НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

«На правах рукопису»
УДК 621.791

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри
_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ
(підпис) «___»_____20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему:

«Зменшення рівня залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань алюмінієвих сплавів електродинамічною обробкою»

Виконала:
студентка ІІ курсу, групи НЗ-41мп
Трояк Катерина Олегівна _____

Керівник:
зав. каф., д. т. н.,
Квасницький Віктор Вячеславович _____

Консультант з охорони праці
та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
зав. каф., д. т. н.,
Левченко Олег Григорович _____

Консультант з розроблення стартап-проєкту:
Доцент, к. е. н.,
Нараєвський Сергій Вікторович _____

Рецензент:
завідувач кафедри ЛТФТТ, к. т. н., доц., _____
Кагляк Олексій Дмитрович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання
імені Є.О. Патона
Кафедра зварювального виробництва

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма – «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Трояк Катерині Олегівні

1. Тема дисертації «Зменшення рівня залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань алюмінієвих сплавів електродинамічною обробкою»
науковий керівник Квасницький Віктор Вячеславович, д.т.н., проф., зав. кафедри

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. № 4748-с

2. Термін подання студентом дисертації 15 грудня 2025 р.

3. Об'єкт дослідження - напруження та деформації зварних з'єднань сплавів алюмінію, отриманих дуговим способом, вплив електродинамічної обробки.

4. Вихідні дані: аргонодугове зварювання; змінний струм; різнополярний асиметричний струм; матеріал зварного виробу – сплави АМг6 та 1561; листовий прокат; умови виготовлення – цехові; температура експлуатації – від -30 ^{0}С до +80 ^{0}С; тип виробництва – дрібносерійне; кількість виготовлення – 500 одиниць на рік; сумарна довжина зварних швів на виробі – 50 метрів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

1. Аналіз застосування сплавів алюмінію у промисловості; їх хімічного складу та властивостей; способів зварювання сплавів алюмінію; схильності алюмінієвих сплавів до утворення дефектів, зокрема гарячих та холодних тріщин, окрихчення, пропалення, непроварів, підрізів тощо; термічна обробка зварних з'єднань; окиснення та неметалеві включення; виникнення залишкових зварювальних напружень та деформацій; аналіз методів зменшення рівня залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань; особливості процесу та застосування електродинамічної обробки; сформулювати висновки по розділу. 2. Аналіз застосовного комплексу обладнання для отримання зварних з'єднань та електродинамічної обробки: джерела живлення; системи керування процесом зварювання; устаткування для електродинамічної обробки зварних швів; технологічні параметри обладнання; пристрої переміщення; пальники; головки; інше устаткування та пристрої; сформулювати висновки по розділу. 3. Визначення впливу процесу електродинамічної обробки на формування напружень та деформацій зразків зварних з'єднань сплаву алюмінію: методика проведення досліджень, обладнання для спекл-інтерферометрії, обладнання для інструментальних вимірювань, допоміжні пристрої, дослідження величини напружень зварних з'єднань, дослідження деформацій зварних з'єднань. 4. Дослідження впливу електродинамічної обробки на формозміни зразків стикових зварних з'єднань зі сплаву алюмінію: методика досліджень, визначення характеристик зварних з'єднань після зварювання; вибір методики та послідовності обробки; технологічні рекомендації по застосуванню електродинамічної обробки; сформулювати висновки по розділу. 5. Виконати розробку стартап-проєкту для впровадження розробленої технології зварювання виробу. 6. Проаналізувати небезпечні фактори і розробити заходи з охорони праці на виробництві.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

1. Аналіз поширених марок сплавів на основі алюмінію, їх хімічного складу та властивостей (1-2 слайди); 2. Аналіз застосовних способів зварювання сплавів алюмінію, обґрунтування вибору раціонального способу зварювання (1-2 слайди); 3. Виникнення залишкових напружень та деформацій при дуговому зварюванні, аналіз способів їх зменшення (1-2 слайди). 4. Аналіз схильності до утворення дефектів при дуговому зварюванні сплавів алюмінію (1-2 слайди); 5. Обране обладнання та пристрої для дугового зварювання дослідних сплавів, технічні параметри обладнання (1-3 слайди); 6. Обладнання для електродинамічної обробки зразків зварних з'єднань та його параметри (1-3 слайди). 7. Аналіз результатів досліджень щодо впливу електродинамічної обробки на рівень напружень та деформацій зразків зварних з'єднань сплаву на основі алюмінію (1-3 слайди); 8. Аналіз експериментальних результатів досліджень щодо впливу електродинамічної обробки на формозміни зразків зварних з'єднань сплавів алюмінію (1-3 плакати); 9. Загальні висновки по роботі (1 слайд).

7. Орієнтовний перелік публікацій: К.О. Трояк, П.Д. Стухляк "Автоматизовані системи для формування захисних покриттів з металокерамічних дисперсних матеріалів" — тези доповіді XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2024 р., Тернопіль, Україна.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проєкту	Нараєвський С.В., к.е.н., доц.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., зав. каф.		

9. Дата видачі завдання *13.11.2025 р.*

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Систематизація і обробка матеріалів	*20 листопада 2025 р.*	
2	Розробка проєктної частини	*27 листопада 2025 р.*	
3	Збір додаткових матеріалів	*04 грудня 2025 р.*	
4	Оформлення графічного матеріалу	*09 грудня 2025 р.*	
5	Літературна обробка і остаточне оформлення пояснювальної записки	*15 грудня 2025 р.*	

Студент _____ Катерина ТРОЯК

Науковий керівник _____ Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація написана на 133 сторінках, включає 6 розділів, містить 24 рисунки, 22 таблиці, 7 формул, 64 літературних джерела.

АЛЮМІНІЄВІ СПЛАВИ, ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА ОБРОБКА, ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЯ, ФОРМОЗМІНА

Тема магістерської дисертації – «Зменшення рівня залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань алюмінієвих сплавів електродинамічною обробкою».

Мета роботи – визначити вплив умов та параметрів реалізації процесу електродинамічної обробки на рівень компонент напружено-деформованого стану та формозміну стикових зварних з’єднань, які отримані автоматичним аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом з листового прокату сплавів на основі алюмінію.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

– проаналізувати вплив способів електродугового зварювання на формування дефектів, рівень залишкових деформацій та спотворення форми стикових зварних з’єднань листів зі сплавів на основі алюмінію;

– на основі аналізу наведених в літературі відомостей оцінити ефективність застосування різних способів регулювання залишкових зварювальних напружень та деформацій, які застосовні для обробки зварних з’єднань з листового прокату сплавів на основі алюмінію;

– обрати методики проведення досліджень по визначенню впливу параметрів та умов процесу електродинамічної імпульсної обробки на величину компонент напружено-деформованого стану зварних з’єднань зі сплавів на основі алюмінію АМг6 та 1561;

– здійснити наближену оцінку величини енергії необхідної для ефективної реалізації процесу електродинамічної обробки зварних з’єднань з листового

прокату алюмінієвих сплавів марок АМг6 та 1561, визначити рекомендовані параметри режимів електродинамічної обробки;

– дослідити вплив умов та параметрів процесу електродинамічної обробки на рівень напружень та деформацій зварних з'єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів визначених марок.

– дослідити вплив умов та параметрів процесу електродинамічної обробки на формозміну зразків стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів.

– сформулювати технологічні рекомендації щодо виконання процесу електродинамічної обробки зварних з'єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів.

Об'єкт досліджень – стикові зварні з'єднання алюмінієвих сплавів отримані автоматичним аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом.

Предмет досліджень – напруження та деформації стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, які отримані автоматичним аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом та їх формозміна.

Методи дослідження – експериментальні методи з визначення напружено-деформованого стану та формозміни зразків з використанням електронної спекл-інтерферометрії та інструментального методу вимірювання прогинів.

Наукова новизна

1. Вперше встановлено, що для забезпечення ефективного впливу процесу електродинамічної обробки на регулювання величини напружень стикових зварних з'єднань пластин товщиною до 4 мм зі сплаву АМг6 необхідно здійснювати обробку за відстані між зонами енерговиділення не більше за 10 мм по довжині зварного з'єднання, а для зменшення величини значень залишкових післязварювальних напружень до нуля, за обраних умов та режимів обробки, достатньо трьох електродинамічних впливів на одній локальній ділянці поверхні пластини з енергією E = 800 Дж.

2. Вперше встановлено, що у поперечному перерізі пластини товщиною до 4 мм зі сплавів алюмінію АМг6 та 1561 після одного імпульсу електричного струму

максимальні значення поздовжньої компоненти напружень σ_x на лінії сплавлення зменшуються на 60–65 %, а поперечної компоненти σ_y – на 35–40 %.

Практичне значення

1. Створені Технологічні рекомендації по застосуванню процесу електродинамічної обробки для виправлення стикових зварних з’єднань листового прокату зі сплавів на основі алюмінію марок АМг6 та 1561.

2. Підтверджена ефективність застосування методу спекл-інтерферометрі для оцінки величини діючих напружень в стикових зварних з’єднаннях пластин зі сплавів на основі алюмінію.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 133 pages, includes 6 chapters, contains 24 figures, 22 tables, 7 equations, and 64 literature references.

ALUMINUM ALLOYS, ELECTRODYNAMIC TREATMENT, RESIDUAL STRESSES, STRESS–STRAIN STATE, SPECKLE INTERFEROMETRY, SHAPE DEFORMATION

Master's thesis topic – "Reduction of residual stresses and deformations of welded joints of aluminum alloys by electrodynamic treatment".

The purpose of this work is to determine the influence of conditions and parameters of the electrodynamic treatment process on the level of stress–strain state components and shape deformation of butt-welded joints produced by automatic argon arc welding with a non-consumable electrode from sheet aluminum alloys.

To achieve this purpose, the following objectives were defined:

– to analyze the influence of arc welding methods on defect formation, the level of residual deformations, and shape distortion of butt-welded joints of aluminum alloy sheets;

– based on the analysis of literature data, to evaluate the effectiveness of various methods for regulating residual welding stresses and deformations applicable to the treatment of welded joints made of sheet aluminum alloys;

– to select research methodologies for determining the influence of parameters and conditions of the electrodynamic pulse treatment process on the magnitude of stress–strain state components of welded joints made of aluminum alloys AMg6 and 1561;

– to perform an approximate assessment of the energy required for effective implementation of electrodynamic treatment of welded joints made of sheet aluminum alloys AMg6 and 1561, and to determine recommended treatment regime parameters;

– to investigate the influence of conditions and parameters of electrodynamic treatment on the level of stresses and deformations of welded joints made of sheet aluminum alloys of the specified grades;

– to investigate the influence of conditions and parameters of electrodynamic treatment on the shape deformation of butt-welded joint specimens of aluminum alloys;

– to formulate technological recommendations for the implementation of electrodynamic treatment of welded joints made of sheet aluminum alloys.

The object of the research is butt welded joints of aluminum alloys produced by automatic argon arc welding with a non-consumable electrode.

The subject of the research is stresses and deformations of butt-welded joints of aluminum alloys produced by automatic argon arc welding with a non-consumable electrode, as well as their shape deformation.

The research methods include experimental methods for determining the stress–strain state and shape deformation of specimens using electronic speckle interferometry and an instrumental method for measuring deflections.

Scientific novelty

For the first time, it has been established that to ensure an effective influence of the electrodynamic treatment process on the regulation of stress levels in butt welded joints of plates up to 4 mm thick made of AMg6 aluminum alloy, the distance between energy release zones along the weld length should not exceed 10 mm. Furthermore, under the selected processing conditions and regimes, three electrodynamic impacts on a single local area of the plate surface with an energy of E = 800 J are sufficient to reduce residual post-weld stresses to zero.

For the first time, it has been determined that in the transverse cross-section of plates up to 4 mm thick made of aluminum alloys AMg6 and 1561, after a single electric current pulse, the maximum values of the longitudinal stress component σ_x at the fusion line decrease by 60–65%, while the transverse stress component σ_γ decreases by 35–40%.

Practical significance

Technological recommendations have been developed for the application of the electrodynamic treatment process for straightening butt-welded joints of sheet products made of aluminum alloys AMg6 and 1561.

The effectiveness of the speckle interferometry method for evaluating the magnitude of acting stresses in butt welded joints of aluminum alloy plates has been confirmed.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ 12

ВСТУП..... 14

1 АНАЛІЗ СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, СПОСОБІВ ЇХ ЗВАРЮВАННЯ, ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТА МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ 16

1.1 Загальна характеристика алюмінієвих сплавів 16

1.2 Застосування алюмінієвих сплавів в авіабудівній та ракетобудівній галузях 17

1.3 Особливості зварювання алюмінієвих сплавів та основні способи зварювання 19

1.4 Особливості вибору та застосування способів зварювання алюмінієвих сплавів 25

1.5 Типові дефекти зварних з’єднань алюмінієвих сплавів та способи їх усунення 27

1.6 Загальні рекомендації щодо усунення дефектів 32

1.7 Залишкові зварювальні напруження та деформації, спотворення геометричної форми зварних виробів 33

1.8 Традиційні методи зменшення залишкових деформацій..... 36

1.9 Імпульсні методи корекції рівня залишкових напружень та деформацій 38

1.10 Порівняльна оцінка ефективності методів зменшення деформацій і залишкових напружень..... 44

Висновки за розділом 1 46

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ 48

2.1 Відомості про алюмінієві сплави 1561 та АМг6..... 48

2.2 Обладнання для електродинамічної обробки..... 50

2.3 Аналіз фізичної моделі процесу електродинамічної обробки та можливості її застосування для зварних з’єднань алюмінієвих сплавів..... 58

2.4 Методика дослідження впливу електродинамічної обробки на напружено-деформований стан стикових зварних з’єднань зі сплаву АМг6 64

2.5 Методика вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії..... 67

Висновки за розділом 2 69
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕЛИЧИНУ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ 70
3.1 Дослідження напружень у зварних з'єднаннях до та після електродинамічної обробки 70
3.2 Дослідження рівня пластичних деформацій та механізму корекції геометричної форми зварних пластин при електродинамічній обробці 74
Висновки за розділом 3 80
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ФОРМОЗМІНИ ЗРАЗКІВ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ 82
4.1 Вибір послідовності електродинамічної обробки та корекції формозмін зварних з'єднань зі сплаву АМг6 82
4.2 Дослідження впливу попереднього вигину на ефективність виправлення прогинів зварних з'єднань 86
4.3 Технологічні рекомендації по виконанню виправлення зварних з'єднань ЕДО 89
Висновки за розділом 4 91
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ 93
5.1 Опис ідеї проєкту 93
5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту 96
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту 99
5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту 106
5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту 108
Висновки за розділом 5 109
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 110
6.2 Вимоги безпеки та гігієни праці 115
6.3 Розрахунок інженерного рішення 121
6.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях 122
Висновки за розділом 6 124
ВИСНОВКИ 125
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 127

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВСК (схема) – від середини до крайок

ГДК – гранично допустима концентрація

ГДР – гранично допустимий рівень

ЕДО – електродинамічна обробка

ЕМП – електромагнітне поле

ЕП – електродний пристрій

ЕПЕ – електропластичний ефект

ЄНЕ – ємкісний накопичувач енергії

ЗІЗ – засоби індивідуального захисту

ЗТП – зварювання тертям з перемішуванням

ЗТВ – зона термічного впливу

ІЕС – імпульс електричного струму

КТЛР – коефіцієнт термічного лінійного розширення

ЛОК (схема) – локалізована зона зварного шва

НДС – напружено-деформований стан

НПР (схема) – на лицьовій поверхні шва в напрямку «на прохід»

УЗО – ультразвукова обробка

УМ – ударний механізм

AC TIG – Alternating Current Tungsten Inert Gas – аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом зі змінний струмом

GTAW – Gas Tungsten Automatic Welding – автоматичне дугове зварювання неплавким електродом в середовищі інертного газу

MAG – Metal Active Gas – зварювання плавким електродом в середовищі активних газів

MIG – Metal Inert Gas – зварювання плавким електродом в середовищі інертних газів

TIG – Tungsten Inert Gas – ручне дугове зварювання неплавким електродом в середовищі інертного захисного газу

σ_x – поздовжня компонента напружень розтягу

σ_y – поперечна компонента напружень розтягу

$\sigma_{0,2}$ – межа плинності металу

$\sigma_в$ – межа міцності матеріалу при розтягу

V_{IEC} – швидкість наростання імпульсу електричного струму

t_{IEC} – період часу протікання імпульсу

$E_з$ – умовне позначення енергії заряду ємнісного накопичувача енергії

δ – товщина зразка

ξ – коефіцієнт швидкості деформування

$Q_{пл}$ – питомий тиск пластичного деформування

$E_{пл}$ – енергія пластичного деформування

$E_п$ – модуль пружності матеріалу

C – ємність накопичувача енергії

U – напруга заряду імпульсу електричного струму

ε^{Σ} – сумарна деформація

$\varepsilon_{пл}$ – пластична складова деформації

$\varepsilon_{пл}^{\Sigma}$ – сумарна пружно-пластична деформація

f – поздовжній прогин зразка після зварювання

$f_{пр}$ – заданий попередній вигин

$\Delta_п$ – поперечний прогин на початку шва

$\Delta_к$ – поперечний прогин у кінці шва

ВСТУП

Сплави систем легування Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu та Al–Li широко використовуються для виготовлення різноманітних виробів та елементів конструкцій в авіаційній, транспортній, суднобудівній, енергетичній, будівельній та інших галузях промисловості. Застосування таких матеріалів забезпечує зменшення маси, економію палива, збільшення вантажопідйомності та підвищення ефективності експлуатації машин та конструкцій завдяки поєднанню низької густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості та технологічності оброблення. При створенні машин, елементів обладнання та конструкцій зі сплавів на основі алюмінію широко застосовуються технології електродугового зварювання. Однак, нерівномірність нагріву та жорсткий термічний цикл електродугового зварювання в середовищі захисних газів призводить до формування значних за своєю величиною залишкових напружень та зміни структури зварних з'єднань, спотворенню геометричної форми виробів. Тому дослідження щодо пошуку шляхів і технологій для зменшення діючих післязварювальних залишкових напружень та деформацій, спотворення геометричної форми отриманих виробів є актуальними.

Електродинамічна обробка є одним з перспективних імпульсних методів зменшення залишкових напружень, деформацій та переміщень. Однак, вплив умов та параметрів реалізації процесу електродинамічної обробки на рівень величини компонент напружено-деформованого стану та формозміну стикових зварних з'єднань, які отримані автоматичним аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом з листового прокату сплавів типу АМг6 (1561) вивчений не достатньо, а наведені в літературі відомості мають суперечливий характер, що підтверджує актуальність теми досліджень.

В роботі представлені результати аналізу наявних в літературі відомостей щодо оцінки ефективності застосування різних способів регулювання залишкових зварювальних напружень та деформацій, обрані раціональні методики проведення досліджень по визначенню впливу параметрів та умов процесу електродинамічної

імпульсної обробки на величину компонент напружено-деформованого стану стикових зварних з’єднань зі сплавів на основі алюмінію АМг6 та 1561. На основі наближеної оцінки величини енергії необхідної для ефективної реалізації процесу електродинамічної обробки зварних з’єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів доведена можливість її застосування для стикових зварних з’єднань листів товщиною до 8 мм зі сплавів на основі алюмінію марок АМг6 та 1561, визначені рекомендовані параметри режимів електродинамічної обробки. Встановлені закономірності впливу уплив умов та параметрів процесу електродинамічної обробки на рівень напружень та деформацій зварних з’єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів визначених марок. Досліджений вплив процесу електродинамічної обробки на формозміну зразків стикових зварних з’єднань алюмінієвих сплавів. На основі отриманих результатів сформульовані технологічні рекомендації щодо виконання процесу електродинамічної обробки зварних з’єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів. Отримані результати досліджень мають науковий інтерес і практичне значення.

1 АНАЛІЗ СФЕР ЗАСТОСУВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ, СПОСОБІВ ЇХ ЗВАРЮВАННЯ, ПРИЧИН УТВОРЕННЯ ДЕФЕКТІВ ТА МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ

1.1 Загальна характеристика алюмінієвих сплавів

Алюміній і його сплави належать до найважливіших конструкційних матеріалів сучасного машинобудування. Їх широке застосування у промисловості пояснюється поєднанням низької густини (≈2,7 г/см³), високої питомої міцності, корозійної стійкості та технологічністю оброблення. Ці матеріали успішно використовуються в авіаційній, транспортній, суднобудівній, енергетичній і будівельній галузях, забезпечуючи значне зменшення маси конструкцій і підвищення ефективності їх експлуатації [1].

Використання алюмінієвих сплавів у машинобудуванні надає можливість знизити матеріалоємність конструкцій і собівартість продукції. У транспортному секторі застосування легких сплавів забезпечує економію палива, збільшення вантажопідйомності та зменшення інерційності рухомих частин [1]. У будівництві сплави алюмінію використовують для створення легких і довговічних каркасних та фасадних елементів, а в суднобудуванні - для корпусів суден, що експлуатуються в агресивному морському середовищі. Застосування сплавів серій Al–Mg і Al–Mg–Si (5ххх та 6ххх) дало змогу значно підвищити стійкість до корозії, водночас зберігши хорошу зварюваність і ударну в’язкість [1].

Важливим напрямом використання алюмінієвих сплавів є авіаційна промисловість, де до матеріалів висуваються підвищені вимоги щодо питомої міцності та втомної витривалості. Сплави систем Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu та Al–Li традиційно використовуються для виготовлення фюзеляжів, крил, шпангоутів і паливних баків літаків. Висока питома міцність цих сплавів забезпечує оптимальне співвідношення між вагою конструкції та її жорсткістю, що дає змогу підвищити ефективність польоту та зменшити витрати палива [1].

У сучасній промисловості алюмінієві сплави активно використовуються для виготовлення трубопроводів, резервуарів, енергетичних платформ, теплообмінників, вагонів, контейнерів і корпусів електромобілів. Їх застосування сприяє зниженню маси конструкцій, підвищенню енергоефективності та довговічності обладнання. Крім того, ці матеріали зберігають механічні властивості за підвищених температур і характеризуються високою антикорозійною стійкістю навіть у вологих та агресивних середовищах.

Таким чином, застосування алюмінієвих сплавів у промисловості визначається комплексом їхніх унікальних властивостей: малою густиною, високою питомою міцністю, стійкістю до корозії та добрими технологічними показниками. З розвитком методів дугового, плазмового та лазерного зварювання відкриваються нові можливості для створення зварних конструкцій із поліпшеними характеристиками міцності, довговічності та надійності [1].

1.2 Застосування алюмінієвих сплавів в авіабудівній та ракетобудівній галузях

Алюмінієві сплави посідають провідне місце серед конструкційних матеріалів, які застосовуються в авіаційній і ракетно-космічній промисловості. Їх використання зумовлене поєднанням низької густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості та доброї технологічності під час зварювання, оброблення різанням і термічної обробки. Завдяки цим властивостям алюмінієві сплави є основними матеріалами для виготовлення планерів літаків, корпусів ракет, паливних баків, крил і силових елементів конструкцій.[1]

У авіабудуванні ефективність використання алюмінієвих сплавів підтверджена багаторічним досвідом експлуатації. Ще у XX столітті сплави систем Al–Cu–Mg, Al–Zn–Mg–Cu, Al–Li продемонстрували відмінне поєднання міцності, пластичності й технологічності, що зробило їх основними матеріалами для конструкцій цивільних та військових літаків.

На сьогодні створення нових моделей літальних апаратів тісно взаємопов’язане із необхідністю зменшення маси конструкцій, зниження вартості

виробництва та підвищення експлуатаційних характеристик. Зниження ваги безпосередньо впливає на зменшення витрат палива та підвищення паливної ефективності [1]. Так, розраховано, що зменшення маси літака на 1 кг дає змогу заощадити від 125 л до 165 л палива на рік, що за весь період експлуатації становить від 3 млн дол. до 5 млн дол. економії. [1]

Найпоширенішими конструкційними матеріалами у виробництві літаків цивільного призначення залишаються сплави Д16, Д19, В95, В96, 1201 (аналогічні до міжнародних марок 2024, 2219, 7075 тощо), які застосовуються для панелей крил, елементів фюзеляжу, шпангоутів і силових вузлів.

Для зменшення маси та підвищення ефективності конструкцій активно використовують сплави з додаванням літію (Al–Li) [1], що знижують густину від 10% до 12% і підвищують модуль пружності до 80 ГПа. Зокрема, у конструкціях літаків Airbus A380, Boeing 777X і перспективних ракетних систем застосовуються сплави 7055-Т77, 2324-Т39, 2524-Т3, а також 2198 та С458 (Al–Li), які характеризуються високими показниками міцності ($\sigma_в$ = від 550 МПа до 640 МПа) і втомної витривалості.

Виготовлення герметичних відсіків літальних апаратів здійснюється зі штампозварних конструкцій із листової оболонки товщиною від 1,5 мм до 3 мм, до якої приварюються шпангоути та фланці, оброблені з об’ємних поковок. При цьому для деталей, що працюють на статичні навантаження, застосовується сплав В96 (7075), а для елементів, які зазнають втомних навантажень - Д16-Т (2024).

Сучасні тенденції авіабудування також спрямовані на створення оребрених зварних панелей крила, жорстких елементів фюзеляжу та зварних шасі, що дозволяє знизити масу конструкції від 10% до 15 % порівняно з клепаними аналогами.

У процесах виготовлення широко застосовуються лазерне, плазмове, електронно-променеве зварювання, а також зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) [1], яке дає змогу отримувати високоякісні з’єднання без тріщин, пор і значних залишкових напружень. Саме технологія ЗТП використовується при зварюванні елементів баків ракет Delta, Saturn-V, Space Shuttle, що забезпечує

стабільність та довговічність роботи конструкцій під впливом кріогенних температур.

Особливо активно алюмінієві сплави застосовуються у ракетобудуванні, де вагові характеристики матеріалу мають вирішальне значення. Для виготовлення паливних баків ракет-носіїв серій Saturn-V і Delta-VI використовуються сплави 2014, 2219, 2598, які поєднують високу зварюваність, міцність і жаростійкість. Завдяки новим технологіям зварювання вдалося знизити деформацію швів, покращити герметичність і скоротити витрати на обслуговування. Наприклад, застосування сплаву C458 (Al–Li) в конструкції паливного баку дозволяє зменшити витрати від 2 млн дол. до 4 млн дол. протягом 400 польотів.

У перспективі (до 2030 р.) очікується подальше вдосконалення сплавів алюмінію, спрямоване на зниження питомої маси, підвищення міцності та термостійкості [2], а також на освоєння технологій зварювання у складних умовах експлуатації. Високий рівень ефективності, надійності та економічності робить алюмінієві сплави незамінними для створення конструкцій майбутніх гіперзвукових літальних апаратів і ракетно-космічних систем нового покоління.

1.3 Особливості зварювання алюмінієвих сплавів та основні способи зварювання

Алюмінієві сплави характеризуються низькою температурою плавлення оксидної плівки на поверхні, високою теплопровідністю, значною реакційною здатністю поверхні до окиснення та порівняно низькою в’язкістю ряду високоміцних сплавів у перехідних температурних інтервалах; ці відмінності зумовлюють як переваги, так і труднощі при застосуванні традиційних дугових методів зварювання й вимагають адаптації джерел живлення, режимів та конструктивних рішень пальників і електродів для забезпечення якісного формування зварного шва та мінімізації дефектів. З огляду на це, на практиці використовують декілька базових груп методів: аргонодугове зварювання неплавким електродом (TIG/GTAW) на змінному або постійному струмі,

зварювання плавким електродом в середовищі інертних газів (MIG/MAG) у звичайному та імпульсному режимах, спеціалізовані варіанти зварювання різнополярним асиметричним струмом, а також плазмово-дугові та гібридні процеси, що поєднують плазмову дугу та плавкий дріт. Кожен із цих процесів має свої технологічні обґрунтування для застосування на різних товщинах матеріалу, при різних позиціях шва та вимогах до продуктивності і властивостей з'єднання [3].

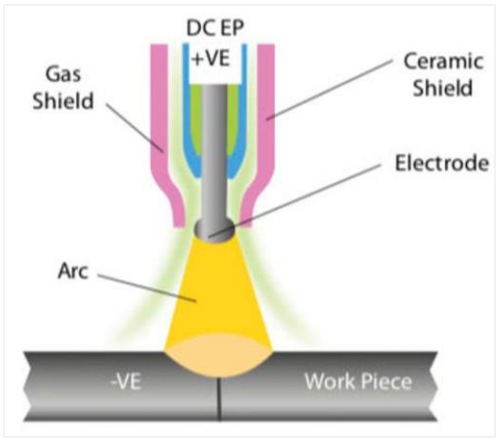
Дугове зварювання зі змінним струмом.

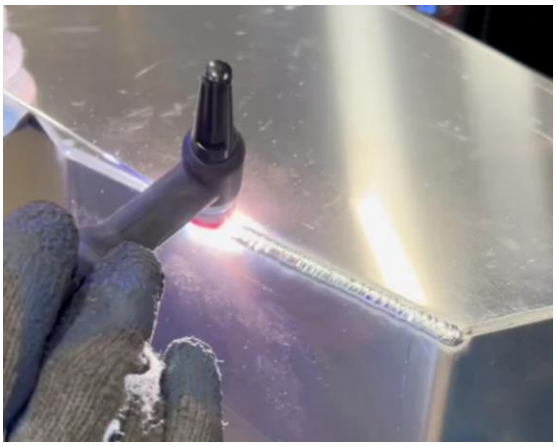
Дугове зварювання зі змінним струмом, зокрема аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом зі змінний струмом (AC TIG), традиційно застосовується для з'єднань тонколистових алюмінієвих сплавів у тих випадках, коли необхідна висока якість шва і мінімальна зона термічного впливу (ЗТВ) (рис. 1.1). Визначальною особливістю застосування змінного струму при TIG-зварюванні алюмінію є чергування полярності: під час частини циклу оберненої полярності відбувається електронне розігрівання вольфрамового електрода й підпал дуги, а під час частини циклу прямої полярності – інтенсивне нагрівання шва і руйнування оксидної плівки на поверхні, що сприяє очищенню поверхні та кращому проплавленню і формуванню металу шва [4].

Через високу теплопровідність алюмінію контрольований нагрів та охолодження є критичним аспектом для зменшення деформацій, а також ризику утворення гарячих тріщин у ЗТВ. Застосування змінного струму здебільшого забезпечує прийнятну стійкість дуги та ефективну дегазацію поверхневих оксидів без необхідності попереднього механічного очищення, хоча для деяких високоміцних сплавів і складних конструкцій можуть знадобитись додаткові заходи.

До переваг даного методу належать відносна простота обладнання, висока якість швів під час зварювання тонких матеріалів та можливість ефективного регулювання форми зварювальної ванни при використанні інверторних джерел. До недоліків методу відносяться обмежена продуктивність в порівнянні з

процесами плавким електродом, складність підтримання сталого режиму на великих товщинах та чутливість до стану поверхні виробів.

а) 

б) 

а) – схема аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом зі змінним струмом; б) – процес формування зварного з’єднання алюмінієвої конструкції

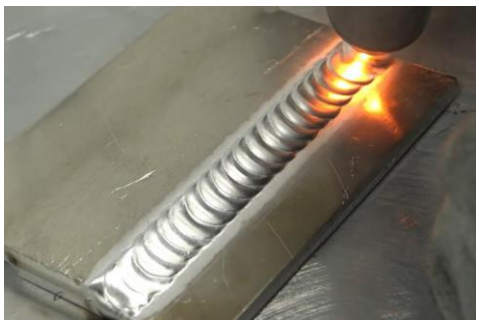
Рисунок 1.1 – Дугове зварювання зі змінним струмом

Імпульсно-дугове зварювання.

Імпульсно-дугове зварювання (імпульсний MIG/MAG або імпульсний TIG - у відповідних варіаціях) становить окрему технологічну категорію, де джерело живлення формує періоди підвищеного струму для транспортування крапель наплавочного металу та періоди базового струму для стабілізації дуги і охолодження ванни [5]. Для алюмінієвих сплавів імпульсний режим є особливо корисним при зварюванні в положеннях, що вимагають контролю краплепереносу, а також при роботі із тонколистовими конструкціями, де необхідно мінімізувати тепловкладку й термічні деформації.

Технологічні переваги імпульсного зварювання включають зниження теплового впливу, кращу керованість формою шва (рис. 1.2) та меншу кількість оксидних і пористих дефектів при коректно підібраних параметрах; серед недоліків – підвищена складність джерела живлення, потреба в точному налаштуванні параметрів пульсації під конкретний сплав і товщину, а також обмеження продуктивності при товстих матеріалах у порівнянні з потужними конвенційними режимами.

Практичні дослідження та промислова практика застосування імпульсного MIG зварювання підтверджують, що інтерпульсні (двопульсні) режими й спеціалізовані криві струму дозволяють отримувати зовнішній вигляд і якість шва, близькі до TIG-процесу, водночас забезпечуючи вищу продуктивність процесу [6].

а) б) 

а) – шви, виконані імпульсним MIG; б) – шов, виконаний імпульсним зварюванням TIG

Рисунок 1.2 – Приклад зовнішнього вигляду зварних швів

Зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Зварювання із використанням різнополярного асиметричного струму, зокрема при плазмово-дуговому зварюванні (рис. 1.3), являє собою продовження розвитку і адаптації технологій, спрямованих на збільшення глибини проплавлення, інтенсивне руйнування оксидної плівки та забезпечення стабільного формування зварювальної ванни під час з’єднання важкозварюваних високоміцних алюмінієвих сплавів [7]. Зварювання на даному режимі передбачає відхилення від класичної симетричної синусоїди з метою збільшення тривалості або амплітуди однієї з полярностей. В результаті забезпечується більш інтенсивне теплове впливання в потрібному циклі та підвищена ефективність десорбції оксидів при одночасному збереженні контролю над формою зварювальної ванни.

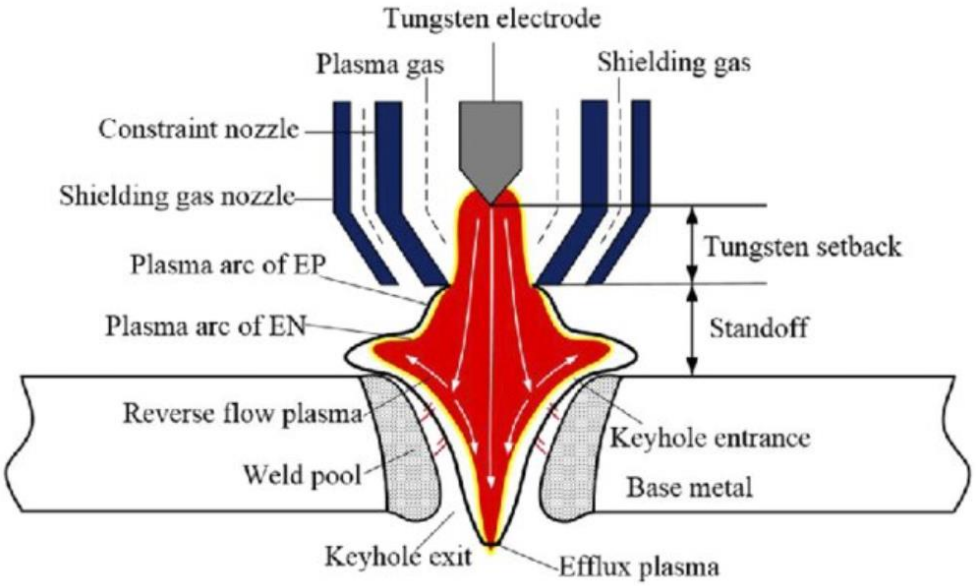


Рисунок 1.3 – Схема плазмово-дугового зварювання із різнополярним асиметричним струмом [8]

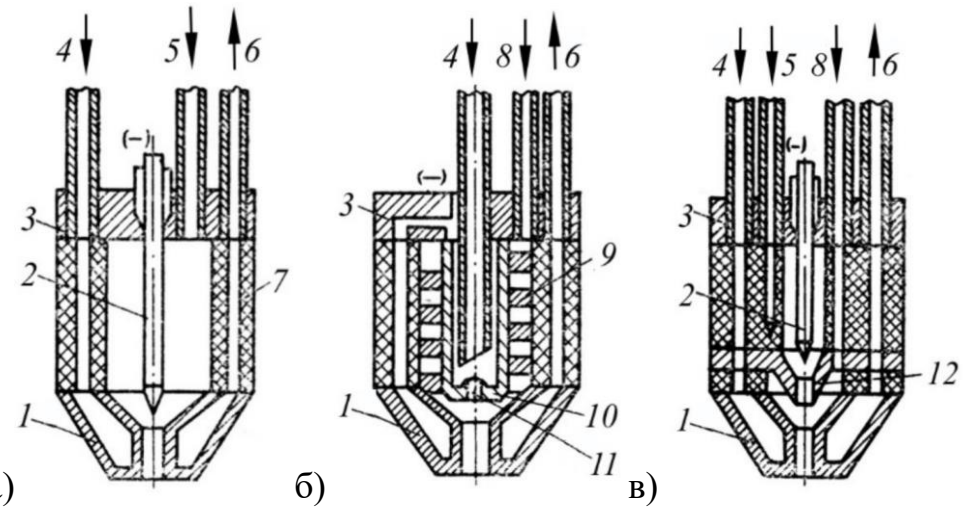
Результати досліджень вітчизняних науковців свідчить, що застосування плазмово-дугового зварювання із різнополярним асиметричним струмом дозволяє істотно поліпшити якість швів високоміцних алюмінієвих сплавів та знизити вагу конструкцій за рахунок можливості застосування тонших стінок без погіршення механічних властивостей з'єднань; проте такі методи вимагають складнішого устаткування, точного підбору режимів та пристосованих пальників, що підвищує капітальні та експлуатаційні витрати.

Плазмово-дугове та гібридне плазмово-дугове зварювання.

Плазмово-дугове зварювання та його гібридні модифікації (плазма + плавкий електрод, плазмове + неплавкий електрод тощо) характеризуються концентрованою енергією плазмової дуги, високою швидкістю зварювання та потенційно високою глибиною проплавлення при відносно вузькій ЗТВ [9]. Застосування плазмового зварювання для алюмінієвих сплавів дає переваги у вигляді більш глибокого проплавлення при меншому вкладанні тепла, а також можливості зменшити деформації та ширину термічно зміненої зони. Водночас дана технологія має ряд обмежень: складність конструкції пальника і джерела живлення, потреба в оптимізації режимів для ефективного руйнування оксидної

плівки (особливо при змінному струмі), чутливість вольфрамового електрода або плазмотрону до режимів роботи і в ряді випадків більші габарити устаткування для забезпечення необхідної стійкості процесу. Будова плазмотронів обумовлена вибором робочого газового середовища, способом подачі газу в дугову камеру, типом запалювання дуги та системою охолодження. Найпростішою є конструкція плазмотронів, які працюють у нейтральних газових середовищах (рис. 1.4) [9].

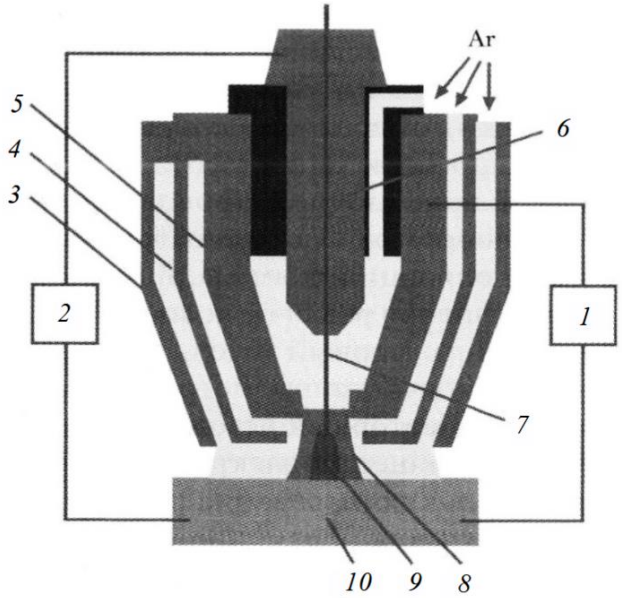
Гібридні схеми, які поєднують плазмову дугу із подачею плавкого електроду (рис. 1.5), спроможні підвищувати продуктивність, однак їх промислова реалізація вимагає врахування економічної доцільності і складності конструкції гібридної головки [9]. Дослідження показують, що застосування змінної чи керованої полярності в плазмових та гібридних дугових процесах сприяє збільшенню глибини проплавлення і покращенню дегазації, хоча це пов’язано з ускладненням конструкції зварювальної головки.



а) б) в)

а – нейтрально-газового з осьовою стабілізацією дуги; б – машинного з вихровою стабілізацією дуги; в – двопотокового

Рисунок 1.4 – Схеми плазмотронів [9]



1 – джерело живлення стиснутої плазмової дуги з неплавким електродом; 2 – джерело живлення дуги з плавким електродом; 3 – захисне сопло; 4 – стабілізуюче сопло; 5 – неплавкий електрод; 6 – струмопідвод; 7 – плавкий електрод; 8 – стиснена плазмова електрична дуга; 9 – електрична дуга плавкого електроду; 10 – виріб

Рисунок 1.5 – Схема процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом [9]

1.4 Особливості вибору та застосування способів зварювання алюмінієвих сплавів

Під час вибору конкретного способу зварювання слід враховувати сукупність факторів: товщину матеріалу, вимоги до механічних властивостей з’єднання, доступні ресурси (обладнання, джерела живлення, кваліфікація зварювальника), продуктивність та економічну ефективність процесу, а також ймовірність виникнення специфічних дефектів (пори, включення оксидних плівок, гарячі тріщини, незадовільне формування кореню шва тощо). Наприклад, для тонких листів і відповідальних швів часто обирають процес TIG зі змінним струмом або імпульсний MIG процес з ретельним контролем параметрів; для середніх і листів значної товщини, де продуктивність має ключове значення, частіше застосовують імпульсний MIG процес або гібридне плазмове зварювання,

тоді як для зварювання високоміцних важкозварюваних сплавів доцільним є використання різнополярного асиметричного струму для зниження ризику виникнення гарячих тріщин і підвищення однорідності структури шва.

Одночасно, незалежно від обраного процесу, критично важливими є підготовка крайок, очищення поверхні від оксидної плівки та забруднень, використання відповідних присадних матеріалів і захисних газів (аргон, суміші з гелієм за потреби), а також застосування термообробки до та після зварювання у випадках легованих і зміцнюваних тепловою обробкою сплавів.

З практичної точки зору, технологічний вибір також визначається наявністю спеціалізованого обладнання: інверторні джерела з функціями пульсації та асиметричного режиму, автоматизовані плазмотронові системи, системи подачі дроту з контролем короткого замикання та краплеперенесення, а також системи піддуву та очищення газового середовища. Вітчизняні виробники та наукові центри розробили низку адаптованих рішень для плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів, включаючи технології біполярного зварювання та спеціальні пальники, однак широке впровадження таких рішень потребує врахування економічних аспектів та підготовки персоналу.

Варто зазначити, що зварювання алюмінієвих сплавів завжди вимагає балансування між якістю шва, продуктивністю та економічною доцільністю. Змінний струм при зварюванні TIG залишається базовим інструментом для отримання якісних тонколистових з’єднань; імпульсні режими та модифікації MIG зварювання збільшують продуктивність і контроль теплового впливу; асиметричні та біполярні режими, а також плазмові технології, дають переваги при роботі з високоміцними та важкозварюваними сплавами, але для них характерне відносно дороге устаткування та необхідність більш ретельного відпрацювання режимів. Практично важливим є також комплексний підхід: підготовка крайок, вибір присадних дротів та газових сумішей, оптимізація швидкості зварювання та величини струму, а також застосування необхідних операцій після зварювання для відновлення структури і властивостей металу.

1.5 Типові дефекти зварних з’єднань алюмінієвих сплавів та способи їх усунення

Зварювання алюмінію та його сплавів є складним технологічним процесом, що потребує високої точності виконання операцій і суворого дотримання технологічних режимів. Це зумовлено фізико-хімічними властивостями алюмінію – високою теплопровідністю, інтенсивним окисненням поверхні, значним коефіцієнтом термічного лінійного розширення (КТЛР), а також схильністю до пороутворення. Сукупність цих факторів зумовлює виникнення характерних дефектів у зварних швах, які впливають на механічні властивості, герметичність та довговічність конструкцій. До найпоширеніших дефектів при зварюванні алюмінієвих сплавів належать гарячі тріщини, підрізи, пори, незадовільне формування шва, дефекти в корені шва, неметалеві включення та включення оксидних плівок.

Гарячі тріщини.

Гарячі тріщини – це лінійні розриви (рис. 1.6), що виникають у зварному шві або прилеглій зоні під час кристалізації металу при температурах, близьких до точки плавлення. Вони зумовлені великою усадкою металу, нерівномірним охолодженням, наявністю домішок, які знижують температуру солідуса, або утворенням евтектичних фаз. Особливо чутливими до утворення гарячих тріщин є сплави систем Al–Mg–Si, Al–Cu, а також деякі деформовані сплави серії 6ххх та 2ххх. Тріщини зазвичай розвиваються вздовж осі шва, у місцях зосередження термічних напружень або в зонах перегріву [10].

Рисунок 1.6 – Гаряча тріщина у зварному шві з алюмінієвого сплаву

Причини утворення: надмірна кількість легувальних елементів (Cu, Mg, Si), висока швидкість охолодження, значні термічні напруження, недостатнє проплавлення, неправильна підготовка крайок.

Рекомендації щодо усунення: застосування присадних дротів з підвищеним вмістом кремнію (наприклад, AlSi5, AlSi12), використання імпульсного режиму зварювання для контролю тепловкладення, попередній підігрів заготовок до 100–150°C, зниження жорсткості конструкції для компенсації усадки, забезпечення оптимальної ширини шва.

Підрізи.

Підрізами називають борозни або виїмки уздовж країв шва (рис. 1.7), які виникають унаслідок надмірного проплавлення основного металу при недостатньому заповненні рідким металом. Такі дефекти знижують переріз шва, створюють концентратори напружень, що призводить до зниження міцності з’єднання.

Причини утворення: надмірний зварювальний струм, неправильний кут нахилу пальника або електрода, занадто швидке переміщення дуги, неправильно підібраний діаметр присадного дроту, недостатній контроль за формуванням валика зварного шва.

Рекомендації щодо усунення: оптимізація режимів (зменшення струму, стабілізація швидкості подачі дроту), дотримання правильного кута нахилу

пальника 70–80°, використання короткої дуги, правильний вибір діаметра електрода або дроту відповідно до товщини матеріалу.

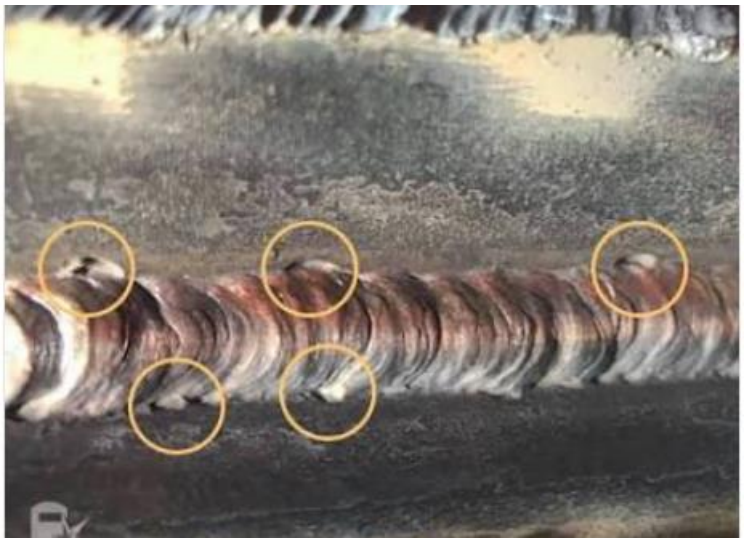


Рисунок 1.7 – Підрізи уздовж країв зварного шва

Пори.

Пороутворення (рис. 1.8) є однією з найпоширеніших проблем при зварюванні алюмінію. Пори – це газові включення, які утворюються внаслідок розчинення водню у розплавленому металі та його виділення під час кристалізації. Навіть невелика кількість вологи або мастил на поверхні може спричинити інтенсивне пороутворення [11].

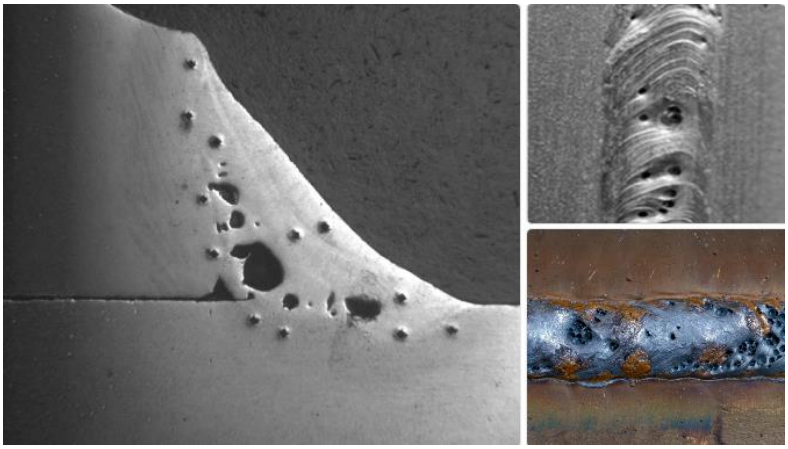


Рисунок 1.8 – Пористість в швах з алюмінієвого сплаву

Причини утворення: наявність оксидної плівки, вологи, мастил або бруду на поверхні; недостатній захист зони дуги інертним газом; занадто великий дебіт або турбулентність потоку газу; надто коротка або надто довга дуга.

Рекомендації щодо усунення: ретельне очищення зварюваних поверхонь механічним (щітка з нержавіючої сталі) та хімічним способом (лужні або кислотні розчини), застосування сухого аргону або гелію високої чистоти (не нижче 99,995 %), контроль герметичності пальника, зменшення довжини дуги та стабілізація захисного газового потоку.

Незадовільне формування шва.

Незадовільне формування шва (рис. 1.9). Цей дефект характеризується нерівномірною формою валика, неповним заповненням або надмірним напливом металу. Такі шви мають низьку естетичну якість, а також можуть бути джерелом концентрації напружень.

Рисунок 1.9 – Незадовільне формування шва з алюмінієвого сплаву

Причини утворення: неправильний режим зварювання, нестабільна подача присадного матеріалу, несиметричне положення пальника, коливання струму або напруги, недостатній контроль за процесом.

Рекомендації щодо усунення: стабілізувати режим подачі дроту, застосовувати імпульсно-дугове зварювання для кращого контролю перенесення металу, дотримуватися оптимальної швидкості переміщення пальника, забезпечити правильне положення виробу у просторі.

Дефекти в корені шва.

Дефекти в корені шва. Такі дефекти включають непровари, заглиблення у корені, неповне проплавлення (рис. 1.10). Вони призводять до зниження несучої здатності зварного з’єднання, втрати герметичності та появи корозійних осередків.

Причини утворення: недостатній струм, мала швидкість подачі дроту, неправильна геометрія підготовки крайок, відсутність підкладки або підтримки ванни зворотного боку.

Рекомендації щодо усунення: оптимізувати струм і напругу, забезпечити правильний зазор і притиск деталей, використовувати підкладні стрічки з мідного або графітового матеріалу, застосовувати двостороннє зварювання або піддув газу з протилежного боку шва.

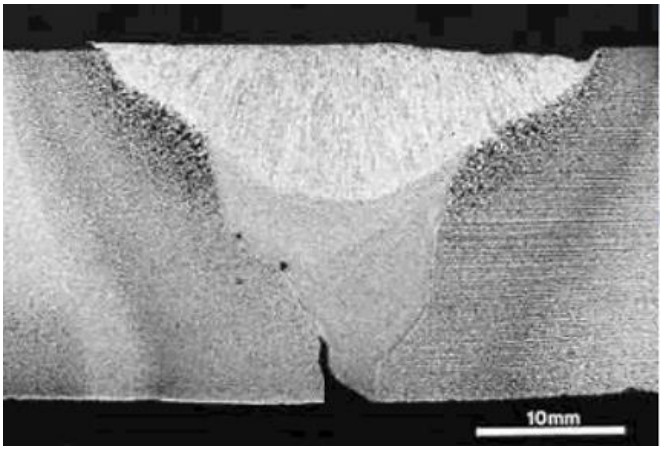


Рисунок 1.10 – Неповне проплавлення кореню шва

Неметалеві включення та включення оксидних плівок.

До неметалевих включень належать частинки шлаку, оксидів, силікатів або сторонніх матеріалів, які потрапляють у шов у процесі зварювання [12]. Вони погіршують однорідність структури, знижують міцність і пластичність з’єднання.

Причини утворення: недостатнє очищення поверхонь, зварювання через оксидну плівку, використання неякісного присадного дроту, забруднені інструменти або пальники.

Рекомендації щодо усунення: забезпечення ретельного попереднього очищення металу, використання присадних матеріалів, сертифікованих для конкретного типу сплаву, очищення пальників, запобігання контакту дроту з вологою або мастильними матеріалами.

Включення оксидних плівок. Алюміній дуже швидко окиснюється при контакті з повітрям, утворюючи міцну плівку Al_2O_3, температура плавлення якої перевищує 2000 °C, тоді як сам алюміній плавиться при 660 °C. Ця плівка не розчиняється у зварювальній ванні та може залишатися у шві у вигляді включень [12].

Причини утворення: недостатнє очищення поверхні, неправильна полярність струму, відсутність механічного руйнування оксидного шару під дією дуги.

Рекомендації щодо усунення: використання змінного струму (AC TIG), що забезпечує катодне очищення; механічне зняття оксидів безпосередньо перед зварюванням; підтримання стабільного потоку аргону для запобігання повторному окисненню; правильне балансування зварювального режиму для ефективного очищення поверхні.

1.6 Загальні рекомендації щодо усунення дефектів

Загальним підходом до усунення дефектів у зварюванні алюмінієвих сплавів є суворий контроль чистоти поверхонь, вибір правильного типу зварювання (TIG, MIG, плазмове), відповідність присадного матеріалу основному металу, оптимізація тепловкладення, забезпечення стабільного газового захисту, а також контроль температурного режиму. Важливою умовою є мінімізація залишкових напружень, які можуть призвести до деформацій і тріщин, що досягається завдяки застосуванню імпульсних або комбінованих режимів, попередньому підігріву та раціональній послідовності накладання швів.

Таким чином, забезпечення високої якості зварних з’єднань алюмінієвих сплавів можливе лише за умови комплексного дотримання технологічних

параметрів, правильного вибору обладнання, матеріалів і режимів, а також системного контролю якості зварювального процесу.

1.7 Залишкові зварювальні напруження та деформації, спотворення геометричної форми зварних виробів

Процес зварювання металів, зокрема сплавів алюмінію, супроводжується складними термомеханічними явищами, які суттєво впливають на структуру, механічні властивості та геометричну форму виробів. Однією із важливих особливостей зварювальних процесів є формування залишкових напружень і деформацій внаслідок нерівномірного нагріву та охолодження металу в зоні зварювання. Для алюмінієвих сплавів, з їх високим КТЛР і низьким модулем пружності, такі залишкові деформації особливо відчутні: вони знижують експлуатаційну надійність, підвищують схильність до утворення дефектів і призводять до втрати геометричної форми та працездатності зварних з’єднань.

Залишкові зварювальні деформації зумовлені неоднорідністю температурного поля, яке утворюється в процесі зварювання. Метал у зоні шва нагрівається до температур плавлення, тоді як прилеглі ділянки зазнають лише часткового нагріву; у результаті виникають теплові градієнти, що спричиняють локальні розширення та усадки, обмежені жорсткістю або защемленням конструкції. Після охолодження у матеріалі формується стійкий розподіл залишкових напружень стиску та розтягу, який виявляється у вигляді постійних змін форми – залишкових деформацій. У конструкціях із листового прокату це часто проявляється у вигляді поздовжніх і поперечних викривлень, хвилястості поверхні, а також загального спотворення геометричної форми виробу [13].

Фізична сутність виникнення залишкових деформацій полягає в тому, що під час циклу нагрів–охолодження відбувається локальна пластична течія металу, а після завершення процесу частина отриманих теплових деформацій не компенсується пружними. У результаті після охолодження метал перебуває у стані наявності залишкових напружень: окремі ділянки зазнають розтягу, інші – стиску, що зумовлює постійну деформацію виробу навіть без зовнішнього

навантаження. Найбільш небезпечними є залишкові напруження розтягу, які діють у напрямках, що збігаються з робочими напруженнями конструкції, оскільки це може призвести до передчасного руйнування або втрати стійкості зварного вузла.

Схильність до утворення дефектів у зварних швах безпосередньо пов’язана з величиною, знаком і розподілом залишкових деформацій та відповідних напружень. При надмірних локальних розтягненнях у зоні шва й високому ступені закріплення (фіксації) підвищується небезпека утворення тріщин при кристалізації металу шва та ліквацийних тріщин у ЗТВ, які формуються наприкінці тверднення або під час часткового підплавлення легкоплавких фаз [14]. Для алюмінієвих сплавів із високою теплопровідністю та значним КТЛР такі механізми є визначальними. Пористість у швах з алюмінієвих сплавів переважно зумовлена наявністю водню та оксидних плівок. Водночас залишкові напруження розтягу можуть перешкоджати «закриттю» мікропорожнин і сприяти їх збереженню, а залишкові викривлення конструкції – провокувати технологічні дефекти типу непроварів унаслідок зміщення крайок і зміни зазорів.

Поздовжні деформації утворюються внаслідок нерівномірного стиску металу по осі шва. Вони проявляються у вигляді зміни довжини елемента після зварювання, що часто спостерігається у тонколистовому прокаті. Такий тип деформацій призводить до утворення залишкового вигину виробу, зміни його розмірів, а також викривлення площин. Якщо зварювання виконується з одного боку листа без симетричного нагріву, виникає односторонній прогин виробу – явище, яке особливо характерне для тонких алюмінієвих деталей.

Поперечні деформації виникають унаслідок нерівномірного нагріву по ширині шва. У цьому випадку відбувається стиснення металу у напрямку, перпендикулярному до шва, що зумовлює звуження виробу або утворення хвилястих викривлень. Такі деформації небезпечні тим, що спричиняють зміщення окремих елементів конструкції, що ускладнює їх складання, монтаж і подальшу експлуатацію.

У виробах із листового прокату деформації зварювання часто проявляються комплексно. Під час охолодження зварного з’єднання одночасно діють сили, які прагнуть скоротити метал у різних напрямках, внаслідок чого утворюються як поздовжні, так і поперечні спотворення. Якщо при цьому не враховано жорсткість конструкції, порядок накладання швів або особливості тепловідведення, то результатом стає суттєве викривлення виробу, що призводить до втрати точності геометричних параметрів [15].

Спотворення геометричної форми виробів може набувати різних форм: вигин, кручення, розкриття або закриття кутів, хвилястість поверхні. У великих конструкціях, таких як корпуси резервуарів, кузови транспортних засобів або панелі літальних апаратів, навіть незначні залишкові деформації можуть призвести до втрати герметичності або зміни аеродинамічних характеристик. Для запобігання таким наслідкам у технологічних процесах застосовуються різноманітні методи компенсації – попередній вигин, симетричне зварювання, зварювання зворотно-поступальним способом або фіксація елементів у спеціальних пристроях, що стримують деформацію.

Залишкові деформації також впливають на властивості зварного з’єднання на мікрорівні. У ЗТВ відбувається перерозподіл зерен, виникає рекристалізація, а також зміна фазового складу металу. Це створює умови для появи мікроскопічних напружень, які, у поєднанні з макродеформаціями, сприяють зниженню втомної міцності матеріалу. Унаслідок цього навіть при допустимих експлуатаційних навантаженнях може відбуватися поступове накопичення пошкоджень і ініціювання тріщин.

Особливої уваги заслуговує вплив залишкових напружень на зварні конструкції з алюмінієвих сплавів серії Al-Mg і Al-Si, що широко застосовуються у транспортному машинобудуванні. Для цих матеріалів характерна схильність до утворення тріщин через понижену пластичність у певних температурних діапазонах. Під час зварювання на межі твердіння і рідкої фази утворюються концентратори напружень, які при охолодженні не можуть бути компенсовані

пластичною деформацією. Це призводить до утворення гарячих тріщин, що особливо часто виникають при зварюванні алюмінієвих листів товщиною до 3 мм.

У практиці сучасного зварювального виробництва зменшення залишкових деформацій досягається завдяки оптимізації технологічних параметрів – зниженню зварювального струму, зменшенню тепловкладення, застосуванню імпульсного режиму або попередньому підігріву виробу [16]. Крім того, застосовуються методи термомеханічного вирівнювання – локальний нагрів після зварювання, механічне правлення або термообробка, що сприяє релаксації внутрішніх напружень. Залишкові зварювальні деформації мають багатофакторний вплив на якість зварних з’єднань із листового прокату. Вони зумовлюють виникнення дефектів, знижують точність геометричних параметрів виробів, погіршують експлуатаційні властивості конструкцій. Тому під час розроблення технології зварювання необхідно враховувати залишкові деформації, оскільки це є ключовою умовою отримання надійних та високоякісних алюмінієвих конструкцій.

1.8 Традиційні методи зменшення залишкових деформацій

Необхідність регулювання залишкових деформацій у зварних конструкціях є однією з актуальних проблем зварювального виробництва. Під час виготовлення нових типів конструкцій використовуються сучасні матеріали та способи зварювання, для яких традиційні методи забезпечення заданої точності виготовлення не завжди придатні. Водночас, в умовах подорожчання енергоресурсів останніми роками все більш актуальними стають методи, що ґрунтуються на мінімальному енергоспоживанні.

Традиційні методи регулювання залишкових деформацій зварних конструкцій можна поділити на термічні та механічні, залежно від характеру впливу на конструкцію під час зварювання або післязварювальної обробки. Також застосовуються комбіновані термічні та механічні методи.

На сьогодні застосування термічних методів правки, з урахуванням витрат на енергоносії, суттєво підвищує собівартість виробництва металоконструкцій. Це

особливо стосується великогабаритних мостових і суднокорпусних конструкцій, а також виробів із легких сплавів із високою теплопровідністю. Водночас, автоматизація процесу [17] у поєднанні з сучасними розрахунковими методиками, які оптимізують тепловий вплив на конструкцію, дозволяє успішно застосовувати цей метод у сучасному виробництві. Розроблено математичні моделі термічної правки для різних типів конструкцій, таких як тонкостінні оболонки, вали [18], суднобудівні панелі [19, 20], що дає можливість мінімізувати нагрівання виробу при максимальній ефективності операцій правки.

Під час термічної обробки відпуском у затискних пристроях, яка ґрунтується на нагріванні виробу разом зі складальним оснащенням, значна кількість теплової енергії додатково витрачається на нагрівання масивних пристроїв, що застосовуються для фіксації виробу. З огляду на те, що ефективність відпуску пропорційна питомій кількості тепла на тонну ваги конструкції (з урахуванням оснащення), використання різних схем нагрівання для виправлення великогабаритних зварних конструкцій стає економічно невигідним.

Компромісним рішенням є локальний відпуск окремих вузлів зварної конструкції, однак цей метод обмежений у застосуванні й малоефективний для виробів з металів із високою теплопровідністю.

Силові методи ґрунтуються на прикладанні до конструкції на різних етапах виготовлення механічних навантажень, що компенсують її залишкові деформації від зварювання.

Зворотне прогинання є ефективним способом компенсації зварювальних деформацій у виробах із відносно невеликою згинальною жорсткістю, наприклад, під час приварювання фланців до тонкостінних оболонкових конструкцій. Це вимагає ускладнення технології зварювання, але в ряді випадків є більш раціональним рішенням, ніж післязварювальна обробка конструкції. Водночас застосування такого методу прогинання не завжди доцільне через високу вартість оснащення для збирання.

Зварювання з попереднім розтягуванням – це метод зниження зварювальних деформацій тонколистових конструкцій, що застосовується під час виготовлення великогабаритних полотен із легких сплавів. Недоліком цього методу є висока вартість спеціального обладнання для розтягування зварюваних елементів.

В цілому, основними недоліками наведених методів є високий рівень енергоспоживання та металоємність, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів до забезпечення заданої точності виготовлення зварних конструкцій.

1.9 Імпульсні методи корекції рівня залишкових напружень та деформацій

Перспективним підходом, який відрізняється простотою застосування, низьким енергоспоживанням і не потребує металоємного обладнання, є удосконалення та розробка імпульсних методів, що реалізують ударно-хвильові впливи, які застосовуються до металоконструкцій у процесі їх виготовлення.

Так, традиційний метод проковування зварних швів ще у 80-ті роки знайшов своє розвиток у застосуванні ультразвукового ударного інструменту, який відрізняється значно більшими можливостями щодо керування впливом.

Фундаментальні та прикладні дослідження, що проводилися з 60-х років, дозволили встановити явище різкого підвищення пластичності та зниження опору металу деформації за рахунок одночасної дії механічних напружень та електричного струму високої густини. Це явище отримало назву електропластичності.

Її практичне використання відкрило нові можливості для деформування металів і сплавів, включно з тугоплавкими, а також для покращення їх властивостей після механічного формоутворення [21, 22].

Ця закономірність дії електричного струму відрізняється від відомого теплового ефекту, який покладений в основі електроконтактного нагрівання, тим, що виявляється лише в деформованому металі, тобто у зразках, що перебувають під впливом пружних механічних напружень [23, 24] або під навантаженням, що перевищує границю текучості.

У цьому випадку під час дії імпульсу струму матеріал характеризується нестабільним (нестаціонарним) напружено-деформованим станом (НДС), який впливає на зміну геометричних характеристик оброблюваної деталі [25].

Спільною ознакою всіх способів імпульсної обробки металів є підведення струмів великої густини безпосередньо в зону деформації металу та локалізація області дії електричного струму. Завдяки цьому методи обробки, що базуються на електропластичному ефекті (ЕПЕ), відрізняються від електроконтактного нагрівання, яке застосовується під час волочіння та прокатки.

У сучасних технологіях формоутворення конструкційних матеріалів застосовуються процеси, що інтенсифікують деформування заготовок за рахунок нетермічної дії імпульсного струму – ЕПЕ. Це дозволяє зменшити витрати на нагрівання під час операцій кування, штампування та волочіння, а також усунути потребу в нагріванні технологічного оснащення.

На основі ЕПЕ реалізуються технології отримання із крихких матеріалів, таких як чавун, берилій, реній, надпровідних дротів, стрічок та штампованих деталей з мінімальним рівнем технологічних залишкових напружень завдяки застосуванню струмів високої густини у зонах волочіння, прокатки, штампування та після обробки деталей тиском.

Ці способи формоутворення металевих матеріалів мають низку спільних закономірностей, які необхідно враховувати під час застосування електроімпульсної обробки для виправлення формозмін, спричинених зварюванням.

Результати досліджень з електропластичного волочіння конструкційних сталей показали, що вплив електричного струму дозволяє досягти збільшення швидкості деформацій під час волочіння. Електроімпульсний вплив на деформовану сталь 08Г2С сприяє підвищенню однорідності фрагментованої структури металу, а пластичне деформування проявляється на більш ранніх стадіях навантаження, супроводжуючись збільшенням об’ємної частки пластичної складової.

Це підтверджують дані [26], отримані під час електродинамічної обробки (ЕДО) за умов одновісного розтягу зразків низьковуглецевої сталі та її зварних з'єднань. У цьому випадку інтенсивна пластична течія металу, що проявляється у формуванні смуг Чернова–Людерса, розпочиналося ще за пружної області деформування зразків.

Результати досліджень свідчать, що ЕПЕ застосований для інтенсифікації процесу листового штампування металу під час виготовлення деталей літальних апаратів. Дія електричного струму також дозволяє ліквідувати втомні тріщини та подовжити експлуатаційний ресурс деталей, що працюють за циклічних навантажень.

Застосовувані у технологічних операціях листового штампування тонкостінних деталей силового набору та обшивки літальних апаратів термічна інтенсифікація та електроконтактний нагрів мають низку недоліків. До них належать значні енергетичні витрати, високі температури штампування, що спричиняють укрупнення зерна й погіршення експлуатаційних характеристик отриманих деталей, а також потреба в післяопераційній термічній обробці. Зазначені недоліки усуваються під час використання електроімпульсних впливів у процесі штампування.

Застосовувалися одно- і багатоімпульсні впливи на різних етапах штампування деталей літальних апаратів. Суттєвий вплив має рівень питомої електричної енергії, кількість імпульсів струму, ступінь попередньої деформації заготовки і швидкість охолодження виробу після завершення штампування. Встановлено, що за оптимального електроімпульсного впливу зростають тимчасовий опір матеріалу виробу, межа витривалості й експлуатаційний ресурс без зниження пластичних властивостей матеріалу.

Електроімпульсний вплив дозволяє збільшити ресурс конструкцій літальних апаратів, що працюють у несприятливих умовах, за рахунок підвищення їх корозійної стійкості.

На основі результатів [27] встановлено, що ЕПЕ може бути використаний для інтенсифікації процесів листового штампування металів і сплавів. У цьому

випадку доцільним є застосування одно- та багатоімпульсних впливів на різних етапах штампування, задаючи визначений рівень введеної в заготовку енергії та кількість імпульсів струму, а також певний ступінь попереднього деформування заготовки. За оптимального електроімпульсного впливу в процесі формоутворення підвищуються статична міцність матеріалу виробу та межа витривалості без погіршення пластичних властивостей матеріалу, а рівень залишкових напружень знижується.

Особливості електроімпульсного впливу були відпрацьовані на сталях марок 12Х18Н10Т, 30ХГСА, титанових сплавах ВТ8, ОТ4 і ВТ20, а також на алюмінієвих сплавах Д16, 1420, В95Т і АМг6.

На підставі аналізу робіт із пластичного формоутворення та регулювання напруженого стану металів в умовах електрострумових впливів можна зробити висновок, що технології формоутворення на основі обробки імпульсами струму можуть бути реалізовані для виправлення зварних конструкцій.

Під час обробки зварного з'єднання імпульсами струму внаслідок стимуляції ЕПЕ пружна складова залишкової деформації формоутворення переходить у пластичну, що дозволяє ефективно впливати на геометричні характеристики металоконструкції.

Електроімпульсна обробка може підвищувати ефективність методів попереднього силового впливу, таких як жорстке закріплення або попередній пружний розтяг зварюваних елементів. У силових схемах, реалізованих у зазначених методах, до зварної конструкції прикладено зовнішні навантаження, за яких обробка зварних з’єднань імпульсами струму дає максимальний ефект. Це пов’язано із реалізацією ЕПЕ в процесі перетворення пружних деформацій елементів конструкції в пластичні під час її обробки в оснащенні.

Ультразвукова обробка зварних з’єднань.

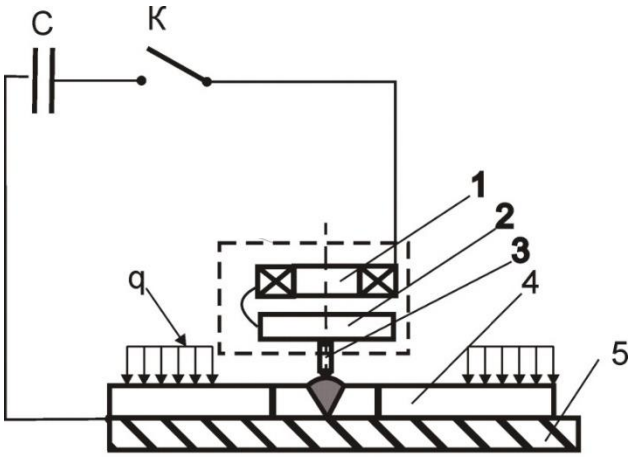
Ультразвукова обробка (УЗО) ґрунтується на передачі коливань високої частоти (від 18 кГц до 40 кГц) через металевий інструмент у зону шва. Ультразвукові коливання спричиняють мікропластичну деформацію металу в поверхневих шарах, що супроводжується подрібненням зерен, зменшенням

розмірів кристалітів і виникненням сприятливих залишкових напружень стиску [29].

Застосування ультразвукової енергії активізує процеси дислокаційного зміцнення, прискорює релаксацію залишкових напружень і зменшує ймовірність утворення мікротріщин. Також УЗО ефективно знімає термічні напруження після зварювання алюмінієвих і сталевих сплавів, що особливо важливо для конструкцій авіаційної, суднобудівної та енергетичної галузей. Переваги УЗО включають високий ступінь локального контролю впливу, можливість автоматизації процесу, відсутність необхідності значних механічних зусиль і низьку енерговитратність. Серед недоліків відзначають складність обладнання, обмежену ефективність для товстостінних деталей і чутливість до точного налаштування параметрів (амплітуди та частоти коливань).

Електродинамічна обробка зварних з’єднань.

Електродинамічна обробка (ЕДО) – імпульсний метод зменшення залишкових напружень, деформацій і підвищення втомної довговічності зварних з’єднань, зокрема тонколистових алюмінієвих панелей зі сплавів типу АМг6 (1561). Під час ЕДО по лінії шва наноситься короткий удар індентора, і одночасно в місці контакту проходить імпульс струму великої густини (густина струму $j \geq 1$ кА/мм^2) (рис. 1.11). Така комбінована дія викликає локальну пластичну деформацію приповерхневого шару металу, переводить залишкові напруження зі стану розтягу у стан стиску та стабілізує геометричну форму шва. Після ЕДО в зоні шва і навколо нього формуються напруження стиску величиною до близько 120 МПа замість вихідних напружень розтягу після зварювання. Це гальмує зародження і зростання втомних тріщин та підвищує довговічність елементів конструкцій [30].



1 – індуктор; 2 – диск; 3 – рухомий електрод - індентор; 4 – зразок, що бробляється; 5 – робочий стіл; q – навантаження, що фіксує зразок [30]

Рисунок 1.11 – Схема ЕДО пластин

Імпульс формується розрядом ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ). Струм проходить крізь шов, одночасно прискорює індентор до ударної швидкості (близько 5 м/с), створює у металі хвилю пружно-пластичної деформації та реалізує ЕПЕ (струм полегшує рух дислокацій, і метал деформується без утворення макротріщин). Унаслідок цього, зона шва переходить зі стану розтягу в стан стиску, а характерні для тонких стикових з’єднань викривлення (жолоблення) зменшуються [30].

Типова система ЕДО складається з імпульсного джерела струму (ЄНЕ із зарядною напругою до 500 В), ударного вузла, індентора та притискного вузла. Важливо, що метод може виконуватися не лише після зварювання, а й безпосередньо під час нього. Для цього зварювальний пальник і головка ЕДО об’єднують в один модуль: пальник формує шов, а відразу за ним індентор обробляє ще теплий метал з температурою приблизно 150 °С. Така “обробка на гаряче” виконується в одному проході, без окремої післязварювальної операції, що полегшує автоматизацію (у тому числі в MIG/TIG процесах), скорочує цикл та одразу задає стискальний напружений стан і стабільну форму панелі [31].

Разом з тим, ЕДО потребує складнішого імпульсного обладнання, синхронізації моменту удару та імпульсу струму, підвищених вимог до

електробезпеки і точного наведення індентора. Наявні режими найбільш відпрацьовані для тонколистових алюмінієвих конструкцій (товщина до 8 мм); для масивних сталевих елементів метод ще адаптують. Незважаючи на це, ЕДО вже розглядають як промисловий інструмент контролю залишкових напружень і форми зварних панелей без громіздкої термообробки та силового виправлення [31].

1.10 Порівняльна оцінка ефективності методів зменшення деформацій і залишкових напружень

Порівняння розглянутих методів показує, що всі вони мають спільну мету – створення сприятливого стану стиску в зварній зоні та зміцнення приповерхневих шарів металу. Однак відмінності полягають у фізичній природі впливу, глибині дії та технологічних особливостях.

Механічне проковування є найбільш доступним методом, який забезпечує ефективне підвищення втомної міцності при мінімальних витратах, проте має обмежену глибину впливу. УЗО відзначається високою точністю, можливістю автоматизації та мінімальним спотворенням геометрії шва, що робить її придатною для виробів із тонких листових матеріалів. ЕДО, у свою чергу, поєднує удар індентора з імпульсним пропусканням струму великої густини через шов, що дозволяє не лише зменшувати розтягувальні залишкові напруження, але й переводити зону шва у стійкий стан стиску та одночасно знижувати залишкове жолоблення; метод забезпечує високу втомну довговічність тонколистових алюмінієвих панелей, проте потребує імпульсного обладнання та синхронізації удару з імпульсом струму.

У промисловості високочастотна механічна обробка зварних швів застосовується в авіаційній, суднобудівній, машинобудівній і транспортній галузях. Дослідження Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут» показали, що застосування УЗО алюмінієвих з’єднань після аргонодугового зварювання збільшує їхню втомну довговічність від 70% до 100 %. У випадку сталевих конструкцій механічне проковування підвищує

границю витривалості до 50 %. Для тонколистових елементів зі сплавів Al–Mg (типу АМг6/1561) ЕДО дозволяє в процесі або відразу після зварювання сформувати в шві залишкові напруження стиску і зменшити залишкові деформації, що особливо важливо для панелей, які працюють за циклічних навантажень. Способи високочастотної механічної обробки зварних з'єднань – механічне проковування, УЗО та ЕДО є ефективними методами зміцнення та підвищення надійності зварних конструкцій. Вони забезпечують покращення структури металу, зменшення залишкових напружень, підвищення втомної міцності та довговічності виробів. Вибір конкретного методу визначається типом матеріалу, товщиною деталей, умовами експлуатації та економічною доцільністю.

Мета роботи – визначити вплив умов та параметрів реалізації процесу електродинамічної обробки на рівень компонент напружено-деформованого стану та формозміну стикових зварних з'єднань, які отримані автоматичним аргоно-дуговим зварюванням неплавким електродом з листового прокату сплавів на основі алюмінію.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Проаналізувати вплив способів електродугового зварювання на формування дефектів, рівень залишкових деформацій та спотворення форми стикових зварних з'єднань листів зі сплавів на основі алюмінію.

2. На основі аналізу наведених в літературі відомостей оцінити ефективність застосування різних способів регулювання залишкових зварювальних напружень та деформацій, які застосовні для обробки зварних з'єднань з листового прокату сплавів на основі алюмінію.

3. Обрати методики проведення досліджень по визначенню впливу параметрів та умов процесу електродинамічної імпульсної обробки на величину компонент напружено-деформованого стану зварних з'єднань зі сплавів на основі алюмінію АМг6 та 1561.

4. Здійснити наближену оцінку величини енергії необхідної для ефективної реалізації процесу електродинамічної обробки зварних з'єднань з листового

прокату алюмінієвих сплавів марок АМг6 та 1561, визначити рекомендовані параметри режимів електродинамічної обробки.

5. Дослідити вплив умов та параметрів процесу електродинамічної обробки на рівень напружень та деформацій зварних з'єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів визначених марок.

6. Дослідити вплив умов та параметрів процесу електродинамічної обробки на формозміну зразків стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів.

7. Сформулювати технологічні рекомендації щодо виконання процесу електродинамічної обробки зварних з'єднань з листового прокату алюмінієвих сплавів.

Висновки за розділом 1

1. В авіаційній, транспортній, суднобудівній, енергетичній, будівельній та інших галузях промисловості все більше поширення набувають сплави на основі алюмінію. Їх застосування в якості основних конструкційних матеріалів забезпечує зменшення маси, економію палива, збільшення вантажопідйомності та підвищення ефективності експлуатації машин та конструкцій завдяки поєднанню низької густини, високої питомої міцності, корозійної стійкості та технологічності оброблення.

2. При створенні машин, елементів обладнання та конструкцій зі сплавів на основі алюмінію широко застосовуються технології електродугового зварювання. Однак, нерівномірність нагріву та жорсткий термічний цикл електродугового зварювання в середовищі захисних газів призводить до формування значних за своєю величиною залишкових напружень та зміни структури в зварних швах та зоні термічного впливу, спотворенню геометричної форми отриманих виробів.

3. Одним з найбільш ефективних методів регулювання напружень, зменшення величини післязварювальних деформацій та переміщень є електродинамічна обробка. Доведено, що застосування електродинамічної обробки забезпечує не лише регулювання рівня та розподілу залишкових

напружень і деформацій, а забезпечує підвищення втомної довговічності зварних з’єднань шляхом гальмування зародження та зростання тріщин втоми в металі.

2 МАТЕРІАЛИ, ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Відомості про алюмінієві сплави 1561 та АМг6

Алюмінієвий сплав 1561 належить до системи Al–Mg–Mn і є деформівним конструкційним матеріалом, який характеризується поєднанням високої питомої міцності, корозійної стійкості та задовільної технологічної зварюваності. Саме ці властивості зумовили його широке використання для розробки зварних конструкцій транспортного, авіаційного та ракетно-космічного призначення, які експлуатуються в широкому діапазоні температур (табл.2.1).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву 1561 (мас. %) [32]

Fe	Si	Mn	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Домішки
≤ 0,4	≤ 0,4	0,7…1,1	Осн.	≤ 0,1	0,0001…0,003	5,5–6,5	≤ 0,2	≤ 0,1

Однією з ключових переваг сплаву 1561 є його технологічна придатність до аргонодугового та плазмово-дугового зварювання (MIG, TIG, Plasma-MIG). Матеріал має низьку схильність до утворення гарячих тріщин у ЗТВ, що дозволяє з’єднувати листові деталі товщиною від 3 мм до 6 мм без застосування спеціальних компенсуючих добавок. Це є важливою умовою при виготовленні герметичних тонкостінних елементів паливних баків, де навіть незначні дефекти можуть впливати на експлуатаційну надійність [32].

Завдяки стабільній структурі після зварювання сплав 1561 зберігає високі показники пластичності та ударної в’язкості, що особливо важливо для деталей, які працюють в умовах змінних навантажень і циклічного тиску при перепадах температур у польоті. Випробування показали, що міцність зварних з’єднань 1561 сягає від 80% до 90 % міцності основного металу, а залишкові деформації після зварювання мінімальні, що сприяє високій геометричній стабільності панелей і оболонок [33].

Висока стійкість сплаву до міжкристалітної та пітінгової корозії забезпечує тривалий строк служби конструкцій у вологих та агресивних середовищах

(наприклад, у баках для кріогенних палив). Застосування гібридного лазерно-дугового зварювання та ЗТП дало змогу додатково підвищити якість швів, знизити тепловклад і залишкові напруження, що безпосередньо впливає на ресурсність вузлів і довговічність конструкцій [32, 33].

Таким чином, сплав 1561 поєднує малу масу, добру технологічну здатність до зварювання, стійкість стійкість до агресивних середовищ і високу технологічність, що забезпечує економічну доцільність його застосування при виготовленні великогабаритних елементів конструкцій.

Алюмінієвий сплав АМг6 (система Al–Mg–Mn) належить до деформівних алюмінієвих сплавів, які поєднують високу питому міцність, добру корозійну стійкість, зварюваність і технологічність обробки. Завдяки цим властивостям він став одним із основних матеріалів для виготовлення елементів паливних баків, обичайок, днищ і силових панелей ракетно-космічної техніки конструкцій різного призначення (табл. 2.2) [34].

Таблиця 2.2 – Хімічний склад сплаву АМг6 [3]

Хімічний елемент	Mn	Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Be	Ti
Склад (% мас.)	0.5-0.8	≤0.4	≤0.4	≤0.1	≤0.2	5.8-6.8	0.0002-0.005	0.02-0.1

Сплав АМг6 застосовується у виготовленні вафельних та стрингерних панелей паливних баків ракет класу «Зеніт», де забезпечує поєднання високої міцності при невеликій питомій масі. Конструкції баків виконуються штампозварними з товщиною оболонки від 3 мм до 5 мм [34]. Під час виготовлення таких конструкцій основною вимогою є мінімізація зварювальних деформацій і залишкових напружень, що досягається застосуванням аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом у середовищі інертного газу [34].

Важливою перевагою сплаву є його стійкість до низькотемпературного руйнування. АМг6 проявляє високу термостійкість, стійкість до

термоциклювання та корозійного впливу, зберігаючи при цьому необхідну пластичність у ЗТВ.

Сплав АМг6 залишається базовим матеріалом для стільникових конструкцій відповідальних елементів, що підтверджено його багаторічним використанням у вітчизняній ракетно-космічній техніці.

2.2 Обладнання для електродинамічної обробки

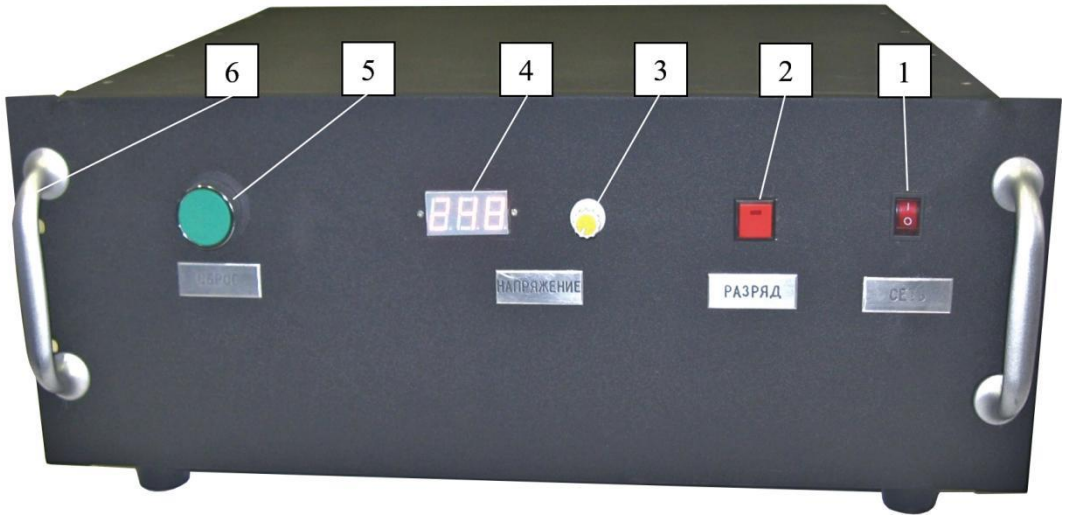
Джерело живлення для електродинамічної обробки/

Для реалізації процесу ЕДО застосовували спеціалізоване джерело живлення електричного струму. Технічні характеристики джерела живлення електричного струму наведені в таблиці 2.3

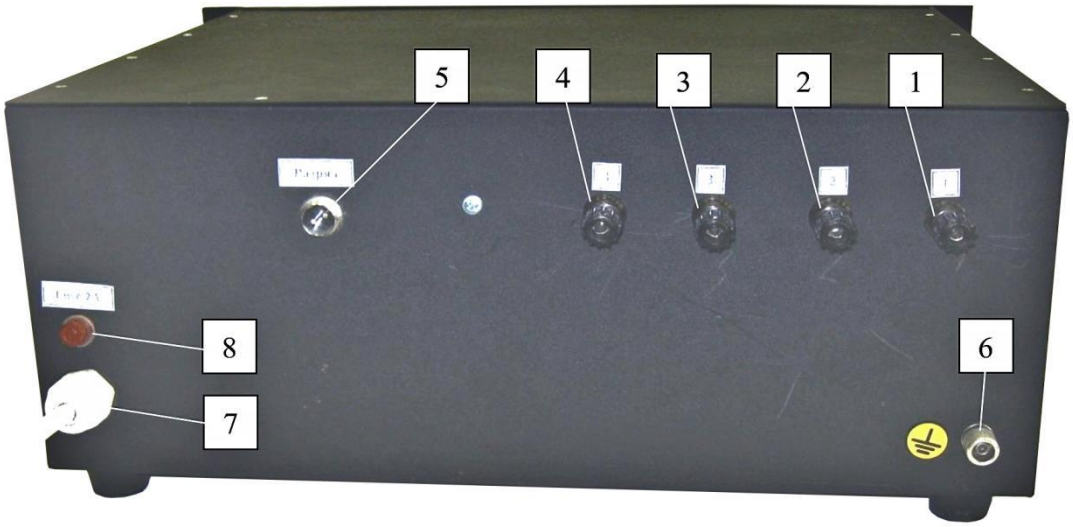
Таблиця 2.3 – Технічні характеристики джерела живлення електричного струму

№ п/п	Найменування параметра	Значення
1	Напруга однофазної живильної мережі ДЖ змінного струму частотою 50 Гц, В	1х220 (-10…+5)
2	Діапазон регулювання вихідної напруги ДЖ (плавне регулювання), В	250-800
3	Споживана потужність ДЖ, Вт	≤300
4	Максимальна вихідна енергія імпульсу, кДж	≤1,8
5	Максимальна амплітуда струму, кА	10
6	Тривалість імпульсу, мс	1-5
5	Режим роботи ДЖ – повторно-короткочасний: – час паузи перед розрядом, с	≥30
6	Час готовності ДЖ до роботи після ввімкнення в мережу, с	60
7	Час перебування у режимі постійного ввімкнення у мережу ДЖ, год	≤8
8	Габаритні розміри, мм: – джерела живлення; – електродного пристрою	500х450х200 140х140х120

Зовнішній вигляд джерела живлення електричного струму для ЕДО наведений на рис. 2.1.



а)



б)

а) вигляд з боку передньої панелі, де: 1 – вимикач «Мережа» (зі світловою індикацією); 2 – кнопка «Розряд»; 3 – регулятор «Напруга» заряду; 4 – світловий індикатор напруги; 5 – кнопка «Скидання» заряду; 6 – скоба для перенесення;

б) вигляд з боку задньої панелі, де: 1 – клема підключення навантаження 6,12 мкГн; 2 – клема підключення навантаження 10,34 мкГн; 3 – клема підключення навантаження 16,8 мкГн; 4 – клема підключення навантаження 24,1 мкГн; 5 –клема підключення ЕП; 6 – клема заземлення; 7 – мережевий кабель; 8 – плавкий запобіжник

Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд джерела живлення для ЕДО

Важливо упевнитися у надійності підключення електродного пристрою (ЕП) до одного з чотирьох виводів котушки індуктивності та до клеми «Земля» на задній панелі джерела живлення.

Перед увімкненням клавіші «Мережа» необхідно переконатися, що ручка керування величиною напруги «Напруга» знаходиться у крайньому лівому положенні.

Після увімкнення клавіші «Мережа» автоматично розпочинається заряд ємкісного накопичувача енергії (ЄНЕ). Інформація про значення напруги на ньому відображається на індикаторі «Напруга». Налаштування потрібного значення напруги здійснюється за допомогою ручки керування. При цьому збільшення заданого значення напруги потрібно виконувати плавно. У разі, якщо встановлено напругу, що перевищує необхідну, ручку керування слід плавно повернути проти годинникової стрілки та натиснути кнопку «Скидання».

Після встановлення необхідного значення напруги накопичувача можна виконувати його розряд. Для цього на передній панелі слід натиснути кнопку «Розряд».

Після відпускання кнопки автоматично розпочинається заряд ЄНЕ до того значення напруги, яке було встановлено в попередньому циклі роботи.

Після виконання останнього розряду необхідно вимкнути клавішу «Мережа», повернути регулятор напруги у крайнє ліве положення та натиснути кнопку «Скидання» із витримкою часу не менше 15 секунд.

Розряд ЄНЕ джерела імпульсів струму має аперіодичний характер. Тривалість аперіодичного процесу визначається величиною компонентів розрядного кола, до яких належать: батарея конденсаторів ємністю 5600 мкФ, індуктивність ЕП та паразитні індуктивності з’єднувальних електричних дротів, активний опір електронного приладу (тиристора) та активний опір з’єднувальних дротів.

Індуктивність котушки ЕП, яка забезпечує задану електромагнітну силу на зону контакту разом із з'єднувальними дротами становить 11 мкГн. Активний електричний опір цих елементів дорівнює 22 мОм.

Тривалість імпульсу струму аперіодичного характеру визначається від моменту початку протікання струму до досягнення його величини 400 А на спадній гілці кривої I(U).

Значення середньої тривалості імпульсу струму для різних значень індуктивності розрядного контуру наведено в таблиці 2.4.

На величину тривалості імпульсу струму, окрім індуктивності, можуть впливати й зовнішні з'єднувальні проводи.

У разі згортання провідників у бухту або утворення ними кільцевих структур індуктивність розрядного контуру змінюється непередбачувано, що призводить до зміни тривалості імпульсу та величини амплітуди струму.

Таблиця 2.4 – Значення середньої тривалості імпульсу струму для різних значень індуктивності розрядного контуру

Клема на задній панелі приладу (рис. 2.1, б)	1	2	3	4
Величина індуктивності *L* без з'єднувальних проводів, мкГн	8,2	14,3	18,5	23
Середня тривалість імпульсу струму ⟨t⟩, мкс	2000	2200	2600	2900

Електродний пристрій для електродинамічної обробки.

Для здійснення електродинамічного впливу застосовували електродний пристрій (ЕП), конструкція та зовнішній вигляд якого показані на рисунку 2.2 і 2.3.

У процесі роботи ЕП формує електричний контакт між електродом і металом через канал, яким до оброблювальної ділянки подається імпульс електричного струму (ІЕС).

Окрім цього, використання ЕП дає можливість регулювати параметри електроімпульсної та динамічної дії електрода на метал.

Вольфрамовий електрод слугує робочим елементом ЕП (рис. 2.2) та фіксується у латунному корпусі за допомогою гвинта. Полірована контактна частина електрода що взаємодіє з металом має заокруглення радіусом 15 мм, що сприяє стабільності електродного контакту.

Латунний корпус жорстко з'єднано з мідним та сталевим дисками товщиною 3 мм і 5 мм відповідно. У сукупності ці елементи разом із електродом формують ударний механізм (УМ).

УМ фіксується між двома тефлоновими підшипниками ковзання, які забезпечують його плавне вертикальне переміщення у процесі роботи.

З метою запобігання обертанню УМ навколо своєї вертикальної осі в його конструкції передбачено два гвинти, які рухаються у вертикальних канавках кільця.

Обойма жорстко з'єднана з дисками та містить котушку індуктивності, намотану мідною шиною розміром 6,2 мм × 1,5 мм і сформовану на 18 витків. Завдяки конфігурації обойми між мідним диском і обмоткою формується немагнітний зазор величиною 0,5 мм, а індуктивність катушки становить 8,2 мкГн. Обойма фіксується на основі за допомогою гвинтів.

Нижня кришка закріплюється на основі за допомогою гвинтів та гайок. На її внутрішній поверхні прикріплено гумову прокладку, що слугує для демпфування та полегшення електродинамічного удару по кришці у разі, коли електрод не впирається у метал.

Для під'єднання ЕП до джерела живлення на верхній частині основи встановлено клеми 16 і 17 (рис. 2.2). Через клему 16 IEC 1 подається до УМ гнучким проводом, тоді як клема 17 забезпечує комутацію обмотки.

ЕП передбачає два режими підключення:

– режим, що реалізує суперпозицію електроімпульсної та динамічної дій – IEC 1;

– режим чистого динамічного навантаження – IEC 2.

У випадку суперпозиції електроімпульсної та динамічної дій один із виводів обмотки (клема 17) під'єднують до плюсового проводу джерела живлення, тоді як

другий вивід через клему 16 з'єднується з УМ. Мінусовий провід джерела живлення відповідно підключається до металу, що обробляється.

Схематичний шлях проходження ІЕС 1 у режимі суперпозиції наведено на рис. 2.2 суцільною стрілкою.

У режимі чистої динамічної дії провід від джерела живлення під'єднують до виводів обмотки через клему 17, тоді як клему 16 у цьому випадку не використовують. Напрямок руху ІЕС 2 у даному режимі показано на рис. 2.2 пунктирною стрілкою.

Підвідні проводи кріпляться за допомогою фіксатора, закріпленого гвинтами на основі. Клемний відсік зверху закрито кришкою, що кріпиться до основи за допомогою гвинтів та гайок.

Принцип роботи ЕП відбувається наступним чином: торець електрода ЕП впирається у метал та позиціонується вертикально. З метою нормального функціонування ЕП у режимі пропускання ІЕС через метал (ІЕС 1), що оброблюється для запобігання іскроутворення та локальному оплавленню в зоні контакту «електрод–метал», перед подачею ІЕС потрібно забезпечити надійне притиснення електрода до поверхні виробу.

За відповідного позиціювання ЕП прикладене навантаження передається від обойми безпосередньо через УМ на вольфрамовий елктрод, забезпечуючи його притиснення до поверхні металу.

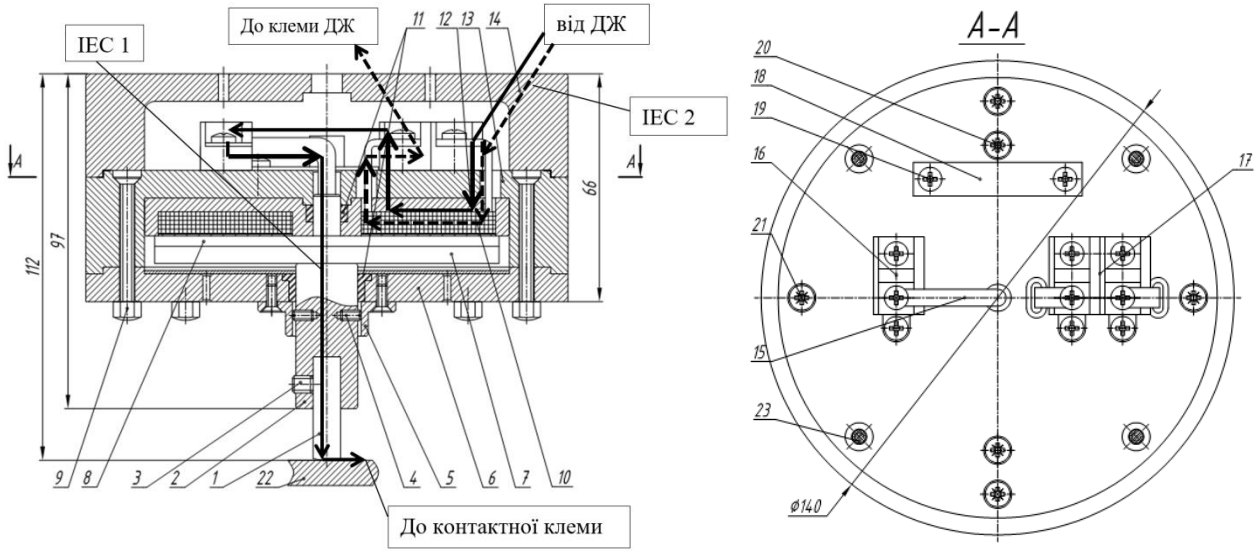
Коли через котушку індуктивності проходить ІЕС, у мідному диску формуються вихрові струми. На початку імпульсу вони спричиняють відштовхування диска від котушки, тоді як наприкінці його дії виникає протилежний ефект – диск притягується до неї.

Конструкція ЕП, що реалізує пряме пропускання ІЕС, вирізняється рядом переваг, зокрема простотою виготовлення та незначними енергетичними витратами під час розрядного циклу роботи джерела живлення.

До конструкційних особливостей ЕП належить те, що у схемі, де ІЕС подається через індуктор та електрод тривалість імпульсу динамічного навантаження менша, ніж при реалізації ІЕС-1. Крім того, така схема не

забезпечує можливості регульованої синхронізації електроімпульсної та динамічної дії.

Таким чином, конструкція обладнання для ЕДО передбачає окремі блоки джерела живлення і ЕП з плоским індуктором, скомутованих між собою.



а – вид збоку б – вид зверху

1 – вольфрамовий електрод; 2 – латунний корпус електрода; 3 – гвинт фіксації електрода; 4 – гвинти запобігання обертанню ударного механізму; 5 – напрямне кільце з вертикальними канавками; 6 – нижня кришка електродного пристрою; 7 – сталевий диск ударного механізму; 8 – мідний диск ударного механізму; 9 – гайки кріплення кришок; 10 – котушка індуктивності; 11 – тефлонові підшипники ковзання; 12 – обойма індуктора; 13 – основа електродного пристрою; 14 – верхня кришка клемного відсіку; 15 – гнучкий струмопідвідний провід; 16 – клема подавання імпульсу електричного струму до ударного механізму; 17 – клема підключення обмотки індуктора; 18 – фіксатор підвідних проводів; 19 – гвинти кріплення фіксатора; 20 – гвинти кріплення обойми до основи; 21 – гвинти кріплення нижньої кришки; 22 – оброблюваний метал; 23 – гвинти кріплення верхньої кришки

Рисунок 2.2 – Схема конструкції одноканального ЕП (стрілками вказані напрями протікання ІЕС)

Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд ЕП для ЕДО

Інструмент для виконання електродинамічної обробки зварних з’єднань.

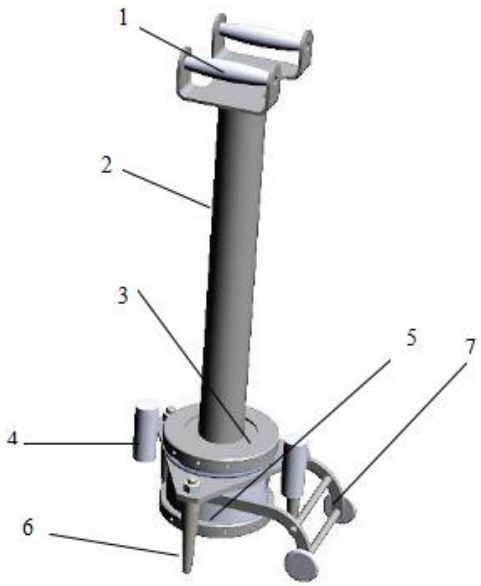
Для позиціювання ЕП відносно оброблюваної поверхні та забезпечення надійного електричного контакту робочої частини електрода в зоні ЕДО був розроблений спеціалізований ручний інструмент (рис. 2.4).

Інструмент використовується для виправлення локальних деформацій типу «опуклість», а також для ЕДО протяжних зварних з’єднань.

Конструктивними елементами інструмента є основа 2, на якій розташовані нерухома рукоятка 1 та плита кріплення ЕП – 3.

Рукоятка призначена для переміщення інструмента оператором, а на плиті закріплені: підсвітка зони ЕДО – 4, ЕП – 5, опори 6, які разом з електродом ЕП забезпечують стійке розташування інструмента на оброблювану поверхню металу.

Для ЕДО довгомірних з’єднань інструмент обладнаний транспортним візком 7, призначеним для робочих та позиціювальних переміщень ЕП уздовж зварного шва та лінії сплавлення.



1 – рукоятка, 2 – основа, 3 – плита кріплення ЕП, 4 – підсвітка, 5 – ЕП, 6 – опора, 7 – транспортний візок

Рисунок 2.4 – Ручний інструмент для ЕДО

2.3 Аналіз фізичної моделі процесу електродинамічної обробки та можливості її застосування для зварних з'єднань алюмінієвих сплавів

Підвищення експлуатаційних властивостей зварних з'єднань у результаті ЕДО зумовлене комплексним впливом таких факторів:

– зниження залишкових зварювальних напружень розтягу. У зоні обробки під дією електродинамічних сил у металі шва формуються пружні хвилі напружень. У процесі взаємодії динамічних хвиль зі статичним полем залишкових зварювальних напружень у зоні обробки виникають локальні області пластичних деформацій, що ініціюють зниження рівня залишкових напружень;

– деформаційне зміцнення пластично деформованого металу, внаслідок якого, завдяки ЕПЕ, у обробленому матеріалі підвищуються характеристики опору деформації – такі, як умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$ та границя міцності $\sigma_в$;

– зміна структури приповерхневих шарів металу. Після ЕДО в зміцненому шарі поблизу поверхні обробленого металу формуються ділянки з

дрібнозернистою структурою, еволюція якої визначається пластичним деформуванням в умовах реалізації ЕПЕ.

Підвищення експлуатаційних властивостей зварних з'єднань за рахунок релаксації залишкових напружень і поверхневого пластичного деформування металу в умовах реалізації ЕПЕ, що визначається взаємодією електроімпульсної (струмової) та динамічної складових ЕДО, можна пояснити з позицій теорії електронно-дислокаційної взаємодії – впливом електронів провідності на скупчення дислокацій в період проходження ІЕС.

Динамічне навантаження створює умови для прориву бар'єрів дислокаційних скупчень і їх розмноження, а ІЕС забезпечує просування дислокацій у процесі їхньої взаємодії з потоком електронів провідності під час проходження струму через оброблювану поверхню металу.

Пружна хвиля напружень забезпечує тимчасову синхронізацію початку процесу пластичної деформації, що зумовлена проривом бар'єрів групою дислокацій, тоді як дія ІЕС забезпечує їх просування на величину вектора Бюргерса [35] у об'ємі матеріалу, обмеженому скін-шаром.

У цих умовах можливе лавиноподібне розмноження та просування дислокацій у значних об'ємах металу, включно з ділянками поза межами скін-шару, що дає підстави розглядати процес ЕДО як об'ємний вид впливу.

Спираючись на теорію електронно-дислокаційної взаємодії, вплив ІЕС (при густині струму $j \geq 1$ кА/мм²) на електропровідні металеві матеріали визначається акумульованою енергією заряду ЄНЕ $E_з$, швидкістю наростання ІЕС – V_{IEC} та періодом часу t_{IEC} його протікання.

Величина $E_з$ задає енергетичні характеристики імпульсу, необхідні для підвищення експлуатаційних властивостей зварних з'єднань, що базується на дії комплексу факторів, які реалізуються під час ЕДО в оброблюваному металі, що виступає як навантаження в електричному колі проходження ІЕС.

Швидкість V_{IEC} визначає величину імпульсу дії ІЕС на закріплення дислокаційних скупчень, ініціюючи механізми пластичної деформації полікристалічних структур. Умовою релаксації статичних напружень під дією

динамічного навантаження, окрім досягнення величини $\sigma_{0,2}^{д}$, є певний тип швидкісної залежності пружної хвилі НДС [36], який пов'язаний зі значенням V_{IEC}.

Параметр t_{IEC} визначає часовий інтервал взаємодії електронів провідності з дислокаціями, вивільненими зі закріплень дислокаційних скупчень, у момент проходження імпульсного струму. При цьому t_{IEC} впливає на товщину скін-шару Δ, що визначає можливості реалізації ЕПЕ у певному об’ємі оброблюваного металу.

Найважливішими з перелічених параметрів ЕДО, з точки зору можливості реалізації процесу, є t_{IEC} та $E_з$. З огляду на те, що в цій роботі об’єктом дослідження є зразки зі сплаву алюмінію, актуальним є проведення наближеної оцінки значень параметрів t_{IEC} та $E_з$ режимів ЕДО, які забезпечують зниження рівня залишкових зварювальних розтягувальних напружень у з’єднаннях із цього матеріалу.

Під час вибору діапазону значень t_{IEC} враховували, що для реалізації ЕПЕ при ЕДО необхідно задавати значення, співставні з товщиною δ оброблюваних зразків, які визначаються співвідношенням:

$$\Delta \approx \delta, \text{ мм}, \tag{1.1}$$

У цьому випадку зміни значень Δ для алюмінієвих сплавів перебувають у зворотній залежності від tIEC, а в цій роботі досліджується застосування ЕДО для підвищення експлуатаційних властивостей тонколистовових зварних конструкцій за товщини δ, що не перевищує 8 мм.

Таким чином, для забезпечення співвідношення (1.1) за умови $\delta \leq 8$ мм значення tIEC становить від 1 мс до 1,5 мс під час ЕДО досліджуваних матеріалів, таких як алюмінієві сплави АМг6 та 1561. З урахуванням практично однакових механічних характеристик сплавів АМг6 і 1561, надалі всі експерименти (за винятком обробки тестових пластин завтовшки $\delta = 5$ мм і 8 мм, проводили на зразках зі сплаву АМг6.

На основі методики, наведеної в [26], було виконано наближену оцінку величини енергії, достатньої для ініціювання релаксаційних процесів під час ЕДО, спрямованих на зниження рівня залишкового НДС стикових зварних з'єднань пластин довжиною L та шириною b зі сплавів АМг6 та 1561 товщиною δ, що визначається співвідношенням (1.1) і становить 8 мм.

Ширину b приймали рівною 80 мм, що приблизно відповідає зоні пластичної деформації зварного з'єднання, а значення L задавали рівним 200 мм. Об'єм V зварних пластин, які досліджувалися становив 128 000 мм³. Для оцінювання ефективності ЕДО приймали питомий тиск $Q_т$, необхідний для пластичного деформування одиничної ділянки поверхні матеріалу [26]:

$$Q_{пл} = k\left(\sigma_{0,2}^2 \cdot \frac{\xi^2}{E_y}\right), \text{ кг/мм}^2 \quad (1.2)$$

де ξ = 2 та k = 5 – коефіцієнти, що враховують відповідно швидкість деформування та форму зразка;

$\sigma_{0,2}$ та $E_п$ – відповідно межа плинності та модуль пружності оброблюваного металу.

Тоді енергія $E_{пл}$, необхідна для пластичного деформування матеріалу об'ємом V, визначається як:

$$E_{пл} = (Q_{пл} \cdot V) \cdot 10^{-2}, \text{ Дж} \quad (1.3)$$

Об'єм пластично деформованого металу приймали рівним об'єму V досліджуваних пластин із алюмінієвих сплавів АМг6 і 1561, а енергію $E_{пл}$, необхідну для деформування об'єму V, визначали згідно з виразом (1.3).

Значення енергії $E_{пл}$, необхідне для реалізації електродинамічних впливів, приймали рівним енергії заряду ЄНЕ $E_з$, що визначається виразом:

$$E_з = E_{пл}, \text{ Дж} \quad (1.4)$$

Величину акумульованої енергії $E_з$ розраховували відповідно до наведеного виразу:

$$E_з = \left(\frac{C \cdot U^2}{2}\right) \cdot 10^{-6}, \text{ Дж} \quad (1.5)$$

де C – ємність накопичувача енергії, мкФ;

U – напруга заряду ІЕС, В.

Ємність накопичувача C приймали рівною 6600 мкФ, що забезпечувало діапазон значень енергії заряду, достатній для обробки широкого спектру товщин і матеріалів.

Із виразу (1.5) видно, що найефективнішим параметром регулювання $E_з$ під час електродинамічних впливів є напруга заряду U. Беручи до уваги вираз (1.4) і підставляючи результати обчислення $E_{пл}$ у вираз (1.6), отримували значення U, необхідні для реалізації електродинамічних впливів, які забезпечують пластичне деформування зварних пластин об'ємом 128 000 мм³ зі сплавів АМг6 і 1561.

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot E_з}{C}} \cdot 10^3, \text{ В} \quad (1.6)$$

Результати розрахунку наведено в таблиці 2.5, з якої видно, що значення U, необхідні для виконання співвідношення (1.5) при заданому значенні V пластин зі сплавів АМг6 та 1561, не перевищують 500 В.

Використовуючи вираз (1.5), виконували оцінювання впливу порогового значення U, нижче якого застосування ЕДО є недоцільним. З цією метою проводили розрахунок $E_з$, змінюючи C та U відповідно у діапазонах: C – від 1000 мкФ до 6600 мкФ, U – від 100 В до 500 В.

Залежності $E_з = f(C)$ при фіксованих значеннях U наведені на рисунку 2.5, з якого видно, що при U = 100 В зміна значень C лише незначною мірою впливає на енергію заряду. Це відповідає пологому характеру зростання кривої 1.

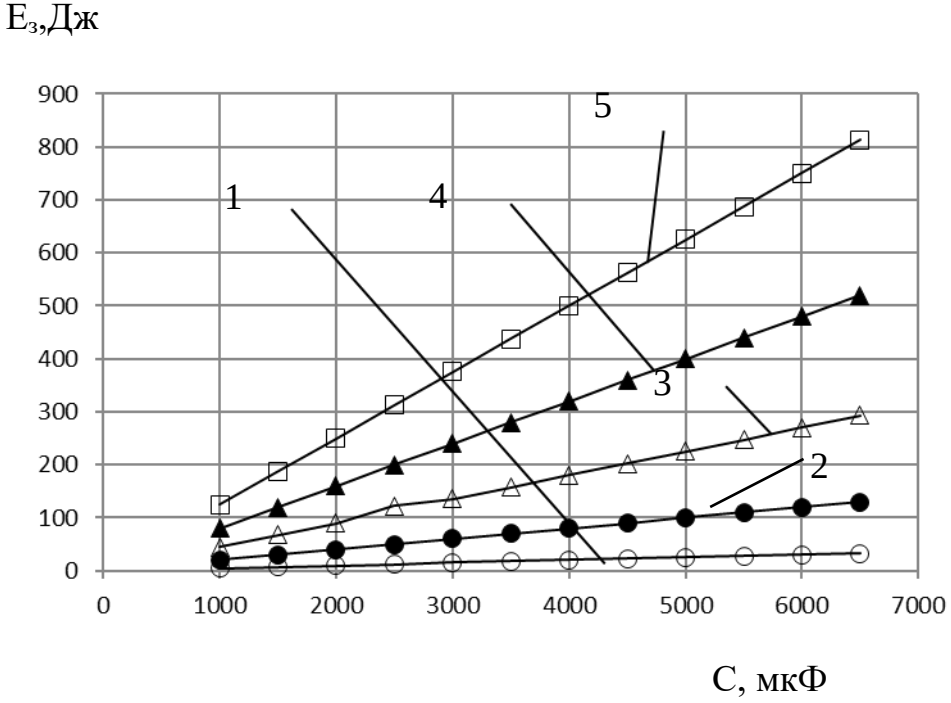
При U = 200 В спостерігається невелике збільшення $E_з$ (крива 2), інтенсивність якого зростає при підвищенні U від 300 В до 500 В (криві 3–5).

Таким чином, у всьому діапазоні значень С при U = 100 В зростання $E_з$ є практично незначним, а верхня межа значень $E_з$ не перевищує 35 Дж.

Отже, варіація С в досліджуваному діапазоні при значеннях U ≤ 100 В робить процес ЕДО малоефективним, оскільки, згідно з даними таблиці 2.5, для виконання співвідношення (1.5) для пластин із заданим об'ємом V зі сплавів АМг6 та 1561потрібні значення $E_з$, є значно більшими.

Таблиця 2.5 – Вихідні параметри та результати розрахунку енергетичних характеристик ЕДО для сплаву АМг6 та 1561

Матеріал	$\sigma_{0,2}$, кг/мм^2	$\sigma_в$, кг/мм^2	$\sigma_{0,2}/\sigma_в$	$E_п$, кг/мм^2	δ,%	$E_{пл}$, Дж	U ,В
АМг6/1561	14	30	0,48	7000	30	717	466



1 – U = 100 В, 2 – U = 200 В, 3 – U = 300 В, 4 – U = 400 В, 5 – U = 500 В

Рисунок 2.5 – Залежність енергії розряду $E_з$ від ємності накопичувача С за різних значень зарядної напруги U

На підставі попередньої розрахункової оцінки значень таких параметрів ЕДО, як U і t_{IEC}, необхідних для пластичного деформування пластин зі сплавів

АМг6 та 1561 під дією електроімпульсних навантажень, можна зробити висновок, що для виконання ЕДО необхідно дотримуватися таких умов:

– для реалізації ЕПЕ на глибину скін-шару Δ, що відповідає товщині пластин $\delta \leq 8$ мм зі сплавів АМг6 та 1561, потрібно забезпечити проходження ІЕС з періодом t_{IEC} від 1мс до 1,5 мс;

– найбільш доступним способом генерування імпульсного струму є використання ЄНЕ за фіксованого значення ємності С та варіюванням зарядної напруги U;

– для пластичного деформування пластин із зазначених матеріалів достатньою є енергія $E_{пл} \approx 700$ Дж, яка, згідно з виразами (1.4–1.6), забезпечується зарядною напругою $U \approx 500$ В при $C_{\text{-const}} = 6600$ мкФ.

2.4 Методика дослідження впливу електродинамічної обробки на напружено-деформований стан стикових зварних з'єднань зі сплаву АМг6

Необхідність регулювання залишкового жолоблення, спричиненого зварюванням у тонколистовових металевих конструкціях, є однією з актуальних проблем зварювального виробництва. Під час виготовлення нових типів конструкцій застосовуються такі матеріали та види зварювання, для яких традиційні методи забезпечення заданої точності не завжди є придатними. Водночас, в умовах зростання вартості енергоресурсів, методи виправлення (усунення) деформацій, що ґрунтуються на мінімальному енергоспоживанні, набувають все більшої актуальності.

Перспективним підходом до усунення (корекції) залишкових деформацій, що відрізняється низьким енергоспоживанням і не потребує металомісткого обладнання, є розроблення методів, заснованих на впливі ІЕС та імпульсного електромагнітного поля на зварне з'єднання.

Одним із таких методів є ЕДО, під час якої вплив ІЕС на зварне з'єднання призводить до релаксації його НДС, що визначає параметри залишкового формозмінення.

Для ЕДО зразків зварних з’єднань використовували імпульсне джерело живлення та ЕП. Під час виконання ЕДО застосовували режим, що відповідає Е = 800 Дж.

Дослідження впливу ЕДО на залишкові формозміни проводили на зразках стикових зварних з’єднань зі сплаву АМг6 товщиною δ = 4 мм розмірами 400 мм × 400 мм.

Стикові зварні з’єднання виконували способом TIG зварюванняна установці АСТВ-2М за режимами, наведеними у таблиці 2.6.

Товщина листового прокату становила 2,0 мм, 4,0 мм. Як захисний газ використовували аргон вищого сорту. Витрату газу встановлювали в межах від 17 л/хв до 21 л/хв.

Таблиця 2.6 – Режими автоматичного зварювання пластин зі сплаву АМг6 різної товщини δ, використаних для ЕДО.

№ пластини	Товщина δ, мм	Напруга дуги $U_д$,В	Зварювальний струм $I_д$, А	Швидкість зварювання, мм/с
1	2,0	20	170	5,55
2	4,0	20	200	3,33

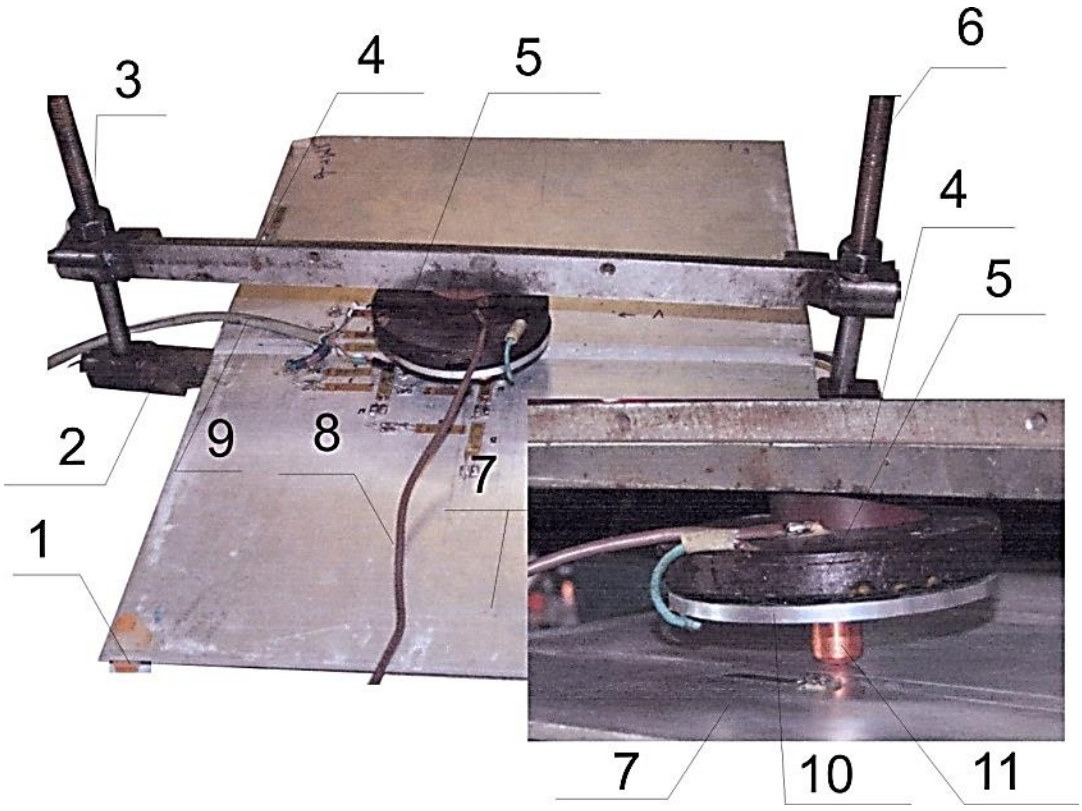
Для ЕДО зварних з’єднань використовували спеціалізоване складальне оснащення (рис. 2.6), призначене для позиціонування ЕП відносно оброблюваного перерізу зразка. Оснащення дає змогу виконувати обробку зварного з’єднання у вільному стані та після попереднього вигину.

Пристосування (рис. 2.6, а) складається з: опорної балки 2, притискної балки 4, які призначені для кріплення зразка 7 і плоского індуктора 5, а також для їх комутації в розрядне коло джерела живлення за допомогою силового кабелю 8.

Позиціонування притискної балки відносно зразка здійснювали за допомогою спрямовуючих шпильок 6, а вертикальне притискне зусилля створювали притискними гайками.

Тензометричний шлейф 9 використовували для контролю напружень під час попереднього вигину, для реалізації якого по кутах пластин встановлювали підп’ятники 1.

Для ЕДО застосовували ударний механізм ЕП, попередньо вилучений із корпусу (рис. 2.4). Взаємне розташування індуктора 5 із диском із неферомагнітного матеріалу 10 та електрода 11 показано на рисунку 2.6, б.



а) б)

а) загальний вигляд, де:1 – підп’ятник, 2 – опорна балка, 3 – притискна гайка, 4 притискна балка, 5 – ударний механізм електродного пристрою, 6 – спрямовуюча шпилька, 7 – зразок зварного з’єднання, 8 – кабель до імпульсного джерела живлення, 9 – тензометричний шлейф;

б) позиціонування УМ на зварному шві, де: 5 – індуктор, 7 – зразок, 10 – диск із неферомагнітного матеріалу, 11 – електрод

Рисунок 2.6 – Оснащення для ЕДО зварного з’єднання зі сплаву АМг6

Вивчали характер розподілу залишкових зварювальних напружень під час ЕДО як фактора, що визначає формозміни пластини при електродинамічних впливах.

2.5 Методика вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії

Напружений стан зразків стикових зварних з'єднань вимірювали безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії (рис. 2,7). Використовували метод, заснований на вимірюванні деформацій під час пружного розвантаження об'єму металу в досліджуваних точках на поверхні зразка, спричиненого свердлінням неглибоких (глухих) отворів діаметром 1,0 мм [37] із застосуванням спеціалізованого пристрою для свердління 2 (рис. 2.7).

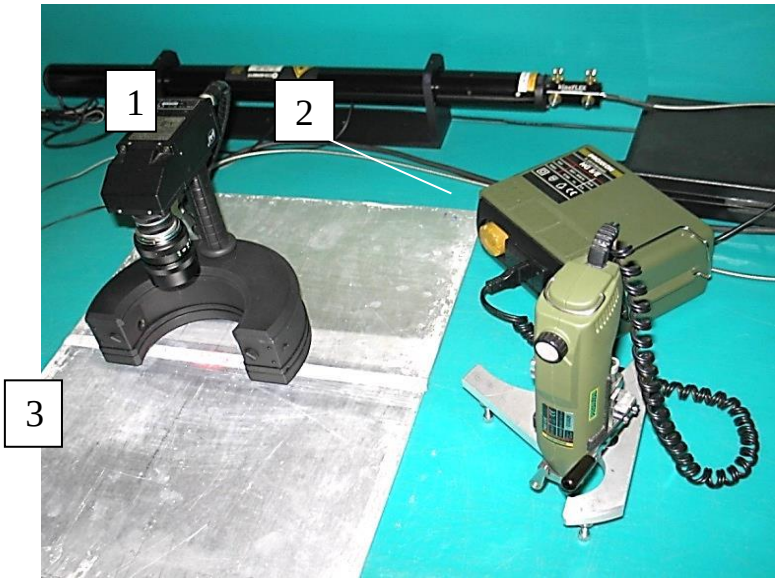
Застосовували оптичну схему інтерферометра 1, у якій досліджувана ділянка зразка 3 освітлювалася лазерним променем під одним і тим самим кутом із двох напрямків, що дозволяло визначати площинні компоненти вектора переміщень, які характеризують деформацію зразка у площині. Кут між нормаллю до точки досліджуваної поверхні та напрямком освітлення становив 57°.

Вибір цього методу зумовлений необхідністю збереження цілісності зразка після реєстрації його початкового напруженого стану. Зразки з відомим рівнем початкових напружень піддавали ЕДО, після чого повторно вимірювали кінцеві значення залишкових напружень.

Порівнюючи параметри напруженого стану до та після ЕДО на конкретному зразку зварного з'єднання, визначали ефективність електродинамічної обробки.

Для реєстрації зміни напруженого стану стикових зварних з'єднань використовували компактний інтерферометр 1, який встановлювали безпосередньо на поверхню досліджуваного зразка (рис. 2.7). До складу приладу входили такі основні компоненти: спекл-інтерферометр, CCD-камера, світловод, основа приладу з трьома конічними опорами.

Проводили оцінку зони поширення електродинамічного впливу від енергетичного виділення під час струмового розряду. З цією метою здійснювали ЕДО зони лінії сплавлення на одній із лицьових поверхонь зразка розмірами 400 мм × 500 мм при δ = 4 мм серією із п’яти ІЕС. Розташування ділянки вибирали на відстані x = 200 мм від початку шва та 15 мм від його поздовжньої центральної осі, причому усі ІЕС подавали в одну й ту саму точку.



1 – інтерферометр, 2 – пристрій для свердління, 3 – зразок зварного з’єднання

Рисунок 2.7 – Вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії на поздовжніх стикових швах

Після реєстрації початкового напруженого стану методом спекл-інтерферометрії вздовж лінії сплавлення виконували три ІЕС з подальшою оцінкою зміни значень поздовжньої (відносно лінії шва) компоненти напружень σ_x та поперечної компоненти σ_y залишкових напружень. Далі виконували ще два ІЕС з остаточною реєстрацією змін σ_x та σ_y на оброблюваній ділянці. Паралельно проводили поточні вимірювання напруженого стану вздовж необробленої лінії сплавлення, для відстеження змін напружень поза зоною дії електродинамічного впливу.

Висновки за розділом 2

1. Порівняльний аналіз хімічного складу сплавів на основі алюмінію 1561 та АМг6 свідчить, що вони близькі, тому узагальнені результати проведених досліджень та основні закономірності щодо впливу процесу електродинамічної обробки на зміну величини компонент напружено-деформованого стану отримані в результаті досліджень зварних з'єднань сплаву АМг6 можуть бути поширені на сплав 1561.

2. Обране обладнання для електродинамічної обробки та розрахунковим шляхом визначені рекомендовані параметри режиму процесу обробки стикових зварних з'єднань пластин товщиною до 8 мм зі сплаву АМг6, зокрема: час проходження імпульсного електричного струму t_{IEC} = 1–1,5 мс; зарядна напруга U = 500 В; ємність батареї конденсаторів C-const = 6600 мкФ. Підтверджений достатній рівень енергії розрядного імпульсу електродинамічної обробки $E_{пл} \approx 700$ Дж для пластичного деформування металу зазначених зварних з'єднань.

3. Обрані методики проведення досліджень впливу процесу електродинамічної обробки на характеристики та величину компонент напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань пластин зі сплавів алюмінію, для визначення величини напружень рекомендовано застосовувати метод спекл-інтерферометрії.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ВЕЛИЧИНУ НАПРУЖЕНЬ ТА ДЕФОРМАЦІЙ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

3.1 Дослідження напружень у зварних з'єднаннях до та після електродинамічної обробки

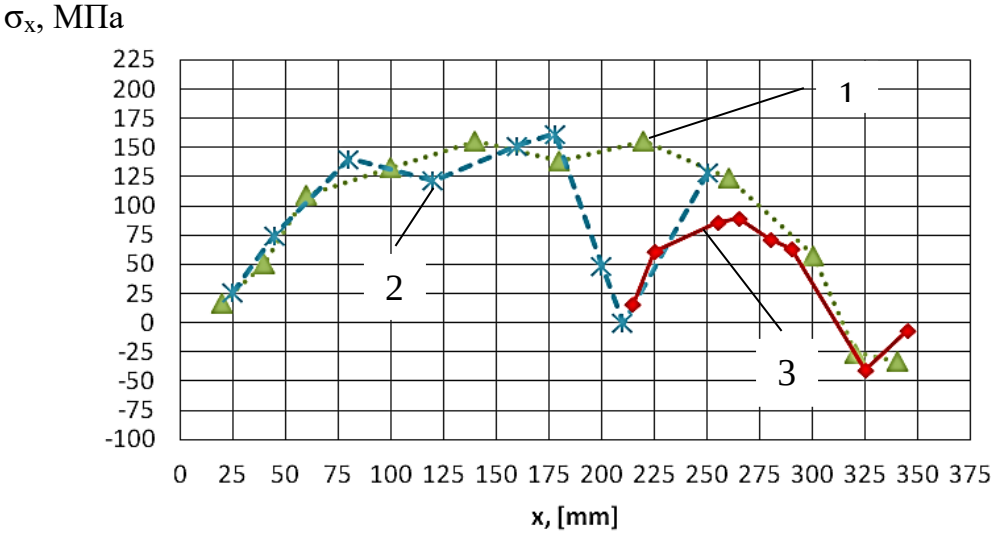
Розподіл поздовжньої компоненти напружень σ_x та поперечної компоненти σ_y вздовж ліній сплавлення зварної пластини наведено на рисунку 3.1 Аналізуючи ці дані, можна бачити, що максимальні початкові значення напружень розтягу σ_x спостерігаються в центральній частині пластини і не перевищують 150 МПа (крива 1). Водночас має місце монотонне зменшення напружень розтягу σ_x у напрямку до поперечних крайок пластини – аж до мінімальних значень, які не перевищують 25 МПа на початку шва, та переходу в напруження стиску в кінці шва – до –30 МПа.

Після трьох ІЕС (крива 2) значення σ_x у зоні ЕДО стають близькими до нуля, а довжина ділянки лінії сплавлення, яка перебуває під впливом електродинамічного навантаження, не перевищує 75 мм.

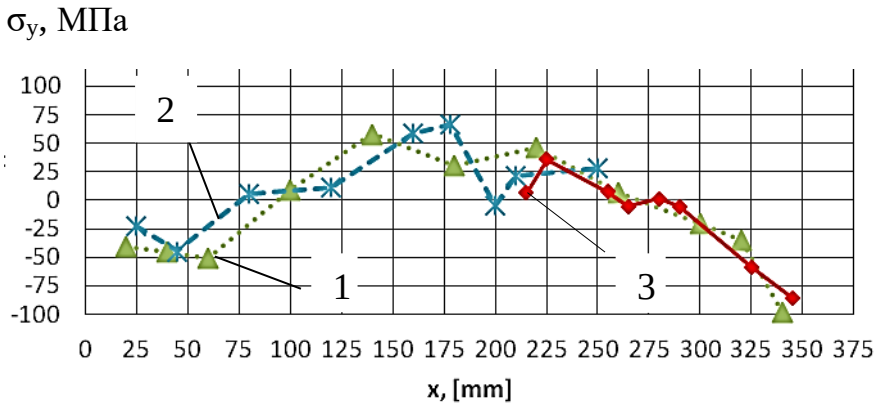
Після завершення серії з п'яти ІЕС (крива 3) спостерігається певне розширення зони впливу ЕДО, при збереженні нульових значень σx у точці контакту електрода з поверхнею зразка. Впливу ЕДО на протилежній (необробленій) ділянці лінії сплавлення не виявлено.

Розподіл початкових σy вздовж лінії сплавлення (рис. 3.1, б) загалом є подібним до наведеного для σx.

Максимальні значення напружень розтягу σy у центральній частині пластини не перевищують від 25 МПа до 50 МПа, із монотонним переходом до напружень стиску до –50 МПа на початку шва та до –100 МПа в його кінці (крива 1).



а)



б)

1– початковий напружений стан; 2 – після трьох ІЕС на відстані x = 200 мм від початку шва; 3 – після п’яти ІЕС; а) – розподіл σ_x; б) – розподіл σ_y

Рисунок 3.1 – Розподіл компонент σ_x і σ_y у зварній пластині зі сплаву АМг6 розмірами 400 мм × 500 мм при δ = 4 мм уздовж лінії сплавлення на відстані 15 мм від центра шва

Після трьох ІЕС спостерігається зниження σ_y до нульових значень, однак зона впливу ЕДО при цьому не перевищує 50 мм.

Після завершення серії з п’яти ІЕС відбувається розширення зони електродинамічного впливу зі збереженням нульових значень σ_y у точці енерговиділення та відсутністю впливу ЕДО на необробленій ділянці лінії сплавлення.

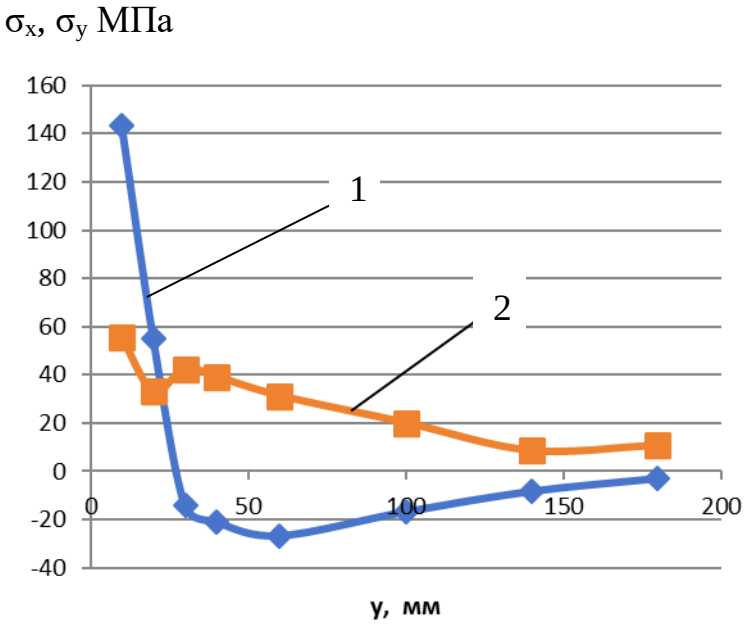
На підставі даних, наведених на рисунку 3.1, можна зробити висновок, що для забезпечення гарантованого впливу ЕДО по довжині зварного з'єднання доцільно вибирати відстань між зонами енерговиділення не більше ніж 10 мм, а для досягнення нульових значень залишкових напружень достатньо трьох електродинамічних впливів на одному локальному фрагменті поверхні пластини за режиму E = 800 Дж.

Розподіл залишкових зварювальних напружень у поперечному перерізі пластини при x = 200 мм до і після одного ІЕС наведено на рисунку 3.2. Із рисунка видно, що після обробки максимальні значення поздовжньої компоненти напружень σ_x на лінії сплавлення зменшуються від 60 % до 65 % (рис. 3.2, а), а поперечної компоненти σ_y – від 35 % до 40 % (рис. 3.2, б).

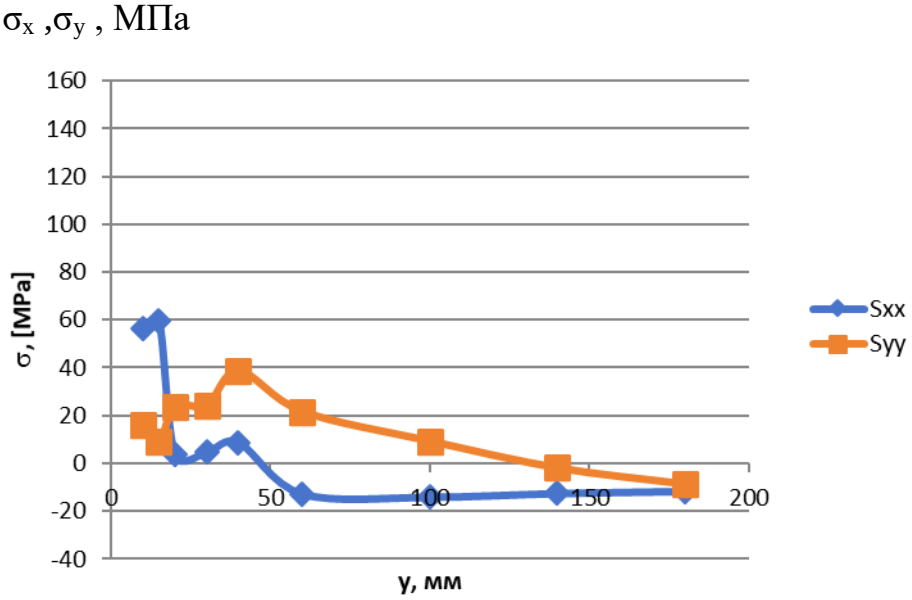
Порівнюючи характер розподілу напружень до (рис. 3.2, а) і після ЕДО (рис. 3.2, б), можна побачити, що обробка змінює монотонний характер зменшення значень напружень на немонотонний.

Немонотонний характер поздовжньої складової напружень розтягу σx після ЕДО можна пояснити дією хвиль деформацій. Так, у момент розряду ІЕС електродинамічний вплив ініціює в пластичній зоні шва радіальні та тангенціальні деформації розтягу (відносно зони контактної взаємодії електрод – контрплощина). Взаємодія цих деформацій із залишковими напруженнями шва формує результуючу пластичну складову, яка призводить до зменшення σx після обробки пластини.

Дещо іншим є вплив ЕДО на характер розподілу поперечної складової σy, що визначається суперпозицією полів пластичних деформацій, спричинених зварюванням та подальшою обробкою. Окрім зменшення абсолютних значень напружень після ЕДО, спостерігається також зміщення точки нового максимуму σy на відстань 20 мм від центра шва.



а)



б)

1 – σ_x поздовжня компонента напружень, 2 – σ_y поперечна компонента напружень; а) – початковий напружений стан; б) – після одного IEC

Рисунок 3.2 – Розподіл компонент σ_x і σ_y у зварній пластині зі сплаву АМг6 розмірами 400 мм × 500 мм при δ = 4 мм у поперечному перерізі на відстані x = 200 мм

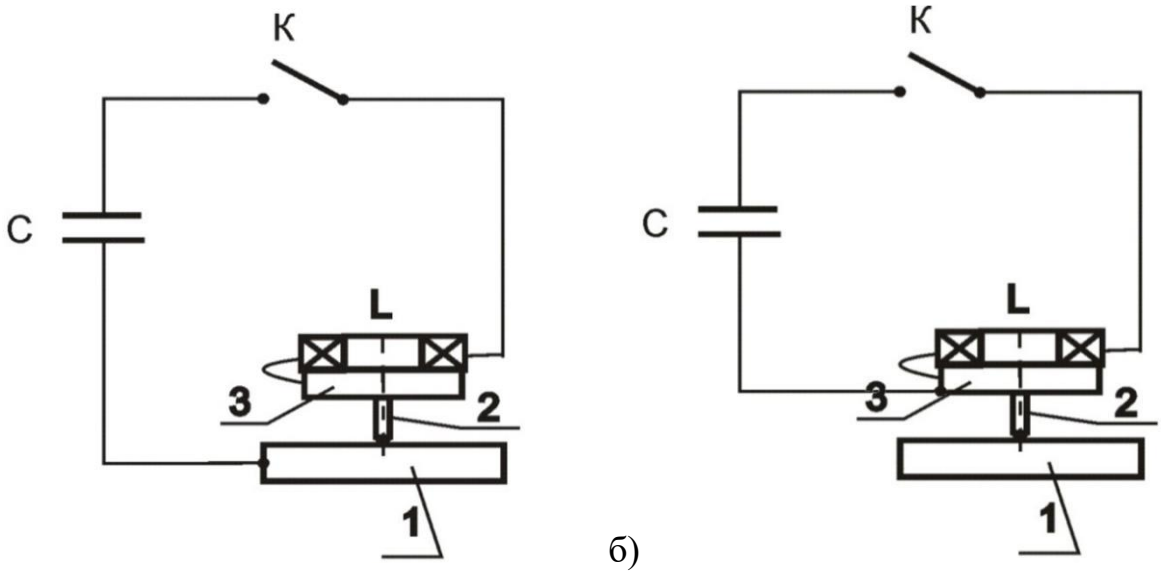
Аналізуючи дані, наведені на рисунках 3.1 і 3.2, можна зробити висновок, що ЕДО стикового з'єднання пластин знижує рівень залишкових зварювальних напружень, що є фактором впливу на зменшення спотворення форми пластин, що зварені.

3.2 Дослідження рівня пластичних деформацій та механізму корекції геометричної форми зварних пластин при електродинамічній обробці

Для дослідження механізму корекції зварних з'єднань методом «розрізування» вивчали розподіл залишкових пластичних деформацій $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$, ініційованих ЕДО у пластині (рис. 2.6, а), обробленій у центрі шва та по основному металу на відстані 20 мм від шва.

Реєстрацію $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$ здійснювали шляхом зняття показників механічного деформометра (з базою 25 мм) після зварювання та виконання розрізу, що дало можливість виділити з сумарних пружно-пластичних деформацій пластини $\varepsilon_{пл}^{\Sigma}$ пластичну складову $\varepsilon_{пл}$, яка визначає внесок електродинамічного впливу у формозміну пластин з метою їх корекції.

Досліджували характер розподілу компоненти (згину) сумарних поздовжніх (відносно лінії шва) деформацій ε^{Σ} на поверхнях зварної пластини (рис. 2.6, а), отриманого внаслідок збільшення електродинамічної дії під час ЕДО лицьового та зворотного боків зразка, виконуваної за схемою пропускання струму через зразок (рис. 3.3, а).



а) б)

а) ІЕС проходить через плоский індуктор L, диск 3, електрод 2 та зразок металу 1, де С – ємнісний накопичувач енергії, К – контактор; б) ІЕС проходить через L та диск

Рисунок 3.3 – Схеми розрядного контуру для ЕДО

Реєстрували ε^{Σ} (рис. 3.4, а) на лицьовій та зворотній поверхнях пластини (відповідно криві 1 і 2) після ЕДО серією з трьох ІЕС на зовнішній поверхні в центрі шва, як показано стрілкою на рисунку 3.4, б. Далі реєстрували зміни ε^{Σ} після ЕДО трьома ІЕС на зовнішній поверхні основного металу пластини на відстані 20 мм (рис. 3.4, г), які наведено на рисунку 3.4, в. Аналогічні вимірювання ε^{Σ} виконували після ЕДО серіями по три ІЕС у зоні кореня шва (рис. 3.4, е) та на поверхні пластини з боку кореня (рис. 3.4, к), результати яких подано на відповідних графіках – рисунок 3.4, д та рисунку 3.4, ж.

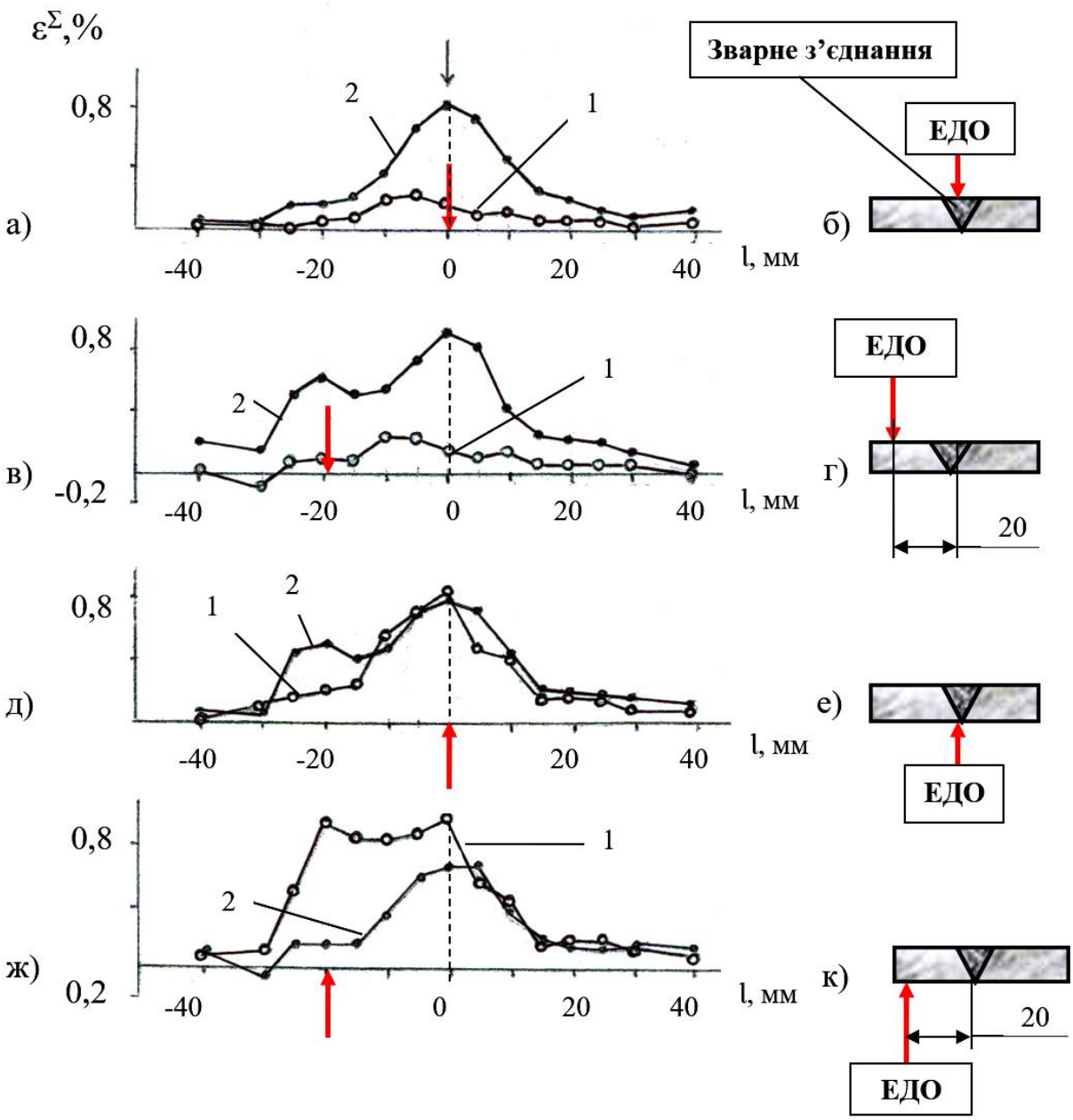
Аналізуючи дані, наведені на рисунку 3.4, а, в, д, ж, можна побачити, що спільною особливістю розподілу ε^{Σ} на всіх етапах ЕДО є те, що сумарні деформації мають розтягувальний характер і, відповідно, ініціюють поля залишкових стискальних напружень у контактній зоні електродинамічного впливу. Водночас характер розподілу компонент згину ε^{Σ} на зовнішній та зворотній поверхнях зварної пластини суттєво відрізняється, а інтенсивність зростання ε^{Σ} на контрплощині на всіх стадіях ЕДО є вищою, ніж на площині введення. У цьому випадку площиною введення є оброблювана поверхня

пластини, а контрплощиною – поверхня, яка не піддається обробці. Таким чином: на схемах, наведених на рисунку 3.4, б, г, зовнішня поверхня пластини є площиною введення, а зворотна поверхня – контрплощиною; на рисунку 3.4, е, к – навпаки.

Після реалізації першого етапу ЕДО сумарні деформації ε^{Σ} на контрплощині в зоні контактної взаємодії після трьох ІЕС у центрі шва (рис. 3.4, б) перевищують 0,8 % (рис. 3.4, а, крива 2), тоді як на площині введення – становлять близько 0,2 % (крива 1).

Аналогічний характер розподілу ε^{Σ} спостерігається і після другого етапу ЕДО – обробки трьома ІЕС основного металу на зовнішній поверхні пластини (рис. 3.4, г), де значення ε^{Σ} на контрплощині та площині введення досягають відповідно 0,6 % і 0,2 % (рис. 3.4, в).

Більші значення ε^{Σ} за кривою 2 у зоні шва пояснюються вищою чутливістю литої структури металу шва до електродинамічних впливів порівняно зі зміцненою структурою основного металу.



криві 1 і 2 відповідають значенням ε^{Σ} на зовнішній та зворотній поверхнях пластини: а – ε^{Σ} після ЕДО зовнішньої поверхні шва відповідно до схеми б; в – ε^{Σ} після ЕДО зовнішньої поверхні основного металу відповідно до схеми г; д – ε^{Σ} після ЕДО зворотної поверхні шва відповідно до схеми е; ж – ε^{Σ} після ЕДО зворотної поверхні основного металу відповідно до схеми к

Рисунок 3.4 – Графіки розподілу компонент згину сумарних деформацій ε^{Σ} пластини зі сплаву АМг6

Після ЕДО кореня шва, коли зовнішня (лицьова) поверхня є контрплощиною (рис. 3.4, е), у зоні обробки спостерігається зростання значень ε^{Σ}

на її поверхні до 0,8 % (рис. 3.4, д, крива 1), яке супроводжується незначним зменшенням ε^{Σ} на площині введення (рис. 3.4, д, крива 2).

Таку поведінку можна пояснити суперпозицією полів пластичних деформацій, спричинених попередніми електродинамічними впливами (рис. 3.4, б) та поточними впливами (рис. 3.4, е).

Після завершального етапу ЕДО (рис. 3.4, к) значення ε^{Σ} у зоні обробки основного металу на контрплощині та на поверхні шва вирівнюються і досягають 0,9 % (рис. 3.4, ж, крива 1).

Ефект вирівнювання ε^{Σ} у шві та основному металі пов’язаний із тим, що завершальній ЕДО піддавали метал, який був попередньо пластифікований електродинамічною дією, реалізованими на етапі, наведеному на рисунку 3.4, г.

Таким чином, попереднє підвищення пластичності оброблюваного металу збільшує його схильність до деформування, що позитивно впливає на ефективність ЕДО.

Водночас суперпозиція полів пластичних деформацій, отриманих у результаті попередніх та поточного етапів ЕДО, призводить до зниження пікових значень ε^{Σ} на площині введення до 0,6 % (рис. 3.4, ж, крива 2).

Узагальнюючи дані, наведені на рисунку 3.4, можна зробити висновок, що електродинамічна дія розподіляється в об’ємі оброблюваного матеріалу, причому переважна дія ЕДО спостерігається на контрплощині в напрямку нормалі до площини введення.

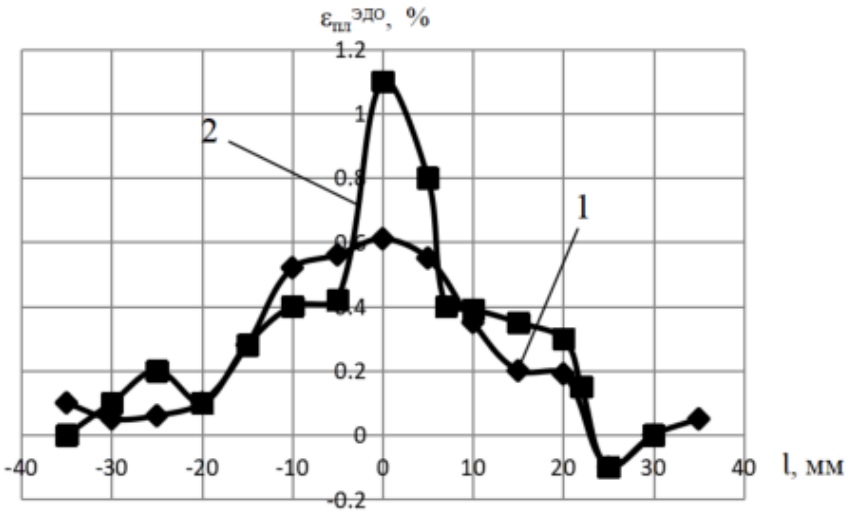
Водночас значення ε^{Σ} суттєво перевищують протилежні за знаком величини $\varepsilon_{пл}^{зв}$, унаслідок чого в зоні ЕДО формуються результуючі моменти, які викликають деформацію вигину, та забезпечують корекцію деформацій вигину, спричинених зварюванням.

Таким чином, застосування електродинамічної дії з метою створення нерівномірних по товщині пластичних деформацій дає змогу сформувати деформації вигину, протилежні за знаком зварювальним, і, відповідно, коригувати вихідну формозміну зварних пластин у потрібному напрямку.

Враховуючи дані рисунку 3.4, електродинамічний вплив необхідно ініціювати в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні з боку пластини, протилежного напрямку її вигину.

Проводили дослідження впливу суперпозиції струмової та динамічної складових ЕДО у порівнянні з дією чисто динамічного навантаження. З цією метою пластини (рис. 2.6) обробляли серіями з п’яти ІЕС у центрі шва за відповідними схемами, наведеними на рисунку 3.3, а та 3.3, б.

Розподіл залишкових пластичних деформацій єпл-ЕДО у пластині (рис. 3.5) підтверджує домінування впливів, що виникають при ЕДО із суперпозицією динамічної та струмової складових (крива 2), порівняно з дією лише динамічного навантаження (крива 1).



1 - динамічний вплив; 2 - сумісна дія електроімпульсного та динамічного впливів

Рисунок 3.5 – Розподіл пластичних деформацій $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$ у центральному поперечному перерізі зварної пластини (х = 200 мм) зі сплаву АМг6 розмірами 400 мм × 150мм × 2 мм, ініційованих ЕДО у центрі шва

З рисунку 3.5 видно, що пікові значення єплЕДО при динамічному навантаженні (крива 1) та при суперпозиції впливів (крива 2) становлять відповідно 0,6 % і 1,05 %.

Розглядаючи отримані результати з позицій фізичної моделі ЕДО, що ґрунтується на теорії електронно-дислокаційної взаємодії, можна зробити

висновок, що менша величина $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$, отримана при виключно динамічній дії, пов'язана з відсутністю ЕПЕ.

У цьому випадку величина $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$ визначається лише вивільненням дислокаційних скупчень від закріплень, що ініціює механізми ковзання в полікристалічній структурі металу.

За наявності ж електроімпульсної складової впливу ІЕС, який проходить крізь зону ЕДО, забезпечує дрейф дислокацій, вивільнених унаслідок динамічного навантаження, завдяки їхній взаємодії з електронами провідності. Це збільшує величину вектора Бюргерса [35] і, відповідно, підвищує отримані значення $\varepsilon_{пл}^{ЕДО}$.

Висновки за розділом 3

1. Для забезпечення ефективного впливу процесу електродинамічної обробки на регулювання величини напружень стикових зварних з'єднань пластин товщиною до 4 мм зі сплаву АМг6 необхідно забезпечувати відстань між зонами енерговиділення не більше за 10 мм по довжині зварного з'єднання. Для зменшення величини значень залишкових післязварювальних напружень до нуля, за обраних умов, достатньо трьох електродинамічних впливів на одному локальному фрагменті поверхні пластини за режимом E = 800 Дж.

2. Встановлено, що у поперечному перерізі пластини при x = 200 мм після одного імпульсу електричного струму електродинамічної обробки максимальні значення поздовжньої компоненти напружень σ_x на лінії сплавлення зменшуються на 60–65 %, а поперечної компоненти σ_y – на 35–40 % у порівнянні з початковими значеннями. Окрім зменшення абсолютних значень напружень після електродинамічної обробки спостерігається зміщення точки нового максимуму σ_y на відстань 20 мм від центру шва.

3. Аналіз результатів досліджень свідчить, що в процесі електродинамічної обробки формуються сумарні деформації ε^{Σ} розтягу, що призводить до формування напружень стиску на ділянці електродинамічного впливу. Однак, характер розподілу компонент сумарних деформацій ε^{Σ} на зовнішній та зворотній поверхнях зварного з'єднання пластин відрізняється. Інтенсивність зростання

сумарних деформацій ε^{Σ} на контрплощині вища ніж на площині введення на всіх стадіях електродинамічної обробки.

4. Застосування електродинамічного впливу дає змогу сформувати деформації вигину, протилежні за знаком зварювальним, і, відповідно, коригувати вихідну формозміну зварних пластин у потрібному напрямку.

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ФОРМОЗМІНИ ЗРАЗКІВ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ, ТЕХНОЛОГІЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

4.1 Вибір послідовності електродинамічної обробки та корекції формозмін зварних з'єднань зі сплаву АМг6

Визначали найбільш раціональну послідовність виконання електродинамічних впливів для досягнення максимальної ефективності корекції формозміни методом ЕДО. З цією метою проводили оцінку впливу розташування зони обробки на зварному шві та схеми виконання ІЕС на зниження початкового рівня жолоблення зразків.

Вибір зварного шва як зони для ЕДО обґрунтовується тим, що було показано: максимальна ефективність електродинамічного впливу досягається тоді, коли ЕДО застосовується до металу, який має рівень розтягувальних напружень, близький до $\sigma_{0,2}$, що є характерним для центральної частини зварного з'єднання.

Таким чином, з метою виконання ЕДО доцільно обробляти зону підсилення зварного шва.

Для вибору оптимальної схеми ЕДО з метою зниження залишкового жолоблення після зварювання використовували зразки зварних з'єднань зі сплаву АМг6, описані у п.п. 2.4.

Після встановлення зразків у пристосування (рис. 2.6) виконували серію ІЕС з подальшою оцінкою зміни геометричних характеристик зварних з'єднань у результаті ЕДО.

Як оцінювальні характеристики формозміни реєстрували вихідні (після зварювання) значення:

– поздовжніх прогинів зразків уздовж вільних крайок – f_1 і f_3;

– уздовж шва – f_2;

– а також величини поперечних прогинів – на початку шва $\Delta_п$ та в кінці шва $\Delta_к$ зварного шва, як показано на рисунку 4.1, а.

Після проведення ЕДО реєстрували значення параметрів формозміни після обробки – $f_{1e}…f_{3e}$, $\Delta_{пе}$ та $\Delta_{ке}$, які разом із початковими значеннями наведено в таблиці 4.1.

Вивчали три схеми ЕДО, які визначали послідовність виконання та місце прикладання ІЕС.

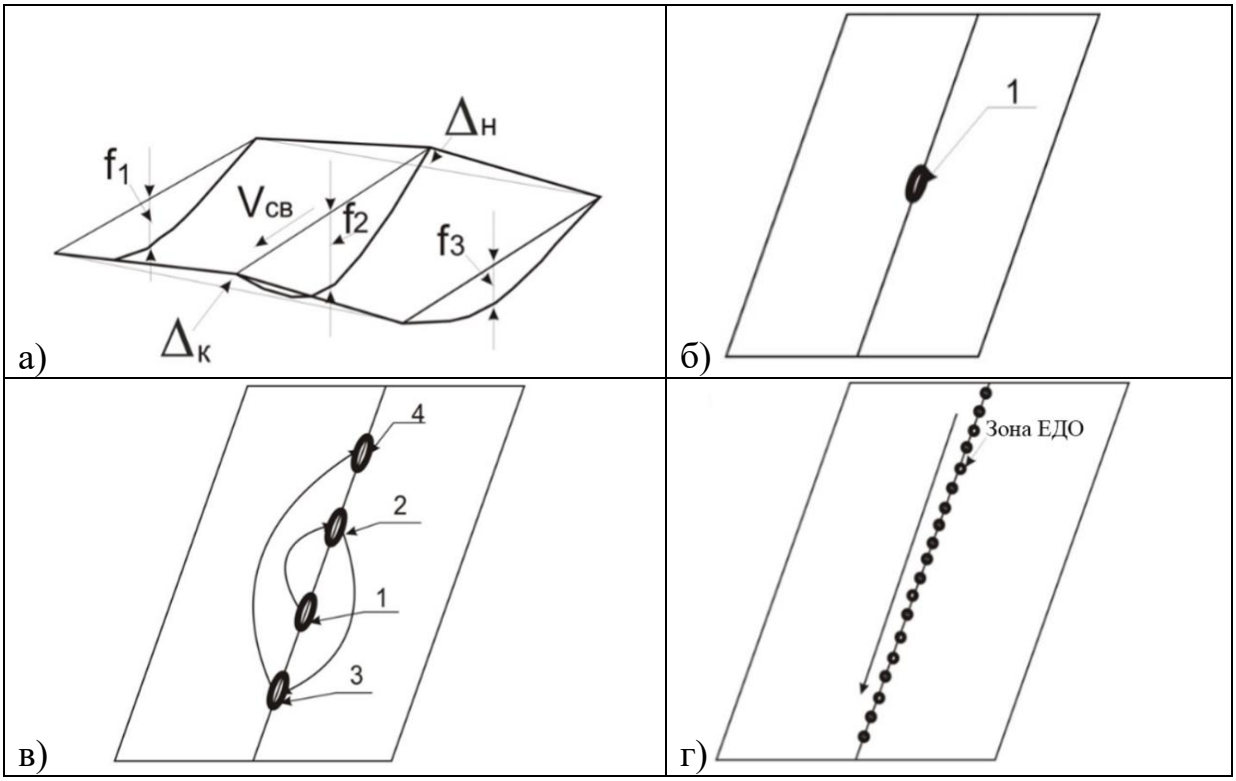
При реалізації першої схеми цикл ЕДО, що складався з 5 ІЕС, виконували в локалізованій зоні зварного шва (рис. 4.1, б; схема ЛОК).

У другій схемі цикл ЕДО здійснювали на лицьовій поверхні шва в напрямку «на прохід» (рис. 4.1, г; схема НПР).

Третю схему реалізовували шляхом прикладання чотирьох циклів ЕДО уздовж лінії шва в напрямку «від середини до крайок» (рис. 4.1, в; схема ВСК).

Під час реалізації схеми ЛОК виконували обробку центральної частини зварного шва (рис. 4.1, б), що давало змогу сконцентрувати електродинамічну дію на обмеженій ділянці шва, прикладаючи її у зоні, яка відповідає максимальному значенню поздовжнього прогину f_2 (рис. 4.1, а).

Ця схема характеризується мінімальною трудомісткістю, оскільки не потребує переміщення електрода вздовж шва. Водночас ефективність ЕДО знижується з кожним наступним ІЕС, прикладеним до фіксованої ділянки поверхні шва. Це пов’язано з тим, що загальна результативність електродинамічної обробки з точки зору релаксації напружень безпосередньо залежить від початкового рівня напружень σ_0 в оброблюваному металі. Таким чином, кожен наступний ІЕС у циклі ЕДО діє на метал, у якому величина σ_0 зменшилася внаслідок попереднього імпульсу, а отже – його вплив на релаксацію НДС пластини поступово слабшає.



а – геометричні характеристики формозміни; б – схема локалізована зона зварного шва (ЛОК); в – схема від середини до крайок (ВСК); г – схема на лицьовій поверхні шва в напрямку «на прохід» (НПР); $f_1 \ldots f_3$ – поздовжні прогини; $\Delta_п$ і $\Delta_к$ – поперечні прогини; 1...4 – послідовність виконання ІЕС; стрілками показаний напрямок ЕДО

Рисунок 4.1 – Схеми електродинамічної обробки стикових зварних з’єднань зразків та геометричні характеристики формозміни

Аналіз залишкових формозмін зварних пластин зі сплаву АМг6, оброблених за схемою ЛОК, показав, що до оброблення зразки мали характерну параболічну форму поздовжніх прогинів величиною до 2,5 мм, а поперечних – від 2,5 мм до 3,5 мм. Після проведення ЕДО залишкові значення поздовжніх і поперечних прогинів зменшилися в середньому на 60 % (рядок 1 табл. 4.1).

Порівняння значень f_2 та f_{2e} свідчить, що максимальний ефект обробки, який визначає залишкові прогини пластини після ЕДО, досягається саме в зоні зварного з’єднання – у ділянці, де початкові величини прогинів, як і рівень залишкових зварювальних напружень, є найбільшими.

Під час ЕДО за схемою НПР (рис. 4.1, г) досліджували зміну прогинів пластин під час поступового переміщення інструмента вздовж шва у напрямку «на прохід» – від початку до кінця з’єднання. Поздовжнє переміщення торця

електрода виконували вздовж лінії шва з кроком 15 мм таким чином, щоб на кожну ділянку оброблюваної поверхні припадало одне електродинамічне навантаження. Ця схема ЕДО є найбільш трудомісткою серед досліджених, оскільки потребує багаторазового позиціювання ЕП вздовж шва.

Аналіз прогинів зварних пластин зі сплаву АМг6 після ЕДО за схемою НПР показав, що після обробки значення $f_1 – f_3$ зменшилися до приблизно 2,0 мм, тоді як величина Δ зросла до 3,9 мм (рядок 2 табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Поздовжні (f) і поперечні (Δ) прогини пластин після зварювання та ЕДО

№	Поздовжній прогин f, мм			Поперечний прогин Δ, мм		Схема ЕДО	Поздовжній прогин f після ЕДО, мм			Поперечний прогин Δ після ЕДО, мм	
	f_1	f_2	f_3	$\Delta_п$	$\Delta_к$		f_{1e}	f_{2e}	f_{3e}	$\Delta_{пе}$	$\Delta_{ке}$
1.	2,5	2,5	2,5	2,5	3,5	ЛОК	1,1	1,0	1,2	1,1	1,2
2.	2,5	2,6	2,4	2,4	3,2	НПР	2,2	2,0	2,2	2,2	3,9
3.	2,4	2,6	2,6	2,6	3,4	ВСК	-0,5	0	-1,1	-2,3	-0,6

Примітка: ЛОК – схема ЕДО з локалізованим впливом у центрі шва; НПР – схема у напрямку «на прохід»; ВСК – схема у напрямку «від середини до країв».

Використання схеми ВСК (рис. 4.1, в) поєднує переваги двох попередньо розглянутих схем – ЛОК і НПР. Так, перевагою схеми ЛОК є мала трудомісткість завдяки відсутності потреби переміщувати електрод уздовж стикового шва, тоді як перевага схеми НПР полягає у можливості обробки поверхні шва по всій його довжині.

Схему ВСК реалізовували шляхом обробки чотирьох ділянок поверхні шва на зварних пластинах у послідовності «від середини до країв». На кожній із цих ділянок виконували цикл ЕДО, що складався з п’яти ІЕС. Аналіз значень залишкових формозмін зварних пластин зі сплаву АМг6 після ЕДО за схемою ВСК показав, що після обробки поздовжні прогини в зоні шва зменшилися до нульових значень, а поперечні – до рівня формозміни протилежного знака (рядок 3 табл. 4.1).

Використання схеми ВСК для зразків зі сплаву АМг6 забезпечує незначну за величиною зворотну кривизну досліджуваних пластин за наявності супутніх залишкових прогинів поперечних крайок. Аналіз даних таблиці 4.1 показує, що найбільш ефективною схемою електродинамічної обробки є саме схема ВСК.

Попереднє навантаження навколошовної зони зварюваних листів пружним вигином дає можливість регулювати залишкові формозміни тонколистових конструкцій зі сплаву АМг6. Звідси можна дійти висновку, що попередній вигин зварних пластин перед виконанням ЕДО здатний підвищити ефективність обробки. Це пов'язано з тим, що під час реалізації зворотного вигину до зварної конструкції прикладається зовнішнє навантаження, яке сприяє переходу пружної складової деформації зварної пластини у пластичну в процесі дії електродинамічного імпульсу.

4.2 Дослідження впливу попереднього вигину на ефективність виправлення прогинів зварних з'єднань

Завданням була оцінка впливу попереднього вигину на ефективність ЕДО стикових зварних з'єднань.

На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що для пластин зі сплаву АМг6 параметри вигину мають відповідати таким значенням σ_0 в області пружного навантаження, які є близькими до $\sigma_{0,2}$.

Вивчали ефективність обробки методом ЕДО зварних пластин, попередньо задаючи величину їх поздовжнього прогину $f^*_{пр}$ у напрямку, протилежному прогину від зварювання. Попередній вигин пластин виконували в центральній частині зварного з'єднання, використовуючи складальне пристосування, наведене на рисунку 2.6, а, а величину $f^*_{пр}$ задавали шляхом регулювання висоти опор 1 (рис.2.6, а), розташованих по краях пластин. У цьому випадку значення $f^*_{пр}$ визначали як стрілку прогину пластини після прикладення вертикального навантаження.

Вигин здійснювали шляхом контакту торця електрода плоского індуктора з поверхнею пластини в центральній частині з'єднання. Після досягнення заданих

значень $f^*_{пр}$ виконували контроль поздовжньої складової стискуючих напружень σ_x уздовж лінії сплавлення, що виникали на поверхні пластини внаслідок вигину. При цьому значення $\sigma_x = 0$ відповідало прогибу f_2 пластини від зварювання в зоні шва.

Слід зазначити, що оцінку впливу початкового навантаження на ефективність ЕДО виконували, задаючи значення σ_0 для пласких зразків в області розтягу, тоді як на поверхні пластин після вигину спостерігали стискуючі σ_x.

Реєстрацію значень σ_x виконували з використанням дротового тензорезистора, який наклеювали на поверхню пластин у зоні ЕДО, та тензометричного тракту тензостанції ІДЦ-10. Значення $f^*_{пр}$ і σ_x наведено в таблиці 4.2.

Цикл ЕДО, як і в попередніх експериментах, складався з п’яти ІЕС, які виконували на пластині за схемою ЛОК, з подальшою реєстрацією формозміни, отриманої в результаті обробки.

Значення початкових поздовжніх прогинів пластин $f_1 – f_3$, а також значення після обробки – $f_{1e} – f_{3e}$ (де f_2 та f_{2e} відповідають прогинам у зоні шва), початкові значення поперечних прогинів пластин на початку та в кінці шва – $\Delta_п$ і $\Delta_к$, а також значення після ЕДО – $\Delta_{пе}$ і $\Delta_{ке}$, наведено в таблиці 4.2.

Слід зазначити, що задані значення $f^*_{пр}$ при співвідношенні $\sigma_x = –0,3 \cdot \sigma_{0,2}$ для всіх досліджуваних матеріалів не призводять до помітного зменшення параметрів залишкового жолоблення пластин.

На підставі даних таблиці 4.2 можна бачити, що при досягненні значення $\sigma_x = –0,6 \cdot \sigma_{0,2}$ на зразку зі сплаву АМг6 (рядок 1) та відповідного прогину $f_{пр} = –2,5$ мм, поздовжня складова формозміни, що визначається значеннями $f_{1e} – f_{3e}$, зменшується на 70%, а поперечна – $\Delta_{пе}$ та $\Delta_{ке}$ – на 60%. Максимальні значення складових залишкового прогину отримано після ЕДО при $\sigma_x = –\sigma_{0,2}$ (рядок 2), що відповідає $f_{пр} = –5,5$ мм, де зменшення формозміни забезпечило практично повне вирівнювання пластини.

Отримані результати свідчать про те, що максимальна ефективність електродинамічного впливу для сплаву АМг6 досягається при початкових значеннях напружень, близьких до – $\sigma_{0,2}$.

Згідно з даними таблиці 4.2 можна зробити висновок, що ЕДО з попереднім вигином зварних пластин, який створює на поверхні шва напруження на рівні межі плинності матеріалу, дозволяє практично усунути залишкове жолоблення поздовжніх зварних з'єднань зі сплаву АМг6.

Порівнюючи дані таблиці 4.1 і таблиці 4.2, можна дійти висновку, що ЕДО за умови попереднього вигину при значеннях σ_x, близьких до $\sigma_{0,2}$, за ефективністю співставна з обробкою за схемою ВСК, проте є більш технологічною, оскільки не потребує переміщення індуктора вздовж лінії шва.

Водночас трудомісткість ЕДО з використанням попереднього вигину є нижчою, ніж за схемою ВСК, адже не потребує багаторазового позиціювання електрода уздовж шва.

Таблиця 4.2 – Вплив попереднього поздовжнього вигину $f^*_{пр}$ на залишкові формозміни зварних пластин під час ЕДО

№	Поздовжній прогин f після зварювання, мм			Поперечний прогин після зварювання Δ, мм		Вигин $f^*_{пр}$, мм	Напруження σ_{xx}, МПа	Поздовжній прогин f_e після ЕДО, мм			Поперечний прогин після ЕДО, Δ_e, мм	
	f_1	f_2	f_3	$\Delta_п$	$\Delta_к$			f_{1e}	f_{2e}	f_{3e}	$\Delta_{пе}$	$\Delta_{ке}$
1.	2,5	2,6	2,5	2,4	3,8	-2,5	-90	0,7	0,8	0,7	1,0	1,4
2.	2,4	2,7	2,6	2,6	3,4	-5,5	-145	0,1	0	0,2	0,2	0,2

Результати досліджень електродинамічної обробки поздовжніх і поперечних зварювальних деформацій, а також локальних опуклостей стали основою для розроблення технологічних рекомендацій щодо ЕДО зварних з'єднань.

4.3 Технологічні рекомендації по виконанню виправлення зварних з’єднань ЕДО

1. Загальні положення

1.1. Перед виконанням ЕДО зварних з’єднань очистити оброблювану зону від сторонніх предметів, інструменту, кабельних та шлангових магістралей з метою забезпечення вільного переміщення транспортного візка.

1.2. Забезпечити доступ ЕП до зони обробки на відстань не менше 20 мм від лінії сплавлення зварного шва.

1.3. Зачистити поверхню зони електричного контакту ЕП та струмові клеми абразивним електроінструментом від ґрунтівки, фарби та оксидної плівки до металевого блиску. Допускається застосування металевої щітки.

1.4. Для зменшення місцевих оплавлень під час ЕДО забезпечити гарантоване притискання ЕП зусиллям не менше 20 кг до оброблюваної поверхні в момент розрядного циклу роботи джерела живлення.

1.5. Для зменшення місцевих оплавлень під час ЕДО використовувати прокладки товщиною δ від 0,5 мм до 1,0 мм із міді електротехнічної марки М1 (М2), розташовані між ЕП і оброблюваною поверхнею в момент циклу розряду роботи джерела живлення.

1.6. Забезпечити надійне закріплення струмової клеми шляхом її фіксації стопорним болтом на листах або елементах силового набору. Рекомендована відстань між ЕП та струмовою клемою становить від 1 м до 1,5 м.

1.7. Рекомендується виконувати правку методом ЕДО в нижньому положенні позиціювання ЕП на оброблюваній поверхні.

2. Рекомендації щодо електродинамічної правки стикових зварних з’єднань

2.1. Ці рекомендації поширюються на зварні з’єднання, виконані у «внапуск».

2.2. Під час правки поздовжнього прогину прямолінійних зварних з’єднань ЕП встановлювати на розтягнутій поверхні металу в зоні, що відповідає максимальній величині прогину f. ЕДО проводити на поверхні наплавленого

металу в центрі підсилення шва. Допускається виконання до п’яти ІЕС без переміщення ЕП. Рекомендований напрям виконання обробки – почергово з різних боків вздовж лінії шва.

2.3. Під час обробки зварних з’єднань протяжністю понад 1 м допускається застосування напряму «на прохід».

2.4. Під час обробки поздовжнього прогину f листів зі стиковими зварними з’єднаннями рекомендується забезпечити їх спирання вздовж поперечних крайок за допомогою дерев’яних підкладок, висота f_1 яких повинна бути більшою за величину прогину f і становити від 20 мм до 30 мм.

2.5. Перед виконанням обробки поздовжнього прогину f листів зі стиковими зварними з’єднаннями рекомендується виконати попередній вигин – $f_{пр}$ у напрямку, протилежному вихідному прогину, із величиною $|f_{пр}| = f$. Для реалізації зворотного вигину – $f_{пр}$ рекомендується застосовувати суднобудівні збиральні масивні притискачі.

2.6. Під час ЕДО кільцевих швів, а також швів замкнутого контуру, обробку виконувати почергово з різних боків вздовж лінії шва. Застосування схеми ЕДО «на прохід» у цьому випадку не рекомендується.

3. Рекомендації щодо електродинамічної правки таврових з’єднань

3.1. Під час правки поздовжнього прогину f таврових зварних з’єднань рекомендується встановлювати ЕП на полиці тавра зі сторони, протилежної напрямку її прогину з площини, у зоні, що відповідає максимальному значенню f.

3.2. Напрям і кількість ІЕС рекомендується обирати відповідно до пп. 2.2–2.4 для стикових з’єднань.

3.3. Під час встановлення ЕП зі сторони стінки тавра зону ЕДО рекомендується обирати на відстані не більше 10 мм від лінії сплавлення полиці зі стінкою. Рекомендується використовувати електрод із вильотом висотою $h_e = h + 20$ мм, де h – висота стінки тавра. Під колеса транспортного візка з обох боків стінки тавра підкладати напрямні з сухої деревини висотою h.

3.4. Під час встановлення ЕП зі сторони, протилежної стінці тавра, зону ЕДО рекомендується обирати у центрі активної зони зварного з’єднання.

3.5. Рекомендується перед виконанням правки поздовжнього прогину f таврового зварного з’єднання забезпечити його попередній вигин $-f_{пр}$ відповідно до п. 2.5 для стикових з’єднань.

4. Рекомендації щодо електродинамічної обробки локальних деформацій

4.1. Перед обробкою локальних опуклостей ЕП рекомендується встановлювати на листі в центрі опуклості зі сторони, протилежної напрямку прогину f.

4.2. Рекомендується починати обробку опуклості з ЕДО в його центрі, виконуючи не більше п’яти ІЕС без перестановки ЕП.

4.3. Рекомендується виконувати обробку опуклості від центра до країв за спіральною схемою із кроком від 5 мм до 10 мм між зонами ЕДО.

4.4. Під час виправлення спотворень геометричної форми корсетного вигляду на шпації шириною b ЕП рекомендується встановлювати на полиці на відстані між ребрами жорсткості, що дорівнює b/2.

4.5. Під час виправлення спотворень геометричної форми корсетного вигляду напрям і кількість ІЕС рекомендується обирати відповідно до пп. 2.2 – 2.4 для стикових з’єднань.

Висновки за розділом 4

1. При виборі ділянки оброблення зварних з’єднань в основу покладена гіпотеза, що максимальна ефективність електродинамічного впливу досягається за умови максимального рівня значень діючих напружень розтягу, тобто коли їх величина наближається до $\sigma_{0,2}$. Максимальний рівень залишкових напружень розтягу формується в центральної частини зварного з’єднання.

2. Порівняння значень стрілок прогину f_2 та f_{2e} свідчить, що максимальний ефект електродинамічної обробки досягається в зоні зварного з’єднання на ділянці, де початкові величини прогинів, як і рівень залишкових зварювальних напружень, є найбільшими. Після проведення електродинамічної обробки за рекомендованими режимами залишкові значення поздовжніх і поперечних прогинів зменшилися в середньому на 60 %.

3. При застосуванні електродинамічної обробки стикових зварних з’єднань пластин зі сплаву АМг6, за схемою впливу на чотири ділянки поверхні зварного шва у послідовності «від середини до країв» (схема ВСК) за 5 циклів впливу імпульсного електричного струму на кожній з ділянок встановлено, що після обробки поздовжні прогини в зоні шва зменшилися до нульових значень, а поперечні – до рівня формозміни протилежного знаку.

4. Використання схеми ВСК для зразків зі сплаву АМг6 забезпечує незначну за величиною зворотну кривизну досліджуваних пластин за наявності супутніх залишкових прогинів поперечних крайок, а електродинамічна обробка за схемою ВСК є найбільш ефективною.

5. Електродинамічна обробка з попереднім вигином стикових зварних з’єднань пластин при значеннях σ_x, близьких до $\sigma_{0,2}$, є ефективною і не поступається обробці за схемою ВСК. Така обробка є більш технологічною оскільки не вимагає багаторазового позиціювання електрода уздовж шва.

6. Створені Технологічні рекомендації по застосуванню процесу електродинамічної обробки для виправлення стикових зварних з’єднань листового прокату зі сплавів на основі алюмінію.

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Назва проєкту: «Технологія зниження залишкових напружень і деформацій зварних з’єднань алюмінієвих сплавів електродинамічною обробкою».

Стартап-проєкт передбачає впровадження технології ЕДО як окремого етапу після зварювання для корекції форми й напруженого стану алюмінієвих конструкцій без додаткового нагріву. Технологія забезпечує стабілізацію форми зварних виробів і підвищення їхньої механічної довговічності.

Застосування ЕДО дає змогу знизити залишкові зварювальні напруження та короблення, скоротити витрати на механічну правку, зменшити частку браку, підвищити точність і стабільність геометрії конструкцій.

Технологія орієнтована на підприємства авіабудування, суднобудування, машинобудування, виробників алюмінієвих конструкцій, а також інженерні та сервісні центри, що займаються ремонтом і модернізацією таких виробів.

5.1 Опис ідеї проєкту

Ідея проєкту полягає у створенні та комерціалізації технологічного рішення для післязварювальної електродинамічної обробки зварних з’єднань алюмінієвих сплавів. Йдеться про впровадження регламентованої технології та комплекту обладнання, які дозволяють керовано змінювати напружено-деформований стан зони шва.

Технологія базується на імпульсній дії електричного струму та електромагнітних сил, що ініціюють локальні пластичні деформації в зоні зварного шва. У результаті: знижуються залишкові розтягувальні напруження, коригуються поздовжні та поперечні прогини, підвищуються геометрична точність і експлуатаційна надійність конструкцій.

На початковому етапі реалізації проєкту впровадження процесу ЕДО виконується у вигляді заключного етапу виробничого циклу після зварювання. У перспективі пропонується розробка на основі технології ЕДО комбінованих зварювально-правильних модулів, у яких операції зварювання та

електродинамічної обробки виконуються в одному технологічному циклі та в одній системі базування виробу, а також інтеграція ЕДО в роботизовані або напівавтоматизовані комплекси, в залежності від умов виробництва та вимог потенційних замовників. Такий підхід відкриває можливості для подальшого скорочення технологічного часу, оптимізації виробничої логістики та підвищення рівня автоматизації зварювального виробництва.

Опис основної ідеї стартап-проєкту наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап – проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та впровадження ЕДО зварних з’єднань алюмінієвих сплавів з метою зниження залишкових напружень і деформацій, покращення геометричної точності та довговічності конструкцій	Авіабудування	Збільшення ресурсу конструкцій при циклічних навантаженнях (підвищення втомної міцності і межі витривалості)
Підвищення стійкості до утворення тріщин та оптимізація напружено-деформованого стану за рахунок електропластичного ефекту (ЕПЕ)	Машинобудування / транспортне машинобудування	Зниження залишкових напружень і деформацій, стабільність геометрії конструкцій
Використання ЕДО в процесі або після зварювання для керованої локальної пластичної течії матеріалу і переведення пружних деформацій у пластичні	Суднобудування	Можливість зменшення товщини листів до 3-4мм без втрати міцності, економія матеріалів
Впровадження регламентованих параметрів імпульсу та форми електрода-індентора (ролик/напівсферичний ударник)	Виробництво алюмінієвих конструкцій	Зменшення браку продукції та підвищення повторюваності результатів
Реалізація електродинамічної обробки (ЕДО) у поєднанні з адитивним наплавленням (WAAM, плазмове пошарове наплавлення) для ущільнення структури надрукованих шарів та зменшення пористості матеріалу.)	3D-друк металами (WAAM, плазмове наплавлення)	Зменшення шпаристості, покращення структури та підвищення втомної міцності деталей

Розглянемо аналіз потенційних техніко-економічних переваг запропонованої технології ЕДО зварних з’єднань алюмінієвих сплавів у порівнянні з існуючими технологіями, що використовуються для регулювання залишкових напружень та деформацій (табл. 5.2).

Для цього було виконано:

– визначення ключових техніко-економічних характеристик ідеї;

– формування кола конкурентних технологій (термічний відпуск, зворотне прогинання, ультразвукова обробка);

– порівняльний аналіз показників власної технології з альтернативними методами з визначенням слабких (W), нейтральних (N) і сильних (S) характеристик.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт (ЕДО)	Термічний відпуск	Зворотне прогинання	Ультразвукова обробка			
1.	Глибина впливу на залишкові напруження	Глибока дія + перетворення розтягувальних напружень у стискальні (до ~120 МПа)	Часткова релаксація, потребує прогріву маси конструкції	Компенсація геометрії без суттєвої зміни внутрішнього НДС	Локальна дія, ефективна тільки в поверхневому шарі			+
2.	Втомна міцність з’єднання	Підвищення життєвого ресурсу у 2–3 рази	Підвищення на 20–40 %	Підвищення до 1,3 разів	Підвищення на 1,7–2,0 рази			+
3.	Деформації (жолоблення, викривлення)	Значне зменшення шляхом стабілізації геометрії	Не усуває деформації форми	Компенсує прогином, але деформація може повертатися	Мінімальний вплив на форму			+
4.	Анізотропія властивостей	Зменшується завдяки ЕПЕ та однорідності пластичного стану	Не змінює	Не змінює	Зменшує частково		+	

Продовження таблиці 5.2

№ п/п	Техніко-економічі характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт (ЕДО)	Термічний відпуск	Зворотне прогинання	Ультразвукова обробка			
5.	Енергоспоживання	Низьке (локальний імпульсний вплив)	Високе (нагрів всього виробу + оснастки)	Низьке, але потребує силової оснастки	Дуже низьке			+
6.	Автоматизація процесу	Може бути об’єднано в єдиний комбінований зварювально-правильний модуль	Потребує окремої операції	Потребує ручного/напівавтоматичного регулювання	Легко автоматизується			+
7.	Товщина виробу, мм	Найбільш ефективно: до 6–8 мм	Може застосовуватись на всіх товщинах	Обмеження по жорсткості конструкції	Ефективно тільки до ~3–4 мм	+		
8.	Матеріальна універсальність	Ефективно для Al–Mg (АМг6/1561), титанових, нержавіючих сталей	Для сталей добре, для Al – не дуже	Для сталевих конструкцій	Добре для Al і сталей, але з обмеженнями			+
9.	Вартість обладнання	Середня	Низька	Середня	Висока	+		
10.	Вимоги до кваліфікації персоналу	Потребує навченого оператора	Середні	Середні-високі	Потребує специфічної підготовки	+		
11.	Ризик появи мікротріщин	Знижує	Може збільшувати при перегріві	Не впливає	Зменшує			+

5.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

У межах цього підрозділу було здійснено технологічний аудит ідеї проєкту, результати якого наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

№ п/п	Ідея проєкту	Варіанти технологічної реалізації ідеї проєкту	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Впровадження технології (процесу) електродинамічної обробки зварних з'єднань алюмінієвих сплавів для зниження залишкових напружень і деформацій у зварних конструкціях на підприємствах потенційних замовників	Варіант 1. «Стаціонарне устаткування ЕДО для обробки на заключному етапі виробничого циклу після зварювання». Представляє собою окрему станцію ЕДО: конденсаторне джерело, силовий стенд, ручне або просте механізоване позиціювання електрода вздовж шва	Базовий процес ЕДО відпрацьований на рівні науково-дослідних стендів і експериментальних установок. Розроблені спеціалізовані інструменти для адаптації під різноманітні задачі. Для промислового застосування потрібне невелике інженерне доопрацювання, принципово нових рішень не вимагає	Доступна. Є власний напрацьований науковий та експериментальний досвід, доступ до спеціалістів та базового обладнання. Потребує невеликих інвестицій у адаптацію під конкретні вироби замовників
		Варіант 2. «Напівавтоматизований стенд для ЕДО з ЧПК/механізованим переміщенням електрода». Представляє собою стаціонарне устаткування з можливістю програмування траєкторії руху електрода по шву, можливе доповнення системою вимірювання прогинів або деформацій	Окремі вузли (конденсаторні джерела, системи переміщення, вимірювальні системи) можливо виготовляти самостійно або купляти на ринку. Готові автоматизовані рішення для ЕДО-правки фактично відсутні на ринку, необхідна інтеграція із відповідним обладнанням	Частково доступна. Можна розглядати використання устаткування для зварювальної автоматизації, яке присутнє на ринку, або, за можливості, використання наявного устаткування замовника. Для інтеграції устаткування ЕДО із обладнанням для автоматизації необхідне залучення спеціалістів і відповідні інвестиції

Продовження таблиці 5.3

№ п/п	Ідея проєкту	Варіанти технологічної реалізації ідеї проєкту	Наявність технологій	Доступність технологій
		Варіант 3. «Комбіновані зварювально-правильні модулі». Послідовне виконання зварювання та ЕДО в одному технологічному циклі та в одній системі базування виробу	Готові комерційні рішення наразі відсутні. Існують передумови у вигляді окремо відпрацьованих технологій зварювання та ЕДО. Є деякі концептуальні напрацювання. Потребує глибших досліджень, повномасштабної конструкторської розробки та відповідних інвестицій	Умовно доступна. Варіант може бути реалізований командою спеціалістів спільно із виробниками зварювального обладнання за умови залучення значних інвестицій. Рівень технічного ризику середній, терміни розробки готового рішення – середньострокові
		Варіант 4: «Інтеграція ЕДО в роботизовані або напівавтоматизовані зварювальні комплекси». Окремі модулі устаткування для ЕДО-правки, інтегровані із промисловими роботами або портальними маніпуляторами, що можуть послідовно виконувати зварювання та обробкою зварного з’єднання	Роботизовані зварювальні комплекси та їхні елементи широко представлені на ринку. Готових рішень щодо інтеграції модулів ЕДО із промисловими роботами фактично немає. Необхідна розробка спеціальної оснастки, силових електродів, алгоритмів керування та систем захисту електроніки	Потенційно доступна. Даний варіант може бути перспективним з точки зору забезпечення максимальної ступені автоматизації на крупних підприємствах. Можна розглядати реалізацію у вигляді спільного проєкту із компаніями що займаються інтеграцією зварювального обладнання із промисловою робототехнікою. Потрібні НДДКР і відповідні інвестиції, але технологія має високий потенціал масштабування та доданої вартості

На початковому етапі реалізації проєкту доцільно зосереджуватись на варіанті 1 – стаціонарному устаткуванні ЕДО для обробки на заключному етапі виробничого циклу після зварювання, оскільки існують власні напрацювання, експериментальні результати, наявне обладнання та компетентні фахівці, що дозволяє швидко та з мінімальним технологічним ризиком розпочати надання послуг щодо впровадження процесу ЕДО. Паралельно із реалізацією варіанту 1 пропонується здійснювати аналіз та відпрацювання варіанту 2, адже на ринку існують окремі технологічні компоненти, а реалізація даного варіанту не потребує значних початкових інвестицій і може бути досягнута у середньостроковій перспективі. На подальших етапах розвитку проєкту, після вивчення потреб потенційних замовників та специфіки їх виробничих процесів, пропонується розпочати оцінку доцільності впровадження варіанту 3 та варіанту 4. Обидва напрями мають значний потенціал масштабування застосування технології ЕДО та створення високої доданої вартості, але потребуватимуть додаткових інвестицій і конструкторських розробок.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Визначення ринкових можливостей та аналіз ринкових бар'єрів дозволяє оцінити перспективи реалізації проєкту на ринку промислових технологій. У межах даного підрозділу оцінюється стан ринкового середовища, наявність попиту на технології підвищення втомної довговічності зварних пластин зі сплавів алюмінію, кількість конкурентів, необхідність сертифікації та рентабельність (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	2-3
2.	Загальний обсяг продажу технологічних послуг/обладнання	~70–120 млн. грн/рік (ринок України + експортні рішення)
3.	Динаміка ринку	Зростає на 6–9 % щорічно, особливо в авіабудуванні, транспортному машинобудуванні, металоконструкціях

Продовження таблиці 5.4

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
4.	Наявність обмежень	Складність ввезення імпульсних джерел струму, вимоги до електробезпеки та метрології, воєнний стан
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Необхідність відповідності ISO 15614, ISO 16910, AWS D17.2 (для авіаційних конструкцій), вимоги для контролю НДС та валідації процесу ЕДО
6.	Середня норма рентабельності у галузі	12–20 % (вищі значення при впровадженні у високо маржинальні галузі – авіація, військова сфера, суднобудування)

На основі проведеного аналізу стану ринку, динаміки його розвитку, наявних обмежень, вимог сертифікації та оцінки рентабельності, можна зробити висновок, що ринок технологій підвищення втомної довговічності алюмінієвих конструкцій є привабливим для входження. Незважаючи на наявність регуляторних бар'єрів та вимог до електробезпеки, ринок характеризується низькою конкуренцією, стабільним ростом та високою нормою рентабельності, що створює сприятливі умови для впровадження інноваційної технології ЕДО і забезпечує її перспективи для комерційного успіху.

З огляду на отримані результати щодо стану ринкового середовища та визначених характеристик попиту, на наступному етапі доцільно провести ідентифікацію цільових груп споживачів технології, їх специфічних потреб та очікувань від впровадження запропонованого рішення (табл. 5.5). Це дозволить сформувати розуміння ключових категорій клієнтів та їх вимоги до нашого продукту.

Таблиця 5.5 – Визначення потенційних груп клієнтів

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Збільшення втомної довговічності алюмінієвих	Авіабудівні підприємства, виробники БПЛА, ремонтні авіаційні	Висока готовність інвестувати у технологію при підтверджених	Гарантований ефект зниження НДС, підтвердження випробувань,

Продовження таблиці 5.5

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	панелей	бази	показниках надійності	відповідність авіаційним стандартам (ISO / AWS), технічна підтримка
2.	Зниження залишкових деформацій зварних конструкцій	Машинобудування, вагонобудування, виробники транспортних систем	Орієнтація на економічну доцільність, швидку інсталяцію, відсутність зупинок виробництва	Сумісність з існуючими процесами MIG/TIG, можливість впровадження прямо на виробничій лінії, навчання персоналу
3.	Усунення більш дорогих методів термічної обробки або таких що потребують громіздкого устаткування	Суднобудівні підприємства та виробники офшорних конструкцій	Схильність уникати високого енергоспоживання, потреба мобільної обробки	Можливість застосування на великих габаритах, мобільність системи, зменшення енерговитрат порівняно з відпуском
4.	Зниження браку та дефектів зварних з’єднань	Підприємства з виробництва алюмінієвих корпусів, резервуарів, металоконструкцій	Прагнення підвищити стабільність виробничого циклу та повторюваність результаті	Наявність режимів ЕДО для різних марок сплавів (АМг6, 1561, 1570 тощо), швидке налаштування устаткування

Для оцінки перспективи впровадження технології ЕДО необхідно визначити зовнішні чинники ринку: ті, що створюють ризики та загрози, і ті, що відкривають вікна можливостей для масштабування технології. Результати наведені у таблицях 5.6 та 5.7.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Невисока обізнаність ринку про технологію ЕДО	Багато компаній не знають про ЕДО або не уявляють її ефект	Проведення технічних презентацій, демонстраційних тестів, участь у виставках, публікації наукових статей
2.	Складність доведення економічної ефективності	Компанії звикли до термообробки й ультразвуку	Порівняльні випробування «було/стало», надання звітів з мікроструктурою та даними по напруженнях

Продовження таблиці 5.6

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
3.	Нормативні бар'єри та сертифікація	Потрібна відповідність ISO / AWS / EN тощо	Ініціювання процедури підтвердження технології через стандарти; співпраця з сертифікаційними центрами
4.	Потреба у спеціалізованій кваліфікації персоналу	Технологія складна для некваліфікованих зварювальників	Запровадження навчання операторів
5.	Потреба у дотриманні норм електробезпеки	Високі значення розрядного струму та імпульсної напруги вимагають строгого дотримання вимог IEC/ISO щодо заземлення, ізоляції, екранів та контролю електромагнітних впливів	Високі значення розрядного струму та імпульсної напруги вимагають строгого дотримання вимог IEC/ISO щодо заземлення, ізоляції, екранів та контролю електромагнітних впливів

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
1.	Зростання потреб у легких конструкціях з алюмінію	Ринок авіації, транспорту, суднобудування	Пропозиція ЕДО як інструменту підвищення довговічності таких конструкцій
2.	Зростання тенденції до технологій, що знижують енергоспоживання	Виконання ЕДО потребує менше енергії, ніж термообробка	Позиціонування ЕДО як енергоефективної альтернативи термообробці для зменшення споживання електроенергії та операційних витрат підприємства
3.	Підвищення вимог до надійності зварних з'єднань	Більший ресурс - менші витрати на експлуатацію	Пропонувати ЕДО як шлях зниження витрат життєвого циклу конструкцій
4.	Автоматизація виробництва	Компанії потребують технологій, що можна інтегрувати із роботизованими комплекси	Розробка модулів ЕДО для роботів-маніпуляторів
5.	Участь у програмах міжнародної технічної підтримки та науково-технічного розвитку	Можливість залучення зовнішнього фінансування через міжнародні програми підтримки інновацій, технологічні фонди та партнерські наукові консорціуми	Підготовка заявок на R&D-фінансування, створення партнерств з міжнародними університетами, технопарками й профільними інституціями

Продовження таблиці 5.7

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакції компанії
6.	Можливість експорту технології	ЕДО актуальна для високоміцних конструкцій у країнах з розвиненою промисловістю та інженерною культурою (ЄС, Туреччина, Китай, Південна Корея, ОАЕ). Попит на технології підвищення довговічності та зменшення залишкових напружень у зварних конструкціях	Англомовна технічна документація, підготовка презентацій для міжнародних партнерів, участь у міжнародних технічних виставках та конференціях, створення демонстраційного стенду

З урахуванням характеристик процесу ЕДО та його переваг порівняно з термообробкою й ультразвуковою обробкою, сформовано набір критеріїв, що визначають конкурентоспроможність технології на ринку промислових технологій. Детальний аналіз подано в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор д ля порівняння конкурентних проєктів значущим
1.	Глибоке зниження залишкових напружень	ЕДО забезпечує релаксацію НДС від –80 до –120 МПа, тоді як термічний відпуск знімає напруження частково (від–20 до –40 МПа), а ультразвукова обробка – переважно локально і менш стабільно. Це прямо впливає на ресурс конструкцій та їх експлуатаційну надійність
2.	Енергоефективність процесу	ЕДО потребує в рази нижчу енергію, ніж повнооб’ємна термообробка, яка потребує нагріву всього виробу. У порівнянні з УЗО імпульсний вплив коротший за часом та локалізований
3.	Сумісність з існуючими зварювальними технологіями (MIG/TIG/роботи)	ЕДО може бути реалізована як модуль, інтегрований у зварювальний комплекс, тоді як термообробка потребує окремого постпроцесу, а УЗО часто виконується на стаціонарному обладнанні. Це зменшує простої ліній виробництва
4.	Зменшення браку і дефектності з’єднань	ЕДО знижує ризик мікротріщин та внутрішніх концентраторів напружень, тоді як при термічному відпуску зберігається можливість термічних деформацій, а при УЗО може виникати поверхнева нерівномірність обробки

Продовження таблиці 5.8

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим
5.	Можливість обробки тонколистових конструкцій (2–8 мм)	Термообробка для тонких панелей часто недопустима через ризик геометричної деформації, УЗО – обмежена здатністю до глибокої релаксації. ЕДО дозволяє обробляти тонкі вироби без перекалібрування і механічного викривлення
6.	Масштабованість і можливість автоматизації	ЕДО може бути реалізована у вигляді роботизованої системи з електрод-індентором, тоді як УЗО вимагає ручних налаштувань, а термообробка масштабована лише через збільшення потужності печей
7.	Мобільність і придатність для великогабаритних конструкцій	ЕДО-обладнання є мобільним та може інтегруватися у виробничі лінії або застосовуватися без потреби демонтажу великогабаритних конструкцій. На противагу цьому термічні печі є стаціонарними, а УЗО обмежена площею локальної обробки
8.	Експортний потенціал	Технологія ЕДО відповідає тенденціям в авіабудуванні, транспортному машинобудуванні, суднобудуванні США, ЄС і Азії, де потрібне зниження залишкових напружень і підвищення стабільності виробів. Термообробка тут часто енергозатратна, а УЗО недостатньо ефективна на алюмінієвих сплавах

На основі визначених факторів конкурентоспроможності (табл. 5.8) виконаємо порівняльний аналіз сильних і слабких сторін стартап-проєкту з ЕДО відносно традиційних методів зниження напружень – термічної обробки та ультразвукової обробки (табл. 5.9) .

Таблиця 5.9 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проєкту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг технологій-конкурентів у порівнянні з ЕДО	
			Термічна обробка	Ультразвукова обробка
1.	Глибоке зниження залишкових напружень	20	-2	-1
2.	Енергоефективність процесу	20	-3	-1
3.	Сумісність з існуючими зварювальними технологіями (MIG/TIG/роботи)	17	-2	-1
4.	Зменшення браку і дефектності з’єднань	19	-1	-1
5.	Можливість обробки тонколистових конструкцій (2–8 мм)	18	-1	-2

Продовження таблиці 5.9

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг технологій-конкурентів у порівнянні з ЕДО	
			Термічна обробка	Ультразвукова обробка
6.	Масштабованість і можливість автоматизації	18	-1	-2
7.	Мобільність і придатність для великогабаритних конструкцій	19	-2	-1
8.	Експортний потенціал	13	-1	-1

На основі проведеного аналізу факторів конкурентоспроможності, порівняльних характеристик ЕДО з альтернативними методами, а також ринкових загроз і можливостей, сформовано SWOT-матрицю проєкту (табл. 5.10). Це дозволяє визначити сильні та слабкі сторони ЕДО, а також зовнішні чинники, що можуть впливати на перспективи її впровадження.

Таблиця 5.10 – SWOT-аналіз стартап-проєкту ЕДО

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
1.Значне зниження залишкових напружень (до –120 МПа), перевершує термообробку та УЗО. 2. Енергоефективність процесу – значно менше енергії, ніж у повнооб'ємній термообробці. 3. Сумісність з існуючими зварювальними процесами (MIG/TIG, роботизація). 4. Зменшення браку і дефектності з'єднань, зниження ризику мікротріщин і концентрації напружень 5. Можливість автоматизації, роботизації та інтеграції в виробничі лінії. 6. Висока мобільність – можливість роботи на великогабаритних конструкціях без демонтажу. 7. Експортний потенціал – актуальність у авіа-, транспортній та енергетичній галузях.	1. Необхідність дотримання підвищених вимог електробезпеки при роботі з імпульсними струмами та спеціалізованим обладнанням. 2. Низька обізнаність ринку щодо технології ЕДО, що потребує додаткової роботи із формування розуміння принципів і переваг. 3. Необхідність навчання оператора роботі з ЕДО-обладнанням. 4. Недостатня стандартизація технології ЕДО та відсутність розгорнутих нормативних документів порівняно із термообробкою. 5. Потреба у створенні стандартизованих режимів ЕДО для різних алюмінієвих сплавів і діапазонів товщин. 6. Консервативність виробничих підприємств і повільні темпи адаптації нових технологій у промисловості.

Продовження таблиці 5.10

Можливості:	Загрози:
1. Зростання потреби у легких алюмінієвих конструкціях у транспорті, авіабудуванні, суднобудуванні. 2.Пошук нових технологій, що знижують енергоспоживання. 3. Участь у програмах міжнародної технічної підтримки та науково-технічного розвитку. 4. Залучення нових ринків застосування технології ЕДО через вихід на закордонні авіаційні, машинобудівні, транспортні та суднобудівні кластери. 5. Можливість створення власної сертифікаційної бази і нормативів для ЕДО. 6. Інтеграція технології ЕДО в автоматизовані виробничі процеси.	1. Наявність конкуренції зі сторони існуючих методів: термообробка та УЗО, які вже мають ринкову довіру. 2. Зміни в міжнародних стандартах ISO/AWS/EN щодо вимог до післязварювальної обробки. 3. Ринкова обережність та скептицизм до нових методів у традиційних галузях. 4. Поява нових альтернативних технологій зниження залишкових напружень. 5. Вимоги щодо посилених заходів безпеки праці через локальні вібраційно-динамічні навантаження та акустичний вплив під час ЕДО-обробки 6. Відсутність достатньої державної підтримки наукових і технологічних інновацій в Україні, що безпосередньо може уповільнювати комерціалізацію ЕДО.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту

Для цілей розроблення ринкової стратегії проєкту було проведено аналіз потенційних сегментів споживачів. За результатами даного аналізу відібрано найбільш релевантні групи клієнтів, які характеризуються високою ймовірністю прийняття технології ЕДО та формування стабільного попиту на неї (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
	Військово-оборонний сектор (виготовлення корпусів ракет, баків, панелей, елементів обшивки з АМг6, 1561, 2219)	100%	100%	90%	30%

Продовження таблиці 5.11

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Військово-оборонний сектор (виготовлення корпусів ракет, баків, панелей, елементів обшивки з АМг6, 1561, 2219, 2014)	100%	100%	90%	30%
2.	Авіабудування (крила, стрингери, лонжерони, люки, баки, елементи фюзеляжу з 2524-Т3, 7055-777, 2219-Т8, 6013-Т6, 5083)	100%	100%	90%	40%
3.	Суднобудування (корпусні панелі, палубні конструкції та шпангоутів зі сплавів Al-Mg, Al-Mg-Mn, 5086, 5083, АМг6)	100%	100%	80%	65%
4.	Виробники легких алюмінієвих автомобільних конструкцій (кузови, рами, підвіска, паливні баки зі сплавів 6061, 6013, 7021, АМг5)	95%	95%	85%	50%
5.	Енергетичний сектор (корпуси електротехнічного обладнання та антикорозійні конструкції з Al-Mg сплавів)	90%	85%	60%	60%
6.	Роботизовані виробничі підприємства, де ЕДО інтегрується як окрема операція в автоматизовані технологічні модулі пост-зварювального впливу.	85%	80%	70%	55%
Які цільові групи обрано: – авіабудівні підприємства та виробники авіаційних конструкцій зі сплавів 1561 та АМг6; – суднобудівні підприємства, що використовують алюмінієві зварні панелі і секції корпусу; – підприємства з роботизованими зварювальними лініями, де ЕДО може бути інтегрована як модуль пост-зварювальної стабілізації.					

Відповідно до визначених цільових груп споживачів було сформовано базову стратегію розвитку проєкту, результати якої наведені у таблиці 5.12.

Таблиця 5.12 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Авіабудівні підприємства та виробники авіаційних конструкцій зі сплавів 1561 та АМг6	Сегментована (нішова)	Глибоке зниження залишкових напружень (до –120 МПа); підвищення ресурсу роботи конструкцій; можливість локальної обробки без демонтажу; відповідність вимогам безпеки та сертифікації	Стратегія фокусу
2.	Суднобудівні підприємства, що використовують алюмінієві зварні панелі і секції корпусу	Сегментована, розширювана	Підвищення корозійної стійкості та втомної міцності; можливість обробки крупногабаритних конструкцій; економія енергії порівняно з термообробкою; екологічність процесу	Стратегія диференціації
3.	Підприємства з роботизованими зварювальними лініями для серійного виробництва	Сегментована з технічною інтеграцією	Інтеграція ЕДО у роботизовані комплекси як модуль пост-зварювальної стабілізації; автоматизація; повторюваність результатів; низькі експлуатаційні витрати	Стратегія технологічної диференціації (інноваційного лідерства)

Обрана стратегія дозволяє сфокусувати впровадження ЕДО на сегментах, де її технологічні переваги мають найбільшу цінність, що сприятиме швидшій комерціалізації, формуванню репутації інноваційного постачальника і подальшому масштабуванню на суміжні ринки.

5.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Для розроблення маркетингової програми стартап-проєкту у сфері впровадження інноваційної технології (процесу) електродинамічної обробки зварних з’єднань алюмінієвих сплавів, яка наразі не є широко представленою на ринку та не має стандартного універсального обладнання для широкого використання, необхідно виконати значну попередню роботу. Зокрема, необхідно

активно комунікувати із потенційними замовниками, вивчати їхні потреби, обговорювати найбільш перспективні варіанти впровадження технології, аналізувати можливості виконання різних сценаріїв реалізації та оцінювати відповідні інвестиції. Тільки на основі цих напрацювань можна коректно формувати цінові пропозиції і вибудовувати реалістичну маркетингову стратегію з правильним позиціонуванням даної технології. В умовах вузької спеціалізації галузі, відсутності сформованого конкурентного середовища та обмеженої кількості даних щодо вартості аналогічних технологічних послуг на ринку, процес маркетингового планування наразі є ускладненим і потребує поетапного й адаптивного підходу.

Висновки за розділом 5

На основі проведеного аналізу встановлено, що існує реальна перспектива впровадження технології електродинамічної обробки для зменшення рівня залишкових напружень та деформацій зварних з'єднань алюмінієвих сплавів підтверджується готовністю ключових цільових груп – авіабудування, суднобудування та роботизованих виробництв – розглядати технологію як інноваційне рішення для зменшення деформацій та напружень зварних конструкцій. Для старту ринкової реалізації доцільно обрати стратегію фокусу та технологічної диференціації, що дозволить закріпитися у високотехнологічних сегментах із найбільшим ефектом від застосування електродинамічної обробки. Отримані результати свідчать про доцільність подальшої імплементації проєкту, включаючи розвиток стандартизованих режимів електродинамічної обробки та диверсифікацію застосування на суміжних ринках.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В рамках даної дипломної роботи досліджується технологічний процес електродинамічної обробки, який застосовується як післязварювальна операція для зниження рівня залишкових напружень і деформацій у зварних з'єднаннях тонколистових конструкцій з алюмінієвих сплавів АМг6 та 1561. Процес ЕДО виконується після виготовлення зварних зразків методом TIG, що зумовлює поєднання різних шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Для традиційного процесу ручного аргонодугового зварювання неплавким електродом характерна дія шкідливих і небезпечних виробничих факторів, пов'язаних з утворенням зварювальних аерозолів, інтенсивного оптичного випромінювання дуги в ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному діапазонах, теплового навантаження, а також ризику ураження електричним струмом. Натомість процес ЕДО супроводжується переважно короткочасними, але інтенсивними імпульсними впливами механічного, акустичного та електромагнітного характеру, зумовленими проходженням високострумових імпульсів через електродний пристрій і оброблювану конструкцію.

Метою даного розділу є аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів, характерних для процесів зварювання TIG та ЕДО, а також розроблення комплексу організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на забезпечення безпечних умов праці та зниження ризиків для здоров'я персоналу. Основними завданнями розділу є оцінка відповідності параметрів виробничого середовища чинним нормативним вимогам, обґрунтування рішень щодо вентиляції, організації робочих місць, вибору обладнання і засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), а також визначення вимог безпеки в надзвичайних ситуаціях.

6.1 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів (ШНВФ)

Електродинамічна обробка застосовується як післязварювальний технологічний процес для зниження залишкових напружень у зварних з'єднаннях. Особливість процесу полягає у створенні високострумового імпульсу та його передачі на поверхню деталі через ударний механізм електродного пристрою. Таким чином, згідно з класифікацією виробничих факторів [38], ЕДО можна віднести до процесів, що формують комплексну дію фізичних шкідливих і небезпечних факторів короткочасного імпульсного характеру.

Серед основних шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які впливають на оператора [38], для процесу ЕДО можна виділити наступні:

– підвищений рівень вібрацій локальної дії під час імпульсного удару інструмента по поверхні деталі;

– акустичні пікові навантаження (шум), спричинені ударною дією ЕП по оброблюваному виробу;

– вплив електромагнітних полів (ЕМП), що утворюються імпульсними струмами високої величини;

– статичне фізичне навантаження на верхні кінцівки оператора через необхідність точного та тривалого утримання інструмента в робочому положенні;

– ризик ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції, неправильному підключенні або відсутності відповідного заземлення.

У процесі ЕДО через проходження імпульсних струмів формується змінне магнітне поле – зі збільшенням амплітуди струму зростає інтенсивність поля. Короткочасний імпульс породжує високочастотні електромагнітні коливання, і при швидкій зміні магнітного потоку у прилеглих провідниках наводиться електрорушійна сила (ефект взаємоіндукції), що створює ризики для персоналу та вимагає виконання заходів електромагнітного захисту. Дослідження показують, що такі поля здатні впливати на нервово-серцеву систему та викликати зміни артеріального тиску при тривалому впливі [38], а також представляють небезпеку для осіб із кардіостимуляторами або імплантованими електроприладами. Норми

граничного допустимого рівня (ГДР) ЕМП регламентуються санітарними нормами виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99 [39].

Механічний удар електрода в процесі ЕДО по поверхні металу супроводжується короткими піковими акустичними сигналами, що перевищують фоновий рівень шуму та спричиняють акустичний стрес і тимчасове зниження слухової чутливості. ГДР шуму регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 [40].

Під час проходження імпульсу електричного струму через електродний пристрій і зварну конструкцію, в зоні контакту виникає короткочасне імпульсне зусилля. Це зусилля передається через корпус та рукоятку інструмента на кисть оператора, формуючи локальний ударно-вібраційний вплив. Тривала робота (20–30 хв безперервно) призводить до локальної втоми м’язів кисті та передпліччя, зниження точності рухів та ризику мікротравм [38]. Допустимі рівні локальної та загальної вібрації регламентуються ДСН 3.3.6.039-99 [41].

Крім того, слід враховувати дію шкідливих та небезпечних факторів, що характерні для процесу ручного зварювання TIG, який передує процесу ЕДО. Згідно із класифікацією [38], до основних шкідливих факторів цього процесу належить вплив хімічних речовин, зокрема зварювальних аерозолів, що утворюються внаслідок випаровування основного металу, присадкового дроту та розігріву оксидної плівки на поверхні алюмінію. Крім цього, під дією інтенсивного ультрафіолетового випромінювання дуги в атмосфері зони зварювання формуються токсичні гази – озон та оксиди азоту, які характеризуються подразнювальною дією на дихальні шляхи. Озон спричиняє кашель, втому, стягнення у грудях, тоді як оксиди азоту, взаємодіючи з вологою альвеол, утворюють кислоти, що роз’їдають легеневу тканину та можуть викликати гостре або хронічне отруєння. У виробничих зонах зварювання алюмінієвих сплавів концентрація озону в зоні дихання оператора може сягати від 0,15 мг/м³ до 0,18 мг/м³ (від 60 % до 90 % від ГДК), а при недостатній вентиляції концентрації аерозолів металів перевищують добові норми на 20–30%, що підтверджено замірами. Гранично допустимі концентрації (ГДК) цих речовин регламентовані документом [42] із визначенням класів небезпеки. За відсутності

місцевої витяжної вентиляції та при роботі в замкненому просторі можливе перевищення ГДК у десятки разів, що потребує обов'язкового застосування ЗІЗ органів дихання.

Аргон не має токсичної дії, однак при витраті від 8 л/хв до 10 л/хв і роботі у малих об'ємах він може витісняти кисень з повітря робочої зони. У разі накопичення аргону поблизу рівня дихання виникає небезпека кисневого голодування (асфіксії) при зниженні об'ємної частки кисню (O_2) нижче значень, рекомендованих у ДСН 3.3.6.042-99 [39].

Зварювальна дуга формує інтенсивне ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне випромінювання. УФ-випромінювання викликає електроофтальмію та опіки шкіри, ІЧ-діапазон сприяє локальному перегріванню. Практичні дані свідчать, що близько 40 % виробничих ушкоджень очей у зварювальних підрозділах пов'язані саме з впливом оптичного випромінювання, у тому числі відбитого від світловідбивних поверхонь, характерних для алюмінієвих деталей. Додатковий ризик становить теплове навантаження: під час тривалого зварювання температура повітря в зоні роботи підвищується на 6–10 °C, що призводить до теплового дискомфорту, зниження концентрації уваги та росту помилок оператора. Підвищення температури повітря також прискорює утворення озону, створюючи комбінований хімічно-термічний вплив.

Шум при зварюванні TIG формується вентиляційними системами, охолодженням та джерелом живлення. Його рівень, як правило, менший, ніж при плазмових або дугових процесах у CO_2, проте він не повинен перевищувати ГДР, встановлені ДСН 3.3.6.037-99 [40]. Вібрація від зварювального обладнання й допоміжних механізмів повинна відповідати вимогам [41].

До небезпечних факторів ручного зварювання TIG належать ризик ураження електричним струмом при пошкодженні ізоляції або порушенні заземлення, небезпека опіків від бризок і розплавленого металу, можливість вибуху балонів із аргоном та іншими газами під тиском, а також дія рухомих механізмів та вантажопідіймального обладнання на виробничій дільниці [38].

У таблицях 6.1 та 6.2 наведені загальні характеристики шкідливих і

небезпечних факторів для процесів ручного зварювання TIG та ЕДО.

Таблиця 6.1 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для процесу ручного зварювання TIG [38]

№ п/п	Небезпечні та шкідливі фактори виробничого середовища та організації праці	Зварювання в аргоні	
1	Шкідливі речовини		xx
2	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	xx
3		Видиме	xx
4		Інфрачервоне	xx
5	Електромагнітні поля		-
6	Магнітні поля		-
7	Іонізуючи випромінювання		-
8	Шум		x
9	Ультразвук		-
10	Статичне навантаження руху		xx
11	Електричний струм		xx
12	Іскри, бризки і викиди розплавленого металу		xx
13	Механізми і вироби, що рухаються		xx
14	Системи, які знаходяться під тиском, який не дорівнює атмосферному		xx

Таблиця 6.2 – Небезпечні та шкідливі виробничі фактори для процесу електродинамічної обробки

№ п/п	Небезпечні та шкідливі фактори виробничого середовища та організації праці	Електродинамічна обробка	
1	Шкідливі речовини		-
2	Випромінювання в оптичному діапазоні	Ультрафіолетове	-
3		Видиме	-
4		Інфрачервоне	-
5	Електромагнітні поля		xx
6	Магнітні поля		x
7	Іонізуючи випромінювання		-
8	Шум		xx
9	Ультразвук		-
10	Статичне навантаження руху		xx
11	Електричний струм		xx
12	Іскри, бризки і викиди розплавленого металу		-
13	Механізми і вироби, що рухаються		x
14	Системи, які знаходяться під тиском, який не дорівнює атмосферному		-

Примітки: xx – інтенсивний фактор; x – помірний фактор; (-) – незначний фактор чи його відсутність

Для хімічних речовин, що утворюються при зварюванні TIG (озон, оксиди азоту, оксид вуглецю, аерозолі оксидів алюмінію та магнію), ГДК у повітрі робочої зони та класи небезпеки наведені в гігієнічних регламентах [42]. Ці значення приймаються при проєктуванні вентиляції та виборі ЗІЗ органів дихання.

Мікроклімат виробничого приміщення (температура, вологість, швидкість повітря) має відповідати ДСН 3.3.6.042-99 [39]. Допустимі рівні шуму, ультразвуку та інфразвуку регламентуються ДСН 3.3.6.037-99 [40], а загальної та локальної вібрації – ДСН 3.3.6.039-99 [41]. При оцінці умов праці значення фактичних параметрів порівнюються з наведеними у цих нормативних документах ГДР.

Таким чином, ручне зварювання TIG алюмінієвих сплавів у середовищі аргону є процесом із підвищеним рівнем шкідливості та небезпеки через комбінацію електромагнітних, оптичних, хімічних та психофізіологічних факторів, які потребують застосування ЗІЗ та місцевої вентиляції для забезпечення безпечних умов роботи.

ЕДО характеризується помірним рівнем шкідливості та підвищеною виробничою небезпекою, що обумовлено: короткочасними, але інтенсивними механічними та акустичними впливами; високими рівнями імпульсних ЕМП; необхідністю роботи з обладнанням підвищеної електронебезпеки; статичним фізичним навантаженням оператора.

Дотримання вимог до експлуатації обладнання, використання ЗІЗ, періодичний контроль стану ізоляції кабелів і заземлення дозволяє знизити ризики до допустимого рівня та забезпечити безпеку операторів при виконанні процесу ЕДО.

6.2 Вимоги безпеки та гігієни праці

Вимоги до виробничих приміщень та вентиляції.

Виробничі приміщення, у яких виконують ручне зварювання TIG стикових з’єднань зі сплавів АМг6 та 1561, а також подальшу ЕДО, належать до

зварювально-заготівельних дільниць підвищеної небезпеки і мають відповідати вимогам ДБН В.2.2-28:2010 щодо площі, висоти, ширини проходів і проїздів між обладнанням та огороджувальними конструкціями [43]. Робочі місця зварників повинні бути захищені стаціонарними або пересувними світлопоглинальними екранами, що запобігають поширенню оптичного випромінювання дуги на суміжні робочі місця [38, 44].

Мікроклімат виробничих приміщень регламентується ДСН 3.3.6.042-99 [39]. Для категорії робіт, до якої належать ручне зварювання TIG й ЕДО, температура повітря в робочій зоні у холодний період повинна підтримуватися на рівні, встановленому нормами, при відносній вологості та швидкості руху повітря, що не перевищують допустимі значення. За відсутності місцевих тепловиділень додатковий підігрів або охолодження повітря забезпечують системами опалення та вентиляції.

Відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 система припливно-витяжної вентиляції загального призначення має забезпечувати відведення шкідливих домішок до концентрацій, що не перевищують гранично допустимих значень, та підтримувати необхідні параметри мікроклімату [45]. У зварювальних цехах, де застосовують аргон як захисний газ, додатково передбачають місцеві відсмоктувачі над зоною дуги. Для механізованого та ручного дугового зварювання в інертних газах витрата повітря, що відсмоктується місцевими пристроями, приймається не меншою за 150 м³/год для одного поста, а для зварювання в CO_2 – не меншою за 50 м³/год [46]. Витяжні зонти розміщують на висоті, що забезпечує надійне захоплення зварювального аерозолю, але не заважає огляду зони шва.

Процес ЕДО не супроводжується інтенсивним утворенням аерозолю металу та газових продуктів зварювання. Основними небезпечними факторами тут є імпульсні ЕМП, шум і локальна вібрація. Тому для зони ЕДО достатньо забезпечити загальний повітрообмін відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [39] та видалення тепла від джерела живлення. У разі розташування ЕДО-поста в одному приміщенні зі зварювальним постом повітряні потоки організовують так, щоб забруднене повітря від зварювання не надходило в зону оператора ЕДО.

Рівні виробничого шуму та вібрації під час роботи джерела імпульсного струму й ударного вузла електродного пристрою повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.037-99 та ДСН 3.3.6.039-99 відповідно [40, 41]. За результатами вимірювань при необхідності передбачають установлення шумопоглинальних екранів, гумових прокладок під опорами устаткування та обмеження часу безперервної роботи з ударним механізмом.

Вимоги до обладнання.

Зварювальне обладнання для ручного дугового зварювання неплавким електродом в інертному газі повинно відповідати вимогам ДСТУ 2456-94 [47] та Правил охорони праці під час зварювання металів НПАОП 28.52-1.31-13 [48]. Джерела живлення процесу TIG підключаються до силової мережі з напругою не вище 600 В; вольтметри або сигнальні лампи на панелі джерела мають вказувати наявність напруги в зварювальному колі [49, 50]. Корпуси джерел живлення, зварювальних трансформаторів, шаф керування й металевих частин установок, що можуть опинитися під напругою, заземлюють окремими провідниками згідно з ПУЕ-2017 [50]. Номінальна напруга холостого ходу джерел живлення не повинна перевищувати значень, наведених у Зміні № 1 до ДСТУ 2456-94 [51]. У разі перевищення застосовують пристрої автоматичного зниження напруги холостого ходу до безпечного рівня.

Обладнання для реалізації процесу ЕДО належить до електротехнічних виробів класу I за способом захисту людини від ураження електричним струмом, тобто має робочу ізоляцію та елемент для заземлення корпусу [44]. Джерело імпульсного струму, використане в роботі, забезпечує плавне регулювання напруги конденсаторної батареї в діапазоні від 250 В до 800 В, максимальну енергію імпульсу до 1,8 кДж, пікову амплітуду струму до 10 кА та тривалість імпульсу від 1 мс до 5 мс. Ці параметри обумовлюють необхідність:

– розміщення джерела живлення та конденсаторної батареї в окремій зоні з обмеженим доступом;

– застосування блокувань, які унеможливлюють подачу імпульсу при

відкритих кожухах або відсутності надійного заземлення;

– оснащення установки видимим розривом у колі живлення та аварійним вимикачем для швидкого відключення в разі небезпеки [49, 50].

Електродний пристрій із плоским індуктором та ударним механізмом, а також транспортний візок масою 35 кг, що використовується як навантажувальний пристрій, повинні мати механічну міцність, відкриті рухомі частини мають бути екрановані. Опори візка, контактуючі з поверхнею пластини, доцільно виконувати із заокругленими торцями для запобігання вм'ятинам на поверхні зразка. Рухомі елементи, що підвішуються, додатково фіксують страхувальними ланцюгами або тросами [44].

Рівні ЕМП, створюваних струмами від 4 кА до 10 кА при ЕДО, контролюють згідно з ДСН 3.3.6.096-2002 [52]. При розрахунковій відстані від 0,3 м до 0,5 м від робочої зони індуктора густина потоку енергії та напруженість магнітного поля мають не перевищувати гранично допустимі значення для 8-годинного робочого дня. За потреби застосовують додаткове екранування струмоведучих шин та скорочують час безперервної роботи оператора.

Вимоги до організації робочого місця.

Організація, обладнання та оснащення робочих місць для ручного зварювання TIG та ЕДО повинні відповідати ДСТУ 2456-94 і НПАОП 28.5-1.02-07 [47, 53]. Робочі місця зварників можуть бути стаціонарними (зварювальні кабіни) та тимчасовими. Стаціонарні місця при роботі в сидячому положенні обладнують регульованими стільцями, поверхні столів і підлокітники виконують з матеріалів з низькою теплопровідністю, що легко очищуються від бризок металу [38].

Зварювальні кабіни для ручного зварювання TIG повинні мати не менше ніж три перегородки заввишки не менше 2,0–2,5 м, покриті матеріалом з низькою відбивною здатністю. Ширина проходів між кабінами та обладнанням має забезпечувати безпечне переміщення зварника з пальником і складовими виробу й бути не меншою за 0,8 м, основні проходи в приміщенні – не менше 1,0–1,5 м [43]. Розміщення балонів із аргоном здійснюють поза кабінами в спеціально

відведеному місці, відстань до нагрівальних приладів має бути не меншою за 1 м, а до захисних екранів – не меншою за 0,1 м.

Робоче місце оператора ЕДО організовують таким чином, щоб під час імпульсу він знаходився поза площиною можливого переміщення пластини. Пульт керування джерелом імпульсного струму розташовують збоку від зони обробки на відстані не менше 1 м, що дозволяє візуально контролювати процес і одночасно знижує рівень впливу ЕМП [52]. Кабелі живлення та зварювальні шини прокладають у лотках або підвішують на ізоляційних кронштейнах, уникаючи їхнього знаходження в проходах, місця з’єднань захищають кожухами.

Поверхня столу або монтажної плити, на якій закріплюють тестові пластини розмірами 400 мм × 400 мм ×5–8 мм, повинна мати достатню жорсткість, щоб деформація оснастки не впливала на ефективність ЕДО. Висоту робочої поверхні вибирають з урахуванням антропометричних даних оператора (приблизно від 900 мм до 1000 мм при роботі стоячи), що зменшує статичне навантаження на опорно-руховий апарат [54]. Зона виконання ЕДО позначається попереджувальними знаками, а підлога обладнується діелектричними килимками.

Вимоги до персоналу та засобів індивідуального захисту.

До виконання ручного зварювання TIG допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд, навчання за програмою охорони праці, первинний інструктаж та перевірку знань відповідно до НПАОП 28.52-1.31-13 та Гігієнічної класифікації праці [48, 54]. Зварники повинні мати групу з електробезпеки не нижче II, а персонал, який обслуговує джерела живлення та високовольтну частину установки ЕДО, – не нижче III відповідно до ДНАОП 0.00-1.32-01 і ПУЕ-2017 [50, 55]. Повторні інструктажі з охорони праці проводять не рідше одного разу на три місяці з обов’язковою фіксацією у журналі [44].

Забезпечення працівників ЗІЗ здійснюють відповідно до ДСТУ 7239:2011 [56]. Для ручного зварювання TIG і робіт з ЕДО застосовують:

– зварювальну маску або щиток за ДСТУ EN 175-2001 зі світлофільтрами, що відповідають вимогам ДСТУ EN 169-2001 [57, 58]. Для струмів зварювання

TIG від 200 А до 300 А доцільно використовувати світлофільтри зі ступенем захисту DIN 11–13;

– захисні окуляри при операціях огляду та зачищення швів;

– рукавиці з термостійкого матеріалу згідно з ДСТУ EN 420-2017 [59];

– спеціальний одяг з вогнестійких тканин, що захищає від бризок розплавленого металу та УФ-випромінювання, а також спеціальне взуття з неслизькою підошвою [38, 56];

– фільтрувальні респіратори відповідно до ДСТУ EN 133:2005 у разі зварювання в малих об’ємах або при недостатній ефективності вентиляції [60];

– протишумові навушники або вкладиші (при рівні шуму понад 80–85 дБА) та антивібраційні рукавиці для оператора, який тримає рукоятку електродного пристрою в режимі серійних імпульсів ЕДО [40, 41].

Головним принципом є перевага колективних інженерних заходів (раціональна вентиляція, екрани, автоматизація окремих операцій, удосконалення оснастки) над індивідуальним захистом. ЗІЗ застосовуються в тих випадках, коли технічні й організаційні заходи не забезпечують достатнього зниження рівнів небезпечних і шкідливих виробничих факторів до нормативних значень [38, 44, 56].

Екологічні заходи.

З урахуванням особливостей ручного зварювання TIG та ЕДО важливо передбачити також екологічні заходи, спрямовані на мінімізацію впливу технології на довкілля. Захист повітря забезпечують за рахунок ефективної роботи місцевої та загальнообмінної вентиляції, що знижує концентрації зварювального аерозолю, оксидів азоту та озону до рівнів, регламентованих гігієнічними нормативами [40, 46].

Вода, яка використовується в системах охолодження джерел живлення та іншого обладнання, повинна циркулювати в замкнених контурах. Перед скиданням у каналізацію її необхідно очищувати від можливих забруднень продуктами корозії, мастильними матеріалами тощо.

Тверді відходи технологічного процесу (обрізки алюмінієвих

напівфабрикатів, залишки присадного дроту СвАМг6, зношені вольфрамові електроди, шлакова кора, бризки металу, шліфувальний пил та використані ЗІЗ) підлягають роздільному збиранню, тимчасовому зберіганню в закритій тарі та передачі спеціалізованим організаціям для подальшої утилізації або переробки відповідно до вимог чинного природоохоронного законодавства [44, 46].

6.3 Розрахунок інженерного рішення

Відповідно до ДСТУ 2456–94 [47], при ручному дуговому зварюванні неплавким електродом в інертному середовищі, зокрема при зварюванні алюмінієвих сплавів, повинна забезпечуватись ефективна вентиляція у вигляді комбінації систем витяжної місцевої вентиляції та повітропроникності приміщення. Ця вимога зумовлена тим, що в процесі зварювання утворюються шкідливі аерозолі, гази й випаровування, які при відсутності належної вентиляції можуть накопичуватися в робочій зоні та перевищувати ГДК.

Зокрема, доцільно застосовувати місцеву витяжну вентиляцію (витяжні зонти, пересувні каптури, витяжні шафи чи локальні відсмоктувачі), встановлені максимально близько до зони зварювання – це дає змогу видаляти шкідливі випари безпосередньо на джерелі їх утворення, до того як вони потраплять у зону дихання зварювальника [61]. Такий підхід є найефективнішим засобом контролю забруднення повітря при зварювальних роботах.

Необхідний об’єм повітря для роботи місцевої вентиляції $L_м$ визначається з урахуванням швидкості відсмоктування безпосередньо біля джерела виділення шкідливих речовин, типу та геометрії всмоктувального пристрою, а також характеристик робочого простору. Значення $L_м$ обчислюють за формулою (6.1):

$$L_м = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0, \qquad (6.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, м^2 ;

V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, м/с.

Розрахуємо об’єм повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією. У якості витяжного пристрою приймаємо трубчастий відсмоктувач середнього

розміру з округлим отвором діаметром 150 мм. Відсмоктувальний отвір розміщується на відстані 0,35 м від площини зварювання.

Розрахуємо площу отвору F_0:

$$F_0 = (\pi \cdot d^2)/4 = (3{,}14 \cdot 0{,}15^2)/4 \approx 0{,}01767 \text{м}^2.$$

Оскільки в межах нашої роботи виконується дугове зварювання неплавким електродом у середовищі інертного газу на листовому матеріалі різної товщини та при різних режимах зварювання, необхідну швидкість руху повітря V_x приймаємо рівною 0,3 м/с. Оскільки висота розміщення всмоктувального отвору X = 0,35 м, виконується умова $X > 0{,}5d$, відповідно розрахунок швидкості всмоктування V_0 для округлого отвору без екрана виконуємо за наступною формулою :

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (X/d)^2 = 16 \cdot 0{,}3 \cdot (0{,}35/0{,}15)^2 = 26{,}112 \text{ м/с},$$

Розрахуємо значення $L_м$:

$$L_м = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 = 3600 \cdot 0{,}01767 \cdot 26{,}112 = 1661{,}04 \text{м}^3/\text{год}.$$

Таким чином, для ефективного відведення зварювальних аерозолів під час дугового зварювання неплавким електродом у середовищі інертного газу листів із алюмінієвих сплавів різної товщини, в разі застосування стандартного трубчастого відсмоктувача з діаметром відсмоктувального отвору 150 мм, розташованого на відстані 0,35 м від зони зварювання, об’єм повітря, яке необхідно видалити місцевою вентиляцією становить 1661,04 м³/год. Отримане значення забезпечує достатню інтенсивність відсмоктування для мінімізації концентрацій зварювальних аерозолів та гарантує безпечні умови праці при досліджуваному процесі.

6.4 Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

Дії працівників під час повітряної тривоги.

У разі оголошення сигналу повітряної тривоги на робочому місці персонал

зобов’язаний діяти відповідно до затверджених на підприємстві заходів реагування, передбачених внутрішніми нормативними документами – інструкціями з охорони праці або планами цивільного захисту. Усі дії повинні виконуватися чітко та без зволікань, з дотриманням вказівок керівника робіт або особи, яка тимчасово виконує його обов’язки. Працівники мають негайно прямувати до найближчої захисної споруди, зокрема:

– споруд подвійного призначення – станцій метрополітену або підземних паркінгів;

– найпростіших укриттів – підвальних або цокольних приміщень будівель.

Після прибуття до укриття необхідно зайняти відведене місце та неухильно виконувати розпорядження відповідальної особи – коменданта сховища, керівника підрозділу або інженера з цивільного захисту. Перебування в укритті триває до офіційного повідомлення органів місцевого самоврядування про відбій повітряної тривоги.

У випадках, коли доступ до спеціалізованих захисних споруд відсутній, працівникам слід дотримуватися правила «двох стін», що зменшує ризик ураження уламками та вибуховою хвилею [62].

Пожежна безпека.

Згідно з вимогами ДСТУ Б В.1.1–36:2016 «Визначення категорій приміщень, будівель та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» [63], виробничі приміщення, у яких здійснюються зварювальні роботи, належать до категорії G. Будівля, в якій розміщене відповідне обладнання, має задекларований I ступінь вогнестійкості, що забезпечує обмеження поширення полум’я на основні несівні конструкції, при цьому мінімально допустима межа вогнестійкості становить не менше 2,5 години.

Зони виконання зварювальних робіт та розташування обладнання повинні бути повністю звільнені від легкозаймистих і горючих матеріалів у радіусі щонайменше 5 м. Проведення зварювання поза межами виробничих приміщень допускається виключно за погодженням із підрозділом пожежної безпеки підприємства [64].

Категорично забороняється виконувати зварювальні операції безпосередньо після фарбування металевих конструкцій, а також у зоні посудин, апаратів, трубопроводів і комунікацій, що перебувають під електричною напругою, підвищеним тиском або містять вибухонебезпечні, горючі чи токсичні речовини.

Комплекс заходів пожежної безпеки передбачає:

– запобігання загорянню ізоляційних матеріалів у разі короткого замикання шляхом застосування ефективного струмового захисту;

– недопущення формування вибухонебезпечних і горючих середовищ за рахунок надійної герметизації технологічного обладнання;

– використання систем пожежної сигналізації з автоматичними датчиками, які забезпечують своєчасне виявлення займання та запуск систем автоматичного пожежогасіння.

Висновки за розділом 6

Забезпечення безпечних умов праці під час виконання ручного аргонодугового зварювання неплавким електродом (TIG) та подальшої електродинамічної обробки зварних з’єднань алюмінієвих сплавів потребує комплексного врахування дії шкідливих і небезпечних виробничих факторів різної фізичної природи. Для процесу зварювання TIG визначальними є хімічні, оптичні, теплові та електричні фактори, тоді як для електродинамічної обробки характерні імпульсні механічні, акустичні та електромагнітні впливи. Дотримання вимог чинних нормативних документів, впровадження інженерних і організаційних заходів безпеки, раціональна організація робочих місць, використання засобів індивідуального захисту та контроль технічного стану обладнання забезпечують зниження виробничих ризиків до допустимого рівня. Застосування елементів автоматизації й захисних систем обладнання сприяє зменшенню навантаження на персонал, підвищенню рівня безпеки та створенню стабільних умов для реалізації досліджуваних технологічних процесів.

ВИСНОВКИ

1. Порівняльний аналіз хімічного складу сплавів на основі алюмінію 1561 та АМг6 свідчить, що вони близькі, що дозволяє поширити узагальнені результати досліджень та отримані основні закономірності щодо впливу процесу електродинамічної обробки на зміну величини компонент напружено-деформованого стану отримані для зварних з'єднань сплаву АМг6 на сплав 1561.

2. За результатами розрахунків встановлено, що обране обладнання для електродинамічної обробки та рекомендовані параметри режиму процесу електродинамічної обробки стикових зварних з'єднань пластин товщиною до 8 мм зі сплаву АМг6 забезпечують достатній рівень енергії розрядного імпульсу електродинамічної обробки в $E_{пл} \approx 700$ Дж для пластичного деформування металу зазначених зварних з'єднань.

3. Для забезпечення ефективного впливу процесу електродинамічної обробки на регулювання величини напружень стикових зварних з'єднань пластин товщиною до 4 мм зі сплаву АМг6 необхідно забезпечувати відстань між зонами енерговиділення не більше за 10 мм по довжині зварного з'єднання. Для зменшення величини значень залишкових післязварювальних напружень до нуля, за обраних умов, достатньо трьох електродинамічних впливів на одному локальному фрагменті поверхні пластини за режимом E = 800 Дж.

4. Встановлено, що у поперечному перерізі пластини після одного імпульсу електричного струму електродинамічної обробки максимальні значення поздовжньої компоненти напружень σ_x на лінії сплавлення зменшуються на 60–65 %, а поперечної компоненти σ_y – на 35–40 %.

5. В процесі електродинамічної обробки формуються сумарні деформації ε^{Σ} розтягу в області електродинамічного вплив, а інтенсивність зростання сумарних деформацій ε^{Σ} на контрплощині вища ніж на площині введення на всіх стадіях електродинамічної обробки.

6. Електродинамічна обробка забезпечує сформування деформації вигину, протилежних за знаком зварювальним деформаціям і забезпечує можливість ефективного коригувати форми стикових зварних з’єднань пластин.

7. На основі результатів досліджень створені Технологічні рекомендації по застосуванню процесу електродинамічної обробки для виправлення стикових зварних з’єднань листового прокату зі сплавів на основі алюмінію.

8. В роботі розглянуті питання охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, створений стартап-проект.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лабур Т. М. Зварні конструкції з алюмінієвих сплавів / Т. М. Лабур // *Автоматичне зварювання*. – 2020. – № 3. – С. 35–44.

2. Кривов Г. А. Світова авіація на рубежі XX–XXI століть: промисловість, ринки / Г. А. Кривов, В. А. Матвієнко, Л. Ф. Афанасьєва. – Київ : КВІЦ, 2003. – 352 с.

3. Гринюк А. А. Особливості зварювання алюмінієвих сплавів: зварювання неплавким електродом різнополярним асиметричним струмом : дис. … канд. техн. наук : 05.03.06 / Гринюк Андрій Андрійович ; Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – Київ, 2021. – С. 17–25.

4. Xu B. Metal flow mechanisms during alternating current arc welding and additive manufacturing of aluminium alloy [Electronic resource] / Bin Xu [et al.] // Communications materials. – 2025. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–8. – Mode of access: https://doi.org/10.1038/s43246-025-00819-x (date of access: 28.10.2025). – Title from screen.

5. Ferdinandov N. Influence of the pulse mode of manual metal arc welding on weldment distortions [Electronic resource] / Nikolay Ferdinandov [et al.] // Materials. – 2024. – Vol. 17, no. 20. – P. 5067. – Mode of access: https://doi.org/10.3390/ma17205067 (date of access: 12.11.2025). – Title from screen.

6. Naing T. H. Effect of conventional and pulsed TIG welding on microstructural and mechanical characteristics of AA 6082-T6 repair welds [Electronic resource] / Thet Htet Naing, Prapas Muangjunburee // Journal of Wuhan University of technology-materials science edition. – 2023. – Vol. 38, no. 4. – P. 865–876. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s11595-023-2770-9 (date of access: 24.11.2025). – Title from screen.

7. Коржик В. М. Вплив швидкості плазмово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на формування з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів / В. М. Коржик [та ін.] // *Автоматичне зварювання*. – 2023. – № 8. – С. 23–34.

8. Xu B., Chen S. J. Physical mechanism of material flow in variable polarity plasma arc keyhole welding revealed by in situ x-ray imaging [Electronic resource] / Bin Xu [et al.] // Physics of fluids. – 2021. – Vol. 33, no. 1. – P. 017121. – Mode of access: https://doi.org/10.1063/5.0036587 (date of access: 07.12.2025). – Title from screen.

9. Спеціальні способи зварювання : підручник / І. В. Крівцун, В. В. Квасницький, С. Ю. Максимов, Г. В. Єрмолаєв. – Миколаїв : НУК, 2017. – 348 с.

10. Hu Y., Wang P., Li Z., Chen H., Wang H., Li Y., Li X. Inhibiting weld cracking in high-strength aluminium alloys [Electronic resource] / Yanan Hu [et al.] // Nature communications. – 2022. – Vol. 13, no. 1. – Mode of access: https://doi.org/10.1038/s41467-022-33188-x (date of access: 29.11.2025). – Title from screen.

11. Kah P. Investigation of weld defects in friction-stir welding and fusion welding of aluminium alloys / P. Kah, R. Rajan, J. Martikainen, R. Suoranta // *International journal of mechanical and materials engineering*. – 2015. – Vol. 10. – Art. 26. – P. 1–10.

12. Huang Y. A qualitative and quantitative investigation of nonmetallic inclusions in Al–Mg, Al–Cu, and Al–Zn–Mg–Cu alloys / Y. Huang, C. Li, H. Wang, Y. Zhang // *Journal of materials research & technology*. – 2024. – Vol. 28. – P. 4479–4493.

13. Гребенюк Г. А. Теорія зварювальних напружень і деформацій / Г. А. Гребенюк. – Київ : Вища школа, 2019. – 312 с.

14. Siddique A. M. Z. Post-weld residual stresses and heat treatments of Gas Tungsten Arc Welded aluminum alloy AA6061-T651 [Electronic resource] / A. M. Z. Siddique [et al.] // World journal of engineering. – 2013. – Vol. 10, no. 1. – P. 11–22. – Mode of access: https://doi.org/10.1260/1708-5284.10.1.11 (date of access: 03.12.2025). – Title from screen.

15. Zhou G. Controlling welding residual stress and distortion of high-strength aluminum alloy thin plates by a trailing hybrid high-speed gas fluid field / G. Zhou, B. Liu, W. Song [et al.] // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 18. – Art. 6451. – P. 6451–6467.

16. Паламарчук О. В. Зварювання та контроль якості зварних з’єднань / О. В. Паламарчук. – Київ : Ліра-К, 2021. – 256 с.

17. Paton B. Automated thermal straightening of welded thin-sheet structures / B. Paton, L. Lobanov, G. Tsybulkin [et al.] // *The Paton welding journal*. – 2003. – No. 7. – P. 2–7.

18. Makhnenko O. Mathematical modeling of thermal straightening of cylindrical shells and shafts with distortions along their longitudinal axis / O. Makhnenko, A. Muzhichenko // *The Paton welding journal*. – 2007. – No. 9. – P. 17–23.

19. Makhnenko O. Increase of efficiency of thermal straightening of welded thin-sheet structures on basis of mathematical modeling / O. Makhnenko *// The Paton welding journal.* – 2008. – No. 9. – P. 6–10.

20. Makhnenko O. Application of mathematical modelling in thermal straightening of shipbuilding panels / O. Makhnenko, A. Muzhichenko, P. Seyffarth // *The Paton welding journal.* – 2009. – No. 1. – P. 6–12.

21. Conrad H., Sprecher A. The electroplastic effect in metals / H. Conrad, A. Sprecher // Dislocations in solids / ed. by F. R. N. Nabarro. – Amsterdam : Elsevier Science Publishers B. V., 1989. – P. 500–529.

22. Lu A. Research on residual stress reduction by a low frequency alternating magnetic field / A. Lu // *Journal of materials processing technology.* – 1998. – Vol. 74. – P. 255–258.

23. Lobanov L. Effect of electrodynamic treatment on stressed state of welded joints on steel St3 / L. Lobanov, N. Pashchin, V. Loginov, V. Smilenko // *The Paton welding journal.* – 2007. – No. 7. – P. 6–9.

24. Lobanov L. Effect of electric pulse treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review) / L. Lobanov, N. Pashchin, V. Loginov, A. Poklyatsky // *The Paton welding journal.* – 2010. – No. 3. – P. 10–14.

25. Stepanov G. High-density pulse current-induced unsteady stress–strain state in a long rod / G. Stepanov, A. Babutskii, I. Mameev // *Strength of materials*. – 2004. – Vol. 36, No. 4. – P. 377–381.

26. Lobanov L. Features of formation of plastic deformations at electrodynamic treatment of welded joints of St3 steel / L. Lobanov, V. Makhnenko, N. Pashchin, V. Loginov // *The Paton welding journal.* – 2007. – No. 10. – P. 7–12.

27. Lobanov L. Influence of electrodynamic treatment on the stress-strain state of heat-resistant steels / L. Lobanov, N. Pashchin, V. Skulsky, V. Loginov // *The Paton welding journal.* – 2006. – No. 5. – P. 8–12.

28. Zhang H. Effects of high frequency mechanical impact treatment on fatigue performance of 7075 aluminum alloy thin-walled laser-welded joints [Electronic resource] / Hai Zhang, Jinpeng Zhang, Qiaorong Guo // Welding in the world. – 2025. – Vol. 69. – P. 1015-1028. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/s40194-025-02141-z (date of access: 08.12.2025). – Title from screen.

29. Malaki M. A review of ultrasonic peening treatment [Electronic resource] / Massoud Malaki, Hongtao Ding // Materials & design. – 2015. – Vol. 87. – P. 1072–1086. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.102 (date of access: 01.12.2025). – Title from screen.

30. Лобанов Л. М. Електродинамічна обробка зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6 в процесі нагріву металу шва / Л. М. Лобанов, М. О. Пащин, О. Л. Міходуй [та ін.] // *Автоматичне зварювання.* – 2022. – № 4. – С. 3–7.

31. Лобанов Л. М. Вплив форми електрода на напружено-деформований стан сплаву АМг6 при його електродинамічній обробці / Л. М. Лобанов, М. О. Пащин, О. Л. Міходуй [та ін.] // *Автоматичне зварювання.* – 2022. – № 9. – С. 5–11.

32. Сплав АМг6 (1560) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://evek.com.ua/materials/splav-amg6-1560.html (дата звернення: 21.10.2025). – Назва з екрана.

33. Пригунова А. Г. Конструкційні алюмінієві сплави систем Al–Cu–Mg і Al–Zn–Mg–Cu в літакобудуванні / А. Г. Пригунова, А. М. Недужий // *Процеси лиття*. – 2023. – № 1 (151). – С. 54–68.

34. Лобанов Л. М. Економічна оптимізація методів зварювання конструкцій паливних баків ракетно-космічної техніки / Л. М. Лобанов, О. П.

Кушнарьов, О. А. Мазур [та ін.] // *Автоматичне зварювання*. – 2018. – № 3. – С. 42–51.

35. Honeycombe R. W. K. The plastic deformation of metals / R. W. K. Honeycombe. – 2nd ed. – Maidenhead : Edward Arnold (Publ.) Ltd., 1984. – 483 p.

36. Bell J. F. The experimental foundations of solid mechanics / J. F. Bell. – Berlin ; New York : Springer-Verlag, 1984. – XII, 813 p. : ill. – (Mechanics of solids).

37. Lobanov L. Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry / L. Lobanov, V. Pivtorak, V. Savitsky [et al.] // *The Paton welding journal*. – 2006. – No. 1. – P. 24–30.

38. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник. / Олег Григорович Левченко. – Київ : Основа, 2010. – 240 с.

39. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : Міністерство охорони здоров’я, від 01.12.1999 № 42.

40. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – [Чинні від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров’я України, 1999. – 28 с.

41. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. – [Чинні від 1999-12-01]. – Київ : Міністерство охорони здоров’я України, 1999. – 23 с.

42. Гігієнічні регламенти хімічних речовин у повітрі робочої зони : наказ МОЗ України № 741/35024 від 03.08.2020 р. – Київ : Міністерство охорони здоров’я України, 2020.

43. ДБН В.2.2-28:2010. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення. – Чинний від 2011-10-01. – Вид. офіц.

44. Охорона праці та цивільний захист : підручник / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний [та ін.] ; за ред. О. Г. Левченка. – Київ : Основа, 2019. – 472 с.

45. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Чинний від 2014-01-01. – Вид. офіц.

46. Показники емісії (питомі викиди) забруднюючих речовин від процесів електро-, газозварювання, наплавлювання, електро-, газорізання та напилювання металів / А. М. Сердюк, В. С. Присяжнюк, Л. М. Шмаргун, О. П. Федоришин, В. М. Доценко, Т. О. Синенко, О. Г. Левченко. – Київ : МОЗ України, 2003. – 23 с.

47. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. Чинний від 1994-04-15 – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2003.

48. НПАОП 28.52-1.31-13. Правила охорони праці під час зварювання металів. – [Чинні від 2013-12-09]. – Київ : Міністерство соціальної політики України, 2013. – 72 с.

49. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – [Чинні від 1998-02-09]. – Київ : Держнаглядохоронпраці України, 1998. – 126 с.

50. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – Київ : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2017. – 617 с.

51. Зміна № 1 ДСТУ 2456-94. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки. Чинний від 1994-04-15 – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2003.

52. ДСН 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. – [Чинні від 2002-12-18]. – Київ : Міністерство охорони здоров’я України, 2002. – 28 с.

53. НПАОП 28.5-1.02-07. Правила охорони праці при термічній обробці металів. – [Чинні від 2007-11-21]. – Київ : Держгірпромнагляд України, 2007. – 36 с.

54. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу : наказ МОЗ України № 0472-14. – [Чинна від 2014-04-08]. – Київ : Міністерство охорони здоров’я України, 2014.

55. ДНАОП 0.00-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Наказ від 21.06.2001 № 272 Про затвердження Правил влаштування електроустановок. Електроустаткування

спеціальних установок. Київ: Міністерство праці та соціальної політики України, 2001. (Державні Нормативні Акти з Охорони Праці)

56. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. – [Чинний від 2012-07-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2012. – 28 с.

57. ДСТУ EN 175-2001. Засоби індивідуального захисту очей та обличчя під час зварювальних та споріднених процесів. – Чинний від 2003-07-01. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2003.

58. ДСТУ EN 169:2001. Засоби індивідуального захисту очей. Фільтри під час виконання зварювання та споріднених процесів. Вимоги до пропускання та рекомендації щодо використання. – [Чинний від 2003-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 24 с.

59. ДСТУ EN 420:2017. Загальні вимоги до рукавиць. – [Чинний від 2018-01-01]. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. – 16 с.

60. ДСТУ EN 133:2005. Засоби індивідуального захисту органів дихання. Класифікація. – [Чинний від 2007-01-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 12 с.

61. Welding - ventilation [Electronic resource] // Canadian Centre for Occupational Health and Safety. – Mode of access: https://www.ccohs.ca/oshanswers/safety_haz/welding/ventilation.html?utm (date of access: 10.12.2025). – Title from screen.

62. Якими мають бути дії працівників та роботодавців під час повітряної тривоги [Електронний ресурс] // Довідник спеціаліста з охорони праці. – Режим доступу: https://pro-op.com.ua/article/15628-yakimi-mayut-buti-dii-pratsivnikiv-pid-chas-povitryanoi-trivogi (дата звернення: 11.12.2025). – Назва з екрана.

63. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01. – Вид. офіц. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

64. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях: рекомендації до виконання розділу магістерської дисертації [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка» (зварювальні та споріднені спеціалізації): Електронні текст. дані / уклад. О. Г. Левченко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 30 с.