обов'язкове застосування попереднього й операційного підігріву;

- схильність металу шву до виникнення тріщин та розвиток значних усадочних напружень, що визначається високою ливарною усадкою Al (до 7%).

Наступними дослідженнями будуть визначені особливості реалізації певних технологічних принципів зварювання Al та сплавів на його основі і матеріалів, які використовуються при цьому.

3.1.2. Видалення плівки окислів з поверхні металу, що зварюється. В природних умовах Al фактично одразу покривається шаром окислів, що запобігає його інтенсивній корозії. При руйнуванні або видаленні цієї плівки під дією кисню повітря вона відновлюється за декілька днів, надійно захищаючи метал від подальшого окислювання. На рис. 3.1 наведена залежність поверхневої щільності окислів Al , що утворюються із часом на його поверхні при температурі $20^{\circ}C$.

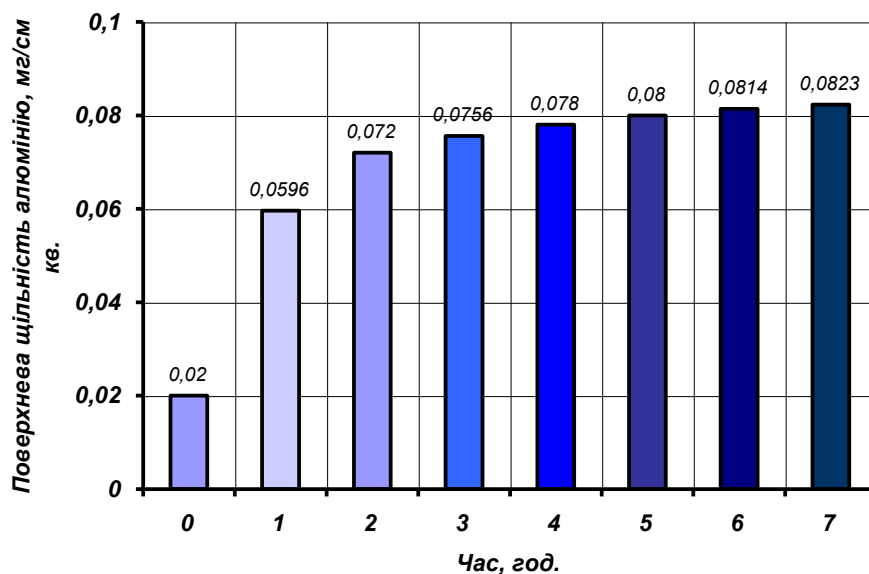


Рисунок 3.1. – Зміна поверхневої щільності шару Al з часом при $20^{\circ}C$

Окисна плівка на поверхні Al і його сплавів значно ускладнює процес зварювання; маючи високу температуру плавлення (вищу за $2050^{\circ}C$) вона не розчиняється в рідкому металі зварювальної ванни, а потрапляючи до неї – суттєво погіршує процес сплавлення між собою часток металу й умови формування шва.

Важливою характеристикою окисної плівки Al є її здатність адсорбувати газу, особливо водяну пару, саме тому вона є джерелом газів, які розчиняються у металі та є причиною формування в ньому різного роду нещільностей.

Природна захисна плівка має значну товщину і її видалення в процесі зварювання досить ускладнене. Тому поверхні деталей, що з'єднуються, й зварювального електроду (дроту) очищують від окислів безпосередньо перед початком процесу зварювання та створюють на них тонкий штучний шар окислів, який має зберігатися 8...16 год. із можливістю відносно легкого руйнування електричною дугою (або під дією флюсу) в процесі зварювання.

Обробка поверхні деталей, що зварюються та дроту здійснюється поетапно: спочатку механічним зачищенням металевими щітками, а потім знежиренням у водному розчині (40...50 г/л тринатрійфосфату ($Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$), 35...50 г/л кальцинованої соди ($NaCO_3$) та 25...30 г/л рідкого скла (Na_2Si_3)) поверхонь деталі та зварювального дроту. Тривалість у часі такого процесу приблизно 5 хв. при температурі розчину 60...70 °C. Наступний етап – хімічне травлення поверхонь протягом 1...3 хв. 5% розчином $NaOH$ (або KOH). Після цього залишки лугу й продуктів реакції з поверхні деталі змивають спочатку гарячою, а потім холодною водою, а після промивання - пасивують поверхні нагрітою до температури 60 °C 20% азотною кислотою (HNO_3). Такий процес забезпечує формування на поверхні деталі нового тонкого шару окисної плівки. Завершальним етапом підготовки є промивання деталі (або її поверхні) поетапно холодною та гарячою водою й остаточне просушування.

Зварювальний процес на підготовлених таким чином поверхнях деталі необхідно виконати за наступні 24 год., а зварювальний дріт без наступної процедури підготовки можна використовувати лише протягом 8 год., що обумовлюється повільним збільшенням при атмосферних умовах товщини окисної плівки. Розбіжності у термінах затримки до зварювання підготовлених поверхонь деталі й дроту обумовлено додатковим видаленням окисних плівок з поверхні деталі механічним очищенням щітками та шабером. Найтонша плівка окису, що утворилася після механічного зачищення, легко видаляється зварювальною дугою, яка горить у середовищі інертних газів, та досить

ефективно видаляє окисли, які мають негативний потенціал.

Процес обробки поверхонь металу, що зварюється, позитивними іонами називають катодним розпиленням. При ньому позитивні іони інертних газів, що наявні в дузі розганяються катодною напругою і вдаряються у поверхневий шар окисної плівки утворюючи візуальні білуваті смуги по сторонах шва.

Менш ефективним є видалення окислів Al з поверхні металу, що зварюється, у випадку наявності в нього позитивного потенціалу - окисли Al руйнуються лише під час взаємодії із розплавленим Al в результаті чого утворюється газоподібний субокисел Al_2O . Оскільки ця реакція можлива тільки при температурах понад $1700^{\circ}C$, область очищеної поверхні практично обмежена анодною плямою. Отже, саме тому, такий метод зварювання потребує використання потужних пальників й високих значень струму дуги для забезпечення значної щільності теплового потоку в області анодної плями дуги. Такий метод видалення окисної плівки називається термічним очищенням.

Цей метод максимально ефективний при використанні, так як захисний газ – гелій (найбільш високоентальпійний газ) сприяє більш стабільній підтримці дугового проміжку.

При ручному дуговому зварюванні покритими електродами й автоматичному дуговому зварюванні під шаром флюсу, розплавлений Al захищають від навколишньої атмосфери флюсами із хлоридів й фторидів лужних та лужноземельних металів, які під дією дуги розплавляються й енергійно реагують з окисом Al , утворюючи комплексні з'єднання, які переходять у шлак або летючі з'єднання. Так, наприклад, при використанні флюсів складу 50% KCl , 15% $NaCl$, 35% Na_3Al_2 відбувається руйнування Al_2O_3 та його розчинення у кріоліті Na_3Al_2 із утворенням легкоплавкого шлаку. Сам кріоліт не тільки розчиняє Al_2O_3 , але й, змінюючи поверхневий натяг металу, сприяє утворенню дрібнокрапельного переносу електродного металу. Залишки же флюсу й шлаку при температурах $25 \pm 5^{\circ}C$ сприяють інтенсивній корозії Al .

Саме тому, ці залишки необхідно ретельно видаляти із зварювальних поверхонь, оброблюючи забруднені ділянки спеціальними волосяними щітками в струменях проточної гарячої води або водяної пари. Дія дуги, залежить від

глибини її проникнення в метал та змінюється при зміні сили зварювального струму $I_{зв}$. В більшості випадків, зварювальний струм $I_{зв}$ для зварювання Al і його сплавів не перевищує 550...750 А, а його збільшення вище критичних значень – викликає порушення процесу формування шва.

Досягти більш повного видалення з торцевих поверхонь кромки окисних плівок можливо за умови збільшення глибини канавки, але при цьому для її заповнення не уникнути додаткової витрати зварювального дроту, та підвищенню концентрації напружень у зоні шва; а для забезпечення нормального прогину окисних плівок на нижній поверхні кромки, ширина канавки повинна бути достатньою.

3.1.3. Технологічні й конструктивні особливості зварювання Al . Високий коефіцієнт теплопровідності та лінійного розширення Al , сприяють істотній зміні форми та розмірі конструкцій із алюмінієвих сплавів в процесі зварювання, що визначає потребу у використанні конструктивних й технологічних методів зменшення зварювальних деформацій в залежності від обраного виду зварювання.

Конструктивні способи зменшення деформацій і напружень за рахунок зменшення кількості зварених швів у виробі та симетричного їх розташування, передбачаються при проектуванні зварного з'єднання. Для врівноваження деформацій припуски на усадку повинні відповідати величині усадки, щоб забезпечити від повітря розмірів деталі після зварювання проектним розміром. Підвищена схильність з'єднань Al і його сплавів до деформації, сприяє виникненню гарячих тріщин, особливо схильними до утворення яких, через перетинання зон термічного впливу, є стикові шви розташовані близько один до одного.

Відмітною рисою зварювання Al є те, що описані вище конструктивні способи необхідно застосовувати у сукупності із описаними в попередньому пункті методами видалення окисної плівки. Не менш важливі й технологічні заходи зменшення деформацій, які забезпечують підбір оптимальних зварювальних режимів для мінімізації зони термічного впливу. Для цього намагаються використовувати лише ті методи зварювання, які забезпечують високу концентрацію енергії в дузі, а з'єднання зварюють на підвищених швидкостях. На деформацію з'єднання істотно впливає й порядок виконання шву: так формування шву підвищеної довжини потребує використання зворотно-

східчастого способу зварювання, а при зварюванні конструкцій, що мають декілька послідовно розташованих швів - оптимально починати із середнього шва, а далі по черзі виконувати інші шви, рухаючи до країв конструкції. Також необхідно враховувати, що з'єднання із скосом кромek більш схильні до деформації, ніж без їх скосу та з'єднання із симетричною двосторонньою обробкою кромek менш схильні до деформацій, ніж із однобічною їх обробкою.

Для усунення залишкових деформацій застосовують ударну та теплову правку гумовими або дерев'яними молотками задля запобігання зашкодженню поверхонь.

До числа технологічних особливостей зварювання *Al* необхідно віднести й попередній його підігрів, який має важливе значення з огляду на той факт, що окисна плівка на поверхні алюмінієвих металоконструкцій, що зварюються, гарно адсорбує вологу й вимагає необхідності застосування заходів із видалення цієї волоgi задля уникнення дефектів. Для підігріву кромek тріщини перед зварюванням використовують газові пальники (відновлювальне полум'я), гаряче повітря або електроконтактні нагрівачі забезпечуючи температурні умови та час підігріву в залежності від марки *Al* сплаву і його товщини (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2. Приклади температур підігріву окремих алюмінієвих сплавів

Сплав	Товщина металу, мм	Температура, °C	Тривалість нагріву, хв.
A99, АД1	Будь яка	350	60
Ал-4, Ал-9, АМц	Будь яка	250	60
АМг3, АМг4, АМг5	< 12	100	30
	> 12	150	10
АД31, АД33, АВ	< 12	180	60
	> 12	200	30
1915	< 12	140	30
	> 12	160	20

3.2. Особливості застосування матеріалів для зварювання алюмінію

3.2.1. Зварювальний дріт. Технологія дугового заварювання тріщин передбачає застосування зварювального дроту, метал якого розплавляючись заповнює зазор формуючи шов потрібних розмірів. Властивості дроту визначають й зміну складу шва, що потрібно узгоджувати при зварюванні різних сплавів на основі *Al*. Вибір потрібного склад дроту для легування здійснюють із

врахуванням хімічного складу матеріалу поверхонь деталі й долі його участі у формуванні шва. Для дугового способу зварювання в середовищі інертних газів розрахунок вмісту кожного з елементів дроту проводять за рівнянням [22]

$$C_{\Pi} = \frac{C_{\text{ш}}}{\gamma_{\Pi} k_{\gamma}} - \frac{C_0}{\gamma_{\Pi}} + C_0, \quad (3.1)$$

де C_{Π} – розрахунковий вміст елементу у дроті;

C_0 – вміст елементу у металі, що зварюється;

$C_{\text{ш}}$ – вміст елементу у металі шва;

k_{γ} – сумарний коефіцієнт, що враховує при зварюванні рівень засвоєння елемента металом шва;

γ_{Π} – частка дроту в металі шва, яка визначається типом з'єднання, товщиною кромок, що зварюються, формою й розмірами шва тощо.

Частина легуючих елементів під дією високих температур зварювальної ванни, видаляється із поверхні розплавленого металу й електродного дроту. Ці витрати прийнято оцінювати сумарним коефіцієнтом засвоєння елементів металом шву k_{γ} , який визначається експериментальним шляхом й оцінює кількість конкретного елементу, що перейшла у шов. Величина витрат залежить від прийнятого способу зварювання й його режимів, фізико-хімічних властивостей елемента та його вмісту у електродному дроті [22, 23, 24].

Із введенням легуючих елементів міцність металу шва підвищується, а пластичність та корозійна стійкість навпаки, знижуються. Для більшості алюмінієвих сплавів (включаючи Ал-4) сумарний вміст 5...8% легуючих елементів у шві або зоні сплавлення є достатнім, для утворення суцільного обідку із вторинних фаз по границях зерен; при такій структурі подальше легування не тільки не збільшує, а й навіть незначним чином знижує міцність, що є результатом концентрації напружень у малопластичних вторинних фазах.

Таким чином, для одержання пластичних корозійно-стійких з'єднань Al-сплави доцільно зварювати менш легованими дротами, а для отримання зварних з'єднань підвищеної міцності - навпаки, використовувати більш леговані дроти із сумарним вмістом легуючих елементів не вище 6...7%.

Вибір дроту, здатного забезпечити з'єднанням підвищену стійкість проти

тріщин при зварюванні алюмінієвих сплавів, визначається максимальними ризиком тріщиноутворення у кожній системі легування. Задля підвищення стійкості з'єднань проти утворення гарячих тріщин, при зварюванні сплавів менш легованих, ніж сплав із максимальним показником тріщиноутворення, застосовують дріт із зниженим вмістом легуючих елементів; в той час як більш леговані сплави зварюють дротами із більшим вмістом легуючих елементів.

В залежності від вимог, що формуються до зварювального шва, для зварювання кожного із сплавів на основі *Al*, к правило, застосовують декілька марок дротів. Найбільш простим підходом є застосування універсального дроту, який забезпечує високі характеристики зварного з'єднанням: стійкість проти появи гарячих тріщин, міцність, пластичність й корозійну стійкість. Марки рекомендованих для зварювання *Al* дротів, які забезпечують з'єднанням оптимальні характеристики наведені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Марки дротів, що рекомендуються для застосування при зварюванні найбільш поширених марок сплавів на основі *Al*

Матеріал деталі	Марка універсального дроту, що забезпечує відносно задовільні характеристики шва	Марка дроту, який забезпечує підвищенні характеристики шва			
		стійкість проти появи гарячих тріщин	тимчасовий опір розриву	відносне подовження	стійкість проти корозії
Ал-4, Ал-9, Амц	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц
А99, А97, А95	А99	А99	СвА85Т	А99	А99
АД0, АД1	СвА5	СвА5	СвА5	СвА97	СвА97
АМг3	СвАМг3	СвАМг5	СвАМг5	АВч	АВч
АМг5	СаАМг5	СвАМг63	СвАМг6	СвАМг5	Св1557
АМг6	СвАМг6	СвАМг63	СвАМг61	СвАМг6	Св1557
АВ, АД31, АД33	СвАК5	СвАК5	Св1557	Св1557	АВч
1915	Св1557	СвАМг5	СвАМг6	СвАМг5	Св1557

Зварювальний дріт може застосовуватися за двома призначеннями:

- при напіваавтоматичному або автоматичному зварюванні у захисних газах (у європейському стандарті має назву «Autrod») в якості електродного дроту;
- при аргонодуговому зварюванні електродом, що не плавиться (у європейському стандарті має назву «Tigrod»), в якості присадкового матеріалу.

Доволі часто на практиці застосовують зварювальні й присадкові дроти компанії «ESAB» (Швеція) (таблиці 3.4 та 3.5).

Таблиця 3.4. Рекомендовані марки дротів для зварювання найбільш поширених сплавів на основі *Al* компанії «ESAB»

Марка <i>Al</i> , що зварюється	Марка дроту, що застосовується
Чистий алюміній A995	OK Autrod 18,01 (склад дроту Al 99,5)
Чистий алюміній A995	OK Autrod 18,11 (склад дроту Al 99,5Ti)
Силумін із вмістом Si до 7%	OK Autrod 18,04 (склад дроту AlSi5)
Сплав АМг3 (до 3% Mg)	OK Autrod 18,13 (склад дроту AlMg3)
Сплав АМг5 (до 5% Mg)	OK Autrod 18,15 (склад дроту AlMg5)
Сплави АМг4, АМг5	OK Autrod 18,16 (склад дроту AlMg4,5Mn)

Таблиця 3.5. Рекомендовані марки присадкових дротів фірми для зварювання найбільш поширених сплавів на основі *Al* компанії «ESAB»

Марка <i>Al</i> , що зварюється	Марка дроту, що застосовується
Чистий алюміній A995	OK Tigrod 18,01 (склад дроту Al 99,5)
Чистий алюміній A995	OK Tigrod 18,11 (склад дроту Al 99,5Ti)
Силумін із вмістом Si до 7%	OK Tigrod 18,04 (склад дроту AlSi5)
Сплав АМг3 (до 3% Mg)	OK Tigrod 18,05 (склад дроту AlSi12)
Сплав АМг5 (до 5% Mg)	OK Tigrod 18,15 (склад дроту AlMg5)
Сплави АМг4, АМг5	OK Autrod 18,16 (склад дроту AlMg4,5Mn)

3.2.2. Захисні (інертні) гази. Для захисту розплавленого металу зварювальної ванни й дроту при зварюванні *Al* і його сплавів застосовуються інертні гази і їх суміші: аргон вищого або першого сорту та гелій особливої або підвищеної чистоти, які поставляються в сертифікованих ємкостях - балонах.

3.2.3. Вольфрамові електроди, що не плавляться. Вольфрам (*W*) – найбільш тугоплавкий із всіх відомих металів, за температурою плавлення він поступається лише C_2 . Температура плавлення *W* дорівнює $3600^{\circ}C$, а питома вага $19,3 \text{ г/см}^3$; він має досить малу летючість при високих температурах й низький коефіцієнт теплопровідності. Електроди виготовлені із *W* розрізняються за ступенем легування, який визначає показник виходу електронів й відповідно термін служби електродів. Електроди бувають чисті (ЕВЧ), лантановані (ЕВЛ), ітріровані (ЕВІ) та торійовані (ЕВТ). Характеристики найбільш поширених марок електродів із *W* представлені у таблиці 3.6.

Слід відзначити, що електроди, які використовуються при аргонодуговому зварюванні *Al* для підвищення стабільності роботи аргонодугової установки та отримання якісного зварного з'єднання - повинні бути заточеними.

Таблиця 3.6. Характеристики найбільш поширених електродів із W

Марка електроду	Вміст домішок, мас. %	Діаметр прутка або дроту, мм
ЕВЧ	-	0,5; 1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ЕВЛ	(1,1-1,4) окиси лантану (LaO)	1,0; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ЕВИ-1	(1,5-2,3) окиси ітрію (Y ₂ O ₃)	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ЕВИ-2	(2,0-3,0) окиси ітрію (Y ₂ O ₃)	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ЕВИ-3	(2,5-3,5) окиси ітрію (Y ₂ O ₃)	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ЕВТ-15	(1,5-2,0) двоокиси торію (ThO ₂)	2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0

Найбільш поширені марки покритих електродів для зварювання Al і його сплавів, виробництва України й інших країн представлені в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7. Найбільш поширені марки покритих електродів для зварювання Al і його сплавів

Марка електроду	Марка сплаву на основі Al, що зварюється
ОЗА 1	Технічний алюміній
ОК 96.10 («ESAB»)	Технічний алюміній
ОЗА 2	Литий сплав типу ЧЕРВОНИЙ-4
ОК 95.50 («ESAB»)	Литий сплав типу ЧЕРВОНИЙ-4
МВТУ	Сплави типу Амц
АФ1	Сплави типу Амг, Амц
ОК 96.20 («ESAB»)	Сплави типу АМг, АМц
А1Ф	Сплави типу АМц, силумін

Склад електродних покриттів для зварювання Al і його сплавів для окремих марок електродів представлений у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8. Склад окремих електродних покриттів для зварювання Al і його сплавів, мас. %

Основний компонент	Марка покриття електроду				
	ОЗА-1	ОЗА-2	МВТУ	АФ1	А1Ф
Хлористий натрій	18,2	30	-	-	18,0
Хлористий калій	32,5	50	20,0	-	32,0
Хлористий літій	9,1	-	24,0	-	9,0
Фтористий калій	-	-	39,0	-	-
Кріоліт	35,0	20	-	35,0	33,0
Фтористий натрій	5,2	-	17,0	-	5,0
Феросиліцій	-	-	-	-	3,0
Флюс АФ-4А	-	-	-	65,0	-

З часом, при збереженні електроди зволожуються, тому перед початком процесу зварювання потрібно провести їх сушіння при температурі 150...200 °С.

Для напівавтоматичного зварювання під шаром флюсу застосовують флюси АН-А1, АН-А4, 48-АФ-1, МАТИ-1а, МАТИ-10, хімічний склад яких представлений у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9. Склад флюсів для зварювання Al і його сплавів, мас. %

Основний компонент	Марка зварювального флюсу				
	АН-А1	АН-А4	48-АФ-1	МАТИ-1а	МАТИ-10
Хлористий натрій	20,0	-	-	-	-
Хлористий калій	50,0	57,0	47,0	47,0	30,0
Хлористий літій	-	-	-	8,0	-
Фтористий барій	-	28,0	47,0	-	68,0
Фтористий натрій	-	-	-	42,0	-
Фтористий калій	-	-	2,0	-	-
Фтористий літій	-	7,5	-	-	-
Фтористий алюміній	-	7,5	-	-	2,0
Кріоліт	30	-	-	3,0	-
Фторцирконат калію	-	-	2,0	-	-
Окис хрому	-	-	2,0	-	-

У відповідності до технічних вимог, зберігання флюсу повинно відбуватися у спеціалізованій тарі, яка герметично закривається, а перед використанням його необхідно просушити протягом 2 год. при температурі 200...250 °С.

3.3. Порівняльний аналіз найбільш поширених способів зварювання алюмінію і його сплавів

Для Al і його сплавів застосовують практично всі існуючі промислові способи зварювання плавленням. Зварювання виконують такими основними способами як: ручним дуговим зварюванням покритими електродами (технологія ММА) аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом, що не плавиться із подачею присадкового дроту (технологія ТП), плазмовим зварюванням та напівавтоматичним зварюванням у середовищі захисного газу (традиційним напівавтоматичним зварюванням, імпульсним напівавтоматичним зварюванням, напівавтоматичним зварюванням із керованим масопереносом на інверторному джерелі живлення та напівавтоматичним зварюванням на джерелах живлення типу ПДГ-316М із комбінованою вольт-амперною характеристикою). Є й інші види зварювання Al і сплавів на його основі (автоматичне зварювання під шаром флюсу, газове зварювання тощо), але вони використовуються значно рідше й тому під час проведення порівняльного аналізу розглядатися не будуть. Безумовно, кожен із способів зварювання має як свої особливості, які необхідно потребують врахування для підвищення ефективності, так й обмеження та недоліки.

3.3.1. Ручне дугове зварювання Al і сплавів на його основі покритими електродами. Технологія ручного дугового зварювання покритими електродами

актуальна при зварюванні деталей із технічного *Al*, сплави якого (марок Амц та Амг) містять до 5% *Mg* та силуміну. При цьому, товщина металу, що зварюється, визначається діаметром електрода; мінімальний діаметр електрода як правило складає 4 мм, що обумовлено складнощами зварювального процесу електродами малого перетину внаслідок високої швидкості їх плавлення. Алюмінієвий електрод розплавляється у 2...3 рази швидше сталевого; в зв'язку із цим товщина металу, що зварюється, повинна перевищувати 4 мм.

Відмінністю даного процесу зварювання *Al* від аналогічного процесу для сталей, полягає у більшій теплопровідності алюмінію, що приводить до появи шлаку у зварювальній ванні так як він не встигає видалятися із розплавленого металу за браком часу перебування зварювальної ванни у розплавленому стані й залишається у з'єднанні у вигляді дефектів.

Зварювання *Al* рекомендується виконувати безупинно у межах одного електрода, так як при випадкових обривах дуги кратер покривається плівкою шлаку, яка перешкоджає повторному її запалюванню. Аналогічний процес відбувається й на кінці електрода.

Для ручного дугового зварювання *Al* необхідний підігрів (для металу середньої товщини – до 250...300 °С, для значних товщин – до 400 °С), що дозволяє одержувати необхідне проплавлення при роботі на помірних зварювальних струмах. Обов'язкове також прожарювання зварювальних електродів перед зварюванням; наприклад, для найбільш розповсюджених електродів типу ОЗА-1 або ОЗА-2 рекомендується прокалювання за температури 150...200 °С впродовж не менше 0,5 год.

Зварювання *Al* покритими електродами виконують постійним струмом зворотної полярності, при використанні в якості джерел живлення спеціальні зварювальні випрямлювачі із падаючою зовнішньою характеристикою й підвищеною (більш 80 В) напругою холостого ходу.

Добре себе зарекомендували випрямлювачі типу КИУ-301, КИУ-501, ГАРТ-160, ВД-306ДК, ВД-506ДК та інші, які мають режими «Целюлоза» й регулювання «Струму короткого замикання». Зварювальний струм вибирають за діаметром електродного стрижня в залежності від товщини основного металу (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10. Наближені режими й витрати матеріалів при ручному дуговому зварюванні *Al* і його сплавів покритими електродами

Товщина металу, мм	d_{el} , мм	Витрата електродів, г/м шву	$I_{зв}$, А	U_d , В	Ширина шву, мм
4	4	150	180...200	36...30	8
6	5	200	280...300	28...32	10
8	6	270	300...320	30...34	14
10	6...7	320	320...380	30...34	16
12	8	400	350...450	32...36	20
14	8	640	400...450	32...36	22
16	8	960	400...450	32...36	24
18	8...10	1270	450...500	32...36	26
20	8...10	1620	5500...550	32...36	28

Механічні властивості з'єднань із алюмінію марки Ал-4 товщиною 6 мм, зварених електродами ОЗА-1 наступні: межа міцності $\sigma_B = 80,3 \text{ МПа}$ при куті згину $\alpha = 180^\circ$.

3.3.2. Аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом, що не плавиться із подачею присадкового дроту (технологія ТП). Цей спосіб (технологія TIG) є найбільш розповсюдженим способом зварювання, який застосовується для заварювання тріщин та виготовлення відповідальних зварних конструкцій із сплавів на основі *Al*. До переваг способу, які визначають його максимальне поширення, належить відсутність шлакових включень, можливість роботи на малих струмах дуги (від 5 А) при забезпеченні високої стійкості горіння дуги в межах діапазону та можливість зварювання тонколистового металу.

В промисловості найбільш часто застосовуються стандартні аргонодугові установки із можливістю використання перемінного струму типу КП (003,004,006), ПДГ (508М, 508М1-1, 516М, 600М), УДГУ (251, 351, 501 і ін.). Конструкція цих установок фактично ідентична: зварювання проводиться на перемінному струмі, керування – тиристорне; можливе регулювання швидкості збільшення й зменшення величини струму, полярності базового струму (регулювання здатності проплавлення). Основною проблемою пристроїв є синхронізація осцилятора й струму дуги, яка змушує осцилятор генерувати високочастотні імпульси у момент проходження струму дуги через нульову позначку. Сама по собі ця проблема вирішується доволі просто, але виникають технічні труднощі, пов'язані із впливом осцилятора на блок керування тиристорами.

Для усунення цього небажаного ефекту виникає необхідність вибудовувати декілька каскадів додаткових L-C фільтрів, які знижують надійність установки. Робочий процес установок на постійному струмі типу УДГУ таких проблем не виникає. Більш докладно ці способи зварювання на перемінному струмі будуть розглянуті нижче.

Зварювання Al на постійному струмі викликають значний інтерес, однак у даний час знаходиться лише у стадії досліджень й лабораторних зразків.

В якості аргонодугових пальників використовують широкий спектр устаткування: серед вітчизняних пальників найбільш поширеними є пальники фірми «Агні» та фірми «Електрик», а серед закордонних пальників - пальники компанії «Abicor Binzel» (Німеччина). Як правило, до струмів 250 А випускаються пальники із газовим охолодженням, а понад 250 А – із рідинним.

При зварюванні на зворотній полярності потрібна заміна електроду на мідний й використання в якості захисного газу аргону, так як використання W анода різко знижує термін його служби. Із закордонних виробників найбільш активно проводить дослідження з цього напрямку вже зазначена німецька компанія «Abicor Binzel», серед вітчизняних - найбільш активно роботи із зварювання Al і його сплавів на постійному струмі зворотної полярності проводилися спільно ВАТ «Каховський завод електрозварювального обладнання» (м. Каховка) та Інститутом проблем зварювання ім. Патона НАНУ (м. Київ).

Технологія зварювання вольфрамовим електродом на перемінному симетричному струмі, визнано найпростішим й поширеним способом аргонодугового зварювання, передбачає живлення дуги від джерел із падаючими зовнішніми характеристиками, що забезпечує мінімальний пусковий скачок струму, що суттєво покращує властивості отриманого зварного з'єднання. Крім того, перемінний струм дуги при зварюванні Al допомагає руйнуванню окисної плівки. Підвищення стабільності горіння електричної дуги, яка утворюється між деталлю й W електродом, забезпечується заточенням його кінця, а за проплавляючу здатність електричної дуги відповідальна симетричність струму.

Для забезпечення максимальної ефективності та продуктивності процесу, вольфрамовий електрод потрібно розташовувати під кутом $60...80^{\circ}$ до поверхні

виробу при куті між цим електродом й присадковим дротом - $80\ldots 90^{\circ}$. Відстань від нижнього краю торця сопла до виробу повинна бути мінімальною ($5\ldots 10$ мм), але достатньою для спостереження за зварювальною дугою і кінцем електроду; збільшення цієї відстані приводить до погіршення ефективності газового захисту та визначає підвищений рівень витрати захисного газу.

За надійність захисту зварювального процесу також відповідальним є діаметр й форма сопла пальника. Рекомендуються наступні діаметри сопла пальника в залежності від діаметра електроду:

Діаметр вольфрамового електроду, мм	2...3	4	5	6
Діаметр вихідного отвору сопла, мм	10...12	12...16	14...18	16...22

Зварювання електродом, що не плавиться, діаметром $2\ldots 6$ мм доцільне для Al і його сплавів при товщина до 10 мм. В даний час більшість промислових підприємств застосовує вольфрамові електроди німецької фірми «Abicor Binzel», які мають максимальний експлуатаційний термін. Наближені режими аргонодугового зварювання W електродом, що не плавиться, із подачею присадкового дроту приведені в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11. Наближені режими аргонодугового зварювання Al сплавів W електродом, що не плавиться, на перемінних симетричних струмах

Тип з'єднання	Шир ина b , мм	Діаметр d , мм		Струм $I_{зв}$, А	Витрата аргону, л/хв	Кількість проходів
		W електроду	присадкового дроту			
З обробкою кромки	1,0	1,0	-	45...50	4...5	1
	1,5	1,5...2,0	-	70...75	5...6	1
	2,0	1,5...2,0	-	80...85	7...8	1
Одностороннє в стик без обробки кромки	2,0	1,5...2,0	1,0...2,0	55...75	5...6	1
	3,0	3,0...4,0	2,0...3,0	100...120	7...8	1
	4,0	3,0...4,0	2,0...3,0	120...150	8...10	1
Двостороннє в стик без обробки кромки		3,0...4,0	3,0...4,0	120...180	7...8	2
		4,0...5,0	3,0...4,0	200...250	8...10	2
		4,0...5,0	3,0...4,0	240...270	8...10	2
В стик із обробкою кромки		4,0...5,0	3,0...4,0	220...280	7...8	3
		4,0...5,0	4,0...5,0	270...300	9...12	3
		5,0...6,0	4,0...5,0	270...300	9...12	5
Таврове, кутове		2,0...4,0	1,5...4,0	100...200	5...7	1...2
		4,0...5,0	3,0...4,0	200...300	7...8	2...4
		5,0...6,0	4,0...5,0	270...320	9...10	2...4

У порівнянні з аргонодуговим зварюванням електродом, що не плавиться, симетричним струмом, зварювання асиметричним струмом сплавів на основі Al

розширює технологічні можливості за рахунок регулювання параметрів струму прямої й зворотної полярностей в діапазоні 30% від амплітудного значення параметра. Перевага складового струму прямої полярності приводить до збільшення глибини проплавлення й швидкості зварювання, а також до підвищення стійкості W електрода. Перевагою струму зворотної полярності є покращення очищення металу, що зварюється, від окисної плівки й підвищення якості формування шву. Вибір правильного режиму зварювання в цьому випадку покладається на технолога (зварювальника).

Характеристиками асиметричного струму є сила струму прямої і зворотної полярності та коефіцієнт асиметрії k_{ac} , який визначається співвідношенням середнього значення складового струму прямої полярності ($I_{np.cер}$) до суми середніх значень струмів прямий й зворотної полярностей ($I_{зв.cер}$).

Для аргонодугового зварювання сплавів на основі Al вольфрамовим електродом, що не плавиться, перемінним асиметричним струмом використовуються установки УДГУ-351АС/DC і УДГУ-501АС/DC, які забезпечують рекомендовані і таблиці 3.12 режими зварювання.

Таблиця 3.12. Режими зварювання стикових з'єднань (зварювання тріщин глибиною 3 мм) із алюмінієвого сплаву Ал-4 на асиметричному струмі

k_{ac}	$I_{np.cер}$, А	$I_{обр.cер}$, А	I , А	U_{δ} , В	q / ν , кДж/см
0,72	115	45	205	10	2,66
0,56	97	75	200	11	2,78
0,35	60	110	195	12	2,92

Зварні з'єднання, виконані на асиметричному перемінному струмі, відрізняються якісним формування зварювального шву при забезпеченні механічних властивості з'єднань зі сплаву Ал-4 (товщиною 3 мм): межі міцності $\sigma_B = 294,3...304,1 \text{ МПа}$ та кути згину $\alpha = 150...155^\circ$.

В окремих випадках, особливо при зварюванні тонколистового металу, більш ефективним застосування різновиду такого процесу - зварювання W електродом, що не плавиться, імпульсною дугою із частотою генерування імпульсів в діапазоні 50...100 Гц та їх накладанням на базову напругу дуги. Поліпшення параметрів шва досягається при цьому різною формою імпульсів: гострокутною -

для частоти 1...50 Гц та прямокутною – при частоті більшої за 100 Гц (для інтенсифікації процесу видалення окисної плівки). Для зварювання в імпульсному режимі випускаються приставки до установок УДГУ-351AC/DC і УДГУ-501AC/DC (типу ППС-01) з пультом для пульсуючого зварювання, який дозволяє регулювати діапазон зміни імпульсів струму та їх тривалість. Це забезпечує зниження ймовірності пропалення металу, що зварюється, й поліпшує формування зварного з'єднання.

Останнім часом з'явилися аналогічні інверторні зварювальні джерела «Faltig-350 (400)» (фірми «OZAS») та «Aristotig» (компанії «ESAB») із частотою зварювальної напруги й струму в декілька десятків кГц й можливістю накладення додаткових імпульсів із регульованою амплітудою та частотою, оснащені подібними до пульту ППС-01 приставками. Перевагами цих установок є висока ефективність руйнування окисних плівок, а при поєднанні із накладанням додаткових імпульсів це створює кращі передумови формування зварного шву, за рахунок чого, реалізується можливість здійснення вибору режиму яким забезпечується плавлення матеріалу при подачі додаткових імпульсів та його кристалізація - в момент припинення дії цих імпульсів. Принциповою відмінністю описаних установок від установок українського виробництва (УДГУ) є зварювання на підвищеній частоті при більш стабільному процесі горіння дуги та виконання схеми керування на більш сучасній елементній базі із використанням осциляторів. Саме тому, в таких установках (в більшості це стосується «Faltig-350 (400)») допускається використання пальника довжиною до 18 м, що суттєво підвищує ефективність зварювання довгомірних конструкцій при забезпеченні значного віддалення зварювальної установки від місця зварювання.

На відмінність від імпульсно-дугового механізованого зварювання *Al* електродом, що плавиться, цей спосіб накладання імпульсів не впливає на регулювання масопереносу. Нажаль, навести інформацію щодо режимів й механічних властивостей покриттів даними методом складно через новизну установок, що реалізують даний метод.

3.3.3. Плазмове зварювання. Подальшим розвитком та удосконаленням методу аргонодугового зварювання *W* електродом, що не плавиться, є плазмове

зварювання, яке реалізує процес нагріву стиснутою дугою стовп якої стиснутий безпосередньо потоком газу, соплом плазмового пальника або дією зовнішнього електромагнітного поля. Найбільшого поширення здобули промислові установки виготовлені із застосуванням останніх двох принципів.

У порівнянні із аргонодуговим зварюванням W електродом, що не плавиться, плазмове зварювання має ряд суттєвих переваг: меншу залежність впливу на геометричні розміри зони проплавлення зміни відстані від торцю сопла до поверхні деталі; менший вплив зміни величини струму на форму дуги та стабільність проплавлення металу; високу надійність запалювання дуги; відсутність включень W у шві; підвищену швидкість зварювання, компактне тепловкладення й мінімальне короблення.

Недоліком плазмового зварювання є потреба у використанні рідинного охолодження плазмового пальника, значне ускладнення обладнання та підвищена її вартість. Плазмове зварювання Al і його сплавів виконується стиснутою дугою на постійному струмі зворотної полярності, що викликане необхідністю руйнування й видалення окисної плівки. Анодом в такому пальнику виступає електрод. Наближені значення режимів зварювального струму прямої та зворотної полярностей для W електродів різних марок і діаметрів наведені у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13. Діапазони значень постійного струму прямої й зворотної полярності для електродів різних марок при плазмовому зварюванні Al

Діаметр електро- ду, мм	Максимальний зварювальний струм (А) для W електродів при полярності							
	ЕВЧ		ЕВЛ		ЕВТ-15		ЕВИ-3	
	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній	прямий	зворотній
2,0	50...90	20...25	110...150	30...35	140...180	35...40	160...200	40...50
3,0	160...200	30...35	240...280	40...45	300...340	45...50	320...360	50...70
4,0	320...370	40...50	470...520	50...60	530...580	60...70	600...660	70...80
5,0	570...600	50...70	680...740	60...80	770...830	70...90	860...920	90...110
6,0	-	70...90	-	80...110	-	90...120	-	100...130
8,0	-	110...140	-	120...160	-	140...180	-	160...200
10,0	-	160...210	-	170...220	-	200...250	-	220...270

За даними таблиці 3.13, при переході на зворотну полярність відбувається багаторазове зниження величини струму, що викликає доцільність використання

мідних сферичних анодів, які охолоджуються рідиною та забезпечує можливість зміни зварювального струму в широких діапазонах (до 300 А) при збереженні високої (більш 10 год.) тривалості безперервної роботи.

Для плазмового зварювання *Al* застосовують установки УПС-301 (струм до 300 А) та УПС-501 (струм до 500 А). Останнім часом найбільш часто їх укомплектовують джерелами живлення ВД-306ДК або КИУ-501 та приставками БУСП-КИГ для аргонодугового зварювання, що дозволяє підключити плазмовий пальник, проводити регулювання струму дуги та базового струму, швидкості зміни базового струму, часу продувки та горіння дуги. В якості плазмового пальника поширений плазмотрон типу ПС-3, конструкція якого допускає використання *Cu* або *W* електродів. Рекомендовані режими плазмового зварювання сплаву Ал-4 наведені у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14. Рекомендовані режими плазмового зварювання стикових з'єднань (тріщин) деталей із сплаву Ал-4 (товщиною понад 3,0 мм)

Вид струму	$I_{зв}$, А	U_d , В	$V_{зв}$, м/год	d_{dp} , мм	q/v , Дж/м
Постійний (зворотна полярність)	87	33	23	1,8	225
Перемінний	220	21	20	2,0	415

При використанні плазмового зварювання тріщин деталей із сплаву Ал-4 глибиною 3,0...3,5 мм проведених на постійному струмі зворотної полярності забезпечуються наступні механічні властивості зварювального шва: межа міцності $\sigma_B = 316,9..327,7 \text{ МПа}$ при куті згину $\alpha = 78..81^\circ$.

3.3.4. Механізоване аргонодугове зварювання електродом, що плавиться. Механізоване зварювання електродом, що плавиться, застосовують для одержання з'єднань *Al* і його сплавів (заварювання тріщин) товщиною 4...6 мм й більш глибоких та є найбільш продуктивним ф найбільш поширеним серед всіх існуючих ручних видів зварювання, особливо за кордоном.

Відмінністю механізованого зварювання *Al* від аналогічного процесу зварювання сталей є використання в якості захисного газу аргону, наявність тефлонових (замість сталевих) каналів подачі, спеціальної форми роликів у механізмі подачі та спеціальних мундштуків на пальниках. Електрична дуга при цьому способі зварювання горить між деталлю та електродом, що плавиться, (дротом), який подається в зону дуги (в більшості випадків із постійною швидкістю).

Надійне руйнування плівки окислів при механізованому зварюванні електродом, що плавиться, досягається лише при живленні дуги постійним струмом зворотної полярності. Механізм видалення окисної плівки в цьому випадку полягає в руйнуванні і розпиленні її важкими позитивними іонами, що бомбардують катод (ефект катодного розпилення).

Недоліком способу зварювання *Al* електродом, що плавиться, є певне зниження показників механічних властивостей у порівнянні із процесом зварюванням електродом, що не плавиться. Зокрема, зменшення міцності шва пояснюється тим, що електродний метал, проходячи через дуговий проміжок, перегрівається в більшій мірі, ніж присадковий дріт при зварюванні електродом, що не плавиться. Також відбувається менш ефективно видалення окисної плівки, як при аргонодуговому механізованому зварюванні безперервним струмом зварювальний процес супроводжується короткими замиканнями, у момент яких катодне розпилення відсутнє.

Для усунення цих недоліків у зварювальній установці ПДГ-516 застосовані принципово нові технічні рішення: низьковольтне постійне підживлення зварювальної дуги напругою 10...11 В, що накладається на загальну картину зварювальної напруги.

Для зварювання, через недостатню твердість процесу *Al* дротом меншого діаметра, застосовують дріт діаметром 1,2...1,6 мм; застосування дроту більшого діаметру можливе, однак зварні з'єднання у цьому випадку характеризуються гіршим зовнішнім виглядом й механічними властивостями.

Установки для механізованого зварювання складаються із випрямлювача (ПДГ-516 та ін.) та механізму подачі із спеціальними роликами. Найбільшого поширення здобули зварювальні пальники німецької фірми «Abicor Binzel» із тефлоновим каналом подачі дроту. Слід зазначити, що при використанні аргону в якості захисного газу, найбільш часто застосовують моделі пальників із рідинним охолодженням та захистом його сопла інертним газом. Діаметр сопла пальника для механізованого зварювання *Al* складає 18...22 мм. Наближені режими механізованої аргонодугового зварювання *Al* електродом, що плавиться, наведені у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15. Наближені режими механізованої аргонодугового зварювання Al і його сплавів електродом, що плавиться

Тип з'єднання	b , мм	$d_{ел.др}$, мм	$I_{зв}$, А	U_{∂} , В	$V_{зв}$, м/год	Витрата аргону, л/хв	Кількість проходів
Одностороннє встик без обробки кромки	4...6	1,5...2,0	140...240	19...22	20...30	6...10	2
	8...10	1,5...2,0	220...300	22...25	15...25	8...10	2
	12	2,0	280...300	23...25	15...18	10...12	2
Встик із V-подібною обробкою кромки	5...8	1,5...2,0	220...280	21...24	20...25	8...10	2...3
	10...12	2,0	260...280	21...25	15...20	8...10	3...4
Встик із X-подібною обробкою кромки	12...16	2,0	280...360	24...28	20...25	10...12	2...4
	20...25	2,0	330...360	26...28	18...20	12...15	4...8
	30...60	2,0	330...360	26...28	18...20	12...15	10...40
Таврове, кутове та накладне	4...6	1,5...2,0	200...260	18...22	20...30	6...10	1
	8...16	2,0	270...330	24...26	20...25	8...12	2...6
	20...30	2,0	330...360	26...28	20...25	12...15	10...40

Особливий інтерес при механізованому зварюванні Al викликає використання установки ПДГ-516М із джерелом живлення КИУ-501. Використання цього джерела є доволі актуальним для промислового застосування так як в ньому використані принципово нове технічне рішення - низьковольтне постійне підживлення зварювальної дуги напругою $10...11$ В, особливістю якого є накладення постійно діючого негативного потенціалу, що забезпечує безперервне горіння електричної дуги, поліпшує видалення окисної плівки, забезпечує більш м'який перехід крапель електродного металу до зварювальної ванни, зменшує розбризкування, стабілізує горіння електричної дуги та підвищує якість формування зварного шва.

Високовольтне підживлення служить для полегшення запалювання дуги та дозволяє здійснювати регулювання тривалості коротких замикань та їх частоти, можливість регулювання струму короткого замикання тощо. Установка має можливість регулювання куту нахилу вольт-амперних характеристик і можливість виконання зварювання на значному віддаленні від зварювальної установки (до 20 м), що забезпечується за рахунок застосування зворотних зв'язків по струму й напрузі на дузі та формування наступних механічних властивостей зварних швів із сплаву Ал-4 товщиною 10 мм: $\sigma_B = 306$ МПа та куту згину $\alpha = 133^\circ$.

Підвищити рівень якості металу шва *Al* сплавів можливо при застосуванні техніки керованого переносу металу при імпульсно-дуговому зварюванні електродом, що плавиться за рахунок накладення на постійний струм зворотної полярності, одержаний від основного джерела живлення, короткочасних імпульсів струму із визначеною частотою (як правило, 50 або 100 Гц). При цьому, імпульси генеруються спеціальним пристроєм для одержання дрібнокрапельного спрямованого переносу електродного металу через дугу при більш низьких значеннях зварювального струму, ніж у звичайному дрібнокрапельному переносі. Величину й тривалість імпульсів зварювального струму вибирають за умови забезпечення керованого переносу металу із торця електрода невеликими краплями в широкому діапазоні струмів. При цьому в паузах між імпульсами значення струму є невеликим, але достатнім для підтримки горіння зварювальної дуги, при якому введення теплоти у деталь зменшується й забезпечується відсутність масопереносу металу.

Імпульсно-дугове зварювання забезпечує підвищення механічних властивостей наплавленого металу та зварних з'єднань, поліпшує стабільність протікання зварювального процесу, дозволяє виконувати зварювання у різних просторових положеннях із поліпшеним формуванням швів, істотно стабілізувати провар кореню шва тощо та реалізується при застосуванні джерела живлення КИГ-401, що комплектується механізмом подачі КП-006. Наближені режими механізованого імпульсно-дугового зварювання *Al* і його сплавів електродом, що плавиться, в середовищі аргону представлені у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16. Наближені режими механізованого імпульсно-дугового зварювання *Al* і його сплавів в середовищі аргону електродом, що плавиться

b , мм	$d_{ел.др}$, мм	Частота імпульсів, 1/с	$I_{зв}$, А	U_{δ} , В	$V_{зв}$, м/год	Витрата аргону, л/хв	Кількість проходів
4	1,4...1,6	50	130...150	17...19	20...25	10...12	1
5	1,4...1,6	50	140...170	17...19	20...25	10...13	1
6	1,4...1,6	100	160...180	18...21	20...25	12...14	1
8	2,0	100	160...190	22...24	25...30	12...14	2
10	2,0	100	220...280	24...26	25...30	14...16	2

В останні роки широке поширення при імпульсно-дуговому зварюванні алюмінію одержали інверторні установки. Найбільш часто використовується

установка для механізованого зварювання типу «Sinermig-401» («OZAS»), яка забезпечує роботу джерела живлення на частоті 26 кГц із можливістю накладення додаткових імпульсів регульованої амплітуди й частоти та дозволяє за рахунок генерування додаткових імпульсів збільшити продуктивність зварювальних робіт в межах 25%.

3.4. Оцінка ефективності зварювання алюмінію різними способами та визначення раціонального способу заварювання тріщин

Оцінка ефективності зварювання *Al* різними способами та визначення раціонального способу заварювання тріщин проводилося шляхом проведення експериментальних досліджень якості зварювання сплаву Ал-4. Результатом проведених дослідів встановлено:

1. Електродугове зварювання *Al* є складним процесом й вимагає точного дотримання всіх параметрів технологічного процесу, що визначається доволі специфічними його властивостями (низькою температурою плавлення $T_{пл} = 600^{\circ}C$, високою теплопровідністю $\lambda = 0,52 \text{ кал/см} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}C$, високою швидкістю кристалізації металу шва, високою спорідненістю до кисню, високим коефіцієнтом лінійного розширення $\alpha = 24,58 \cdot 10^{-6}$). При порушеннях технології зварювання, шви можуть мати незадовільні показники якості та мати такі дефекти як: непровари, прожоги, пористість, тріщини, окисні й *W* включення, незадовільну форму тощо.

2. Всі види електродугового зварювання *Al* вимагають застосування спеціальних технологічних й конструктивних заходів, які повинні сприяти видаленню із поверхні металу окисної плівки, шлакових включень, зниженню загазованості зварювальної ванни та зменшенню ефекту короблення.

3. Принципово дугове зварювання *Al* і його сплавів може здійснюватися всіма відомими (розглянути вище) методами його зварювання. Однак, найбільш доцільними при цьому є необхідність проведення процесу на зворотній полярності або перемінному струмі. Застосування зварювання на прямій полярності принципово можливе й дійсно дозволяє забезпечити високу якість з'єднання, але поширення в промисловості на цей час не отримало.

В таблиці 3.17 наведена порівняльна оцінка ефективності утворення зварного з'єднання із матеріалу Ал-4 й наявності внутрішніх дефектів виконана різними методами.

Таблиця 3.17. Основні механічні властивості триманого зварного з'єднання із сплаву Ал-4 сформовані різними технологіями його зварювання

Метод зварювання	Тип зварювальної установки	Основні режими зварювання	Механічні властивості шва		Виявлені дефекти
			σ_B , кгс/мм ²	α , град	
Вихідний матеріал			32	-	-
Механізоване зварювання електродом, що плавиться	ВД-300Б	$I_{зв} = 110\text{ A}, U_{\phi} = 18\text{ B}$	19	105	П1,0; 7П0,3
	ПДГ-508М	$I_{зв} = 125\text{ A}, U_{\phi} = 18\text{ B}$	21	125	3П0,3; П1,0
	ПДГ-516М	$I_{зв} = 120\text{ A}, U_{\phi} = 17\text{ B}$	26	45	10П0,3
Механізоване імпульсно-дугове зварювання електродом, що плавиться	КП-006	$f = 100\text{ Гц};$ $I_{зв} = 100\text{ A}, U_{\phi} = 20\text{ B}$	10	90	2Н5,0; 6П0,3; 2П1,0
	КП-002	$f = 50\text{ Гц};$ $I_{зв} = 100\text{ A}, U_{\phi} = 20\text{ B}$	27	103	-
	Синерміг-401	$I_{зв} = 87\text{ A}, U_{\phi} = 16\text{ B}$	18	130	3П1,0; 3П0,5
Аргонодугове зварювання W електродом, що не плавиться із подачею присадкового дроту	УДГУ-351	Симетричний струм, $I_{зв} = 50\text{ A}$	16	37	Ц5В0,5; 5П0,3; В0,5
	УДГУ-351	Асиметричний струм, $I_{зв} = 50\text{ A}, K_{AC} = 0,56$	9	90	3П0,3; В2,0
	УДГУ-351	Асиметричний струм, $I_{зв} = 50\text{ A}, K_{AC} = 0,43$	26	83	4СВ0,5; 2В0,5
	УДГУ-351	Пульсуючий режим $t_{im} = 0,15\text{ c}, t_{II} = 0,15\text{ c},$ $I_{зв} = 50\text{ A}$	23	75	2С10В0,5; С20В0,5; П1,0

Аналіз результатів наведених у таблиці 3.17 дозволяє зробити наступні висновки:

- на першому місці із найкращим результатом зварювання Al опинилася базова установка для імпульсно-дугового механізованого зварювання типу КП-002 на частоті 50 Гц генерації імпульсів; зварні шви отримані цим методом єдині серед досліджених у роботі, які не мають внутрішніх дефектів, характеризуються найвищими показниками механічної міцності з'єднання (84% від міцності металу деталі) й мають один із найвищих показників куту згину;

- друге місце посідають випрямлювачі для напівавтоматичного зварювання (ВД-306 (506)ДК та ПДГ-508М (516М)), які мають непогані результати за

показниками механічної міцності (81,2% для ПДГ-506М та відповідно 65,0% для ПДГ-516М від міцності базового металу деталі);

- третя група представлена установкою «Синермиг-401» на якій здійснювалося імпульсно-дугове механізоване зварювання із частотою імпульсів 26 кГц та подачею додаткових імпульсів на частоті 100 Гц; отримані результати підтверджують найвищу пластичність зварного з'єднання (дані за кутом згину) але показують один із найнижчих показників механічної міцності (56% від міцності основного металу);

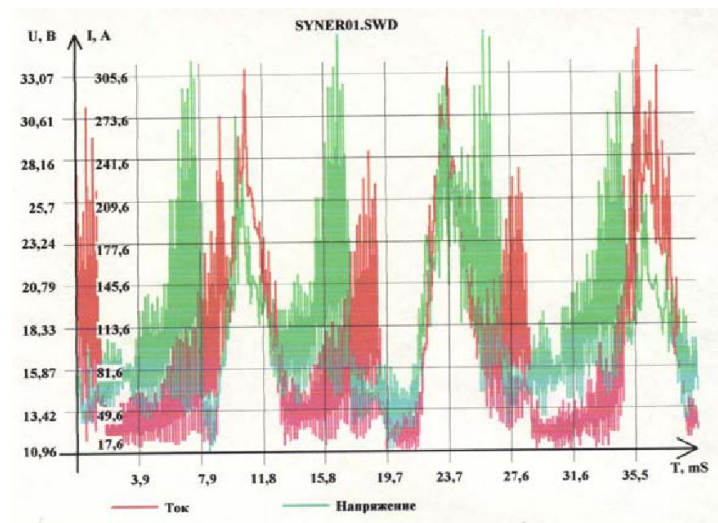
- до четвертої групи установок належить установка УДГУ-351, яка реалізує TIG метод зварювання. Результати формування зварювального шва на перемінному симетричному струмі виявили одні із найнижчих значень за механічною міцністю й кутом згину зварного з'єднання (50% від міцності основного металу). Гірші дані отримані лише при значенні коефіцієнту асиметрії 0,43, тобто коли синусоїда напруги на електроді пальника й деталі зміщена до позитивної області (на деталь подається більше позитивного потенціалу, чим негативного) - 28% від міцності основного металу. Ситуація кардинально змінюється при значенні коефіцієнту асиметрії 0,53 (синусоїда напруги на електроді й виробі зміщується до негативної області) - 81,2% від міцності основного металу або у випадку роботи у пульсуючому режимі зварювання (72% від міцності основного металу).

Поясненням такої ситуації є той факт, що при зварюванні тріщин у *Al* деталях та використанні *Al* дротів для забезпечення формування щільного малоокисленого зварного з'єднання, масоперенос повинний відбуватися краплями одного розміру (не мінімального), а сам перенос не повинен бути струминним. У протилежному випадку, при використанні інверторних джерел живлення при їх роботі на високій частоті, відбувається процес дроблення крапель та, через різке збільшення питомої поверхні краплі, їх інтенсивне окислювання. Зварне з'єднання формується із крапель мінімального розміру, що суттєво окислені, тому механічні властивості з'єднання є недостатніми, але зовнішній вигляд й пластичність з'єднання відповідають високому рівню. Для формування же високоякісного зварного з'єднання не вистачає достатньої ефективності газового захисту, а зварювання із спеціальними додатковими газовими камерами та контрольованою атмосферою - економічно не доцільні.

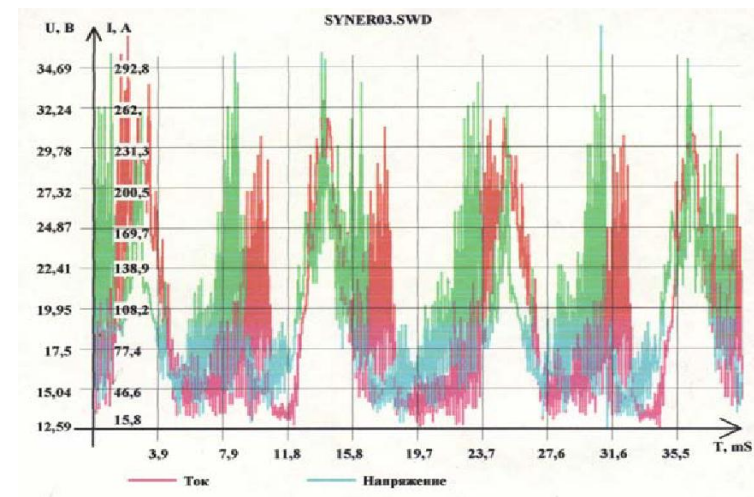
Оцінка доволі високих показників процесу зварювання отриманих при застосуванні промислових установок другої групи (ВДУ-506 та ПДГ-516М), була проведена на основі аналізу осцилограми напруги на дузі отриманої за допомогою обчислювального комплексу на базі ПК та аналого-цифрового перетворювача (на частоті 30 кГц). Так, на рис. 3.2 представлено приклад осцилограми зміни зварювальної напруги, отриманої при зварюванні сплаву Ал-4 на установці «СИНЕРМИГ-401» на різних режимах, а на рис 3.3 – зразок осцилограми зварювальної напруги отриманої на установці КП-002 при зварюванні сплаву Ал-4 й гістограми розподілу часових проміжків появи коротких замикань. Рисунок 3.4 описує вид осцилограми зварювальної напруги отриманої при роботі на установці ПДГ-516М під час зварювання сплаву Ал-4 й гістограм розподілу часовий проміжків дії коротких замикань та картини осцилограм процесу краплепереносу й кінограми різних видів переходу краплі до зварювальної ванни й відриву її від електродного дроту (рис. 3.5).

Аналіз результатів наведених на рис. 3.2 дозволяє зробити висновок, що перенос електродного металу при роботі інверторної установки «СИНЕРМИГ-401» відбувається нормально та не зумовлює подрібнення крапель розплавленого електродного металу на більш дрібні. При збільшенні же величини струму дуги, характер кривої розподілу стабілізується, а середня часова тривалість короткого замикання становить 5...10 mS; при цьому фіксується процес дроблення краплі за рахунок підвищеної частоти (26 кГц) дії напруги при амплітуді піків струму у момент короткого замикання - не більше 310 А. Це забезпечує стабільність процесу зварювання із мінімальним ефектом розбризкування. З технічної сторони, зварювальна установка «СИНЕРМИГ-401» є найбільш досконалим зварювальним апаратом, а у контексті металургії зварювального процесу навпаки - перенос електродного металу з-за наявності струминного переносу, відбувається абсолютно неприпустимо, що приводить до інтенсивного окислювання металу звареного шва й відповідно зниження механічних показників.

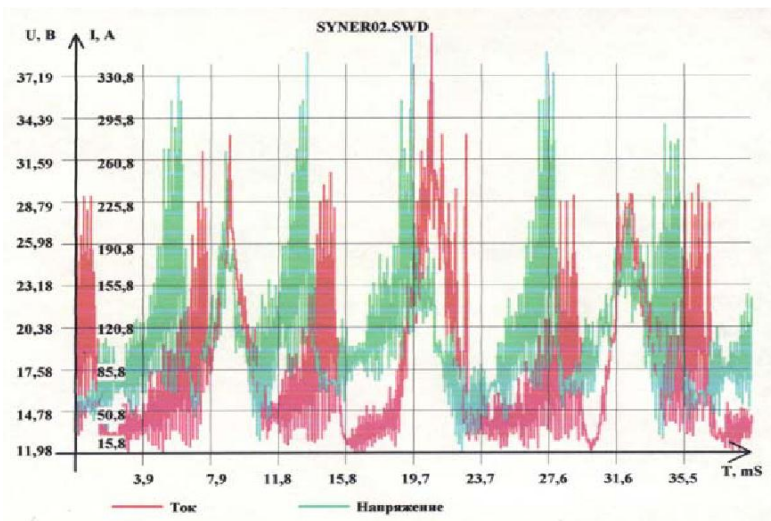
Аналіз графіків рис. 3.3 показав максимально наближену до класичної картину: при рівних проміжках часу виникають короткі замикання, амплітудне значення струму яких не перевищує 310 А, що відповідає такому ж значенню інвертора, а при збільшенні струму дуги, крива розподілу тривалості коротких замикань зміщується до області малих значень часу.



а)



б)



в)

Зварювальна установка «Синермиг 401»

Матеріал деталі Al-4

Матеріал дроту: АМг6 діаметром 1,2 мм

Захисний газ: аргон (Ar)

Режими MIG зварювання:

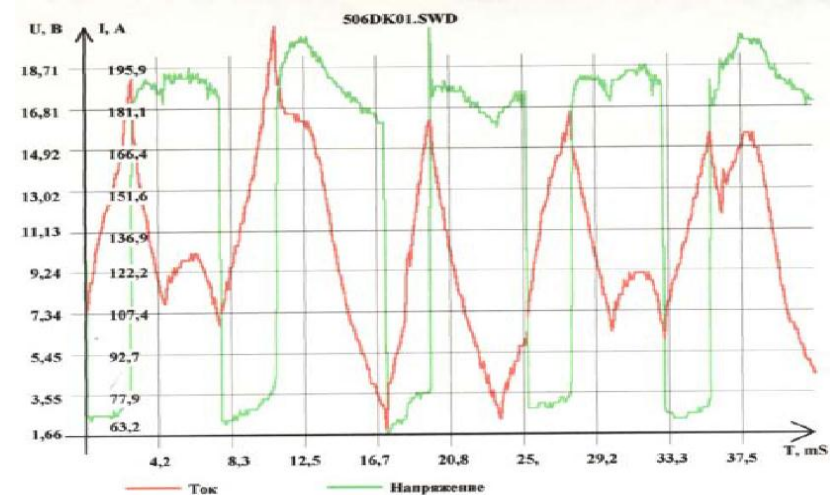
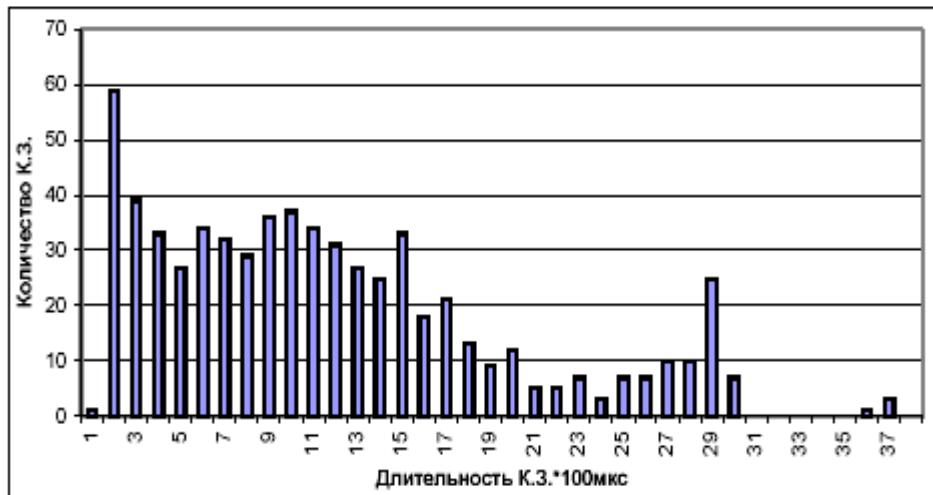
а) Syner 01: $I_{зг}=87\text{ A}$; $U_{зг}=16,0\text{ B}$;

б) Syner 02: $I_{зг}=87\text{ A}$; $U_{зг}=17,5\text{ B}$;

в) Syner 03: $I_{зг}=85\text{ A}$; $U_{зг}=18,0\text{ B}$.

Рисунок 3.2. - Осцилограми зварювальної напруги при зварюванні сплаву Ал-4 на установці «СИНЕРМИГ-401» на різних режимах зварювання

----- Report for VDU50602.KZ Установка: КП-002 с КИГ-301. Материал: Al дріт АМг6. 1.2 мм. Режим: MIG ; $I_{зв}=125$ А; $U_d=18$ В.
Total time 7048.094856 total kz number 737.000000. Middle kz time 9.563222 *100 mks. Disp. 56.112766



----- Report for VDU5060.KZ Установка: КП-002 с КИГ-401. Материал: Al дріт АМг6. 1.2 мм. Режим: MIG ; $I_{зв}=160$ А; $U_d=20$ В.
Total time 339.000000 total kz number 97.000000. Middle kz time 3.494845 *100 mks. Disp. 162.094856

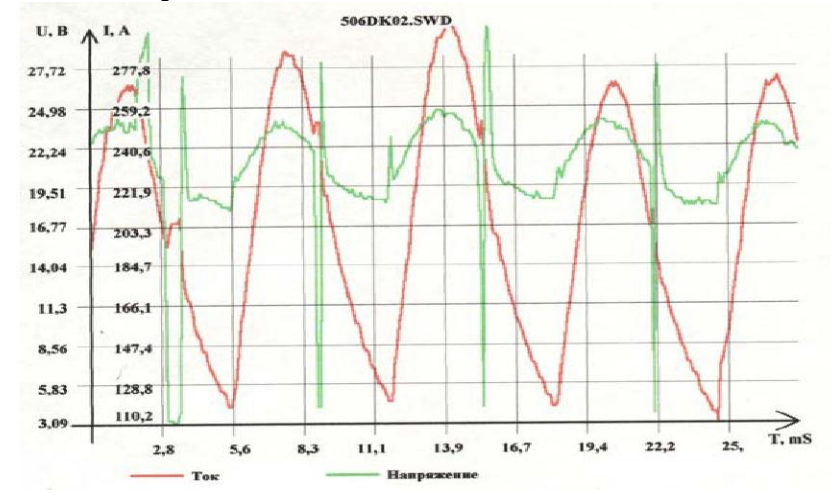
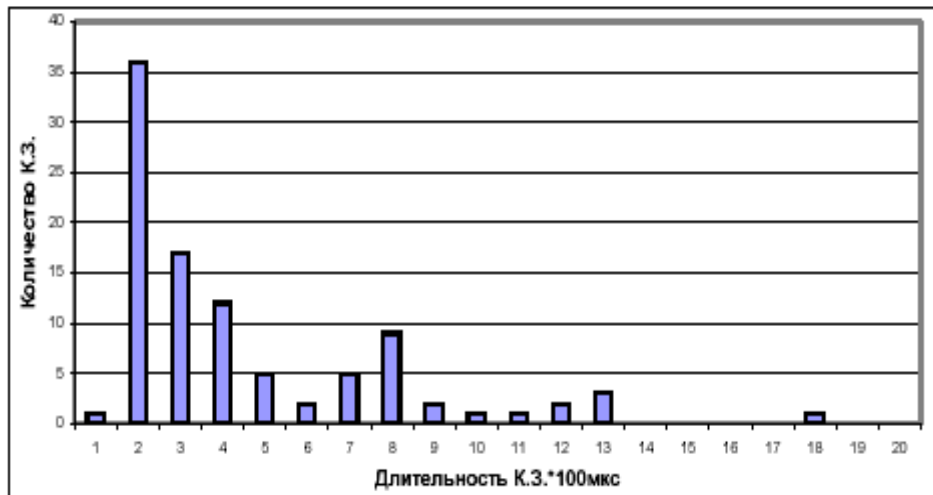
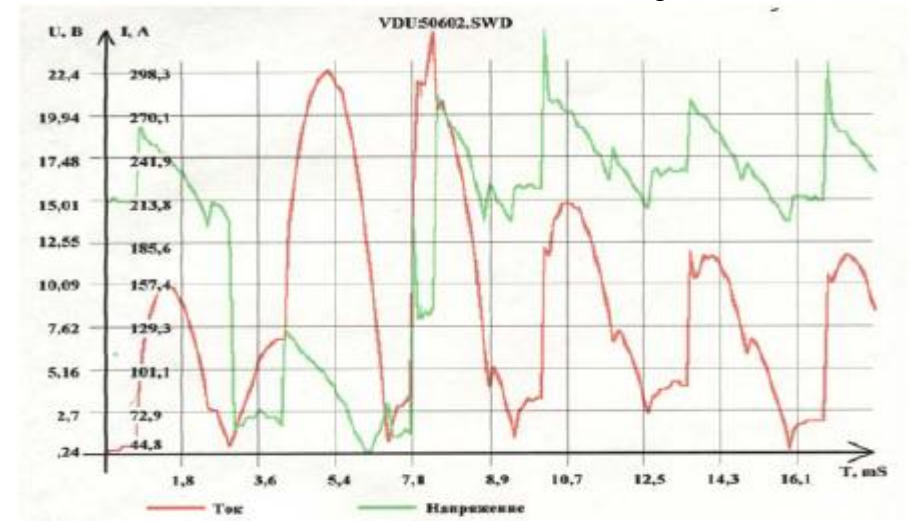
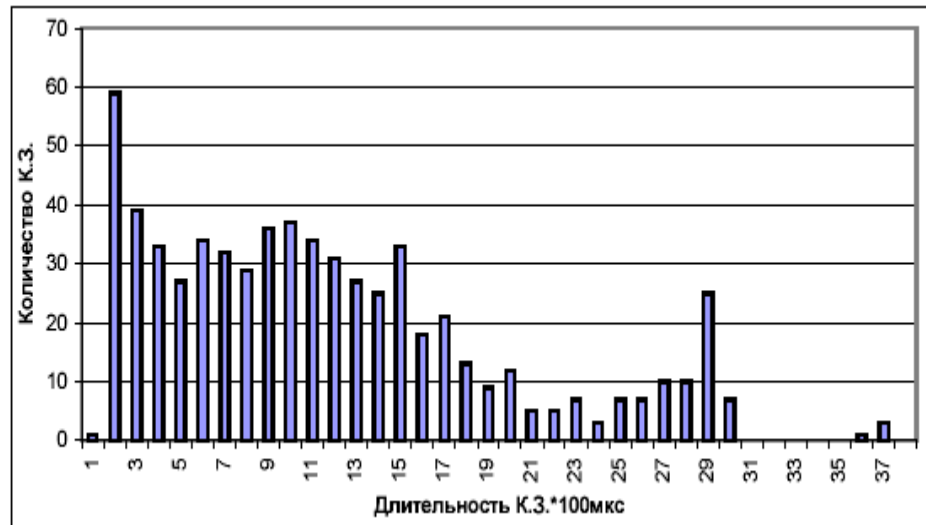


Рисунок 3.3. - Осцилограмми зварювальної напруги при зварюванні і гістограми розподілу сплаву Ал-4 на установці КП-002 при різних часових інтервалах коротких замикань

-----Report for VDU50602.KZ Установка: ПДГ-516М з КИУ-501. Материал: Al дріт АМг6 1,2 мм; Al пластины АМг6 s=2.5 мм.
 Режим: MIG ; $I_{3B}=125$ A; $U_d=18$ В. Total time 7048.094856 total kz number 737.000000. Middle kz time 9.563222 *100 mks. Disp. 56.112766



-----Report for VDU50601.KZ Установка: ПДГ-516М з КИУ-501. Материал: Al дріт АМг6 1,2 мм; Al пластины АМг6 s=2.5 мм.
 Режим: MIG ; $I_{3B}=160$ A; $U_d=20$ В. Total time 339.000000 total kz number 97.000000. Middle kz time 3.494845 *100 mks. Disp. 162.094856

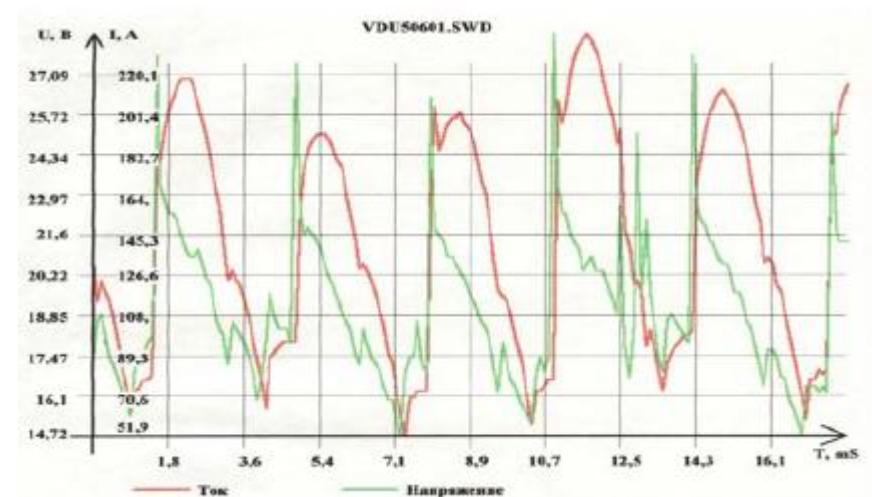
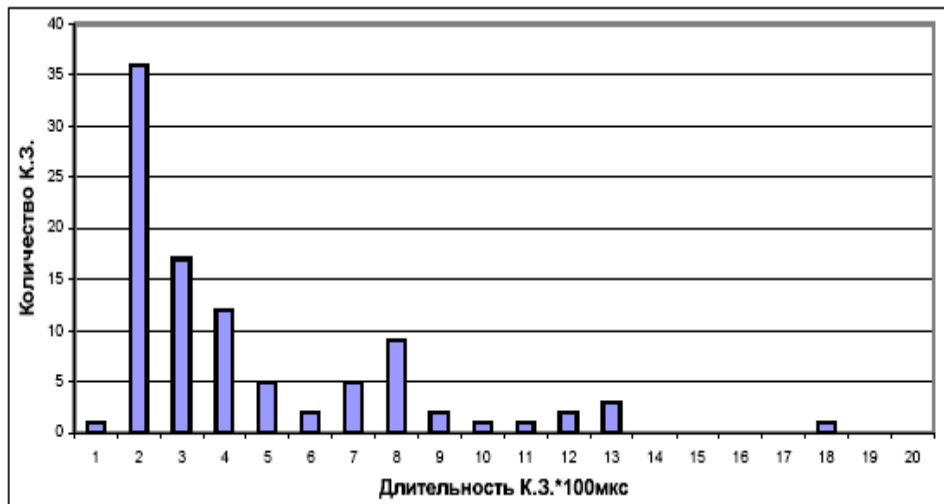
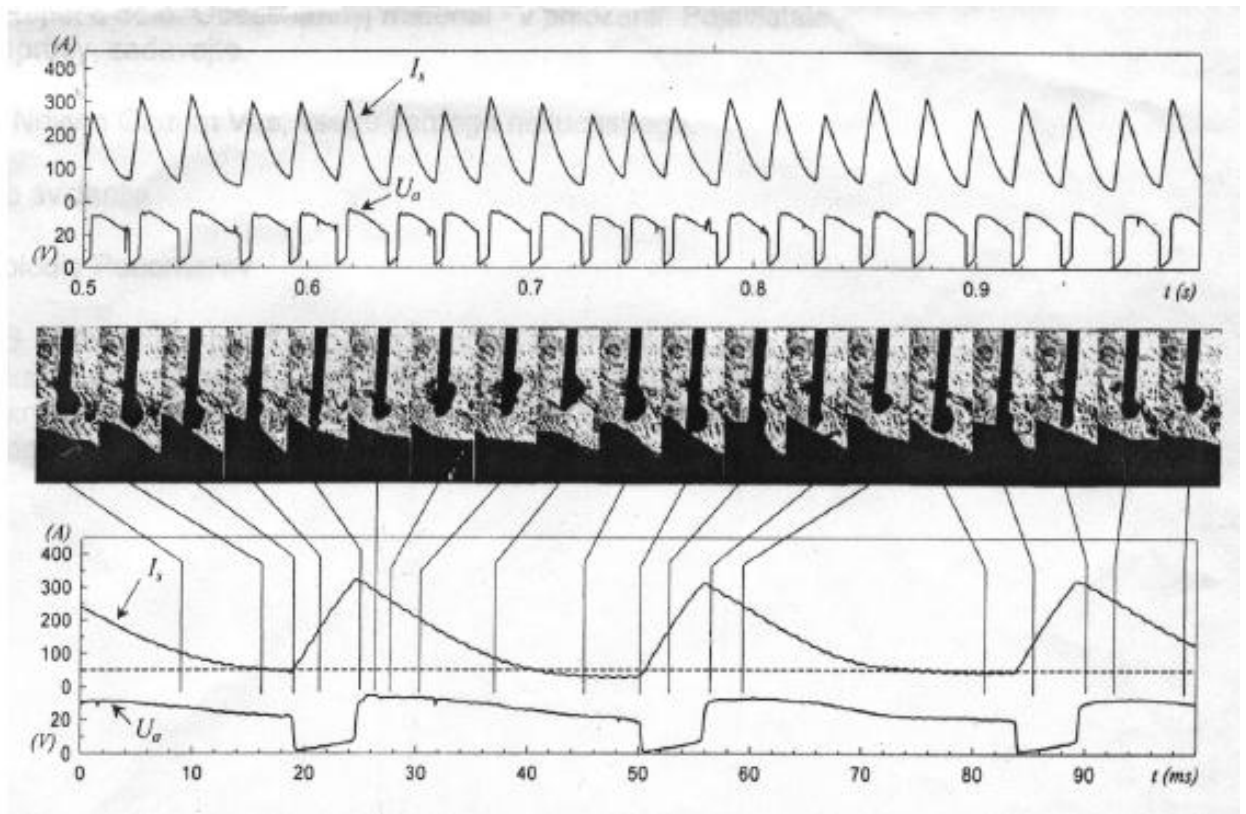
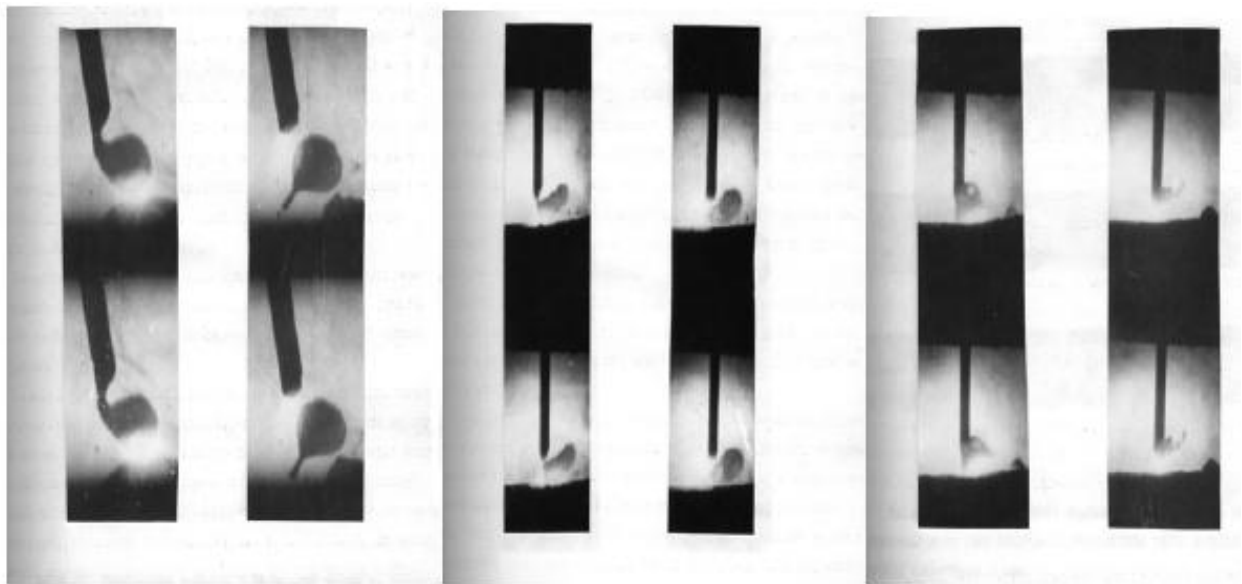


Рисунок 3.4. - Осцилограмми зварювального напруження при зварюванні матеріалу Ал-4 на установці ПДГ-516М із джерелом живлення КИУ-501 при різних режимах роботи та гістограми розподілу часових інтервалів коротких замикань



а) характер осцилограм й напруги, які забезпечуються напівавтоматичним зварюванням без розбризкування ($d_{op} = 1 \text{ мм}$, $U_o = 23,6 \text{ В}$, $I_{зс} = 150 \text{ А}$, захисний газ C_2)



б) кінограми процесу переходу краплі розплавленого електродного металу до зварювальної ванни (А); викиду електродної краплі із зварювальної ванни (Б); вибуху краплі при переході металу до зварювальної ванни (В).

Рисунок 3.5. – Характер осцилограм (а) процесу й кінограм (б) (швидкість зйомки 2000 кадрів у с)

Це вказує на зменшення розміру краплі перенесеного металу при збільшенні струму дуги. Слід відзначити чіткість систематичного характеру цих змін, що дозволяє стверджувати про наявність контрольованого масопереносу.

Фактично подібна картина, але із більш випадковим характером, спостерігається при роботі установки ПДГ-516М (рис. 3.4). Порівняння діаграм наведених на рис. 3.3 та рис. 3.4 дає підстави визнати найбільш ефективною установкою - установку КП-002. В таблиці 3.18 наведені результати експериментально визначених характеристик зварювального процесу при механізованому зварюванні електродом, що плавиться ($d_e = 1,2 \text{ мм}$), сплаву Ал-4 у середовищі інертного захисного газу аргону.

Таблиця 3.18. Експериментальні характеристики зварювального процесу отримані для механізованого зварювання електродом, що плавиться ($d_e = 1,2 \text{ мм}$), сплаву Ал-4 у середовищі інертного газу

Зварювальна установка	Режими зварювання		Середній час коротких замикань, мкс	Середній діаметр крапель, мм	Швидкість наростання $I_{кз}$, V_{cp} , кА/с	Піковий значення струму $I_{кз}^{max}$, А
	$I_{зв}$, А	U , В				
КП-002	120	17	2517	1,24	30	250
КП-002	195	21	273	-	70	310
ПДГ-516М	160	20	349	-	170	230
ПДГ-516М	125	18	956	1,43	95	350
ВС-300Б	110	18	666	1,42	43	260

Аналізуючи показники роботи промислових установок для механізованого зварювання Al у середовищі захисного газу наведені у таблиці 3.18 можна констатувати, що найбільш ефективно процес зварювання тріщин був проведений на установці ПДГ-516М. Установка КП-002 є лідером за якістю серед імпульсно-дугових установок при зварюванні Al та сплавів на його основі; застосування цих установок є максимально ефективним для проведення високопродуктивного й якісного формування довгих зварювальних швів та товщині зварювального металу понад 3 мм.

Крім цього необхідно відзначити, що під час вибору типу установки доцільно враховувати те, що установка ПДГ-516М характеризується температурні експлуатаційними температурними діапазонами $-40...+80 \text{ }^{\circ}\text{C}$, має 5 шарове захисне покриття електронних модулів, що дозволяє використовувати її при різних погодних умовах. На рис. 3.6 наведений збільшений розріз зварювального шву отриманого при роботі на установці КП-002 на режимах представлених на рис. 3.3.

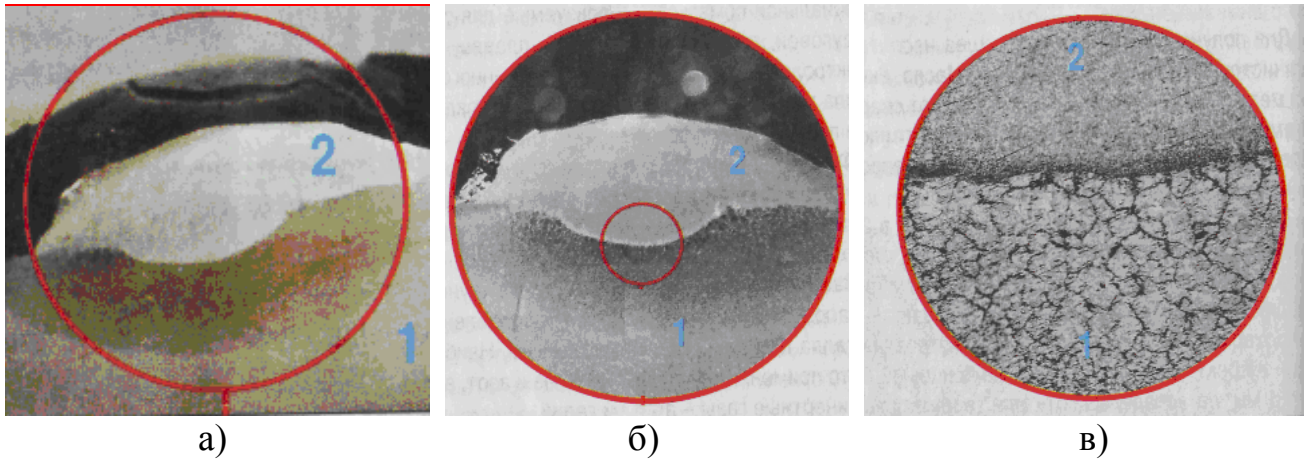


Рисунок 3.5. – Формування зварювального шва (у розрізі):

а – мікрошліф; б – межа між металами деталі й шва;

в – структурні зміни в зоні зварювального шву.

1 – деталь, 2 – зварювальний шов.

Підсумовуючі слід визнати, що розповсюджена у ремонтному виробництві позиція, що найбільш ефективним способом зварювання тріщин у деталях виготовлених із сплавів на основі *Al* є аргонодугове зварювання електродом, що не плавиться, на перемінному струмі – є не зовсім вірною й у більшості обумовлена відсутністю інформації щодо апаратного забезпечення інших зварювальних методик. Цей метод дійсно показує гарні результати, але його доцільно застосовувати при зварюванні *Al* при малих (до 1 мм) товщина; вже зараз за показниками продуктивності та питомими енерговитратами провадження процесу він у 4...5 разів поступається іншим методам.

Найбільш передовою, за показниками продуктивності, механічним властивостям звареного з'єднання, що формується, технологічністю виконання тощо, слід визнати метод напівавтоматичного аргонодугового зварювання електродом, що плавиться, із використанням імпульсно-дугових джерел або випрямлювачів (типу КП-002) із використанням комбінованих вольт-амперних характеристик. Використання цього методу дозволяє усунути більшість недоліків (забруднення металу шва окисними включеннями, високий рівень пористості й низькі механічні показники), які є характерними для традиційного напівавтоматичного зварювання та забезпечити при промисловому використанні високий рівень виконання відновлювальних та ремонтних операцій на деталях виготовлених із сплавів на основі *Al*.

Розділ 4. ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1. Основні правила та вимоги із техніки безпеки під час організації та проведенні зварювальних робіт

Проведення зварювальних робіт супроводжується підвищеним рівнем професійної небезпеки та у відповідності до діючого державного стандарту України (ISO 9606-2:2008) може бути виконаний сертифікованим фахівцем-зварювальником після лише після проведення попереднього інструктажу [29]. Безпосередньо саме зварювання складається із фізичних та хімічних процесів, які вкрай небезпечні й у разі недотримання правил техніки безпеки оказують реальну загрозу здоров'ю й життю виробничих робітників.

Зварювальний процес супроводжується розплавленням та горінням металу, плавленням захисних матеріалів та шлаку, інтенсивним виділенням газів із мікрочастинками розплавленого металу, які при потраплянні до організму людини можуть уразити органи дихання й викликають отруєння. Не виключена й можливість отримання сильних опіків внаслідок потрапляння бризок розплавленого металу на не захищені поверхні ділянок тіла та займання одяжі при влучанні бризок на неї [30]. При цьому небезпека існує як безпосередньо для зварювальника, так й для осіб, які допомагають виконувати процес. Тому, засоби індивідуальні захисту (ЗІЗ) повинен мати не тільки сам фахівець, але й його помічники.

З метою запобігання опіків, отруєння та інших травм, що можливі у процесі виконання зварювальних робіт, дуже важливо не тільки дотримуватися елементарних правил техніки безпеки, але й розумітися на факторах ризику. При виробничих процесах із підвищеними ступенями ризику й небезпеки існують низка факторів ризику отримання травм до яких відносяться:

- іскри та бризки розплавленого металу, які звичайною частиною процесу зварювання, легко пропалюють усі види тканин, за виключенням ЗІЗ зварювальника, що може спричинити опіки різного ступеню тяжкості;

- гарячі газові пари із розплавленим металом потрапляючи до очей або на шкіру обличчя також можуть бути причиною появи опіків;

- інтенсивне іскроутворення в процесі зварювання може спричинити пожежу у разі потрапляння на горючі матеріали, що знаходяться поблизу;

- існують ризик ураження електричним струмом у разі наявних дефектів в ізоляції кабелів або відкритих електричних частин зварювальних трансформаторів;

- тривала дія підвищеного рівня шуму, який супроводжує роботу зварювального апарату, може спричинити часткову втрату слуху;

- дія ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання, яка залишає опіки на руках й пальцях, та при прямому впливі обпікає й органи зору;

- часткова втрата зору можлива й потраплянні до органів зору яскравого світіння від електричної дуги;

- шкідливий вплив на органи дихання здійснюють випари свинцю, хрому, цинку, кадмію та ін. елементів, які входять до складу захисних газів та покриттів електродів та виділяються у повітря під час формування зварювальної ванни;

- висока ймовірність отримання теплових опіків при контакті із нагрітими деталями пальника або безпосередньо від електричної дуги.

Для уникнення будь-яких ризиків при проведенні зварювальних робіт потрібно забезпечити максимальну реалізацію стандартів безпеки на чітко дотримуватися наступних загальних правил із техніки безпеки [30]:

- постійно контролювати формування зварювальної ванни та шва;
- забезпечити відгородження робочої зони зварювальника захисним екраном висотою 1,8 м;
- на місці проведення робіт не має бути сторонніх легкозаймистих предметів;
- обов'язково потрібно використовувати ЗІЗ очей й обличчя;
- переміщення зварювальних апаратів та деталей дозволяється лише після остаточного припинення подачі електроживлення;
- не дозволяється проводити зварювальний процес при перекручуванні зварювальних кабелів;
- під час виконання робіт безпосередньо на АТЗ обов'язково необхідно відключити акумуляторну батарею;
- обов'язкова умова – наявність спеціального одягу: краг із вогнетривких

матеріалів, взуття зі шкіри та повсті, захисної маски, респіратора й каску (у разі необхідності).

Не дозволяється виконувати зварювальний процес при наявності високого рівня вологи на підлозі посту та/або у повітрі приміщення дільниці. Також потрібно пам'ятати, що процес плавлення металу протікає із інтенсивним утворенням випарів шкідливих речовин, що робить неприпустимим зварювальний процес за умови відсутності робочої витяжної вентиляції [30].

При роботі із електричними компонентами зварювального апарату потрібно підтримувати підвищену увагу задля запобігання можливому ураженню струмом та отримання електричних опіків дотримуючись наступних заходів безпеки:

- обов'язкової перевірки наявності й справності заземлення зварювального обладнання перед його увімкненням;
- забезпечення необхідного рівня освітлення робочого місця із використанням джерел з напругою 12 В;
- перевірки стану ізоляції кабелів й електродотримачів – вони не повинні мати тріщини, розриви та інші пошкодження;
- перевірки до початку виконання робіт надійності всіх контактів;
- силова електроенергія повинна подаватися із розподільного щита через встановлені запобіжники.

Додатковими заходами безпеки передбачається:

- контроль довжини кабелю, яка не повинна перевищувати 10 м;
- додаткові штучні з'єднання силового кабелю є неприпустимими (за винятком контакту через муфтове з'єднання);
- значення напруги холостого ходу не повинно бути більшим за 90В.

У разі використання газозварювального обладнання діють особливі правила безпеки, якими передбачено, що процес транспортування газових балонів повинен відбуватися лише за умови їх вертикального розташування при закритих захисними ковпаками вентилях [30, 31].

Перед початком проведення зварювальних робіт необхідно ретельно оглянути й та прочистити пальник, оскільки наявне в ньому мастило становить підвищену небезпеку й може спричинити детонацію горючої суміші.

Безпосередньо ж у процесі зварювання між соплом й деталлю повинен забезпечуватися оптимальний зазор для підтримки постійного тиску газу. У разі появи звуків зворотного удару при зварюванні, подача газу має бути негайно перекрита; першим завжди перекривається вентиль на балоні із ацетиленом й тільки після цього – вентильна балоні із киснем. Відключення газових магістралей необхідно виконувати у відповідності до положень нормативних інструктивних матеріалів.

Для запобігання потрапляння іскор та бризок металу й шлаку у процесі роботи газозварювального обладнання, газові балони повинні розташовуватися на відстані не менше 5 м від робочої зони, а шланги – мають знаходитися у вивішеному положенні без контакту із підлогою ділянки (посту).

Стандартами передбачені жорсткі вимоги до ЗІЗ зварювальника: костюм зварювальника, спецвзуття, маска й краги повинні забезпечувати головну функцію - надійний захист від електричної дуги та окалини металу [29].

Основними вимогами стану ЗІЗ виступають:

- обов'язкова перевірка спецодягу на наявність плям оливи та інших виробничих рідин перед початком кожного робочого дня;
- взуття має бути на товстій підшві, що не пропускає струм; неприпустима наявність на взутті металевих накладок або цвяхів;
- всередині носка взуття має бути встановлена щільна вставка для захисту пальців ніг від травмування важкими предметами;
- краги повинні відповідати типу зварювальних робіт; в окремих випадках (наприклад, під час газозварювання) замість захисного костюму можуть бути використані рукавники й фартухи;
- зварювальна маска не повинна мати дефектів; вона повинна підбиратися суворо за розміром – її фіксація на голові зварювальника має бути щільною;
- світловий фільтр маски повинен не тільки добре захищати органи зору, а й забезпечувати якісний рівень огляду для забезпечення потрібного рівня контролю зварювальником робочого процесу.

За будь-яких порушень описаних вимог до ЗІЗ, ризик отримання опіків та інших травм, значно підвищується.

Доцільним типом зварювальних масок є маски «хамелеон», які оснащені функцією автоматичного регулювання прозорості щитка (автоматично змінюють рівень затемнення під час запалювання та горіння дуги). Сучасні моделі масок є універсальними й дозволяють налаштовувати як кут їх нахилу, глибину посадки й довжину окружності, що не тільки забезпечує надійний захист органів зору зварювальника, але й робить його роботу комфортнішою. Можливе використання й захисних окулярів, але вони не забезпечують належний рівень захисту очей та шкіри обличчя від опіків.

За вимогами безпеки в процесі зварювання деталі необхідно розмістити викласти на робочому столі й, у разі потреби, закріпити струбцинами або магнітними кутниками. При цьому всі зварювальні матеріали, що використовуються повинні мати вогнетривкі властивості.

Вирішальне значення під час роботи із зварювальним обладнанням має освітленість робочої зони; дуже важливо забезпечити максимально можливе забезпечення зварювального місця денним світлом та встановити додаткові освітлювальні прилади при його відсутності або недостатності.

Також необхідно зазначити, що зварювальне обладнання вимагає своєчасної діагностики й обслуговування, які потрібно проводити лише у спеціалізованих сервісних центрах виробників.

4.2. Особливості практичного застосування результатів проведених досліджень

Беззаперечно, впровадження у виробничий процес підприємства сучасної високо ефективної технології зварювання сплавів на основі алюмінію дозволить суттєво розширити перелік технологічних операцій, скоротити час на її проведення та залучити додаткових клієнтів. Все це разом створить передумови підвищення ефективності його виробничої діяльності.

Разом з тим, для реалізації процесу зварювання *Al* та його сплавів підприємству потрібно крім придбання необхідної номенклатури й кількості зварювального обладнання, матеріалів та ЗІЗ зварювальників, забезпечити можливість проведення контрольних операцій, тобто наявності обладнання для

перевірки ГБЦ та блоків циліндрів на герметичність, найбільш поширеним способом проведення якої є пневматичне обпресування.

Використання більш простого магнітного методу контролю наявності тріщин, заснованого на створенні на поверхні деталі, що перевіряється поля магнітного розсіювання, яке змушує нанесений сухий металевий порошок під дією силових ліній магнітного поля «обтікати» тріщину й таким чином візуалізовувати дефект – не практично з огляду на те, що *Al* та його сплави не володіють магнітними властивостями.

Пневматичний спосіб реалізується за рахунок створення в каналах та внутрішніх порожнинах деталей надлишкового (0,3...0,5 МПа) тиску повітря. При цьому, за допомогою спеціальних пристосувань герметизують зовнішні отвори деталі, крім одного через який компресором стану (установки) й подають стиснене повітря. Обпресування проводять у ванні нагрітою до температур 80...90 °С водою, яка нагріває занурену в неї деталь для забезпечення «розкриття» мікротріщин під час їх теплового розширення. Під час перевірки деталей у ванні змінює власне просторове положення, що дозволяє визначити місця витоків пухирців повітря, які свідчать про наявність в цих місцях тріщин.

Робота починається із фіксації деталі (наприклад, ГБЦ) на рухомій монтажній рамі установки (рис. 4.1 а). Попередньо на отвори її каналів охолодження на привальній площині й бічній поверхні встановлюються заглушки, одна з них, як описувалося вище - із штуцером для підведення повітря (рис. 4.1 б).



а)



б)

Рисунок 4.1. - Підготовка ГБЦ до пневматичного обпресування

Через спеціальні прокладки на ГБЦ встановлюється (рис. 4.2а) та фіксується (рис. 4.2б) спеціальна прозора пластикова плита, яка дозволяє спостерігати за привальною поверхнею під час випробування.



а)

б)

Рисунок 4.2. – Розміщення та герметизація ГБЦ

Контроль тиску повітря під час випробувань забезпечується за показниками манометру, а регулювання - спеціальним краном (вентилем), що робить процес безпечним та ефективним.

Для проведення такого виду робіт промисловістю випускаються спеціалізовані стенди або установки (рис. 4.3 - рис. 4.5) порівняльні характеристики яких наведені у таблиці 4.1 [32]. Ці установки мають подібну конструкцію та оснащуються резервуарами (разом із кришками) виготовленими із нержавіючої сталі із ідеальною ізоляцією для запобігання розсіюванню тепла; підігрів води в резервуарах здійснюється двома потужними незалежними нагрівальними елементами із керованим автоматичним таймером та контролюється за допомогою електронної модуля, який забезпечує процес нагрівання та підтримки температури в режимі економії рівня споживання електроенергії.

Таблиця 4.1. Стенди (установки) для перевірки деталей на герметичність [32]

№	Характеристика	Виробник та модель		
		COMEC VPT-190	SERDI SPT 1600 XL	Carmec PTR 1600XHL
1	Максимальний розмір деталі, мм	1350×460×410		
2	Максимальна вага деталі, кг	300		
3	Потужність нагрівального елемента, кВт	3,5	4,5	4,0
4	Вартість (станом на 26.12.23 р.), тис. грн.	756,542	869,450	769,829



Рисунок 4.3. – Стенди (установки) для перевірки герметичності:

а - COMEC VPT-190; б - SERDI SPT 1600 XL; в - Carmec PTR 1600XHL

В експлуатаційних умовах які супроводжуються роботою в штатних режимах для визначення наявності тріщин в блоках циліндрів й ГБЦ ДВЗ доцільно застосовувати тестери герметичності (рис. 4.4), шляхом перевірки наявності в системі охолодження вуглекислого газу (CO_2) [33].



Рисунок 4.4. - Тестер герметичності системи охолодження Viktec VT13939

Даний прилад дозволяє без зняття ГБЦ двигуна встановити герметичність каналів систем охолодження, мащення та випуску. Принцип роботи тестера заснований на протіканні хімічної реакції спеціальної рідини, яка відповідає вимогам MSDS та SVHC та змінює колір із синього на зелений (або жовтий) у разі виявлення у охолоджувальній рідині вуглекислого газу CO_2 . До комплекту приладу входять: гумовий перехідник із

трьома контрольними заглушками для встановлення на більшість заливних горловин радіаторів ДВЗ; колба-тестер із двома камерами, розділеними фільтром та універсальним з'єднанням із кришкою радіатора; ручна груша для всмоктування рідини із системи охолодження; контейнер для реакційної рідини (об'ємом 250 мл.) та тестова рідина (JTC-1236L, 250 мл.). Вартість такого приладу є в рази меншою за стаціонарні стенди (установки) й складає лише 1 тис. 819 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виконана кваліфікаційна магістерська робота створює передумови розширення сегменту робіт спеціалізованого ремонтного підприємства ТОВ «Калита-Нова» за рахунок реалізації раціональної технології ремонту відповідальних деталей машин виготовлених із сплавів на основі алюмінію при відновленні таких критичних їх дефектів як зовнішні тріщини.

У першому розділі роботи викладена інформація щодо особливостей організації та функціонування підприємства, описана структура та номенклатура виробничих операцій, виявлені недоліки в організації виробництва та потенційні можливості із його оптимізації та реорганізації. Дослідженнями цього розділу встановлено, що існує проблема, яка знижує техніко-економічні показники діяльності підприємства за рахунок відсутності, на поточний час, якісної технології виконання зварювальних робіт при усуненні дефектів на деталях із алюмінію та сплавів на його основі. Доведено, що більшість відповідальних й базових деталей машин сьогодні виконуються саме із алюмінієвих сплавів, а їх вибраковування при наявності певних дефектів, які можуть бути усунені, є недоречним та економічно не вигідним. Отже, основною метою подальших досліджень було визнано визначення найбільш ефективної технології усунення тріщин у таких деталях, яка потребувала вирішення певних задач, серед яких:

- проведення аналізу існуючих способів видалення тріщин у корпусних деталях виготовлених із сплавів на основі алюмінію та основних методик зварювання алюмінієвих сплавів;
- визначення особливостей використання різних матеріалів для зварювання алюмінію та раціонального способу заварювання тріщин на основі порівняльної оцінки різних методик зварювання;
- оцінка особливостей впровадження прийнятої технології відновлення у виробничий процес підприємства тощо.

Дослідженнями другого розділу встановлені властивості алюмінію та сплавів на його основі, які використовуються у машинобудуванні. Визначено, що алюміній є найбільш розповсюдженим матеріалом для деталей машин і механізмів різних галузей промисловості, який має ряд суттєвих переваг до яких

відносять: малу вагу, високу пластичність, легкість проведення тепла й електричного струму, високий рівень технологічності у виробництві та ремонті. Однак, одним із його недоліків є високий ризик, при пікових ударних та температурних навантаженнях, появи тріщин, зламів та сколів. Аналіз відомих механічних методів й способів усунення тріщин в алюмінієвих деталях, які можуть бути реалізовані без використання складного технологічного обладнання та значних температурних впливів – накладання латок та встановлення механічних вставок-фіксаторів, показав нажаль недостатній рівень ефективності їх практичної реалізації.

Третій розділ роботи містить дослідження більш ефективної методики усунення тріщин, яка передбачає використання технологій зварювання. Матеріалами розділу проаналізовані особливості організації та технологічного забезпечення (обладнання та матеріали) для найбільш відомих сучасних технологій зварювання алюмінію та сплавів на його основі: виконані дослідження щодо оптимізації зварювальних процесів за рахунок забезпечення видалення плівок окислів із поверхні металу в процесі зварювання, проведений аналіз особливостей застосування матеріалів (електродів та їх покриттів, зварювальних та присадкових дротів, захисних газів та ін.) для зварювання алюмінію тощо. Порівняльний аналіз найбільш поширених способів зварювання алюмінію і його сплавів показав, що на сьогодні найбільш перспективним способом можна вважати прогресивну методику напівавтоматичного заварювання тріщин електродом АМг6 (діаметром 1,2 мм), що плавиться в середовищі захисного газу – аргону, а оптимальною за показником «ціна-якість» зварювальною установкою є установка ПДГ-516М із джерелом живлення КИУ-5101 українського виробництва розроблена за участі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

В четвертому розділі визначені особливості організації та проведення зварювальних робіт на напівавтоматичній зварювальній установці при зварюванні алюмінієвих сплавів; визначені основні правила та вимоги із техніки безпеки при їх виконанні; оцінені ризики отримання виробничим персоналом різних видів травм та ушкоджень; визначена потреба й описана номенклатура необхідних засобів індивідуального захисту зварювальників та встановлені особливості практичної реалізації отриманих в роботі результатів досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Реєстр підприємств України. URL: https://youcontrol.com.ua/catalog/company_details/42306760/
2. ТОВ «Калита-Нова». URL: <https://clarity-project.info/edr/42306760>
3. Р.С. Дейнека. Звіт з науково-дослідної практики «Підвищення ефективності усунення тріщин в корпусних деталях з алюмінієвих сплавів у ТОВ «Калита-Нова» м. Кропивницький». – Кропивницький, ЦНТУ, кафедра ЕРМ, 2023. – 16 с.
4. Зварювання алюмінію. URL: <https://krypton.ua/ua/a21755-svarka-alyuminiya-ego.html>
5. Аргонодугове зварювання алюмінію URL: <https://spika.com.ua/ua/a48941-argonodugovaya-svarka-alyuminiya.html>
6. Основи матеріалознавства. Навчальний посібник / Високос С.М., Глушко Ю.Ю., Пеховка М.В., Сашко В.О., Терещенко Т.М. Автор-упорядник: Боброва Т.Б. – К.: Ресурсний центр ГУРТ, 2019. 104 с. <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/%D0%9D%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D0%B8/2020/04/28/7materialoznavstvo.pdf>
7. Гарнець В. М. Конструкційне матеріалознавство / В.М. Гарнець, В.М. Коваленко. – К.: Либідь, 2007. 384 с.
8. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / В.В. Хільчевський, С.Є. Кондратюк, В.О. Степаненко, К.Г. Лопатько. – К.: Либідь, 2002. 327 с.
9. Чумак М. Г. Матеріали та технологія машинобудування / М.Г. Чумак. – Київ: Либідь, 2000. 368 с.
10. Зварювання алюмінію та його сплавів. URL: <https://obrobka.pp.ua/416-zvaryuvannya-alyumnyu-yogo-splavv.htm>
11. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%BB%D0%BE%D0%BA_%D1%86%D0%B8%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B2
12. Експлуатація автомобілів. Організація: Навчальний посібник / Під ред. В.Я. Чабанного. – Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2009. 392 с.
13. Ремонт автомобілів. Навчальний посібник. Книга 2. / Під ред. В.Я. Чабанного. – Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. 348 с.
14. Ремонт автомобілів. Навчальний посібник. Книга 1. / Під ред. В.Я. Чабанного. – Кіровоград: Центрально-Українське видавництво, 2007. 392 с.
15. СТУ EN ISO 10042:2015 Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів (EN ISO 10042:2005, IDT; ISO 10042:2005, IDT) [HTTPS://ZVARKA.INFO/OSOBLIVOSTI-ZVARYUVANNYA-ALYUMINIYU-ARGONOM/](https://zvarka.info/osoblivosti-zvaryuvannya-alyuminiyu-argonom/)
16. Зварювання в автомобілебудуванні: металознавство та технології: навчальний посібник / Косенко В.А., Добровольський О.Г., Красовський А.П., Каліцький Л.С., Малишев В.В. – К.: Університет «Україна», 2018. 239 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Kosenko_2018_239.pdf
17. Гуменюк І.В. Обладнання та технології зварювальних робіт : навч. посіб. / І.В. Гуменюк. - К.: Грамота, 2014. 120 с. https://www.svpu-profi.lg.ua/pdf/library/gumenuk_oblad_ta_tehnolog.pdf

18. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підруч. / О.А. Лудченко. - К. : Знання-Прес, 2004. 480 с.
19. Особливості застосування різних методів зварювання. Електронний ресурс. <https://ua.lksteelpipe.com/news/the-welding-methods-of-aluminum-and-its-alloys-30818023.html>
20. Квасницький В.В. Теорія зварювальних процесів. Дослідження фізико-хімічних і металургійних процесів та здатності металів до зварювання. Навчальний посібник. Миколаїв: УДМТУ, 2002. 181 с.
21. В.В. Квасницький Спеціальні способи зварювання: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2003. – 437 с. <https://studfile.net/preview/433579/>
22. Березін Л. Я., Хоменко М. М. Теорія зварювальних процесів. Навчальний посібник для студентів спеціальності 6.092300 — "Технологія та устаткування зварювання". – Чернігів: НМЦ ВО, 2002. – 268 с.
23. Коперсак В.М. Теорія процесів зварювання-2, фізико-хімічні та металургійні процеси при зварюванні: Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут: 2011 р. 252 с. URL: <https://studfile.net/preview/3748055/>
24. Толок Є.О. Теорія зварних процесів: [дистанційний курс для студентів спеціальності 015. Професійна освіта. Будівництво та зварювання]. URL: <https://dl.kpt.sumdu.edu.ua/course/view.php?id=851>
25. Черепакін А.А. Технологія конструкційних матеріалів. Зварювальне виробництво: підручник. 2018 р. 272 с. URL: [https://stud.com.ua/157901/tehnika/tehnologiya_konstruktsiynih_materialiv_zvaryuvayne_virobnitstvo](https://stud.com.ua/157901/tehnika/tehnologiya_konstruktsiynih_materialiv_zvaryuvalne_virobnitstvo)
26. Контроль якості зварювання. Т. 1. Неруйнівні методи контролю: навчальний посібник / Г. І. Камель, Ю. А. Гасило, П. С. Івченко, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2018. — 241 с. <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/27/1-27-b1.pdf>
27. Спосіб зварювання та вибір матеріалу алюмінієвого сплаву. <https://www.epowermetals.com/uk/welding-method-and-material-selection-of-aluminum-alloy.html>
28. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України <https://paton.org.ua/institut/istoriya/xronologiya/>
29. ДСТУ ISO 9606-2:2008 Атестаційне випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 2. Алюміній та алюмінієві сплави (ISO 9606-2:2004, IDT)
30. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник для практичних робіт з охорони праці для студентів зварювальних спеціальностей / Укл. О.Г. Левченко. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Електронний ресурс. <http://surl.li/pefpc>
31. <https://dnipro-m.ua/news/tekhnika-bezopasnosti-pri-vypolnenii-svarochnykh-rabot/>
32. Стенди для опресування ГБЦ. Електронний ресурс. <https://surl.li/pefyx>
33. Тестер герметичності системи охолодження. Електронний ресурс. <https://prom.ua/ua/Tester-sistemy-ohlazhdeniya.html>