

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
Інститут електрозварювання ім. Є.О.ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГРИНЮК АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ**

**УДК 621.791.755**

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ  
РІЗНОПОЛЯРНИМ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ**

Спеціальність 05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Подається на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.А. Гринюк

Науковий керівник:

**Коржик Володимир Миколайович**  
доктор технічних наук,

**Київ – 2021**

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	5
<b>РОЗДІЛ 1 Особливості зварювання алюмінієвих сплавів неплавким електродом в інертних газах</b>	11
1.1 Зварювання неплавким вольфрамовим електродом звичайною дугою в інертних газах.	11
1.1.1 Зварювання змінним синусоїдним струмом.	11
1.1.2 Зварювання неплавким вольфрамовим електродом звичайною дугою в інертних газах.	13
1.2 Плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів	15
1.2.1 Плазмо-дугове зварювання змінним синусоїдним струмом.	15
1.2.2 Плазмо-дугове зварювання постійним струмом при оберненій полярності	17
1.2.3 Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму	19
1.3 Мета та завдання досліджень.	23
<b>РОЗДІЛ 2 Методика досліджень</b>	
2.1. Зварювані та зварювальні матеріали.	25
2.2. Підготовка матеріалів під зварювання.	32
2.3. Зварювальне обладнання.	33
2.4. Методика проведення зварювальних дослідів.	45
2.5. Методика визначення впливу технологічних заходів на процеси дегазації рідкого металу зварювальної ванни.	48
2.6. Методика проведення механічних випробувань зварних зразків.	50
2.7 Методика дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань.	52
2.8 Методика розрахунку напружено-деформованого стану для зварювання алюмінієвих сплавів	53
Висновки до розділу 2	56
<b>РОЗДІЛ 3 Закономірності впливу основних технологічних факторів плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на формування зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів</b>	58
3.1 Вольт-амперна характеристика стисненої дуги різнополярного асиметричного струму	58

3.2	Визначення впливу умовної довжини дуги на енергетичні параметри дуги та характер проплавлення металу	61
3.3	Вплив витрат плазмоутворюючого газу на геометричні параметри швів. Особливості впливу витрат плазмоутворюючого газу при різних значеннях струму стисненої дуги	65
3.4	Визначення впливу несучої частоти різнополярного асиметричного струму на якість формування поверхні та геометрію швів	71
3.5	Оцінка впливу тривалості протікання струму при прямій та оберненій полярності на якість формування та геометричні параметри швів	74
3.6	Вплив вмісту гелію у захисній атмосфері на формування швів	78
3.7	Визначення впливу зміни швидкості зварювання та величини зварювального струму на геометричні параметри швів	81
	Висновки до розділу 3	82
	<b>РОЗДІЛ 4 Особливості формування та шляхи підвищення якості зварних з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів</b>	85
4.1	Особливості формування кореневої частини швів при використанні підкладок з формуючими канавками	85
4.2	Визначення особливостей плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвих сплавів без використання підкладних елементів у режимі наскрізного проникнення плазмового струменя	89
4.3	Запобігання утворенню газових пор при зварюванні алюмінієво-літійєвих сплавів вільною та стисненою дугою	98
4.4	Розробка методів запобігання утворенню включень оксидної плівки у високоміцних сплавів при зварюванні неплавким електродом з різним стисканням дуги потоком газу	102
4.5	Методика розрахунку параметрів режиму плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом	107
	Висновки до розділу 5	116
	<b>Розділ 5 Вплив швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на механічні властивості, структуру та напружено-деформований стан зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів</b>	118

5.1	Характер формування швів, структури та зміни механічних властивостей з'єднань в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом	118
5.2	Впливу способу формування кореневої частини шва при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів на структуру зварних швів та механічні властивості алюмінієво-літійєвих сплавів при статичному одновісному та позацентровому навантаженнях	127
5.3	Розподіл температурних полів у зварюваних пластинах в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання	134
5.4	Напружено-деформований стан у зварних з'єднаннях, отриманих зварюванням стисненою дугою з різними швидкостями зварювання	137
5.5	Порівняльний аналіз процесів аргонодугового та плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом	142
	Висновки до розділу 5	150
	<b>РОЗДІЛ 6 Розробка обладнання для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом</b>	154
6.1	Комп'ютерне моделювання конструкції та натурні випробування універсального плазмотрону для автоматичного шовного та точкового плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів	154
6.2	Розробка конструкції плазмового модулю для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання	159
6.3	Перспективи використання стисненої дуги у комбінованих способах швидкісного дугового зварювання алюмінієвих сплавів	162
6.4	Приклади використання результатів роботи для створення промислового обладнання виготовлення конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом	167
	Висновки до розділу 6	172
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ</b>	174
	<b>ЛІТЕРАТУРА</b>	176

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку науки і техніки існує потреба зварювати конструкції із високоміцних алюмінієвих сплавів різних систем легування (наприклад, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li, Al-Mg-Li). Дані конструкції застосовують в авіакосмічній промисловості, судно- і вагонобудуванні, при виготовленні автомобільного транспорту тощо. Традиційно цю задачу вирішують за рахунок застосування добре відомого процесу аргонодугового зварювання неплавким електродом різнополярним струмом (АДЗНЕ) зварювання із розробкою крайок, якій здійснюють переважно за кілька проходів (не менш двох). Високоміцні алюмінієві сплави, особливо зі вмістом літію, схильні до утворення в процесі аргонодугового зварювання дефектів у вигляді оксидних включень. Тепло, яке виділяється під час зварювання АДЗНЕ з не високою концентрацією енергії в плямі нагрівання, викликає розміщення таких сплавів в зоні термічного впливу. Одним із шляхів збільшення продуктивності зварювання таких конструкцій та підвищення якості швів є застосування економічного однопрохідного дугового зварювання. Більш за все під цю характеристику підходить плазмо-дугове зварювання, яке забезпечує щільність потужності не менш  $300 \text{ Вт/мм}^2$ , що в порівнянні із АДЗНЕ, приблизно в 5 разів перевищує цей показник і, щонайменше в 3 рази – швидкість зварювання. Однак, для встановлення механізмів і природи протікання фізичних явищ при формуванні зварних швів і, відповідно, розширення застосування даного процесу необхідно виконати системні дослідження в таких напрямках:

- встановлення закономірностей отримання зварних швів при швидкостях зварювання, які перевищують швидкість зварювання ТІГ в 3 та більше разів для різних систем легування алюмінієвих сплавів;
- аналіз особливостей формування швів без використання підкладних елементів з формуючими канавками;
- вивчення природи утворення газових пор при використанні концентрованих джерел нагрівання та методи ефективної боротьби з ними;

- виявлення особливості формування швів на вертикальній площині та можливості збільшення швидкості плазмо-дугового зварювання;
- розробка методики розрахунку параметрів режиму зварювання з урахуванням теплофізичних особливостей алюмінієвих сплавів різних систем легування та швидкості зварювання.

Вирішення зазначених питань значно підвищить продуктивність і якість зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів, що робить актуальною науково-технічну задачу дослідження особливостей фізико-металургійних процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ).

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**  
Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках Державних науково-технічних програм «Дослідити фізико-металургійні процеси та розробити технології зварювання плавленням нового класу високоміцних сплавів і композитів на основі алюмінію та різнорідних матеріалів» (№ ДР 0103U005428, 2003-2005 рр.); «Розробка наукових основ перспективних технологій зварювання високоміцних легких матеріалів і забезпечення міцності та довговічності зварних елементів конструкцій аерокосмічної техніки» (№ ДР 0110U002740, 2010-2013 рр.); «Розробка конструкції гібридного плазмотрону з осьюовою подачею електродного дроту» » (№ ДР 0115U006700, 2015 р.); «Дослідження фізико-металургійних процесів при гібридному та комбінованому зварюванні з поєднанням плазми і дуги плавкого електрода та створення програмно-апаратного забезпечення для реалізації технологій зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів та суднобудівних сталей» (№ ДР 0117U001186, 2016-2019 рр.); «Доопрацювання тандем-процесу «плазмо-дугове зварювання – ЕДО» та технологічної оснастки для його реалізації» (№ ДР 0118U005494, 2018-2019 рр.); «Підвищення ресурсу зварних промислових і транспортних конструкцій шляхом розробки та застосування комбінованої технології «швидкісне гібридне плазмове зварювання струмопровідним дротом + електродинамічна обробка» (№ ДР 2016-2020 рр.).

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на створення високоякісних з'єднань алюмінієвих сплавів шляхом застосування VPPAW із мінімізованою погонною енергією в порівнянні з існуючими процесами зварювання неплавким електродом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- 1) розвинуто дослідження взаємного впливу основних складових процесу плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів на формування зварних з'єднань із високоміцних алюмінієвих сплавів. Встановлено, що частота різнополярного струму дозволяє збільшувати до 2-2,5 разів глибину проплавлення швів без погіршення якості з'єднання та збільшення теплового навантаження та плазмотрон;
- 2) встановлено ефект видалення газових включень з рідкого металу зварювальної ванни за рахунок її коливання низькочастотними пульсаціями струменю плазмоутворюючого газу, який дає однакове з модуляцією зварювальним струмом зменшення у 2 рази кількості газових пор у порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням без додаткових коливань зварювальної ванни;
- 3) дістало розвитку дослідження механічних властивостей званих з'єднань алюміній-літійєвих сплавів та показано, що при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом границя міцності та ударна в'язкість зварних з'єднань при позацентровому розтягуванні на 30 % вищі у порівнянні з процесом аргонодугового зварювання неплавким електродом, при цьому спосіб формування кореневої частини швів із використання підкладки з формують канавкою дає можливість отримати на 10% вищі показники ніж у плазмо-дугового зварювання з наскрізним проникненням плазмового струменя без використання підкладних елементів;
- 4) отримало подальший розвиток дослідження закономірності впливу погонної енергії (швидкості зварювання) на зміну механічних властивостей високоміцних алюмінієвих сплавів систем легування Al-Mg-Mn, Al-Cu-Li та Al-Cu-Mn в інтервалах товщиною 2 мм, при цьому для кожного сплаву

визначено граничний рівень швидкості зварювання, до якого відбувається зростання механічних властивосте зварних з'єднань;

- 5) вперше встановлено, що залишкові деформації різко зменшуються в декілька разів при досягненні певної пікової швидкості зварювання, значення якої корелюється із товщиною зварювального металу, а подальше збільшення швидкості зварювання не викликає суттєвого зменшення залишкових деформацій;
- 6) запропоновано методику розрахунку основних параметрів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів, яка є оберненою задачею обчислення температури при швидкісному (більше ніж 20 см/хв (12 м/год), зварюванні, яка враховує теплофізичні властивості алюмінієвих сплавів та зміну їх геометрії в залежності від швидкості зварювання.

**Практичне значення одержаних результатів.** Встановлені в роботі закономірності процесу ПДЗ, а також вимоги до умов їх реалізації, дозволили створити рекомендацій з технології та модернізації обладнання, яке забезпечує з'єднання алюмінієвих сплавів із крайками товщиною до 12 мм. Практична цінність роботи міститься в наступному:

- 1) розроблена і впроваджена нова технологічна оснастка для ПДЗ, в тому числі універсальний складально-зварювальний стіл оригінальної конструкції зі змінним кутом нахилу, зварювально-складальна оснастки із підкладкою зі спеціальною формою канавки, що забезпечує якісне формування зварних з'єднань у широкому діапазоні швидкостей в різноманітних просторових положеннях;
- 2) створено плазмотрон оригінальної конструкції із підвищеним ресурсом роботи, який дозволяє здійснювати стабільний процес ПДЗ на струмах до 400 А, на основі якого розроблено та виготовлено лінійку промислових плазмотронів для плазмового точкового зварювання та комбінованого зварювання стисненою дугою неплавкого електроду та плавким електродом без утворення спільної ванни;



- 3) створено оригінальну конструкцію плазмового модулю, на базі якого із залученням серійних джерел живлення для АДЗНЕ створені комплекси обладнання для ручного або механізованого ПДЗ;
- 4) результати досліджень використані при створенні промислових технологій ПДЗ елементів паливної арматури, а також при виготовленні зразків серійного обладнання для ручного, напівавтоматичного та автоматизованого (роботизованого) ПДЗ.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі особисто автором: проаналізовано та вивчено наукову літературу з теми дисертації, проведено попередні теоретичні дослідження характеристик методів; проведено низку експериментальних досліджень особливостей процесів зварювання алюмінієвих сплавів із аналізом одержаних результатів; виконано металографічні дослідження і механічні випробування зварних з'єднань; проведено чисельне комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану зварених зразків; виконано конструкторські розробки елементів обладнання модульного комплексу для промислового зварювання конструкцій з алюмінієвих сплавів.

Дисертаційна робота виконана у відділі електротермічних процесів обробки матеріалів Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом докт. техн. наук, старшого дослідника, завідувача відділом електротермічних процесів обробки матеріалів ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Коржика В. М. Робота є результатом самостійних досліджень дисертанта.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних національних і міжнародних семінарах, конференціях і форумах, та презентувались у збірках наукових праць (III Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (25-27 травня 2005р.), ІЕЗ, Київ, 2005; 16th International Conference «Computer Technology in Welding and Manufacturing», 6 – 8 June 2006, Kiev, 2006; IV Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та суміжні технології” (23-25 травня 2007 р.), Київ, 2007; V Всеукраїнська науково-технічна

конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (27-29 травня 2009 р.), Київ, 2009; VI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (25-27 травня 2011 р.), Київ, 2011; VII науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (22-24 травня 2013 р.), Київ, 2013; VIII міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів „Зварювання та споріднені технології” (20-22 травня 2015 р.), Київ, 2015; Міжнародна конференція «Иновационные технологии и инжиниринг в сварке “PolyWeld-2016”», 26-27 травня 2016 г., Київ, 2016; 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, October 20-21, Hangzhou, China, 2020).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 27 наукові праці, у тому числі 14 статей у наукових фахових виданнях (з них 3 статті у наукометричній базі Scopus), 2 патенти на винахід, 11 тез доповідей у збірках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація викладена на 231 сторінках, складається із вступу, шести основних розділів, основних висновків, додатку та списку використаних джерел з 100 найменувань. Робота містить 120 рисунки, 32 таблиці.

## РОЗДІЛ 1.

### ОСОБЛИВОСТІ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НЕПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ РІЗНОПОЛЯРНИМ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ.

#### 1.1. Зварювання неплавким вольфрамовим електродом звичайною дугою в інертних газах.

##### 1.1.1. Зварювання змінним синусоїдним струмом.

Алюмінієві та магнієві сплави відрізняються від низки інших конструкційних металів і сплавів наявністю на поверхні деталей оксидної плівки з температурою плавлення, яка в декілька разів перевищує температуру плавлення основного металу ( $T_{пл}$  плівки  $\approx 2030^\circ\text{C}$ ,  $T_{пл}$  чистого алюмінію  $\approx 660^\circ\text{C}$ ). При звичайних умовах зварювання неплавким електродом в аргоні при довжині дуги 2 - 3 мм постійним струмом прямої полярності, характерному для переважної більшості металів і сплавів, руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінієвого зразка під дією дуги не відбувається. Тому для руйнування оксидної плівки на поверхні використовують або постійний струм оберненої полярності, або струм зі зміною прямої та оберненої полярності.

Одним із перших способів зварювання алюмінієвих сплавів неплавким електродом було використання синусоїдного струму промислової частоти 50 Гц. Особливістю процесу зварювання було руйнування оксидної плівки в півперіод оберненої полярності та забезпечення більш глибокого проплавлення алюмінієвого зразка в півперіод прямої полярності.

Найбільш поширеним способом зварювання неплавким вольфрамовим електродом було зварювання з використанням синусоїдного струму частотою 50 Гц [1-3].

Особливістю даного способу зварювання було в тому, що при перетині нульової лінії при переході від горіння дуги в півперіод оберненої полярності в півперіод прямої полярності зварювальна дуга «затухала». Це було пов'язано зі збільшенням роботи виходу електронів з алюмінію, на відміну від роботи виходу електронів із вольфраму. Для підвищення стабільності горіння дуги неплавкого

електроду при використанні синусоїдного струму до складу системи керування зварювальними апаратами вводили спеціальну плату, основним завданням якої було видавання короткочасного високовольтного (декілька сотень вольт) в момент перетину кривої зварювального струму нульової лінії під час переходу від оберненої полярності до прямої.

Дана схема роботи зварювальних апаратів для аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом змінним струмом протрималася на світовому ринку протягом трьох десятиліть (з кінця 50-х до початку 90-х років ХХ століття).

На 60-80-ті роки приходить період інтенсивних досліджень властивосте зварних з'єднань сплавів АМг5 та АМг6 (Al-Mg-Mn). Також цей сплав досліджувався і співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Так було проведено ціла низка дослідних робіт під керівництвом Рабкіна Д.М., спрямованих на визначення поведінки зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів в умовах циклічних навантажень [4], особливостей поведінки оксидної плівки на поверхні алюмінієвого сплаву [5] та інші роботи.

Крім того аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом синусоїдним струмом характеризується перегріванням електроду у фазі горіння дуги при оберненій полярності, незначним впливом на руйнування оксидних включень [6-8]. Остаточо питання гарантованого запобігання утворенню оксидних включень у шва при зварюванні алюмінієвих сплавів за допомогою аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом змінним синусоїдним струмом не було вирішено.

Зменшити теплове навантаження на вольфрамовий електрод під час аргонодугового зварювання змінним синусоїдним струмом намагалися за рахунок створення асиметрії струму, за рахунок зміщення нульової лінії в бік оберненої полярності, тобто збільшуючи на графіку струму амплітуду струму прямої полярності та час існування прямої полярності. Таке рішення було реалізовано в джерелі живлення для зварювання вольфрамовим електродом алюмінієвих сплавів ОАРС-4 розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона. В серійне виробництво дане джерело не пішло.

### **1.1.2. Зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму.**

Подальшим розвитком процесу аргонодугового зварювання алюмінієвих сплавів був перехід від синусоїдальної хвилі струму до прямокутної форми хвилі зварювального струму. Перші роботи за даним напрямком почалися ще у 70-х роках ХХ століття [9-10].

За рахунок швидкого наростання струму при зміні полярності від оберненої до прямої полярності при переході кривої струму прямокутної форми через нуль відбувається більш надійне підпалювання дуги. При цьому дуга горить стабільно, та не вимагає використання високовольтного імпульсу при переході з оберненої полярності на пряму полярність [11].

Прямокутна форма хвилі зварювального струму надає можливість керувати балансом між тривалістю струму при прямій полярності та тривалістю струму при оберненій полярності. Крім того прямокутна форма хвилі струму надає можливість також отримувати асиметрію струму (різну величину зварювального струму в прямій та оберненій полярності). На базі ефекту хвилі струму прямокутної форми в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було розроблено два джерела струму для зварювання алюмінієвих сплавів неплавким вольфрамовим електродом – И-126 та И-160. Обидва джерела живлення були з тиристорним керуванням та індуктивний накопичувачами струму. Кожне з джерел живлення мало незалежне регулювання тривалості струму при прямій та оберненій полярності, а також незалежне регулювання амплітуди струму при прямій та оберненій полярності. Джерело живлення було розраховано на 400 А в прямій та оберненій полярності, джерело живлення И-160 було розраховано на 800 А в прямій та оберненій полярності. Всього було випущено 26 установок даного типу. Нажаль дані джерела живлення в перших моделях не мали стабілізації зварювального струму і підтримання величини струму в заданому діапазоні доводилося виконувати оператору вручну. В подальшому дані джерела живлення не пішли в серійне виробництво.

Особливістю процесу аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом різнополярним струмом з прямокутною формою хвилі струму від аргонодугового зварювання змінним синусоїдним струмом є вплив дуги на оксидну плівку як на поверхні зварюваних сплавів, так і на оксидні включення в металі шва. Оксидна плівка руйнується при конкретних значеннях зварювального струму та протягом визначеного часу. При прямокутній формі хвилі можна чітко виставити амплітуду струму оберненої полярності, необхідного для руйнування плівки, а також необхідний час. Це дає можливість покращити умови катодного очищення зварюваних поверхонь та підвищити ресурс вольфрамового електроду за рахунок зменшення виділення на ньому зайвого тепла від дії оберненої полярності.

Широкий розвиток інверторних технологій дав поштовх для розвитку різноманітних моделей джерел живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом різнополярним струмом з прямокутною формою хвилі. Так на даний час випускаються моделі з максимальним зварювальним різнополярним струмом від 160 А до 630 А. Спільними рисами таких джерел живлення є використання різнополярного струму прямокутної форми та можливість регулювати тривалість протікання струму при прямій полярності.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводилися дослідження використання асиметрії струму та балансу між полярностями для запобігання утворенню включень оксидної плівки в зварних швах алюмінієвих сплавів. Багато уваги цій проблемі приділяв Покляцький А.Г. Так ним було встановлено параметри режимів аргонодугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, при яких відбувалося ефективно руйнування оксидної плівки і в швах сплавів системи легування Al-Mg-Mn не утворювалися протяжні включення [12-15].

З кінця 70-х років ХХ століття в промисловості з'являються нові високоміцні алюмінієві сплави, леговані літієм. Введення літію до складу цих сплавів надало можливість зменшити питому вагу сплавів, підвищити міцність та модуль пружності. Але при цьому виявилась одна із особливостей – утворення ниткоподібних протяжних оксидних включень в металі шва під час

аргонодугового зварювання алюмінієвих сплавів [16]. Ефективно боротися з утворенням включень оксидної плівки в алюміній-літєєвих сплавах при аргонодуговому зварюванні різнополярний струмом з прямокутною формою хвилі струму за рахунок амплітудної та часової асиметрії, так як було це запропоновано для сплавів системи легування Al-Mg-Mn, не вдалося. Важко було спрогнозувати появу оксидних включень у шві, при цьому більш чутливими до утворення включень оксидної плівки у шва були сплави системи легування Al-Cu-Li.

В роботах Лабур Т.М. був відображений ефект різкого зниження опору утворенню та поширенню тріщини в зварних з'єднаннях алюміній-літєєвих сплавів, отриманих аргонодуговим зварюванням неплавким електродом різнополярним струмом [17-20].

## **1.2. Плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів.**

### **1.2.1. Плазмо-дугове зварювання змінним синусоїдним струмом.**

Плазмо-дугове зварювання є подальшим розвитком способу зварювання неплавким електродом. При цьому способі зварювання крізь сопло невеликого отвору подається інертний газ, який обтискає електричну дугу, яка горить між вольфрамовим електродом та виробом або електродом та соплом. Проходження іонізованого газу крізь отвір сопла й обтискання його швидкісним потоком інертного газу підвищує концентрацію енергії в дуговому проміжку та надає стовпу дуги вигляду циліндру, на противагу конусу при аргонодуговому зварюванню неплавким електродом. Висока концентрація енергії та висока швидкість витікання плазмоутворюючого газу обумовлюють більш глибоке занурення плазмового струменю в розплавлений метал, що забезпечує рівномірне прогрівання зварюваних кромки по товщині.

Після успішного використання процесу аргонодугового зварювання змінним синусоїдним струмом використали розробили обладнання та провели дослідження по зварюванню алюмінієвих сплавів плазмо-дуговим способом змінним синусоїдним струмом. Досліди по плазмо-дуговому зварюванню

алюмінієвих сплавів змінним синусоїдним струмом проводилися в кінці 60-х на початку 70-х років ХХ століття в багатьох наукових закладах СРСР, в тому числі і в ІЕЗ ім. Є. Патона [21-25].

В ході дослідів було встановлено, що стиснена дуга змінного синусоїдального струму забезпечує більше проплавлення алюмінієвих сплавів у порівнянні з аргонодуговим зварюванням змінним синусоїдним струмом. При цьому також спостерігається зменшення ширини шва та загального вкладення тепла у зварювальний алюмінієвий зразок. Також спостерігалось збільшення механічних властивостей зварних з'єднань сплаву АМгб системи легування Al-Mg-Mn.

Як і при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом, так і при плазмо-дуговому зварюванні змінним синусоїдним струмом більше проплавлення алюмінієвих сплавів відбувається в півперіод прямої полярності, а руйнування оксидної плівки на поверхні зварюваних сплавів (катодне очищення) протікає в півперіод оберненої полярності. Крім того у стисненої дуги змінного синусоїдного струму такі ж самі складнощі при переході через нуль при русі від оберненої полярності до прямої. Для забезпечення стабільності горіння стисненої дуги змінного синусоїдного струму в систему керування установки для плазмо-дугового зварювання необхідно було вводити додаткову плату, яка би генерувала високовольтний імпульс під час переходу дуги через нульову лінію при русі від оберненої до прямої полярності. Також ускладнюється будова самої установки із-за появи додаткового пристрою – блоку чергової дуги. Блок чергової дуги має забезпечити підпалювання дуги між електродом та плазмоутворюючим соплом (чергової дуги). Основне завдання чергової дуги – це іонізувати проміжок між вольфрамовим електродом та виробом та створювати сприятливі умови для запалювання основної зварювальної стисненої дуги.

Попри переваги над аргонодуговим зварюванням змінним синусоїдним струмом процес плазмо-дугового зварювання змінним синусоїдним струмом мав такі ж самі вади, як і зварювання звичайною дугою неплавкого електроду. Цим недоліком була відсутність можливості регулювати тривалість горіння дуги при



оберненій полярності, тобто вибирати тривалість оберненої полярності саме таку, яка необхідна лише тільки для руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінієвого сплаву. Враховуючи більшу напругу стисненої дуги у порівнянні з напругою звичайної дуги неплавкого електроду, в півперіод оберненої полярності на вольфрамовому електроді виділяється більше тепла, ніж при зварюванні звичайною дугою. Отже необхідно вибирати між ефективністю катодного очищення зварюваного алюмінієвого та стійкістю вольфрамового електроду. Не зважаючи на переваги у порівнянні з аргонодуговим зварюванням змінним синусоїдним струмом, процес плазмо-дугового зварювання синусоїдним струмом не отримав широко поширення. В літературі зустрічаються лише поодинокі згадування цього процесу зварювання.

### **1.2.2. Плазмо-дугове зварювання постійним струмом оберненої полярності.**

Складність обладнання для плазмо-дугового зварювання змінним синусоїдним струмом, низька стійкість вольфрамового електроду в плазмотроні, не ефективне руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінієвих сплавів підштовхнула дослідників у різних країнах до використання постійного струму оберненої полярності для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів [26-30]. Також плазмо-дугове зварювання алюмінієвих сплавів постійним оберненої полярності активно досліджували в ФРН [31-36].

Плазмо-дугове зварювання постійним струмом оберненої полярності виконували як в автоматичному, так і в ручному режимі [37,38].

Даний процес плазмо-дугового зварювання широко застосовувався при виробництві виробів криогенного призначення, в першу чергу із сплаву АМг5В (AL-Mg-Mn) та сплавів технічного алюмінію типу АД0 та АД1 [39,40].

Велику увагу дослідники приділяли вивченню особливостей формування швів при плазмо-дуговому зварюванні постійним струмом оберненої полярності без використання підкладок з формуючими канавками [41-49].

Більш детально розглядали питання руйнування оксидної плівки особливо при зварюванні алюміній-магнієвого сплаву АМг6 [50].

Одним із основних недоліків процесу плазмо-дугового зварювання постійним струмом оберненої полярності алюмінієвих сплавів є те, що переважна більшість тепла в процесі зварювання виділяється на аноді, яким виступає електрод плазмотрону. З метою продовження терміну експлуатації електрод виготовляють із міді зі вставкою вольфраму, забезпечують його інтенсивне рідинне охолодження, з метою покращення відведення тепла роблять деталі плазмотрону значно більшими у розмірах у порівнянні з деталями аналогічного призначення у плазмотронів для зварювання на постійному струмі прямої полярності або плазмотронів для зварювання змінним синусоїдним струмом. Збільшення габаритів плазмотронів для зварювання постійним струмом оберненої полярності ускладнює виконання ними кутових швів в таврових з'єднаннях. Крім того при однакових значеннях струму ширина шва, отримана плазмо-дуговим зварюванням постійним струмом оберненої буде більша ніж ширина шва, отримана змінним синусоїдним струмом, при цьому для формування опуклості однакової висоти буде витрачатися більше присадкового дроту, ніж при плазмо-дуговому зварюванні змінним синусоїдним струмом.

Другим негативним фактором, що притаманний також і імпульсно-дуговому зварюванню алюмінієвих сплавів постійним струмом оберненої полярності, є більша газова пористість. На думку німецьких вчених [51,52] основною причиною газової водневої пористості при плазмо-дуговому зварюванні на постійному струмі оберненої полярності є позитивно заряджені іони гідрогену, які утворюються під впливом плазми стовпа дуги з вибиванням із атома водню електроду. Позитивно заряджений іон водню притягується негативно зарядженим електродом, який виступає алюмінієва деталь. Так за рахунок такого явища шви алюмінієвих сплавів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням постійним струмом оберненої полярності завжди будуть мати вищу водневу пористість у порівнянні з процесами зварювання на змінному або різнополярному струмі з прямокутною формою хвилі струму.

Не зважаючи на таку недоліки із-за простоти зварювального обладнання процес плазмо-дугового зварювання постійним струмом оберненої полярності

продовжує використовуватися в ФРН [53] так і в Росії для зварювання сучасних високоміцних алюмінієвих сплавів [54,55].

### **1.2.3. Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму.**

Процес плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ) з прямокутною формою хвилі струму характеризується можливістю ефективно керувати амплітудами струму в прямій та оберненій полярності, а також регулювати частоту різнополярного струму та тривалість горіння дуги при прямій полярності (а відповідно і тривалість горіння дуги при оберненій полярності) [56-59]. За рахунок максимально наближеної до прямокутника форми хвилі зварювального струму відбувається швидкий перехід від оберненої полярності до прямої. При цьому дуга не потребує додаткового «підживлення» високовольтним імпульсом, що було характерно для аргонодугового та плазмо-дугового зварювання змінним синусоїдним струмом.

При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом (англійською мовою Variable Polarity Plasma Arc Welding або аббревіатурою VPPAW) тривалість горіння дуги при оберненій полярності вибирається таким чином, щоб забезпечити мінімально можливий час ефективного руйнування оксидної плівки на поверхні алюмінієвих сплавів. При цьому амплітуда струму в оберненій полярності могла бути більшою за амплітуду в прямій полярності на 35-50 А в залежності від хімічного складу алюмінієвих сплавів.

Процес плазмо-дугового зварюванні різнополярним асиметричним струмом (VPPAW) в першу чергу був спрямований на виконання зварювання алюміній-мідного сплаву 2219 (Al-Cu-Mn) як заміна зварюванню на постійному струмі прямої полярності в гелії. Плазмо-дугове зварювання не вимагало високої точності збирання під зварювання, було менш чутливим до зміни довжини дуги в процесі зварювання та дозволяли виконувати зварювання на вертикальній площині. Процес виконували з наскрізним проникненням плазмового струменю (keyhole) без використання підкладок з формуючими канавками [60-65].

Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів на вертикальній площині виконувалось зі швидкістю не більше 20 см/хв (12 м/год). В нижньому положенні зварювання майже не виконували із-за важкості отримання та підтримування в процесі зварювання наскрізного каналу в розплавленому металі (keyhole).

Основні проблеми, які розглядали дослідники – це підтримання стабільності формування наскрізного каналу в процесі плазмо-дугового зварювання на вертикальній площині, зменшення пористості в металі шва в першу чергу за рахунок підвищення вимог до якості плазмоутворюючого та захисного газу [66]. Ні якого динамічного впливу за зварювальну ванну не пропонувалося та не досліджувалося.

Починаючи з початку 90-х років в космічній галузі США проходить поступова заміна матеріалу, із якого виготовляються баки ракетносія Space Shuttle зі сплаву 2219 (Al-Cu-Mn) на сплави 2090, 2095 та 2195 (Al-Cu-Li). Нові сплави мали меншу питому вагу, вищі показники міцності та модуля пружності. При цьому основним способом зварювання для цих нових сплавів було обрано плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі зварювального струму. Зварювання, як і для конструкцій із сплаву 2219, виконували в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя на вертикальній площині [67].

Основним напрямком досліджень було вивчення особливостей формування наскрізного проплавлення саме для алюміній-мідь-літійєвих сплавів при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом вертикальних швів. При цьому діапазон швидкостей зварювання не перевищував 20 см/хв (12 м/год).

На початку 80-х років і до кінця 90-х років ХХ століття установки для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом з прямокутною формою хвилі струму були створені на основі джерел живлення з тиристорним керуванням. Основними виробниками обладнання були фірми Liburdi (Канада) та Sciasy Inc. (США). Висока вартість обладнання та складність ведення процесу стримували широке розповсюдження плазмо-дугового зварювання

різнополярним струмом у виробництві конструкцій наземного, повітряного та водного транспорту. Також була складність використання даного обладнання для ручного плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів.

Заміна наприкінці 90-х років ХХ століття плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на зварювання тертям з перемішуванням при виготовленні корпусів ракетноносіїв зменшили кількість досліджень у цьому напрямку як в Північній Америці так і в Західній Європі.

Напочатку 90-х років в ІЕЗ ім. Є.О. Патона під загальним науковим керівництвом Іщенко А.Я. проводилася розробка дослідної установки для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму алюмінієвих сплавів. Установка, яка отримала назву И-196, була розроблена на базі джерела живлення И-126 для зварювання неплавким електродом різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму. Нове джерело живлення И-196 мало тиристорне керування та індуктивні накопичувачі, крім того в конструкцію було внесена суттєва зміна – стабілізація струму в процесі зварювання. Активну участь в цих роботах приймав Покляцький А.Г., саме в роботах по дослідженню стабільності формування наскрізного проплавлення при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів різнополярним струмом без підкладок з формуючими канавками [69,70]. Основними напрямками досліджень були визначення сталих умов формування з'єднань із алюміній-магнієвого сплаву АМг6 при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом з прямокутною формою хвилі струму в умовах наскрізного проникнення плазмового струменя без використання підкладок з формуючими канавками. Питання боротьби з газовими порами та дослідження особливостей формування зварних з'єднань при плазмо-дуговому зварюванні зі швидкостями вище 60 см/хв (36 м/год) не виконувалися.

Інтенсивне застосування інверторних технологій дало поштовх до появи нового покоління обладнання для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів. Зацікавленість у випуску недорогого обладнання для плазмо-дугового

зварювання алюмінієвих сплавів почали проявляти великі європейські виробники такі, як Fronius і SBI (Австрія), Cloos та EWM (Німеччина), Castolin (Швейцарія). У цих фірм було два основних погляди на концепцію побудови апаратури для зварювання стисненою дугою різнополярним асиметричним струмом.

Перша позиція – створення спеціалізованого джерела живлення . Прикладом такого обладнання є джерело живлення TETRIX 350 AC/DC PLASMA фірми EWM, EUTRONIC GAP 3000 AC/DC фірми Castolin, а також PMI 380 AC/DC фірми SBI.

Друга позиція – створення приставки до існуючого серійного обладнання для аргонодугового зварювання алюмінієвих сплавів неплавким електродом. Такої думки притримується фірма Fronius. Розроблені нею плазмовий модуль FPM підключався до всіх джерел живлення як розробки фірми Fronius так і інших виробників. Така універсальність дозволила зекономити кошти на розробку та випуск спеціалізованого обладнання. Крім того джерела живлення фірми Fronius можна було використовувати для ручного і механізованого плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним струмом. Зменшення ціни обладнання та спрощення його експлуатації відкривали подальші перспективи використання плазмо-дугового зварювання в різних галузях господарства, частково замінюючи або повністю витісняючи процес аргонодугового зварювання алюмінієвих сплавів.

Але намагання спиратися на підходи формування зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, притаманних плазмо-дуговому зварюванню різнополярним струмом на вертикальній площині з наскрізним проникненням плазмового струменя, відсутність технологічних рекомендацій по виконанню плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів малої товщини (1-2 мм), відсутність досліджень в галузі боротьби із газовими порами, технологій зварювання на швидкостях вище 20-30 см/хв призвели до поступового зменшення попиту на обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом європейських виробників. Так на даний час (2020 рік) із вище наведених

моделей обладнання залишилось лише PMI 380L AC/DC фірми SBI. Інші моделі, на жаль, зняті з виробництва – покупець не знав і не вмів правильно використовувати дане обладнання і переваги процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом над аргонодуговим зварюванням.

На даний час ще продовжуються процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом в КНР [71-74].

**1.2.4. Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – встановлення закономірностей впливу основних параметрів процесу швидкісного плазмо-дугового зварюванням різнополярним асиметричним струмом на формування структури, механічних властивостей, запобігання утворення характерних дефектів та напружено-деформований конструкцій в з'єднаннях із високоміцних алюмінієвих сплавів, а також створення на цій базі методики розрахунку режимів зварювання та розробки комплексів обладнання для ручного, автоматичного та роботизованого плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку і основних недоліків процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (VPPAW) алюмінієвих сплавів.
2. Дослідження основних закономірностей впливу параметрів та умов плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом та технологічних факторів формування з'єднань на особливості протікання фізико-металургійних процесів при формуванні зварних з'єднань алюмінієвих сплавів систем легування Al-Mg-Mn , Al-Cu, Al-Mg-Li.
3. Дослідження впливу погонної енергії та способу отримання швів при VPPAW на закономірності формування структури та механічних властивостей зварних з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів (значення границі міцності яких перевищує 300 МПа), в тому числі сплавів із схильністю до термічного

зміцнення та без неї, а також сплавів, які можуть зміцнюватися за рахунок пластичної деформації.

4. Комплексна оцінка впливу погонної енергії VPPAW на напружено-деформований стан зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, в том числі із врахуванням системи їх легування, стану нагартування та товщини.
5. Розробка методики вибору оптимальних технологічних факторів VPPAW алюмінієвих сплавів і принципів створення модульного обладнання зварювального комплексу.
6. Розробка і впровадження рекомендацій по створенню промислових технологічних процесів VPPAW алюмінієвих сплавів.

*Об'єкт дослідження* – технологія VPPAW алюмінієвих сплавів зі швидкостями, які, щонайменше, в два і більше разів перевищують швидкість аргонодугового зварювання неплавким електродом.

*Предмет дослідження* – фізико-металургійні особливості формування геометрії зварного з'єднання та структури швів алюмінієвих сплавів при VPPAW.



## РОЗДІЛ 2.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Зварювані та зварювальні матеріали.

##### 2.1.1. Зварювані сплави.

###### Сплави системи Al-Mg-Mn

Серед зварюваних алюмінієвих сплавів значне місце займають термічно незміцнювані деформовані сплави системи алюміній-магній-марганець, які мають у своїй основі стабільний перенасичений твердий розчин магнію в алюмінії. Зі збільшенням кількості магнію міцність сплавів зростає, але погіршується технологічні характеристики та корозійна стійкість [77-79].

Алюмінієво-магнієві сплави відрізняються від інших високоміцних сплавів гарною пластичністю (відносне подовження складає 15...20 %) та корозійною стійкістю. Але у відпаленому стані мають відносно малу межу міцності та плинності ( $\sigma_b < 360$  МПа;  $\sigma_{0,2} < 220$  МПа).

Нагартвані листи та плити сплаву АМг6 мають межу міцності більше 400 МПа, а межу плинності більше 300 МПа, при цьому відносне видовження ( $\delta$ ) складає 6...7 %. Ці сплави добре зварюються в середовищі інертних газів. Відношення межі міцності зварного з'єднання до межі плинності гарячекатаного або відпаленого основного металу (коефіцієнт міцності з'єднання  $K_{зв}$ ) наближається до одиниці. Нагартування практично не впливає на схильність сплавів до утворення гарячих тріщин при зварюванні. Коефіцієнт міцності з'єднань, отриманих зварюванням плавким та неплавким електродами не перевищує 0,7.

Все це дозволяє широко використовувати алюмінієво-магнієві сплави для виготовлення відповідальних зварних конструкцій у різних галузях машинобудування. Але, при зварюванні неплавким вольфрамовим електродом сплави саме цієї системи мають підвищену схильність до утворення неметалевих включень оксидної плівки у металі шва.

Для досліджень використовували листи із сплаву АМгб у відпаленому та нагартованому стані товщиною 6,0...6,4 мм (табл. 2.1.)

Таблиця 2.1 - Механічні властивості листів сплаву АМгб

Марка сплаву	Товщина металу $\delta$ , мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Умовна Межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Ударна в'язкість $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут згину $\alpha$ , град
АМгбН	6	424	329	16	40
АМгбМ	6,2	350	169	33	180
АМгбМ	6,4	352	174	34	180

### Сплави системи Al-Cu-Mn

Особливу роль в промисловості відіграють сплави, що термічно зміцнюються, системи Al-Cu-Mn. Поряд з відносно високими значеннями міцності ці сплави мають гарну пластичність, в том числі високу технологічну пластичність.

Сплавам Al-Cu-Mn притаманні високі показники міцності при низьких температурах. Зі зниженням температури одночасно ростуть характеристики міцності та пластичність. Сплави добре зварюються.

У порівнянні зі сплавами інших систем легування сплави Al-Cu-Mn мало чутливі до концентраторів напруження. Крім цього данні сплави успішно працюють при температурах до +250° С [75].

До недоліків сплавів системи Al-Cu-Mn слід віднести їх низьку загальну корозійну стійкість. Хоча після термічної обробки (загартування + штучне старіння) вони мають задовільну корозійну стійкість під напруженням. В зв'язку з цим конструкції із сплавів системи Al-Cu-Mn потребують надійного захисту від кліматичного впливу навколишнього середовища, а особливо від впливу агресивного середовища. Для захисту листового напівфабрикату від корозії його поверхню плакують чистим алюмінієм.

Для машинобудування сплави цієї групи набувають особливе значення. Вони необхідні для виготовлення резервуарів для рідких кисню та водню.

Найбільше використанні ці сплави знайшли в літакобудуванні для виготовлення деяких вузлів турбореактивних двигунів. Хімічний склад сплаву 1201 системи легування Al-Cu-Mn наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Сплави системи Al-Cu-Mn

Марка	Хімічний склад, % (за масою)							
	Al	Cu	Mn	Cr	Ti	Zn	Fe	Si
1201	основа	5,8...6,3	0,3	-	0,06	0,2	0,4	0,4

Для досліджень використовували листи товщиною 6 мм із сплаву 1201 після термічної обробки (табл. 2.3.). Термічна обробка складалась з витримання листів у печі при температурі 530°C на протязі 1 години з охолодженням на повітрі та наступного штучного старіння при 170°C протягом 16 годин.

Таблиця 2.4 - Механічні властивості листів сплаву 1201

Товщина металу $\delta$ , мм	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Ударна в'язкість $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут згину $\alpha$ , град
2	423	308	9,0	78
6	430	340	8,6	28

#### Алюміній-літєві сплави.

Наявність у складі сплавів лужного металу літію надає напівфабрикатам особливих властивостей [80]. Їх питома вага зменшується, а модуль пружності та питома міцність різко підвищуються зі збільшення кількості літію у сплаві. Саме це привертає до цих сплавів увагу конструкторів нової техніки, особливо літальних апаратів. Всі сплави цієї групи можна термічно зміцнити, вони характеризуються високим рівнем механічних властивостей. За схильністю до утворення гарячих тріщин у швах, сплави розташовані у порядку збільшення цього показника, а саме 1420, 1460, 1440. Рівень розміщення матеріалу при зварюванні найменший у сплаву серії 1420, а найбільший – у сплаву типу 1440.

Сплав 1420 системи Al-Mg-Li має питому вагу на 12 % нижче, а модуль пружності на 8% вище, ніж сплав Д16, який широко використовуються у літакобудуванні. Сплав має високу корозійну стійкість [76].

Із сплаву 1420 випускався широкий асортимент листів, в тому числі для формування у надпластичному стані. Листи мають межу міцності та плинності, а також відносно видовження на рівні цих показників у дюралюмінів та дуже низьку швидкість розповсюдження тріщини втоми (ШРТВ). Цей показник важливий для авіаційних конструкцій, які розраховують за принципом безпечного руйнування. Опір навантаженням, що повторюються - малоциклова втома (МЦВ) у сплаву 1420 нижче, ніж у дюралюмінів.

Хімічний склад сплаву 1420 наведено в таблиці 2.4

Таблиця 2.4 - Сплави системи Al-Mg-Li

Марка	Хімічний склад, % (за масою)										
	Al	Mg	Li	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Cu	Ti	Ni
1420	основа	5,0...5,25	1,8...2,05	-	-	0,11	0,20	0,15	-	-	0,1

Механічні властивості сплаву 1420 наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 - Механічні властивості листів сплаву 1420

Товщина металу $\delta$ , мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Ударна в'язкість $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут згину $\alpha$ , град
4	460	340	8,5	45

Для досліджень використовували листи із сплаву 1420 товщиною 4 мм після термічної обробки. Термічна обробка вибиралася з метою досягнення максимальної міцності та складалась із витримання сплавів у печі при температурі 450°C протягом 1 години з охолодженням на повітрі та наступного штучного старіння при температурі 120°C протягом 7 годин.

Сплави 1440 и 1441 системи Al-Cu-Mg-Li близькі за хімічним складом, мають гарне поєднання показників міцності та експлуатаційної надійності [77-

79]. Завдяки підбраному співвідношенні вмісту основних легуючих елементів сплав 1441 придатний для виготовлення тонких плакованих листів методом рулонного прокатування. Листи із сплаву 1441 відрізняються від дюралюміна Д16 меншою на 7% питомою вагою та на 30% швидкістю розповсюдження тріщин втоми, а такою на 50% більш високими значеннями опору малоциклової втоми.

При зварюванні без присадки сплави 1440 и 1441 мають підвищену схильність до утворення гарячих тріщин  $A = 65\%$ . Стійкість металу шва до утворення гарячих тріщин можна підвищити шляхом використання присадкового дроту СвАМг63 ( $A = 24\%$ ).

Хімічний склад сплаву 1441 наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 - Сплави системи Al-Cu-Mg-Li

Марка	Хімічний склад, % (за масою)										
	Al	Mg	Li	Cu	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Ti	Ni
1441	основа	0,7...0,8	1,5...1,7	1,1...1,3	0,06	-	0,03	0,08	0,10	0,02	-

Механічні властивості сплаву 1441 наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 - Механічні властивості листів сплаву 1441

Товщина металу $\delta$ , мм	Межа міцності $\sigma_b$ , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Ударна в'язкість $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут згину $\alpha$ , град
2,5	416	309	18	150

Для досліджень використовували листи із сплаву 1441 товщиною 2,5 мм після термічної обробки. Термічна обробка складалась із витримання сплавів у печі при температурі 535°C протягом 0,5 години з охолодженням у воду та наступного штучного старіння при температурі 150°C протягом 24 годин.

Сплав 1460 системи Al-Cu-Li виготовляється з домішками цирконію та скандію. Він є самими високоміцним зварюваним сплавом, що термічно зміцнюються, серед усіх сплавів з домішками літію [80]. Міцність основного металу знаходиться на рівні 540-600 МПа, що при питомій вазі 2,6 г/см<sup>3</sup> та модулі

пружності 80 ГПа робить його одним із перспективних матеріалів для виготовлення конструкцій космічного призначення. При заміні сплавів системи Al-Cu-Mn на сплави серії 1460 досягається зменшення ваги конструкції на 15-20%. Особливою відзнакою сплаву 1460 є одночасне зростання його міцності та пластичності при криогенних температурах.

Хімічний склад сплаву 1460 приведено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Сплави системи Al-Cu-Li [4, 22].

Марка	Хімічний склад, % (за масою)										
	Al	Mg	Li	Cu	Mn	Sc	Zr	Fe	Si	Ti	Ni
1460	основа	0,7-0,8	1,5-1,7	1,1-1,3	0,06	-	0,03	0,08	0,10	0,02	-

Механічні властивості сплаву 1460 наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 - Механічні властивості листів сплаву 1460.

Товщина металу $\delta$ , мм	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Ударна в'язкість $a_n$ , Дж/см <sup>2</sup>	Кут згину $\alpha$ , град
2,0	486	445	-	37
3,0	580	540	2	18

Для досліджень використовували листи із сплаву 1460 товщиною 3,0 мм після термічної обробки. Термічна обробка складалась із витримання сплавів у печі при температурі 535°C протягом 0,5 години з охолодженням у воду та наступного штучного старіння при температурі 130°C протягом 20 годин і при температурі 160°C протягом 16 годин.

### 2.1.2. Присадні дроти.

В ході виконання досліджень біли використані присадкові дроти наступних марок СВАМг6, СВАМг63, Св1571, Св1201, 2319, 5183 та 5356, а також дослідні присадкові дроти на базі систем легування Al-Mg-Mn та Al-Cu-Mn з додаванням до 0,5% скандію.

Хімічний склад присадних дротів наведено в таблиці 2.10.

Дроти 5183 та 5356 мають заводське механічне полірування та не потребують додаткової обробки перед зварюванням. Дроти СВАМг6, СВАМг63,

Св1571 та Св1201 для захисту їх від корозії та для підготовки під зварювання були оброблені електролітичним поліруванням. Після проведення процедури електричної поліровки додаткова підготовка перед зварюванням не потрібна.

Хімічний склад присадних дротів наведено в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Хімічний склад присадних дротів.

Марка дроту	Масова частка в %									
	Mg	Mn	Sc	Zr	Zn	Cr	Cu	Ti	Fe	Si
СВАМг6	6,2	0,65	-	-	-	-	-	0,10	0,30	0,28
СВАМг63	6,2	0,66	-	0,23	-	0,01	0,005	-	0,012	0,012
Св1571	6,0	0,31	0,30	0,01	0,20	0,08	0,05	0,01	0,10	0,06
5183	4,9	0,65	-	-	0,02	0,07	0,0002	0,11	0,25	0,15
5356	4,9	0,21	-	-	0,01	0,14	-	0,10	0,16	0,04
Св1201										

В процесі експериментів використовували дроти діаметром 1,6 мм.

### 2.1.3. Захисний та плазмоутворюючий газ.

Промисловість виготовляє аргон першого та вищого гатунку по ГОСТ 10157-79 і аргон високої чистоти по ТУ 6-21-12-76. Ці марки аргону значно відрізняються по вартості та вмісту домішок, в тому числі вологи, кількість, якої визначає пористість у швах алюмінієвих сплавів.

В усіх дослідах по плазмо-дуговому зварюванню різнополярним асиметричним струмом у якості плазмоутворюючого газу використовували аргон газоподібний вищого гатунку по ГОСТ 10157-79 з точкой роси  $T_p = 214 \text{ K } (-59 \text{ }^\circ\text{C})$ .

Для захисту зони зварювання використовували аргон вищого гатунку, гелій газоподібний марки Б (ТУ 51-940-80), а також суміш аргону та гелію.

Склад домішок в захисних газах наведено в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Домішки в захисних газах.

Хімічний елемент	Одиниці вимірювання	Аргон		Гелій	
		1 <sup>й</sup> ґатунок	Вищий ґатунок	Марка Б	Марка А
Ar	об. %	≥ 99,987	≥ 99,993	≤ 0,001	≤ 0,0001
He	об. %	≤ 0,0001	≤ 0,0001	≥ 99,99	≥ 99,995
Ne	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	1	1	90	40
O <sub>2</sub>	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	10	7	10	1
N <sub>2</sub>	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	70	50	40	5
H <sub>2</sub>	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	5	1	25	1
C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	12	5	30	1
CO <sub>2</sub> +CO	≤ об. % × 10 <sup>-4</sup>	12	5	10	2
H <sub>2</sub> O	мг/м <sup>3</sup>	≤ 10	≤ 7	≤ 2	≤ 0,5

## 2.2. Підготовка матеріалів під зварювання.

Зварюванні листи алюмінієвих сплавів перед зварюванням обезжирювали ацетоном та хімічним способом видаляли поверхневий шар оксидів (хімічне травлення). Хімічне травлення виконували за такою схемою:

- травлення у водному розчині NaOH (50 г/л) при температурі 60...70° С протягом 1 – 2 хвилин;

- промивання у гарячій проточній воді при температурі не нижче 50° С, а потім промивання у проточній холодній воді;

- освітлювання у водному розчині HNO<sub>3</sub> (325...420 г/л) протягом 1 - 2 хвилин. Температура розчину 20-25°С. Допускається витримування у розчині до 10 хвилин;

- промивання у гарячій проточній воді при температурі не нижче 50 °С з наступним вільним висиханням на повітрі.

Перед зварюванням для більш повного видалення оксидної плівки з протравлених листів механічним шляхом видаляли поверхневий шар (зачищення) на глибину до 0,1 мм з кожного боку пластини та її торця. Ширина шару, що видаляється з на поверхонь кожній пластині становить 10 - 15 мм. Механічне зачищення рекомендується виконувати шабером до утворення блиску. При цьому



проміжок часу між хімічним травленням та механічним зачищенням не регламентується. Після механічного зачищення зварювання необхідно виконувати на протязі не більше як 16 годин при відносній вологості не більше 75 %.

Не дозволяється зачищати поверхню під зварювання абразивами, шліфувальною шкіркою, піскоструминним і дробоструминним обробленням.

Для видалення поверхневого шару також забороняється використовувати металеві щітки та абразивні зачисні круги. Щітки повністю не видаляють поверхневий шар, а при використанні кругів у метал можуть потрапити частки абразиву, які погіршать якість швів. Проміжок часу між механічним зачищенням та зварюванням не повинен перевищувати 8 годин.

Виконувати анодування, наносити фарбувальний і інші захисні покриття на поверхню деталі необхідно після зварювання.

Присадний дріт травиться аналогічно листам основного металу. Хімічно очищений дріт намотується на котушки та пакується у мішки з поліетилену. Забороняється використовувати для зварювання присадний дріт, який зберігався після хімічного очищення на повітрі більш ніж 10...12 годин або в ящиках і сосудах, що герметично закриваються, більш ніж 36 годин. Якщо зварювальний дріт, який був підготовлений хімічним травленням, не було використано протягом вказаного вище терміну, то необхідно повторити процес його підготовки перед зварюванням без попереднього обезжирювання. Допускається два повторних хімічних очищення дроту. Присадкові дроти, поверхня яких оброблена механічним або електролітичним поліруванням не потребують додаткового очищення поверхні перед зварюванням.

### **2.3. Зварювальне обладнання.**

Основний комплекс досліджень зварюваності високоміцних алюмінієвих сплавів виконували з використанням стисненої дуги різнополярного асиметричного струму. Для порівняння властивостей з'єднань також були

використані процеси аргонодугового зварювання неплавким електродом і імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.

Листи алюмінієвих сплавів зварювали за допомогою комплексу обладнання для механізованого плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом. До складу комплексу обладнання входять установка для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом; механізм подавання присадкового дроту; універсальний складально-зварювальний стіл; блок автономного рідинного охолодження плазмотрону; система керування процесом зварювання; плазмотрони.

### **2.3.1. Установка для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.**

Установка для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом складається із двох електричних блоків: джерела живлення для аргонодугового зварювання неплавким вольфрамовим електродом (АДЗНЕ) та плазмового модуля. Таке поєднання дає можливість конструювати за бажанням замовника установки для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом саме тої потужності, яка необхідна для виконання зварювання. Плазмовий модуль забезпечує збудження чергової дуги в плазмотроні між вольфрамовим електродом та плазмоутворюючим соплом, а також за допомогою плазмового модуля відбувається подавання плазмоутворюючого газу.

Джерело живлення Tetric 421 AC/DC (рис. 2.1) забезпечує аргонодугове зварювання неплавким вольфрамовим електродом на постійному струмі при прямій і оберненій полярності.

У режимі зварювання різнополярним струмом джерело живлення забезпечує стабільне горіння дуги в діапазоні струмів від 10 до 400 А. Система стабілізації зварювального струму працює з точністю  $\pm 1$  А.



Рисунок 2.1 - Модифіковане зварювальне джерело живлення Tetrrix 421 AC/DC для аргонодугового зварювання, модифіковане для роботи у складі установки для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Для виконання зварювання деталей малої товщини (0,5 – 1,0 мм), а також для забезпечення спеціальних умов формування зварювальної ванни в джерелі живлення Tetrrix 421 AC / DC передбачена функція зварювання з модуляції зварювального струму. Частота модуляцій змінюється в діапазоні від 0,5Гц до 2 кГц. Тривалість протікання зварювального струму в фазі імпульсу і паузи вибирається з панелі керування джерела живлення.

Для виконання зварювання алюмінієвих та магнієвих сплавів, які мають на поверхні тугоплавку оксидну плівку, використовують режим зварювання різнополярним струмом.

Частота різнополярного струму може плавно змінюватися в діапазоні від 40 до 250 Гц.

Для підвищення стійкості вольфрамового електроду в процесі зварювання в джерелі живлення передбачена функція балансу – регулювання тривалості горіння дуги при прямій полярності.

Для підключення зварювального джерела струму до різних систем управління процесом зварювання і інтегрування його до складу автоматизованих і роботизованих комплексів на задній панелі джерела було встановлено додатковий спеціальний роз'єм. При роботі зварювального джерела живлення в складі установки для автоматичного плазмо-дугового зварювання управління ним здійснюється тільки за допомогою системи керування процесом зварювання.

Основні технічні характеристики зварювального джерела живлення для аргонодугового зварювання наведено в табл. 2.12.

Таблиця 2.12 - Основні технічні характеристики джерела живлення для аргонодугового зварювання неплавким електродом.

Найменування параметра	Значення
Напруга мережі живлення, В	3 фази, 50Гц 400 (±15%)
Потужність, що споживається з мережі, кВА, не більше	24
Сила струму, що споживається з мережі, А, не більше	35
Діапазони регулювання зварювального струму, А	5-400
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	400
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	360
Напруга холостого ходу, В	70
Робоча напруга джерела живлення, В	0-53
Час наростання струму від початкового до робочого значення, с	0-7
Час спадання струму від робочого до струму заварювання кратера, с	0-7
Час дії струми заварювання кратера, с	0-8
Діапазони регулювання початкового струму, % від робочого струму	0-100
Діапазони регулювання струма заварювання кратера, % від робочого струму	0-100
Час продування газом перед зварюванням, с	0-3
Час продування газом після зварюванням, с	0-99
Діапазон регулювання частоти модульованого струму, Гц	0,25-2000
Частота різнополярного струму, Гц	40-250
Тривалість горіння дуги при прямій полярності, %	15-85

### **Плазмовий модуль FPM.**

Плазмовий модуль FPM забезпечує підпалювання та горіння чергової дуги постійного струму прямої полярності. Діапазон регулювання струму чергової дуги становить 5 - 50 А. Величина струму чергової дуги вибирається згідно з

вимогами до застосовуваних плазмотронів. Для гібридного плазмотрона величина струму чергової дуги становить 40 А.



Рисунок 2.2 - Плазмовий модуль.

Плазмовий модуль забезпечує також і подачу плазмоутворюючого газу. Основні характеристики плазмового модуля FPM наведено в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 - Основні технічні характеристики плазмового модуля.

Назва параметру	Значення
Напруга живлення, В	230 1 фаза
Потужність, що споживається з мережі, кВа	2,0
Сила струму, що споживається з мережі, А	16
Діапазон регулювання струму чергової дуги, А	5 – 50
Діапазон регулювання витрат плазмоутворюючого газу, л/хв	0,1 – 10,0
Клас захисту	IP23
Маса, кг	21,0
Габаритні розміри, мм	345x450x375

Робочий діапазон витрати плазмоутворюючого газу становить від 0,1 до 10 л / хв. Точність регулювання становить 0,1 л / хв. Така точність досягається за рахунок застосування в конструкції модуля пневматичного клапану з електричним управлінням. Витрата газу виставляється вручну за допомогою потенціометра на передній панелі плазмового модуля або з операторської панелі системи управління процесом зварювання. Конструкція плазмового модуля

дозволяє використовувати його для виконання ручного та автоматизованого плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів.

### **2.3.2. Спеціалізована система керування комплексом обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.**

Система контролює включення і відключення джерела живлення зварювального струму, плазмового модуля, механізму подавання присадкового дроту, переміщення каретки універсально-зварювального столу та забезпечує виконання таких дій:

- аварійне вимкнення однією кнопкою джерела живлення зварювального струму і плазмового модуля, а також механізму подавання присадкового дроту та переміщення каретки складально-зварювального столу;

- роботу комплексу обладнання в режимах: плазмо-дугове зварювання на постійному струмі прямої полярності; плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом; аргонодугове зварювання вольфрамовим електродом.

- всі технологічні операції, пов'язані з початком і зупинкою переміщення джерела нагріву;

- блокування і аварійну зупинку всього комплексу обладнання при відсутності сигналу з датчиків протоку охолоджуючої рідини;

- блокування підпалювання чергової дуги при відсутності сигналу від датчика протоку охолоджуючої рідини.

- підпалювання чергової дуги з передньої панелі плазмового модуля, так із операторської панелі шафи керування;

- пуск і зупинка процесу зварювання по команді з операторської панелі шафи керування або дистанційного пульта системи керування;

- блокування переміщення зварювальної головки і подавання присадкового дроту при відсутності сигналу основної дуги;

- плавне регулювання швидкості переміщення.

Запуск каретки складально-зварювального столу, вибір швидкості переміщення та напрямку руху задається з операторської панелі шафи

керування. Передбачено переключення режимів переміщення у двох режимах: зі швидкістю зварювання та з маршовою швидкістю. Переключення між режимами переміщення виконується за допомогою тумблера на дистанційному пульті.

Передбачено режим виконання зварювання у режимі відсутності переміщення зварювального стола. Такий режим передбачено для виконання точкового зварювання.

В системі керування передбачено можливість фіксації та збереження параметрів зварювання та їх подальший запис на зовнішній носій типу USB 2.0.

Зовнішній вигляд шафи керування комплексом обладнання для плазмо-дугового зварювання плавким електродом наведено на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Шафа керування комплексом обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом.

### 2.3.3. Складально-зварювальний стіл.

Для виконання дослідів по плазмо-дуговому зварюванню різнополярним асиметричним струмом було розроблено універсальний складально-зварювальний стіл. Особливістю конструкції даного столу є те, що плазмотрон, або інший зварювальний пальник, під час зварювання залишається нерухомим. Така конструкція дозволяю покращити умови спостереження за процесами

горіння дуги, в тому числі за допомогою різноманітних відеокамер. Відсутність коливань пальника під час руху надає можливість виключити вплив коливань пальника на процеси горіння дуги, що важливо під час вивчення впливу витрат плазмоутворюючого газу, частоти різнополярного струму та інших параметрів на геометрію проплавлення.

Конструкція складально-зварювального столу є оригінальною розробкою відділу №21 ІЕЗ ім. Є.О. Патона та призначена, в першу чергу, для відпрацювання технологій зварювання стикових, напусккових та таврових з'єднань у багатьох просторових положеннях (рис. 2.4).



Рисунок. 2.4 - Універсальний складально-зварювальний стіл для автоматичного дугового зварювання у нижньому та вертикальному положеннях.

Платформа зі складально-зварювальною оснасткою може переміщуватися зі швидкістю від 5 до 500 см/хв. (від 3 до 300 м/год). Плавність руху забезпечує сервопривід. Передача руху відбувається за допомогою кулько-гвинтової передачі (КГП). Використання сервоприводу забезпечує плавність старту та зупинки рухомої платформи, при цьому забезпечується однакова плавність руху у всьому діапазоні швидкостей переміщення платформи.



Конструкцією стола передбачено виконання зварювання у нижньому положенні; вертикальних швів на вертикальній площині у режимах зварювання на підйом та на спуск; горизонтальних швів на вертикальній площині; горизонтальних швів на похилій площині; швів на підйом та на спуск на похилій площині. Конструкція столу передбачає збирання стиків під зварювання у зручному нижньому положенні і подальше переведення у просторове положення, необхідне для зварювання (рис. 2.5).

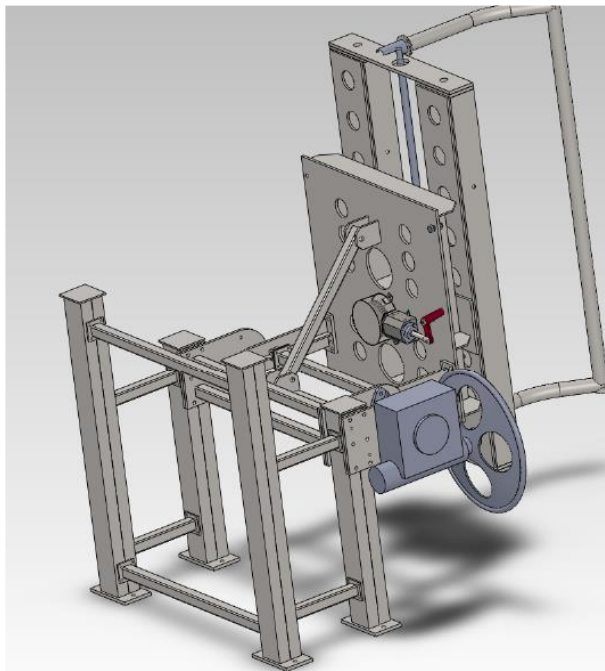


Рисунок 2.5 - Комп'ютерна 3D модель універсального складально-зварювального столу у положенні для зварювання вертикальних швів на вертикальній площині.

Для збирання листів під зварювання та забезпечення їх жорсткої фіксації під час виконання зварювання було розроблено та виготовлено складально-зварювальну оснастку.

**2.3.4. Плазмотрон для зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом.**

Для дослідів по плазмо-дуговому зварюванню різнополярним асиметричним струмом використовували плазмотрон PWM-300 (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 - Плазмотрон для зварювання PWM-300.

Плазмотрон, згідно даних виробника, розрахований на максимальний струм у 300 А при ПВ 100%.

Технічні характеристики плазмотрону наведено в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 - Характеристики плазмотрону для зварювання PWM-300

Назва параметра	Значення
Максимальний зварювальний різнополярним струм при ПВ 100%, А	300
Плазмоутворюючий газ	Ar
Витрати плазмоутворюючого газу, л/хв	0,1 - 10,0
Захисний газ	Ar; He; Ar +He;
Витрати захисного газу л/хв.	8 - 40
Струм чергової дуги, А	5 - 50
Охолодження електроду	Водяне непряме
Охолодження плазмо утворюючого сопла	Водяне пряме
Охолодження захисного сопла	Водяне непряме
Матеріал плазмоутворюючого сопла	Мідь

В якості електроду в плазмотроні PWM-300 використовувався вольфрамовий пруток марки WL-10 (EN DIN) діаметром 4,8 мм і довжиною 130 мм. Стискування дуги відбувалось за допомогою мідних плазмоутворюючих

сопел з діаметром стискаючого каналу ( $d_c$ ) від 2,0 до 4,0 мм. Довжина каналу ( $l_c$ ) плазмоутворюючого сопла змінюється в залежності від діаметру стискаючого каналу, для даного типу плазмотрону вона становить  $l_c = 0,75 d_c$ . Плазмоутворюючий газ подавався аксіально, ламінарність його витікання забезпечувалась введенням у сопла керамічного дифузора, який виконував додатково роль ізолятора. Дифузор також забезпечував центрування електроду відносно осі каналу плазмоутворюючого сопла.

Захист зони зварювання інертним газом виконувався за допомогою мідного сопла без водяного охолодження діаметром 30 мм.

Для покращення умов газового захисту в процесі плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на швидкостях більше 40 см/хв (24 м/год) на плазмотроні монтується додаткове подовжене сопло додаткового газового захисту. Сопло монтується на спеціальному кріпленні разом з системою позиціонування положення присадкового дроту відносно зварювальної ванни (рис. 2.8).

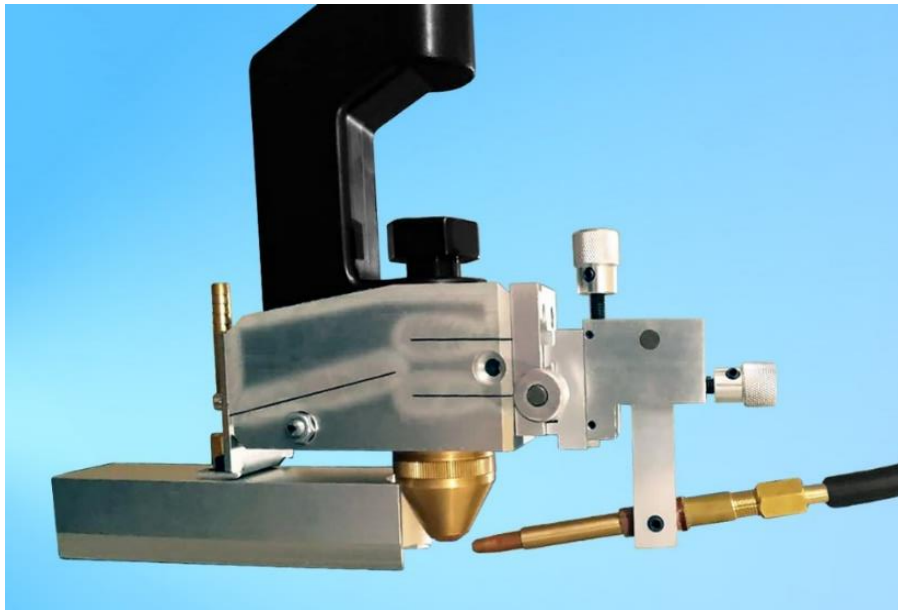


Рисунок 2.7 - Плазмотрон для зварювання PWM-300 з соплом додаткового газового захисту та системою позиціонування положення присадкового дроту відносно зварювальної ванни.

Система позиціонування положення присадкового дроту дозволяє змінювати точку контакту присадкового дроту зі зварними деталями. Цією точкою є початок зварювальної ванни. Враховуючи той факт, що розміри ванни

можуть змінюватися в залежності від швидкості зварювання та товщини зварюваних деталей, тому для забезпечення формування поверхні шва необхідно корегування положення кінця присадкового дроту відносно зварювальної ванни.

Вольфрамовий електрод діаметром 4,8 мм дозволяє витримувати струм до 400 А. Тому даний плазмотрон використовували для виконання поодиноких коротких (до 400 мм) швів при струмах до 350 А зі швидкістю не менше 20 см/хв. (12 м/год). Для зварювання на струмі до 350 А було виготовлено плазмоутворюючі сопла з діаметром стискаючого каналу 4,5 мм, які не були передбачені в комплекті поставки плазмотрону.

### 2.3.5. Механізм подавання присадкового дроту.

Механізм подавання присадкового дроту призначений для подавання присадкового алюмінієвого дроту діаметрами 1,0 мм; 1,2 мм та 1,6 мм в зону плазмо-дугового зварювання (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 - Механізм подавання присадкового дроту для автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвих сплавів.

Двигун механізму подавання присадкового дроту має потужність 80Вт та живиться 24 В постійного струму. Швидкість подавання присадкового дроту може плавно змінюватися в діапазоні від 0,7 до 7,0 м/хв. Плавність подавання дроту забезпечується використанням чотирьох роликів з напівсферичною канавкою на кожному ролику. Для кожного діаметри присадкового алюмінієвого

дроту вибирається відповідний йому розмір канавки на ролику. Керування швидкістю подавання присадкового дроту та живлення струмом механізму подавання дроту виконується з шафи системи керування процесом зварювання.

## **2.4. Методика проведення зварювальних дослідів.**

### **2.4.1. Методика визначення впливу параметрів зварювання на геометрію швів.**

Для визначення впливу параметрів режиму плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на геометрію швів виконували наплавлення без використання присадкового дроту.

В дослідях по наплавленню використовували картки із листів розміром (200 × 100) мм, які наплавлялися без підкладки з метою однакового відведення тепла. На кожній картці виконували лише одне наплавлення по центру картки.

При виборі величини струму та інших параметрів плазмо-дугового зварювання ставили мету отримання проплавлення на глибину не більше 0,7-0,8 товщини основного металу. При досягненні глибини проплавлення 0,9 товщини основного металу на точність результату може впливати крайовий ефект. Зварювання виконували на листах сплаву АМгб. На швидкості ( $V_{зв}$ ) 20 см/хв (12 м/год) проплавляли метал товщиною 10 мм, на швидкості 60 см/хв (36 м/ч) – товщиною 7 мм, а на швидкості 100 см/хв (60 м/ч) – товщиною 4 мм.

Всі досліді по визначенню впливу витрат плазмоутворюючого газу ( $Q_{пл}$ ) та умовної довжини дуги ( $L_d$ ) на геометрію швів проводили на стумі ( $I_{зв}$ ) 180 А, 220 А і 260 А на кожній товщині металу.

Умовну довжину дуги (відстань між плазмоутворюючим соплом і поверхнею зварного зразка) вибирали 4 мм, 6 мм і 8 мм.

Величину витрат плазмоутворюючого газу збільшували, починаючи з 0,2 л/хв., до тих пір, доки не порушувалась якість формування швів і стабільність процесу зварювання.

При зварюванні на струмі 180 А використовували сопло з діаметром каналу 3,2 мм, а на струмах 220 А і 260 А – діаметром 4,0 мм.

Для порівняння виконували проплавлення аргонодуговим зварюванням неплавким електродом з тією ж швидкістю та величиною зварювального струму, що і при плазмо-дуговому зварюванні.

Дослідження впливу частоти різнополярного асиметричного струму на геометрію швів досліджувалось на швах, виконаних на картках 200x100x6 мм із сплаву АМг3. Частота змінювалась у діапазоні от 50 до 240 Гц з дискретністю в 50 Гц. Проплавлення виконувалось без присадкового дроту при швидкості зварювання 40 см/хв (24 м/год). Витрати плазмоутворюючого газу та величина зварювального струму залишалися незмінними та складали 0,2 л/хв. і 240 А.

Для оцінки впливу складу захисної атмосфери на формування швів при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом виконувалося наплавлення у нижньому положенні без використання та з використанням присадкового дроту. Наплавлення виконувалися на листи сплаву АМг6 розмірами 200×100 мм і товщиною 4 мм и 7 мм. Зразки товщиною 7 мм наплавляли зі швидкістю ( $V_{зв}$ ) 60 см/хв (36 м/год), а товщиною 4 мм – зі швидкістю 100 см/хв (60 м/год). Величина струму ( $I_{зв}$ ) стисненої дуги була однаковою для всіх дослідів і складала 220 А. Величина витрат плазмоутворюючого газу у всіх дослідах залишалась незмінною і складала 0,2 л/хв.

В якості захисної атмосфери застосовували чистий аргон, чистий гелій та їх суміші. Кількість аргону у сумішах складала 25 %, 50 % та 75 %. Загальні витрати захисної атмосфери для всіх дослідів залишались незмінними і становили 30 л/хв.

Для визначення впливу складу захисної атмосфери на формування зварного з'єднання виконувалося плазмо-дугове зварювання листів сплавів АМг6 и АМг3 товщиною 4 мм та 6 мм відповідно. Листи товщиною 4 мм зварювали зі швидкістю 60 см/хв (36 м/год), а товщиною 6 мм – 20 см/хв (12 м/год). Швидкість

подавання присадкового дроту діаметром 1,6 мм складала 149 м/год та 72 м/год відповідно.

Із середньої частини наплавлених карток вирізали поперечні шліфи. Після полірування і хімічного травлення шліфи промивали у воді і висушували гарячим повітрям. Подальші виміри розмірів швів виконували на мікроскопі МІМ-8.

#### **2.4.2. Визначення впливу параметрів зварювання на руйнування включень оксидної плівки в швах.**

Оксидні включення у металі шва є найбільш розповсюдженим дефектом зварних з'єднань алюмінієвих сплавів. Вони помітно зменшують міцність при статичних та циклічних навантаженнях, порушують герметичність конструкцій. При аргонодуговому зварюванні неплавким електродом алюмінієво-літєвих сплавів, особливо сплаву 1460, часто утворюються протяжні включення оксидної плівки, які орієнтовані по центру шва

Попередні порівняння розмірів дефектів на рентгенівських знімках та з тими, що спостерігаються в зламах, показало, що біля 30% протяжності дефектів рентгенівським просвічуванням не виявляється. Це пов'язано з тим, що оксидна плівка, розташована в площині сканування рентгенівського променя, чітко фіксувалась на рентгенівському знімку, а та її частина, яка залишалась під кутом до площини променя, втрачала чіткість зображення або зовсім не проявлялась на рентгенівській плівці. Тому протяжність оксидних плівок визначали на повздовжніх зламах вздовж осі шва.

Вплив стисненої дуги на руйнування включень оксидної плівки в швах досліджували за стикових з'єднаннях сплавів АМг6, 1420 та 1460, які є найбільш чутливими до утворення оксидних включень при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом. Зварювали листи сплаву АМг6 товщиною 6 мм, сплаву 1420 товщиною 4 мм і сплаву 1460 товщиною 3 мм. Перед зварюванням листи

протравлювали за загально прийнятою технологією та механічно зачищали на глибину до 0,1 мм.

Для оцінки впливу системи легування присадкового дроту на утворення протяжних включень оксидної плівки в металі швів плазмо-дугове зварювання листів сплаву 1460 товщиною 3 мм виконували з використанням таких присадних матеріалів: 5183 (Al-4,5Mg-Mn), СвАМг63 (Al-6Mg-Mn-0,25Zr), СвАМг63+0,5Sc, 2319 (Al-6Cu-Mn). Діаметр присадних дротів різних систем легування складав 1,6 мм.

Із зварних з'єднань вирізали стрічки зі швом шириною 40 мм. Потім ці стрічки розрізали на зразки з довжиною 60-70 мм. На зразках видаляли підсилення та проплави швів і робили по краях надрізи, щоб отримати концентратори напружень для гарантованого руйнування зразка по центру шва. Після цього виконували механічне руйнування зразка з метою отримання поздовжніх зламів швів, на яких візуальним способом виявляли наявність протяжних включень оксидної плівки.

## **2.5. Методика визначення впливу технологічних заходів на процеси дегазації рідкого металу зварювальної ванни.**

Для визначення впливу технологічних заходів при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом було один із найбільш чутливих до утворення пор в процесі зварювання алюміній-літєвий сплав 1460 системи легування (Al-Cu-Li).

Для визначення впливу стисненої дуги на процеси дегазації розплавленого металу виконували зварювання листів сплаву 1460 товщиною 3 мм та розмірами 200×100 мм з використанням присадкового дроту. Пролав формували на підкладці. Оцінку впливу параметрів процесу плазмо-дугового зварювання на дегазацію проводили за методикою, згідно якої перед зварюванням основний метал механічно зачищали на глибину 0,1 мм лише зверху та з торців. Нижня частина залишалась механічно необробленою.



Плазмо-дугове зварювання виконували за трьома основними режимами зварювання: стаціонарною стисненою дугою (величина струму та витрати плазмоутворюючого газу – постійні); зварювання пульсуючою стисненою дугою (змінна величина зварювального струму та постійні витрати плазмоутворюючого газу); зварювання стисненою дугою з імпульсним подаванням плазмоутворюючого газу (постійна величина зварювального струму та змінні витрати плазмоутворюючого газу). Швидкість подачі присадкового дроту діаметром 1,6 мм у всіх дослідах залишалась незмінною і складала 126 м/год. Швидкість переміщення плазмотрона у всіх дослідах також була незмінною і складала 60 см/хв (36 м/год).

В якості плазмоутворюючого та захисного газів використовували аргон.

При зварюванні стаціонарною стисненою дугою величина зварювального струму складала 180 А, а витрати плазмоутворюючого газу 0,1 л/хв.

Зварювання пульсуючою стисненою дугою виконували при струмі імпульсу 218 А та струмі паузи 51 А. Тривалість протікання струму імпульсу складала 160 мс, а тривалість протікання струму паузи 51 мс. Витрати плазмоутворюючого газу були 0,1 л/хв.

При зварюванні стисненою дугою з імпульсним подаванням плазмоутворюючого газу величина зварювального струму складала 180 А, а витрати плазмоутворюючого газу – 1,0 л/хв та 0,1 л/хв. Тривалість витікання плазмоутворюючого газу з витратами 1,0 л/хв складала 160 мс, а тривалість витікання газу з витратами 0,1 л/хв – 51 мс.

Після зварювання шви вирізали. Механічним шляхом знімали підсилення та проплави швів. Після цього їх полірували та хімічно протравлювали за стандартною методикою. Потім візуально оцінювали пори, які утворилися по зоні сплавлення, їх кількість та розміри.

## **2.6. Методика проведення механічних випробувань зварних зразків.**

Визначення тимчасового опору руйнуванню зразків виконували на зразках з опуклістю та видаленим механічним шляхом нижнім валиком до рівня основного металу (рис. 2.9). При цьому вісь зварного шва має розташовуватися перпендикулярно напрямку розтягування. Після видалення кореня шва зразок зачищали таким чином, щоб не допустити утворення глибоких подряпин, розташованих перпендикулярно напрямку розтягування.

Геометричні розміри зразків для механічних досліджень вибирали згідно ГОСТ 6996-66. В діапазоні товщин, що досліджуються, (2 – 6 мм) геометричні розміри зразків будуть однакові.

Для визначення міцності металу шва використовували зразок з видаленими опуклістю шва та кореневою частиною шва (рис. 2.10).

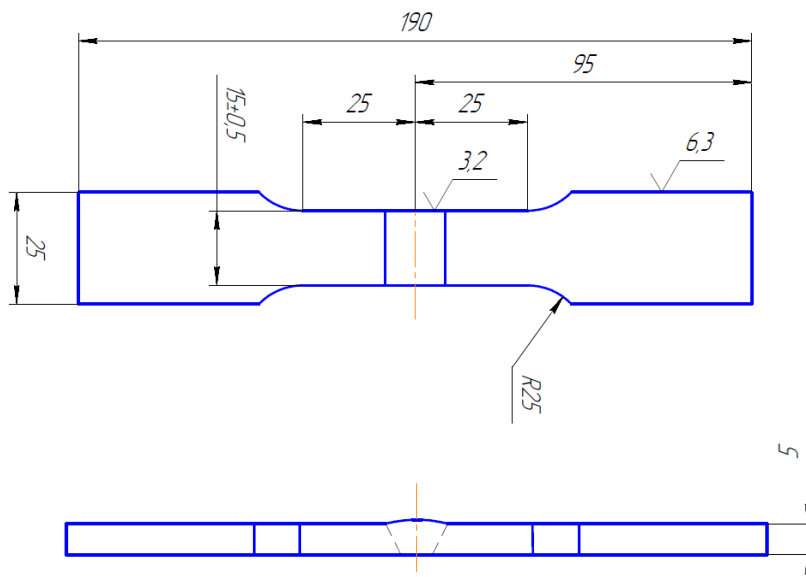


Рисунок 2.9 - Ескіз зразків для випробувань на одновісне розтягування з опуклістю шва та видаленою кореневою частиною шва для зразків із листів товщиною 5,0 мм.

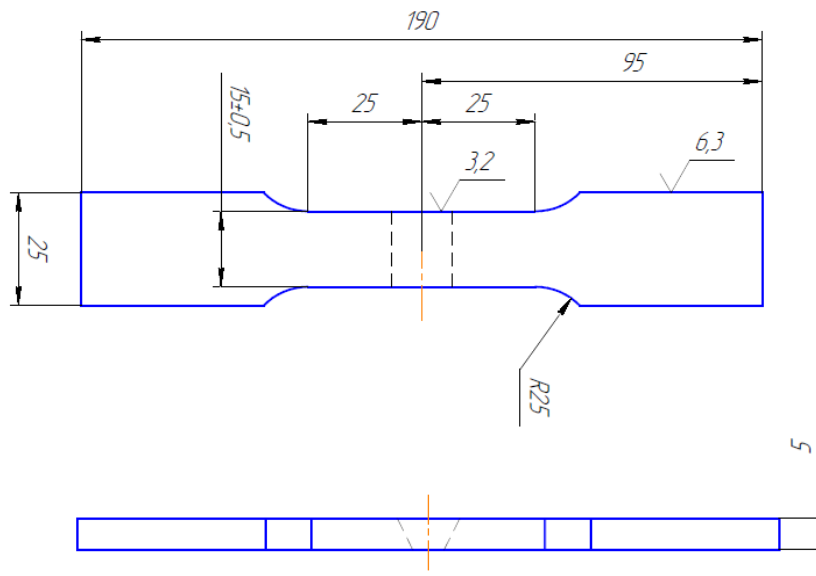


Рисунок 2.10. Ескіз зразків для випробувань на одновісне розтягування видаленими опуклістю шва та кореневою частиною шва для зразків із листів товщиною 5,0 мм.

Міцність визначали по результатах випробувань не менше ніж 3 зразків.

Випробування на одновісне розтягування виконували на універсальній гідравлічній машині MTS 810 (рис. 2.11).

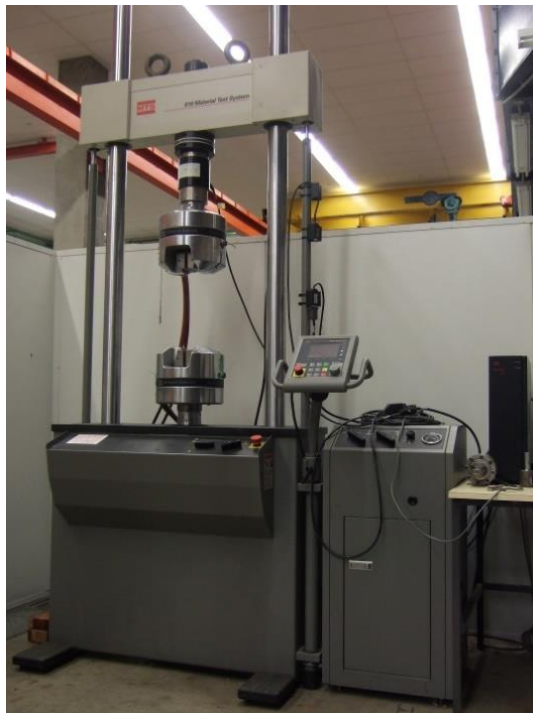


Рисунок 2.11 - Універсальна гідравлічна машина MTS 810 для випробувань на одновісне розтягування.

## 2.6. Методика дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань.

Якісних та кількісний металографічний аналіз основного металу й зварних з'єднань виконували за допомогою мікроскопів МИМ-8 і НЕОРНОТ-32. Дослідження виконували на плоских зразках, які було вирізано із основного металу та зварних з'єднань.

Для шліфів, які використовуються для досліджень мікроструктури необхідне додаткове полірування на станках с горизонтально розташованими кругами, які обтягнуті сукном та оксамитом. Під час полірування поверхню круга необхідно постійно змочувати емульсією з додаванням абразивних часток.

Підготовлений шліф промивається у воді и просушується потоком гарячого повітря.

Для проявлення макроструктури на сплавах системи легування Al-Mg-Mn (AMг5, AMг6 або 5083), а також сплавів системи Al-Mg-Mn-Sc (1570) необхідно використовувати розчин такого складу 72 % HCl, 24 % H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>, 4 % HF. Шліф необхідно занурювати в розчин на 5...7 с. Потім необхідно промити шліф у воді і висушити гарячим повітрям.

Для проявлення макроструктури на сплавах системи легування Al-Cu-Mn (1201) та Al-Cu-Li (1460) необхідно занурювати шліфи у 30% розчин лугу NaOH та з подальшим освітленням у 30% водному розчині кислоти H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>. Потім також необхідно промити шліф у воді і висушити гарячим повітрям.

Шліфи для досліджень мікроструктури необхідно після полірування на сукні піддати електролітичному поліруванню в розчині електроліту наступного складу: 970 - 930 см<sup>3</sup> CH<sub>3</sub>COOH, 30 – 70 см<sup>3</sup> HClO<sub>4</sub>. Час полірування складає 5...10 с.

## 2.7. Методика розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) для зварювання алюмінієвих сплавів

Для визначення параметрів напруженого стану зварних зразків застосовуємо розрахунковий метод Трочуна І.М., що базується на наступних припущеннях:

Виконується гіпотеза плоских перерізів; лінійність напруженого стану; схематизована залежність границі текучості і відносної і відносної пружної деформації на рівні границі текучості від температури; модель ідеально пружнопластичного тіла; незалежність теплофізичних властивостей матеріалу від температури в широкому інтервалі температур; рівномірність розподілення температур, деформацій і напружень по товщині пластини; припускається, що по ширині пластичної зони  $b_{\text{п}}$  залишкові напруження розподілені рівномірно і рівні границі плинності металу [81].

### 1. Визначення геометричних характеристик поперечного перерізу зразка

Розрахунки проводяться для серії зразків з габаритними розмірами  $300 \times 200 \times \delta$  мм, (рис. 1.) де  $\delta$  – товщина зварюваних пластин.

Визначення площ поперечних перерізів пластин

$$F_1 = N \times \delta_1 = 100 \times 4 = 400 \text{ мм}^2$$

$$F_2 = Q \times \delta_2 = 100 \times 4 = 400 \text{ мм}^2$$

де  $N, Q$  – ширина пластини, мм;  $\delta_1, \delta_2$  – товщина, мм.

Загальна площа поперечного перерізу зразка:

$$F_3 = F_1 + F_2 = 400 + 400 = 800 \text{ мм}^2$$

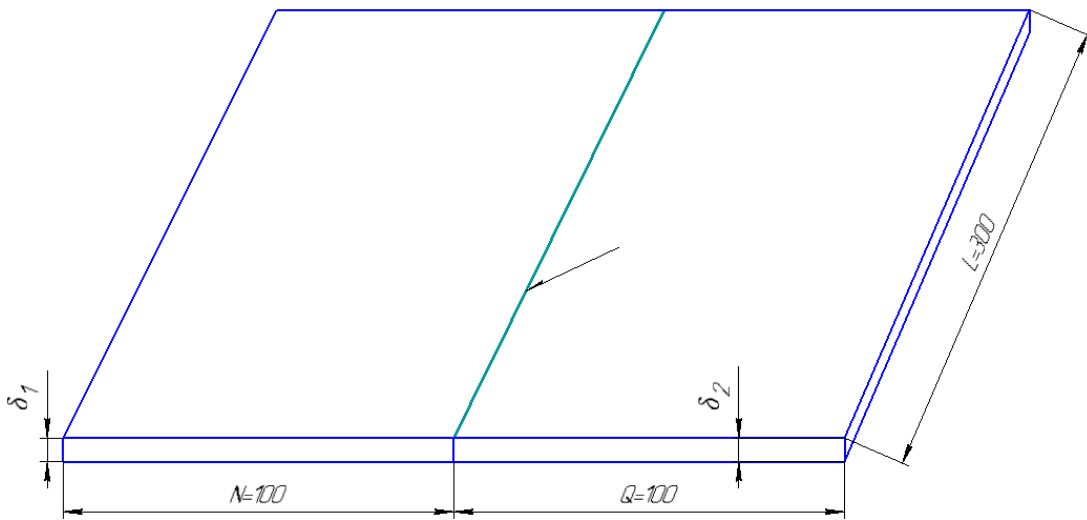


Рисунок 2.13 - Габаритні розміри зразків для розрахунку показників залишкових деформацій та напружень при зварюванні.

## 2. Обчислення ширини зони пластичних деформацій скорочення наstadії нагрівання

За методом Трочуна  $b_{\text{п}} = b_1 + b_2$ . Зона  $b_1$  обмежена температурою  $T^*$ , при якій втрачаються пружні властивості металу (для алюмінієвих сплавів  $T^* \approx 300^\circ\text{C}$ ).

В зоні  $b_2$  при досягненні максимальних температур повна повздовжня деформація точки, що розглядається, складається з температурної, пружної і пластичної складових.

Розмір зони  $b_1$  можна визначити за формулою Рикаліна для максимальних температур в навколошовній зоні на відстані  $u$  від осі шва без врахування втрат на поверхневу тепловіддачу. [1 с. 54-55]

$$T_{\text{max}} = \frac{0.484 \times q_0}{c\gamma \times b_1}$$

де  $q_0$  - питома енергія зварювального нагріву, Дж/мм<sup>2</sup>;  $c\gamma$  – об'ємна теплоємність, Дж/мм<sup>3</sup>\*°C.

Питома енергія зварювального нагріву:

$$q_0 = \frac{I_{\text{зв}} \times U_{\text{д}} \times \eta}{V_{\text{зв}} \times \delta_0} = \frac{185 \times 21.6 \times 0.55}{6.67 \times 8} = 41.209 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2}$$

де  $I_{зв}$  – зварювальний струм, А;  $U_d$  – напруга на дузі, В;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії дуги;  $V_{зв}$  – швидкість зварювання, мм/с;  $\delta_0 = \delta_1 + \delta_2$  – приведена товщина металу.

Ширина зони  $b_1$ :

$$b_1 = \frac{0.484 \times q_0}{c\gamma \times T^*} = \frac{0.484 \times 41.209}{2.9 \times 10^{-3} \times 300} = 22.925 \text{ мм}$$

Ширина зони  $b_2$ :

$$\begin{aligned} k_2 &= 3.218 \times 10^{-8} \times q_0^3 - 1.579 \times 10^{-5} \times q_0^2 + 3.153 \times 10^{-3} \times q_0 + 0.036 \\ &= 3.218 \times 10^{-8} \times 41.209^3 - 1.579 \times 10^{-5} \times 41.209^2 \\ &\quad + 3.153 \times 10^{-3} \times 41.209 + 0.036 = 0.141 \end{aligned}$$

$$b_2 = k_2 \times (B - b_1) = 0.141 \times (100 - 22.925) = 10.896 \text{ мм}$$

де  $k_2$  – поправочний коефіцієнт;  $B$  – ширина пластини, мм;

Ширина зони пластичних деформацій скорочення на стадії нагрівання:

$$b_{\pi} = b_1 + b_2 = 22.925 + 10.896 = 33.821 \text{ мм}$$

Площа поперечного перерізу зони пластичних деформацій скорочення:

$$F_{\text{плз}} = b_{\pi} \times \delta_1 + b_{\pi} \times \delta_2 = 33.821 \times 4 + 33.821 \times 4 = 270.57 \text{ мм}^2$$

Залишкові напруження у реактивній зоні після зварювання:

$$\sigma_p = -\sigma_T \times \frac{F_{\text{плз}}}{F_3 - F_{\text{плз}}} = -159 \times 10^6 \times \frac{270.57}{800 - 270.57} = -8.126 \times 10^7 \text{ Па}$$

де  $\sigma_T$  – границя текучості, Па.

Пружні стискальні деформації у реактивній зоні:

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E} = \frac{-8.126 \times 10^7}{7 \times 10^{10}} = -1.161 \times 10^{-3}$$

де  $E$  – модуль пружності, Па.

Величина усадочної сили:

$$\begin{aligned} P_{\text{ус}} &= (\sigma_T + |\sigma_p|) \times \frac{F_{\text{плз}}}{10^6} = (159 \times 10^6 + |-8.126 \times 10^7|) \times \frac{270.57}{10^6} \\ &= 6.501 \times 10^4 \text{ Н} \end{aligned}$$

Величина повздовжнього скорочення зразка після зварювання (перевірка):

$$\Delta L_{\text{повзд.}}^{\sigma} = \frac{|\sigma_p| \times L}{E} = \frac{|-8.126 \times 10^7| \times 300}{7 \times 10^{10}} = 0.348 \text{ мм}$$

де  $L$  – довжина зразка, мм.

$$\Delta L_{P_{yc}}^{\sigma} = \frac{P_{yc} \times L}{E \times F_3} = \frac{6.501 \times 10^4 \times 300}{7 \times 10^4 \times 800} = 0.348 \text{ мм}$$

де  $E$  – модуль пружності, МПа.

Для інженерних розрахунків було залучено програмне забезпечення MatCAD. Метою розрахунків було встановлення закономірностей зміни основних показників, що характеризують деформації та напруження під час зварювання в залежності від товщини зварювального металу та швидкості зварювання.

## **Висновки до розділу 2.**

1. Для виконання комплексу досліджень по впливу основних параметрів режиму плазмо-дугового зварювання, досліджень механічних властивостей зварних з'єднань, отриманих при різних швидкостях зварювання та особливостей формування кореневої частини шва було розроблено лабораторний комплекс обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом на основі інверторного джерела живлення для зварювання неплавким електродом з частотою різнополярного струму до 250 Гц та максимальним струмом до 420 А.

2. Для порівняльної оцінки впливу стисненої дуги та звичайної дуги неплавкого електроду різнополярного асиметричного струму на утворення протяжних включень оксидної плівки було обрано у якості технологічних проб стикові з'єднання алюміній-літєвих сплавів, виконаних з використанням підкладок з формуючими канавками.

3. Дослідження ефективності технологічних рішень для запобігання утворенню газових пор під час плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом проводили на зварних з'єднаннях із листів товщиною 3,0 мм алюміній-літєвого сплаву системи легування Al-Cu-Li, чутливого до утворення газових пор. Для збільшення кількості утворених пор та для виконання плазмо-дугового



зварювання різнополярним струмом в однакових умовах для дослідів по перевірці впливу технологічних факторів на запобігання утворенню газових пор поверхню листів перед зварюванням не піддавали ніякій ні хімічній, ні механічній обробці.

4. Оцінку впливу швидкості зварювання на механічні властивості зварних з'єднань виконували на плоских зразках зі знятим проплавом та знятими опуклістю та проплавом, виготовленим згідно вимог стандартів до механічних випробування зварних зразків.

5. Якісну оцінку зміни показників напружено-деформованого стану в зразках товщиною 2 – 8 мм при різних швидкостях плазмо-дугового зварювання виконували за допомогою інженерних розрахунків із застосуванням методики Трочуна та комп'ютерного пакету програм для інженерних розрахунків MatCAD.

### РОЗДІЛ 3.

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ VPPA НА ФОРМУВАННЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

При аргонодуговому зварюванні неплавким вольфрамовим електродом (АДЗНЕ) основними технологічними факторами, які впливають на формування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, є сила струму, довжина дуги та швидкість зварювання. Плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом має більший діапазон параметрів, які впливають на формування шва.

Дослідження впливу кожного із параметрів плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом та їх взаємного впливу один на одного надасть можливість визначити закономірності формування з'єднання при зварюванні стисненою дугою деталей із алюмінієвих сплавів.

### **3.1 Вольт-амперна характеристика стисненої дуги різнополярного асиметричного струму**

Вольт-амперна характеристика є одним із визначальних факторів, які характеризують той чи інший процес дугового зварювання. Вона закономірності зміни напруги зварювальної дуги в залежності від сили струму.

Процес плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, як і процес аргонодугового зварювання неплавким вольфрамовим електродом, відноситься до процесів дугового зварювання з падаючою вольт-амперною характеристикою, тобто зміна величини зварювального струму викликає пропорційну зміну напруги на дузі.

Прямокутна форма кривої зварювального струму дозволяє переходити кривій струму через нульову вісь майже миттєво (долі мілісекунд), що дає можливість зменшити додатковий імпульс до декілька вольт, у порівнянні з сотнею вольт при використанні синусоїдної форми. Осцилограма кривої форми

струму та напруги, характерної для процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом прямокутної форми наведено на рис. 3.1

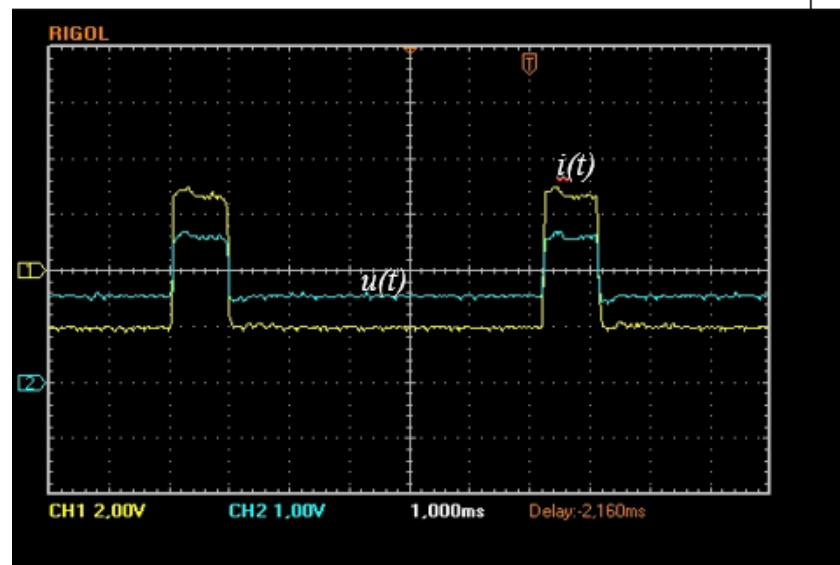


Рисунок 3.1 - Осцилограма кривої струму та напруги на дузі при амплітуді різнополярного асиметричного струму прямокутної форми 150 А та частоті різнополярного струму 150 Гц.

Вольт-амперна характеристика стисненої дуги різнополярного асиметричного струму має чітку зростаючу спрямованість – зі зростанням величини зварювального струму спостерігаються зростання напруги на дузі.

Спостерігається різна величина зростання напруги на дузі в залежності від сили струму в діапазоні від 100 до 300 А.

Так на ділянці від 100 до 200 А при зміні сили струму на 50 А відбувається зростання напруги на дузі в середньому на 1,3 В як в прямій, так і в оберненій полярності. При діапазоні величини струму від 200 до 300 А зростання напруги вже становить в середньому 2,3 В як для прямої так оберненої полярності.

З ростом величини сили струму спостерігається більш круте зростання напруги на дузі в прямій полярності у порівнянні з оберненою полярністю. При цьому зменшується різниця між напругами на дузі між прямою та оберненою полярністю, так при 100 А різниця становила 6,2 В, при зростанні струму до 350 А різниця скоротилася до 4,7 В.

На рис. 3.2 наведена вольт-амперна характеристика, отримана для процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом прямокутної форми при умовній довжині дуги 4,0 мм, витратах плазموутворюючого газу аргону в 0,4 л/хв, та діаметрі каналу плазموутворюючого сопла 4,0 мм.

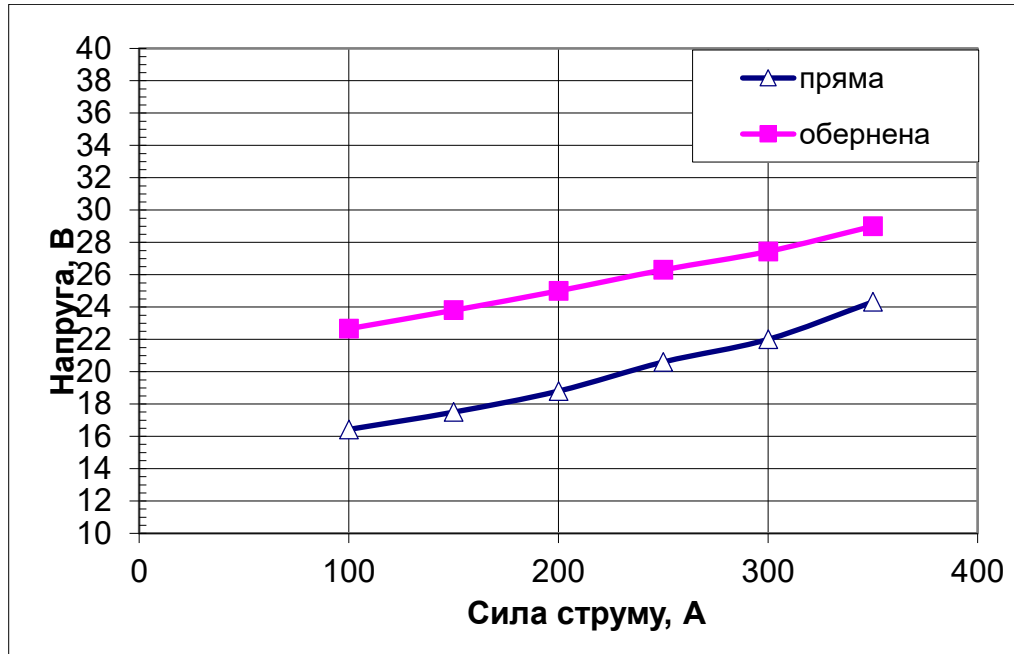


Рисунок 3.2 - Форма вольт-амперної характеристики стисненої дуги різнополярного асиметричного струму прямокутної форми окремо для прямої та оберненої полярності.

Вольт-амперні характеристики, отримані на різних плазмотронах можуть мати незначні відмінності, а саме різні значення напруги на дузі при одних і тих самих значеннях сили струму. Причиною цього може бути різниця в довжині каналу плазموутворюючого сопла, яка відрізняється у різних виробників при однаковому діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла. Тому для проведення коректних розрахунків режимів зварювання слід використовувати вольт-амперну характеристику, отриману саме на цьому плазмотроні, на якому будуть виконуватися у подальшому зварювальні роботи.

### **3.2. Визначення впливу умовної довжини дуги на енергетичні параметри дуги та характер проплавлення металу**

При аргонодуговому зварюванні неплавким вольфрамовим електродом довжина дуги (відстань від торця вольфрамового електроду до виробу) є одним із чинників, які з величиною зварювального струму, хімічним складом захисного газу та балансом різнополярного струму впливають на напругу зварювальної дуги. При цьому зміна довжини дуги дуже сильно може вплинути на глибину проплавлення, особливо при зварюванні тонкого металу (0,5 – 1,0 мм). Зміна довжини дуги викликає зменшення, або збільшення напруги на дузі, автоматично змінює потужність дуги, концентрацію енергії в плямі нагрівання, що впливає на параметри проплавлення.

Плазмо-дугове зварювання є подальшим розвитком процесу аргонодугового зварювання неплавким електродом. При цьому вплив дуги на зварювальну ванну при плазмо-дуговому зварюванні при зміні її висоти може відрізнитися у порівнянні з процесом аргонодугового зварювання неплавким електродом. При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів вплив зміни довжини дуги на формування зварного з'єднання детально не досліджувався.

При плазмо-дуговому зварюванні реальна довжина дуги складається із трьох складових: відстань від торця плазмоутворюючого сопла до виробу, довжина каналу в плазмоутворюючому соплі та відстань від початку каналу в плазмоутворюючому соплі до торця електроду. В технологічному плані при виборі того, чи іншого режиму плазмового зварювання в першу чергу враховують відстань між торцем плазмоутворюючого сопла та виробом. Цю відстань будемо називати умовною довжиною дуги. Саме цей параметр може змінюватись самостійно в процесі зварювання внаслідок деформації поверхні зварних листів. Довжина каналу плазмоутворюючого сопла та відстань від електроду до початку каналу в плазмоутворюючому соплі залишаються незмінними в процесі зварювання. Ці величини вибираються виходячи із

конструктивних особливостей будови плазмотрону, а також забезпечення стабільного збудження та горіння стисненої дуги в процесі зварювання.

Як правило довжина каналу в плазмоутворюючому соплі менше або дорівнює його діаметру. Відстань між початком каналу в плазмоутворюючому соплі та торцем електроду може бути як додатною (зазор між електродом та плазмоутворюючим соплом), так і від'ємною (торець електроду заглиблено в канал плазмоутворюючого сопла) величиною.

В ході досліджень було встановлено, що збільшенні умовної довжини дуги при плазмо-дуговому зварюванні, викликає збільшення напруги на дузі. На рис. 3.3 наведено графік зміни напруги стисненої дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 7 мм, величині зварювального струму 250 А, витратах плазмоутворюючого газу 0,6 л/хв, балансі різнополярного струму 85% прямої полярності та діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла 3,2 мм.

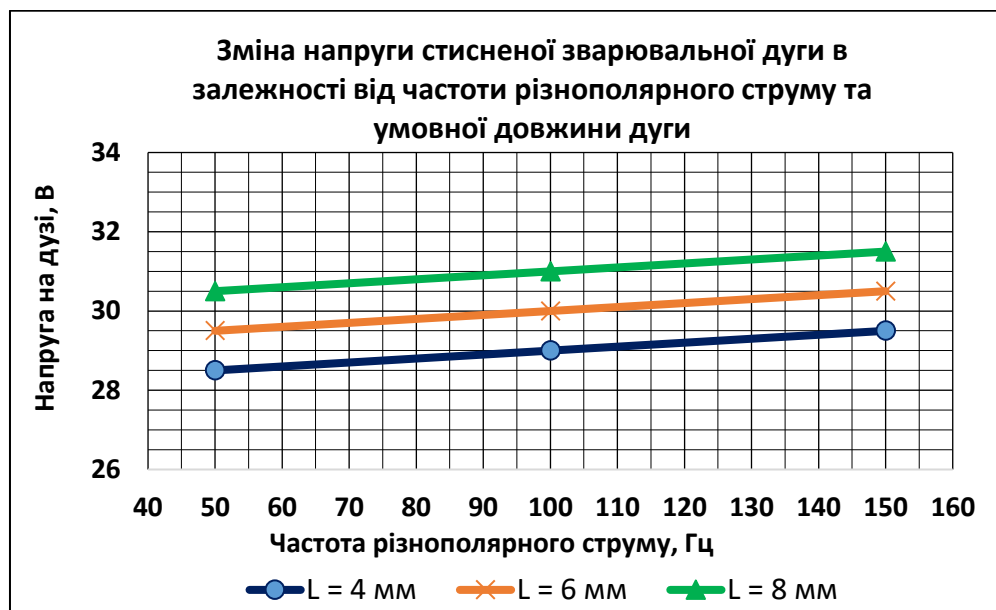


Рисунок 3.3 - Графік зміни напруги стисненої дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 7 мм в залежності від частоти різнополярного струму та умовної довжини дуги при 85% прямої полярності.

Зростання напруги стисненої дуги в залежності від зміни умовної довжини дуги спостерігається також при і при зміні тривалості прямої полярності при незмінному значенні частоти різнополярного струму (рис. 3.4).

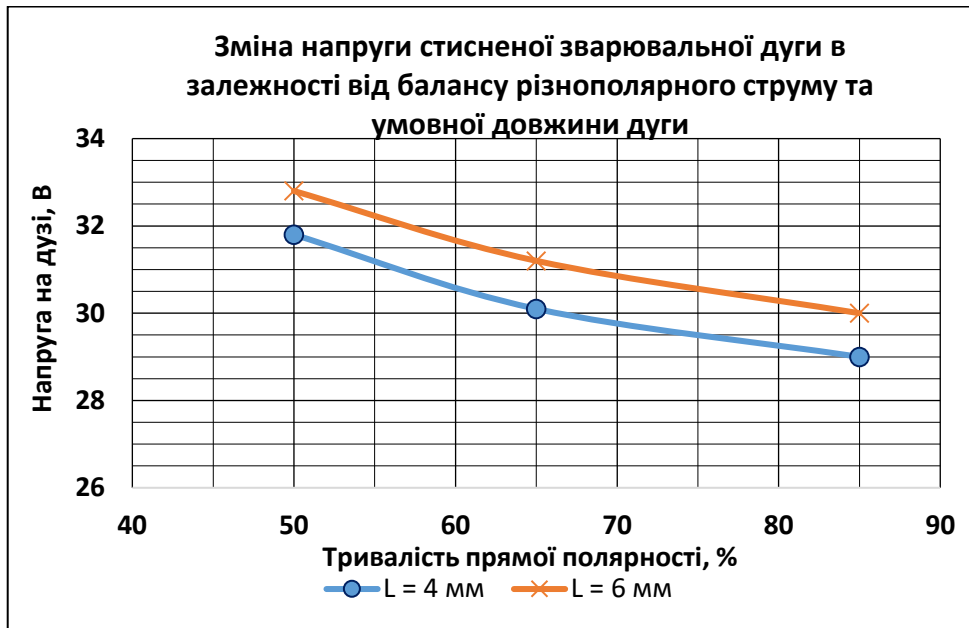


Рисунок 3.4 - Графік зміни напруги стисненої дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 7 мм в залежності від балансу різнополярного струму та умовної довжини дуги при частоті різнополярного струму 100 Гц.

Спостерігається чітка тенденція зростання напруги стисненої дуги на 1 В при зміні умовної довжини дуги на 2 мм.

Дослідження швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг6 товщиною 4 мм, 7 мм і 10 мм на швидкостях 100 см/хв, 60 см/хв. та 20 см/хв. відповідно, показали, що зміна умовної довжини дуги в межах 4-8 мм викликає зменшення глибини проплавлення, так збільшення довжини дуги з 4 мм до 8 мм при зварюванні сплаву АМг6 товщиною 10 мм на струмі 180 А призводить до зменшення глибини шва з 2,9 мм до 2,4 мм (рис. 3.5, а-в), що становить 17% від загальної глибини проплавлення. При зростанні величини зварювального струму до 260 А при тих же витратах плазмоутворюючого газу ( $Q_{пл}=0,2$  л/хв) зміна довжини дуги практично не вплинула на глибину проплавлення швів (рис. 3.5, г-е).

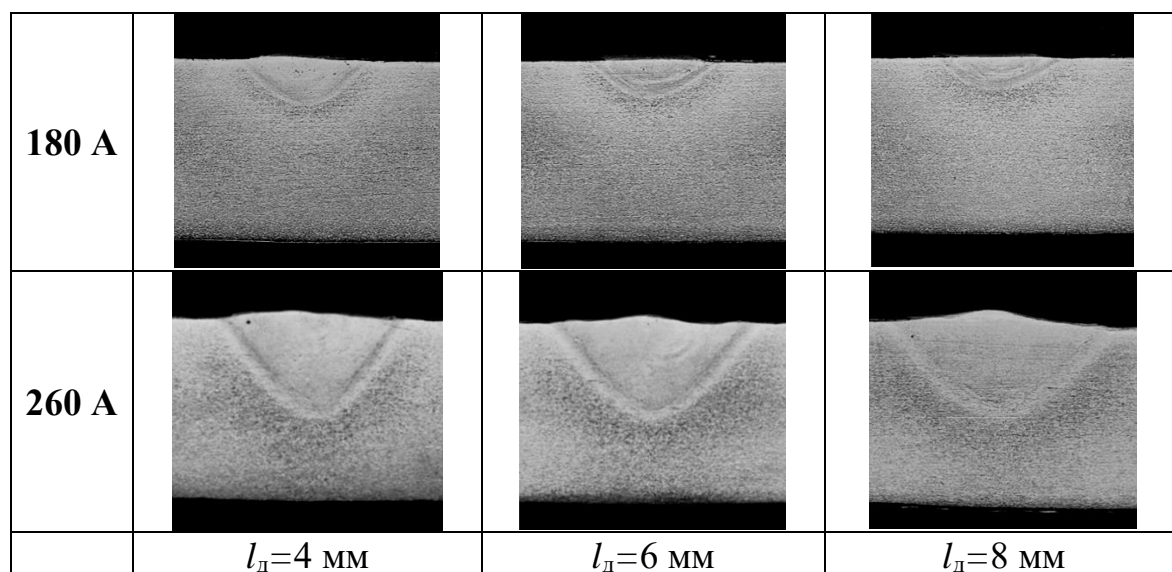


Рисунок 3.5 - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг6 товщиною 10 мм ( $V_{зв} = 20$  см/хв (12 м/год);  $Q_{пл} = 0,2$  л/хв) при різній довжині дуги та величині струму.

Збільшення довжини дуги викликає збільшення радіусу плями нагрівання на поверхні ванни. Збільшення плями нагрівання при незмінних значеннях сили тиску стисненої дуги, які прямо пропорційні квадрату величині зварювального струму, зменшує тиск на рідкий метал. Тобто та ж сама сила діє на більшу площу. Так при діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла 3,2 мм зростання довжини дуги на 2 мм викликає збільшення діаметру плями впливу дуги на поверхні зварювальної ванни на 12%. При цьому напруга зростає лише на 3,4 %. Зростання потужності за рахунок збільшення напруги не компенсує падіння сконцентрованості енергії в плямі нагрівання за рахунок збільшення діаметру плями нагрівання.

При зварюванні тонких алюмінієвих листів на малих струмах (до 200 А) утворюється ванна з малим об'ємом рідкого металу. Такий об'єм металу більш чутливий до змін тиску, навіть таких, як зміна тиску дуги із-за зміни площі активної плями на поверхні зварювальної ванни. У таких випадках необхідно під час зварювання контролювати умовну довжину дуги та автоматично регулювати її в заданих величинах за рахунок використання автоматичних систем дотримання довжини дуги. У випадку різнополярного струму це може бути



механічний тактильний датчик на відміну від контролю за довжиною дуги за напругою, як це можливо у разі використання постійного струму.

Залежно від швидкості зварювання, товщини металу та величини зварювального струму зміна довжини дуги в досліджуваному діапазоні може або не впливати на глибину проплавлення швів при великих об'ємах зварювальної ванни, або зменшувати глибину проплавлення при зростанні умовної довжини дуги при малих об'ємах зварювальної ванни. При збільшенні умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні частково компенсувати глибину проплавлення можливо за рахунок збільшення витрат плазмоутворюючого газу.

Але в першу чергу збільшення витрат плазмоутворюючого газу необхідно для покращення просторової стабільності стисненої дуги при зростанні умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні на струмах до 150 А.

### **3.3. Вплив витрат плазмоутворюючого газу на геометричні параметри швів. Особливості впливу витрат плазмоутворюючого газу при різних значеннях струму стисненої дуги.**

Графік на рис. 3.6 відображає зміну напруги стисненої дуги при плазмо-дуговому зварюванні зі струмом 220 А, частоті різнополярного струму 100 Гц, умовній довжині дуги 6 мм та діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла 3,2 мм. Залежність показує, що з ростом витрат плазмоутворюючого газу напруга може збільшитися на 18%. Основною умовою зростання напруги стисненої дуги є посилення газової ізоляції навколо стовпа плазми, внаслідок чого блокується його розширення.

При плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів глибина проплавлення швів зростає при збільшенні витрат плазмоутворюючого газу. Це явище обумовлюється двома факторами: по-перше зростання витрат плазмоутворюючого газу викликає зростання напруги стисненої дуги різнополярного струму (рис. 3.6), по-друге збільшення витрат плазмоутворюючого газу посилює силовий вплив саме потоку газу на рідкий

метал зварювальної ванни, викликаючи занурення плазмового струменю в саму ванну та покращуючи теплопередачу від стисненої дуги до твердого металу.

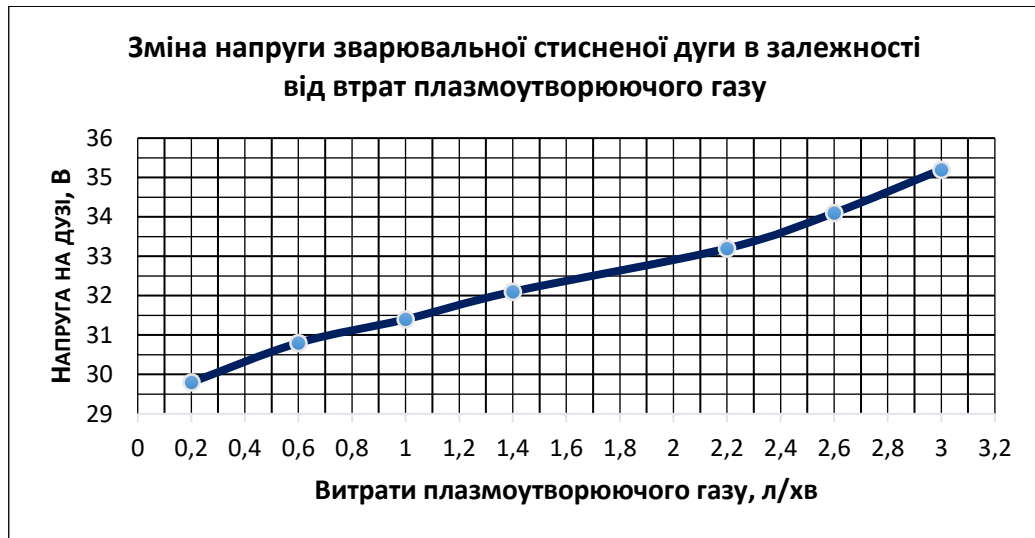


Рисунок 3.6 - Зміна напруги стисненої дуги при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом в залежності від зміни витрат плазموутворюючого газу.

Проте якісне формування швів забезпечується тільки в певному діапазоні зміни витрат плазмоутворюючого газу. Цей діапазон залежить від товщини зварюваного металу, швидкості переміщення плазмотрона та величини зварювального струму. Проведені дослідження дозволили встановити межі регулювання витрат плазмоутворюючого газу, при яких вдається отримувати якісні шви, і визначити наскільки зміна цих витрат впливає на глибину проплавлення швів.

При плазмовому зварюванні сплаву АМг6 товщиною 10 мм стабільність процесу забезпечується на струмі 180 А при витратах плазмоутворюючого газу не більше 1,6 л/хв, на струмі 220 А – не більше 1,8 л/хв, на струмі 260 А – не більше 1,2 л/хв (рис. 3.7).

При цьому на струмах 180 А і 220 А зміна витрат газу із 0,2 л/хв до максимально допустимого значення дозволяє збільшити глибину проплавлення на 35% (рис. 3.8, а-г). А при збільшенні струму до 260 А за рахунок зростання

витрат газу в 6 разів (із 0,2 л/хв до 1,2 л/хв) глибина проплавлення швів зростає всього на 10% (рис. 3.8, д, є).

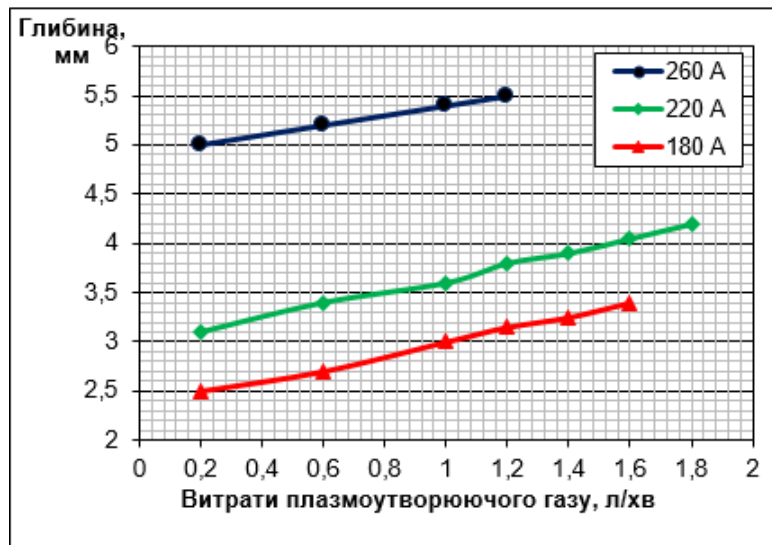


Рисунок 3.7 - Вплив витрат плазмоутворюючого газу на глибину проплавлення швів при плазмі-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 10 мм ( $V_{зв} = 20$  см/хв (12 м/год);  $l_d = 6$  мм)

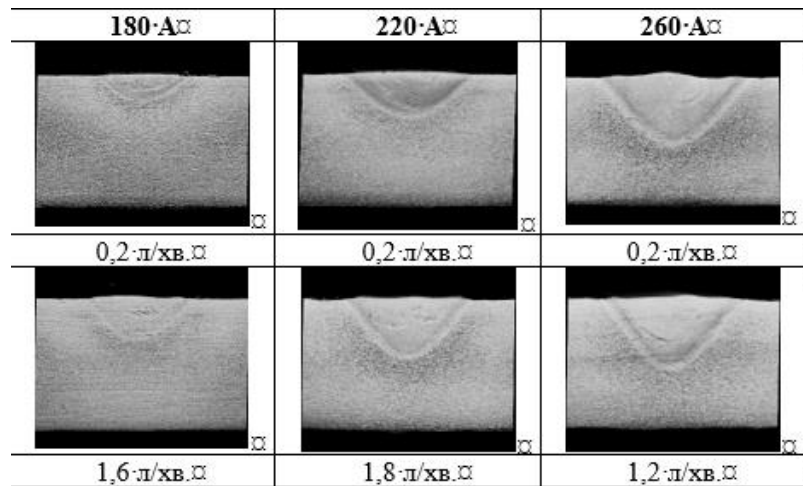


Рисунок 3.8. - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмі-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 10 мм ( $V_{зв} = 20$  см/хв (12 м/год);  $l_d = 6$  мм) з різними витратами плазмоутворюючого газу

При зварюванні сплаву АМГб товщиною 7 мм (при швидкості переміщення плазмотрона 60 см/хв (36 м/год) створилися сприятливі умови між об'ємом зварювальної ванни та часом її існування, що дозволило дещо збільшити

максимально допустимі витрати плазмоутворюючого газу без порушення якості швів. На струмі 180 А стабільність процесу забезпечувалась при витратах газу до 2,0 л/хв, на струмі 220 А – до 2,6 л/хв, а на струмі 260 А – до 1,8 л/хв (рис. 3.9).

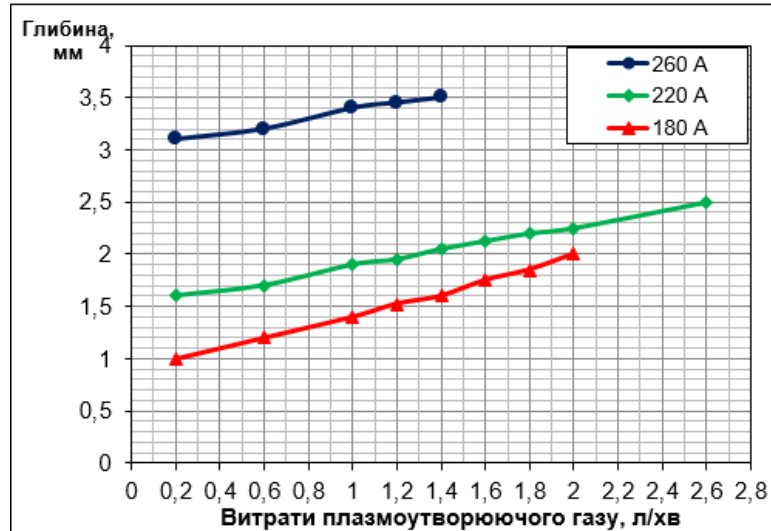


Рисунок 3.9 - Вплив витрат плазмоутворюючого газу на глибину проплавлення швів при плазмі-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 7 мм ( $V_{зв} = 60$  см/хв (36 м/год);  $l_d = 6$  мм)

Проте і в цьому випадку значне зростання витрат плазмоутворюючого газу (з 0,2 л/хв до 1,8 л/хв) при використанні зварювального струму величиною 260 А дозволило збільшити глибину проплавлення всього на 19 % (рис. 3.10).

Швидкісне (100 см/хв (60 м/год) плазмі-дугове зварювання сплаву АМГб товщиною 4 мм забезпечує отримання якісних швів на струмі 180 А при витратах плазмоутворюючого газу не більше 2,0 л/хв, на струмі 220 А – не більше 2,2 л/хв, а на струмі 260 А – не більше 1,4 л/хв. При цьому на струмах 220 А і 260 А зміна витрат газу із 0,2 л/хв до максимально допустимого значення дозволяє збільшити глибину проплавлення приблизно на 15% (рис. 3.11).

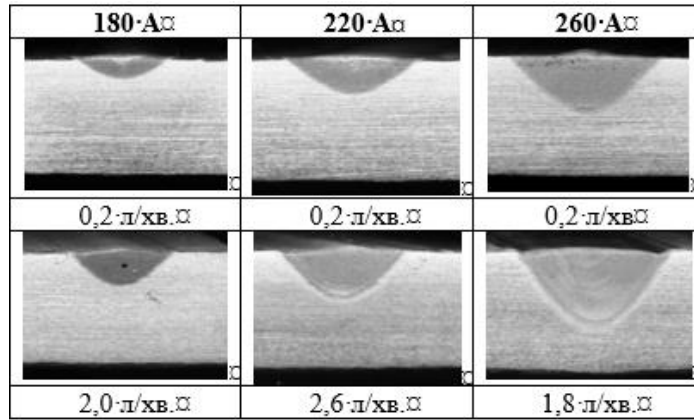


Рисунок 3.10 - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 7 мм ( $V_{зв} = 60$  см/хв (36 м/год);  $l_0=6$  мм) з різними витратами плазмоутворюючого газу

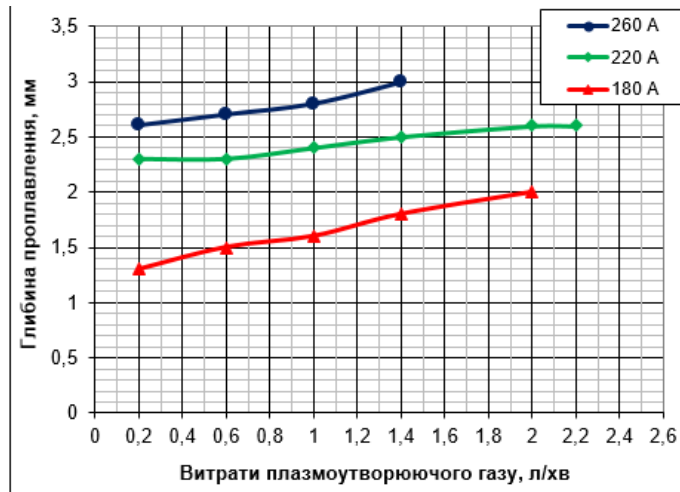


Рисунок 3.11 - Вплив витрат плазмоутворюючого газу на глибину проплавлення швів при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 4 мм ( $V_{зв} = 100$  см /хв (60 м/год);  $l_д = 6$  мм).

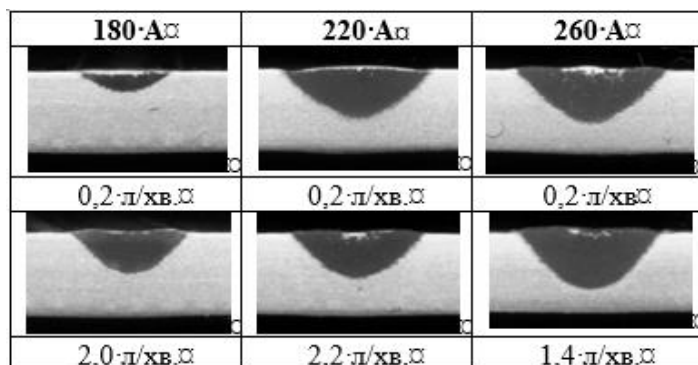


Рисунок 3.12 - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМГб товщиною 4 мм ( $V_{зв} = 100$  см/хв (60 м/год);  $l_д=6$  мм) з різними витратами плазмоутворюючого газу:

Зростання витрат плазмоутворюючого газу при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом призводить до зростання занурювання плазмового струменя в розплавлений метал (рис. 3.13).

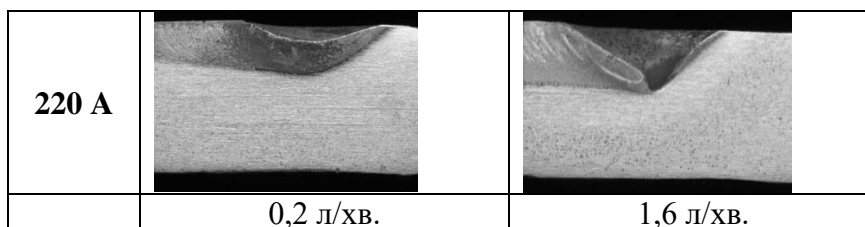


Рисунок 3.13 - Поздовжні макрошліфи кратерів швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМгб товщиною 10 мм з різними витратами плазмоутворюючого газу.

Так було становлено, що для струму 220 А, при умовній довжині дуги 6 мм, частоті різнополярного струму 100 Гц та балансі різнополярного струму у 85% прямої полярності збільшення діаметру плазмоутворюючого сопла з 3,2 мм до 4,2 мм напруга стисненої дуги зменшується на 11% (рис.3.14).

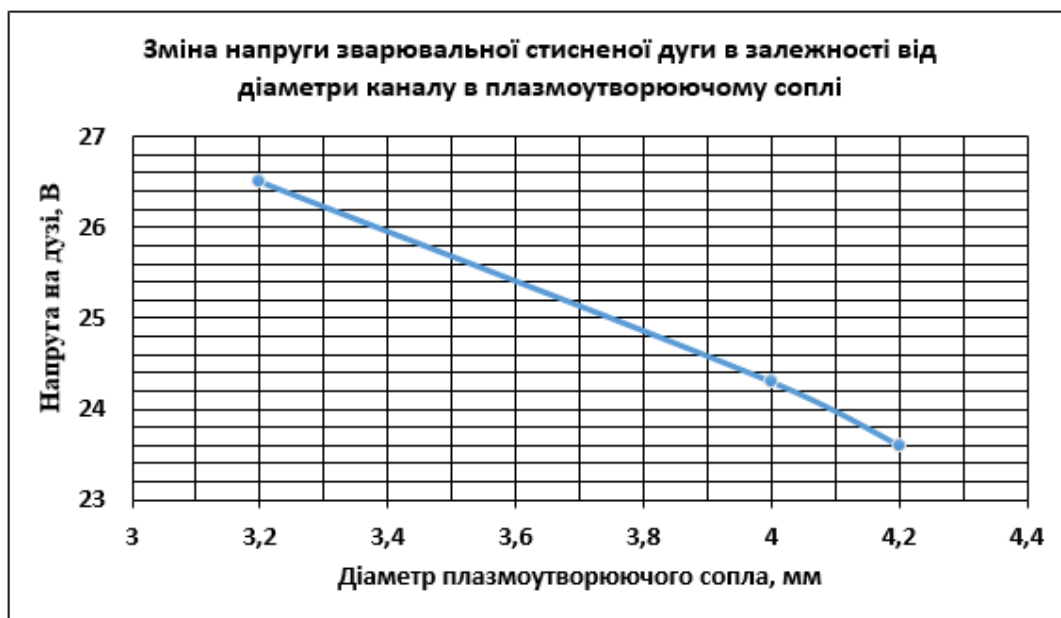


Рисунок 3.14 - Вплив діаметру каналу плазмоутворюючого сопла на напругу стисненої дуги при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів різнополярним струмом.

### **3.4. Визначення впливу несучої частоти різнополярного асиметричного струму на якість формування поверхні та геометрію швів**

Одним із параметрів різнополярного асиметричного струму є частота різнополярного струму. Саме це параметр відповідає за інтенсивність зміни впливу півперіодів прямої та оберненої полярності протягом 1 секунди.

Вплив частоти різнополярного струму на геометричні параметри зварного шва та стабільність його формування саме при плазмовому зварюванні алюмінієвих сплавів раніше не досліджувався.

Для проведення експериментів вибирали вольфрамові електроди одного діаметра, одні значення частоти та співвідношення між тривалістю протікання струму при прямій та оберненій полярності.

Так при плазмовому зварюванні зі збільшенням частоти різнополярного асиметричного струму збільшується глибина проплавлення та зменшується ширина зварних швів. Так при виконанні проплавів на сплав АМг 6 товщиною 6 мм стисненою дугою зі швидкістю 40 см/хв (24 м/год), струмом 250 А, тривалістю протікання струму при прямій полярності 85% з частотою різнополярного струму 50 Гц глибина проплавлення складала 2,5 мм. Зі зростанням частоти різнополярного струму спостерігається зростання глибини проплавлення. Так підвищення частоти зварюваного різнополярного струму до 200 Гц при тих же значеннях струму та швидкості зварювання викликало збільшення глибини проплавлення алюмінієвої пластини товщиною 6 мм до 5,5 мм. Поперечні мікрошліфи проплавів, отриманих плазмовим зварюванням з різною частотою різнополярного струму наведені на рис. 3.15.

При цьому більш інтенсивна зміна глибини проплавлення спостерігається в діапазоні від 150 до 200 Гц. Подальше зростання несучої частоти різнополярного струму до 240 Гц викликало повне розрізання зразка із-за надмірного його розплавлення при незмінних величинах швидкості переміщення пальника та сили струму.

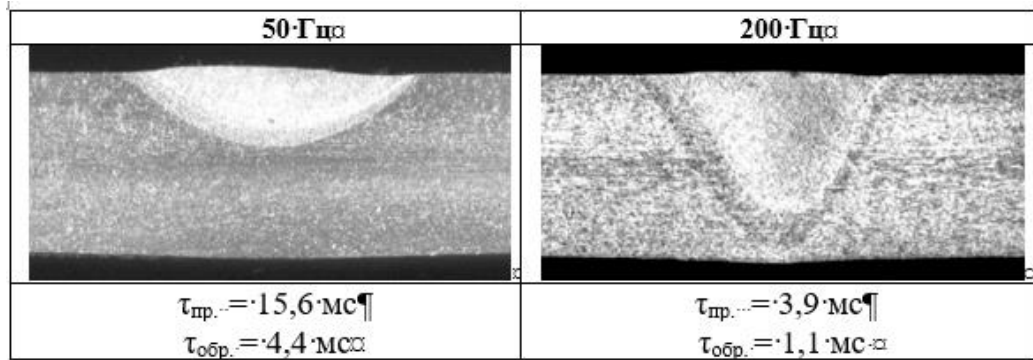


Рисунок 3.15 - Поперечні макрошліфи проплавів, отриманих на сплаві АМг 6 товщиною 6 мм плазмо-дуговим зварюванням зі швидкістю 40 см/хв (24 м/ч) зі струмом 250 А при різній частоті різнополярного асиметричного струму.

Зміна частоти струму впливає також на ширину зварного шва. Так із зростанням частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц ширина шва зменшилась з 9,4 до 8,2 мм. Графік залежності зміни геометричних параметрів проплавлення алюмінієвої пластини із сплаву АМг3 товщиною 6 мм від частоти різнополярного струму при плазмовому зварюванні наведено на рис. 3.16.

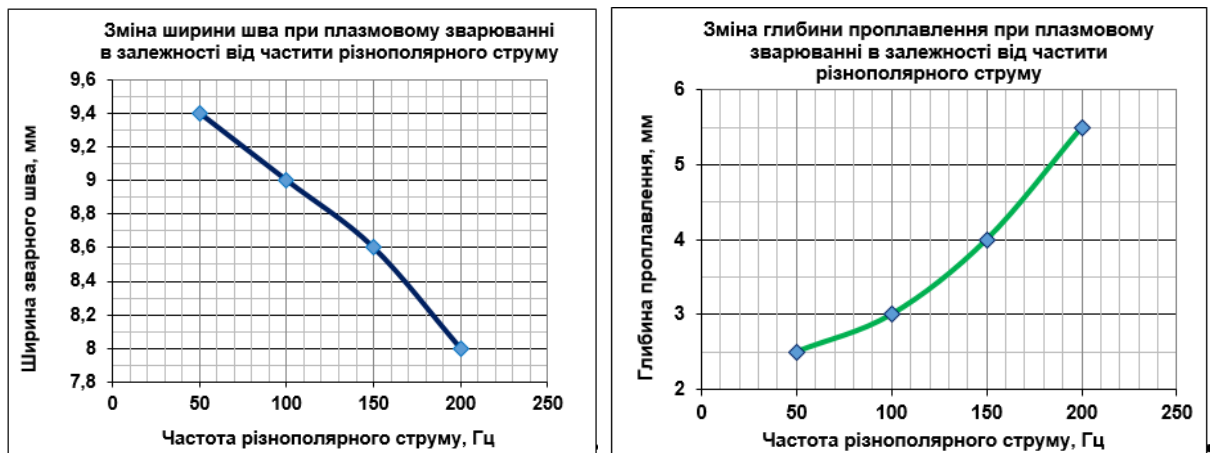


Рисунок 3.16 - Зміна ширини шва та глибини проплавлення при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвого сплаву АМг 3 (Al-Mg-Mn) товщиною  $\delta = 6$  мм в залежності від несучої частоти різнополярного асиметричного струму. ( $I_{зв} = 250$  А;  $V_{зв} = 40$  см/хв (24 м/год))

При плазмовому зварюванні різнополярним струмом зі зростанням частоти різнополярного струму спостерігається зростання напруги на дузі (рис. 3.17.).



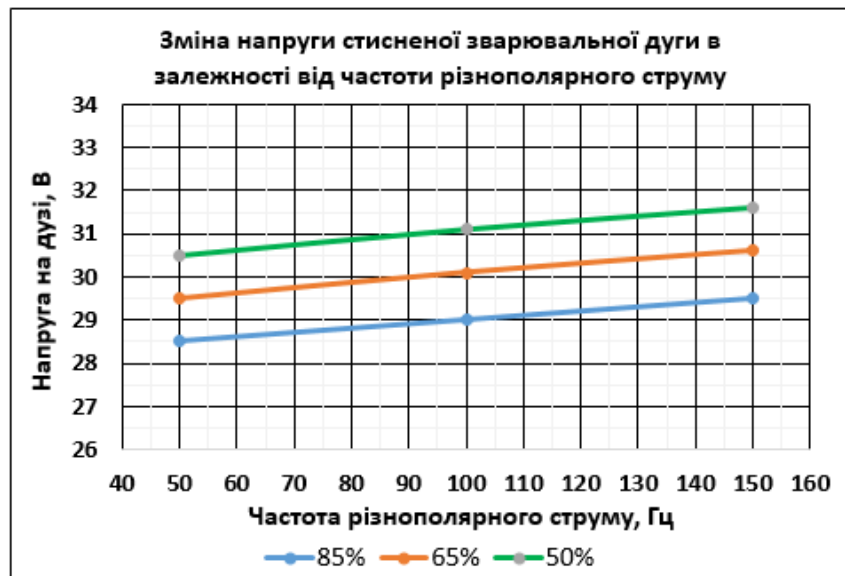


Рисунок 3.17 - Залежність напруги стисненої дуги від частоти різнополярного струму та тривалості протікання струму при прямій полярності при плазмовому зварюванні. ( $I_{зв}=250$  А;  $V_{зв} = 40$  см/хв. (24 м/год); умовна довжина дуги 4 мм).

Напруга при збільшенні частоти різнополярного струму при плазмовому зварюванні з 50 Гц до 100 Гц зростає в середньому на 0,5 – 0,6 В, що становить лише 1,7 – 1,8 %. При цьому спостерігається зростання глибини проплавлення алюмінієвої пластини товщиною 6 мм на 20 %. Отже зростання глибини поправлення не може бути прояснено лише зростанням потужності дуги за рахунок росту напруги. При цьому також спостерігається зменшення ширини шва.

Одночасне зменшення ширини шва зі зростанням його глибини свідчить про зростання ефективності передачі енергії від стисненої дуги до основного металу при зростанні частоти різнополярного струму. Це може бути викликано зменшенням загального часу переходу від прямої полярності до оберненої полярності. Враховуючи той факт, що тиск дуги при прямій полярності дещо вищий у порівнянні з оберненою полярністю, то зростає сукупний силовий вплив стисненої дуги на рідкий метал зварювальної ванни, викликаючи заглиблення дуги в рідкий розплав, відтиснення рідкого металу та зменшення прошарку рідкого металу під дугою. Зменшення прошарку між дугою та основним металом

обумовлює зростання передачі тепла від дуги основному металу, що викликає його більше розплавлення.

Другим фактором збільшення ефективності зростання глибини проплавлення металу при зростанні частоти різнополярного струму при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів – це зменшення діаметру активної плями на поверхні зварюваної ванни з ростом частоти струму. При цьому зростає сконцентрованість енергії в плямі нагрівання, що обумовлює також її заглиблення в рідкий метал та зростання глибини проплавлення.

### **3.5. Оцінка впливу тривалості протікання струму при прямій та оберненій полярності на якість формування та геометричні параметри швів**

Руйнування оксидної плівки відбувається при протіканні струму при оберненій полярності. В цей період часу катодом виступає виріб, а анодом виступає електрод пальника (плазмотрону). Більша частина тепла від дії електричної дуги при оберненій полярності виділяється на аноді. При плазмовому зварюванні різнополярним струмом електродом в плазмотроні виступає вольфрамовий стрижень. Надмірне тепло на аноді викликає передчасне руйнування вольфрамового стрижню.

З метою зменшення теплового впливу на вольфрамовий стрижень та подовження терміну його експлуатації без руйнування було запропоновано використання часової асиметрії – переважання горіння стисненої дуги при прямій полярності.

Так при протіканні струму прямої полярності відбуваються процеси проплавлення основного металу. Більшість тепла виділяється на аноді, яким виступає зварюваний метал.

З метою забезпечення процесу ефективного руйнування оксидної плівки та зменшення теплового навантаження на електрод, тривалість протікання струму при оберненій полярності зменшують до мінімально можливої величини. Так у американських дослідників ця величина становила 3 – 4 мс.

Напруга на дузі при оберненій полярності вище ніж при прямій полярності при однакових значеннях сили струму та витратах плазмоутворюючого газу.

Змінюючи баланс (співвідношення між тривалістю протікання струму при прямій та оберненій полярності) можна змінювати потужність стисненої дуги за рахунок більшої напруги оберненої полярності (рис. 3.18).

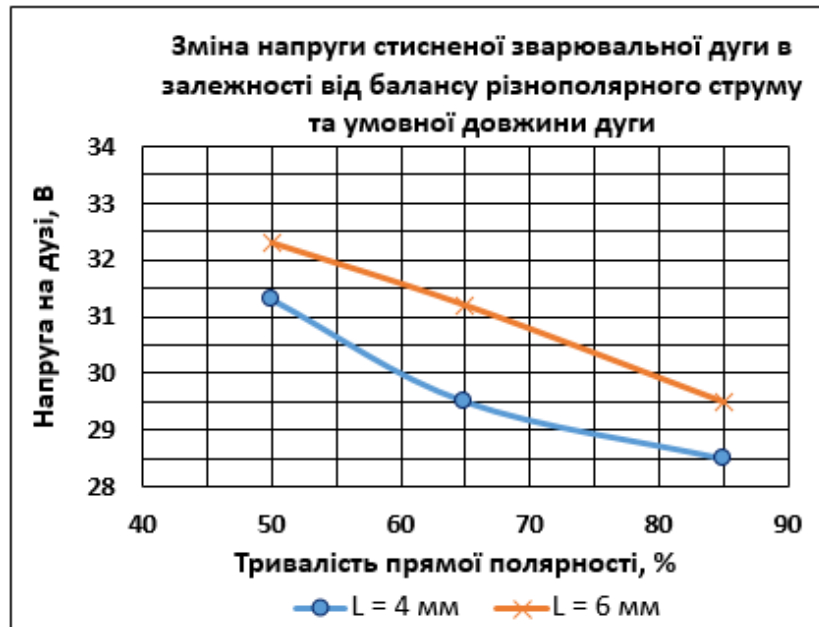


Рисунок 3.18 - Зміна напруги стисненої дуги в залежності від балансу різнополярного струму та умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг 3 товщиною 7 мм з частотою різнополярного струму 50 Гц.

Встановлено, що при збільшенні долі прямої полярності в періоді зварювання зменшується середнє значення напруги на дузі. Така тенденція зберігається як при частоті різнополярного струму 100 Гц (рис. 3.19) так і при частоті 150 Гц (рис. 3.20) та більш високих частотах різнополярного струму.

Також було досліджено вплив балансу різнополярного струму на геометричні розміри зварних швів. Шви виконували плазмовим зварюванням різнополярним струмом при постійному значенні сили струму 250 А, витратах плазмоутворюючого газу 0,6 л/хв, умовній довжині дуги 6 мм, швидкості зварювання 40 см/хв. У всіх дослідях було використано плазмоутворююче сопло з основним каналом діаметром 4,0 мм та двома додатковими отворами діаметром

по 1,0 мм кожне. Частота різнополярного струму була незмінною і становила 200 Гц.

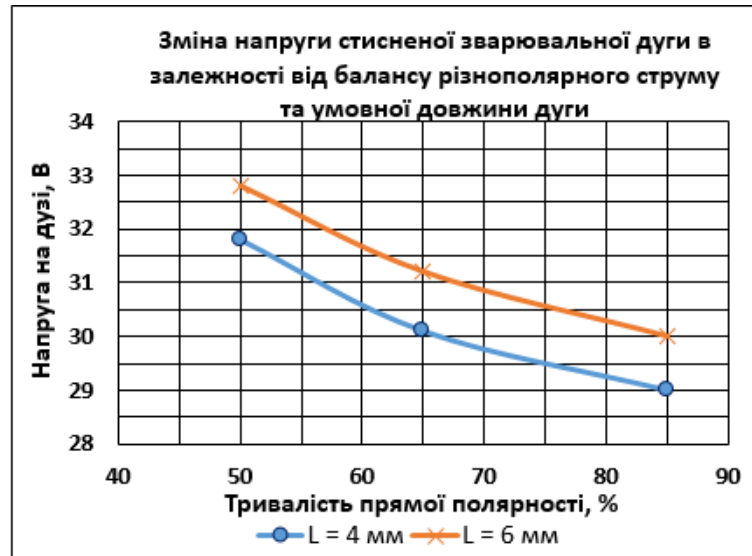


Рисунок 3.19 - Зміна напруги стисненої дуги в залежності від балансу різнополярного струму та умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг 3 товщиною 7 мм з частотою різнополярного струму 100 Гц.

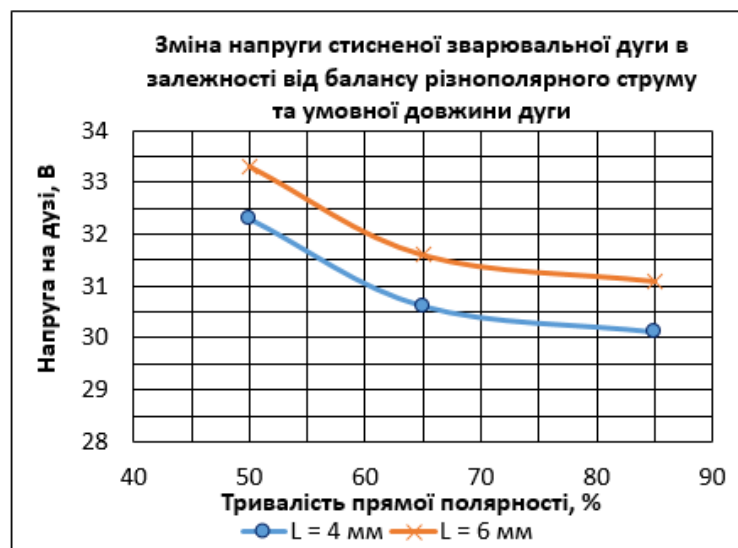


Рисунок 3.20 - Зміна напруги стисненої дуги в залежності від балансу різнополярного струму та умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні алюмінієвого сплаву АМг 3 товщиною 7 мм з частотою різнополярного струму 150 Гц.

В ході досліджень було встановлено, що найбільша глибина проплавлення спостерігається при балансі різнополярного струму – 85% прямої полярності (рис. 3.21, а). Зі збільшенням частки оберненої полярності до 65% прямої полярності – глибина проплавлення зменшується, а ширина шва ледь помітно зростає (рис. 3.21, б). При рівній кількості тривалості горіння прямої та оберненої полярності (баланс 50% прямої полярності) глибина проплавлення зменшується у порівнянні з балансом 65% прямої полярності та становить лише 50% від глибини проплавлення при балансі 85% прямої полярності (рис. 3.21, в).

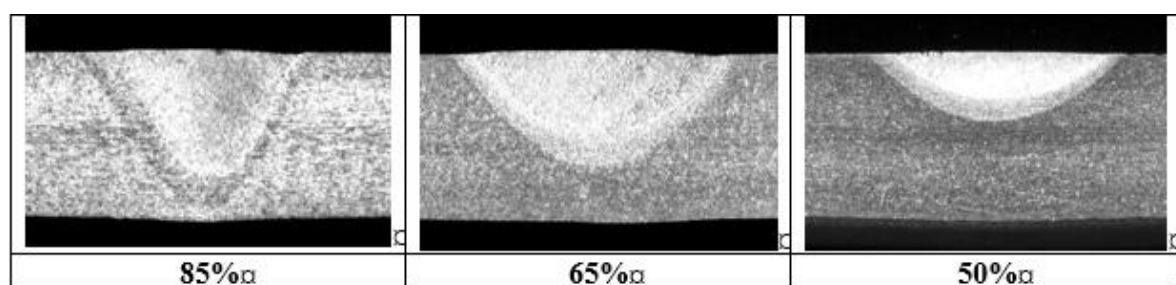


Рисунок 3.21 - Поперечні шліфи зварних швів, отриманих плазмовим зварюванням алюмінієвого сплаву АМг3 різнополярним струмом з різною тривалістю протікання струму при прямій полярності.

Візуально спостерігається більші геометричні розміри стовпа стисненої дуги при оберненій полярності у порівнянні зі стовпом дуги при прямій полярності. Зменшення глибини проплавлення при плазмо-дуговому зварюванні спостерігається при збільшенні частки оберненої полярності. Таке зменшення глибини проплавлення може свідчити про зменшення тиску плазмового струменя на рідкий метал зварювальної ванни при протіканні струму при оберненій полярності. Зменшення тиску плазмового струменя зменшує його занурення в розплавлений метал зварювальної ванни, збільшує прошарок рідкого металу під плазмовим струменем, і як наслідок цього зменшується ефективність передавання тепла від плазмового струменя до нерозплавленого металу. Отже, зменшення тиску плазмового струменя на рідку ванну при оберненій полярності викликає зменшення проплавлення шва, збільшення

ширини шва зумовлено зростанням потужності стисненої дуги із-за збільшення середнього значення напруги на дузі.

### 3.6. Вплив вмісту гелію у захисній атмосфері на формування швів

Застосування гелію в якості захисного газу замість аргону призводить до збільшення проплавляючої спроможності дуги. Так, на сплаві АМГб товщиною 7 мм ширина шва збільшилась з 9,7 мм до 12,4 мм, а глибина проплавлення – з 3 мм до 4,3 мм при швидкості зварювання 36 м/год і струмі 220 А (рис. 3.22). Гелій має більший потенціал іонізації, що обумовлює підвищення напруги на дузі в 1,5 – 2 рази у порівнянні зі зварюванням в аргоні при однакових значеннях зварювального струму.

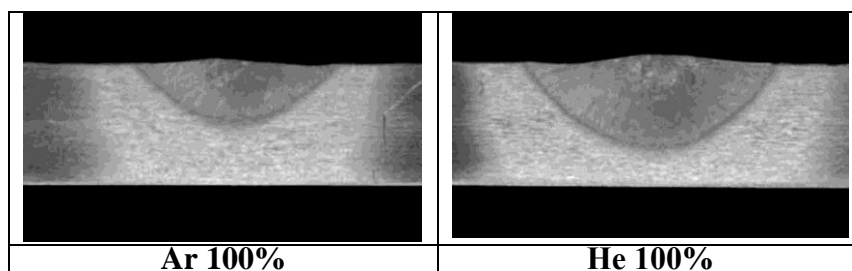


Рисунок 3.22 - Поперечні макрошліфи швів сплаву АМГб  $\delta = 7$  мм, отриманих плазмовим зварюванням зі швидкістю 60 см/хв (36 м/год) при різному складі захисного газу.

На сплаві АМГб товщиною 4 мм ( $I_{зв} = 220$  А,  $V_{зв} = 100$  см/хв (60 м/год) заміна аргону гелієм призвела до збільшення ширини шва з 6,8 мм до 9,3 мм і глибини проплавлення з 1,9 мм до 3,6 мм (рис. 3.23).

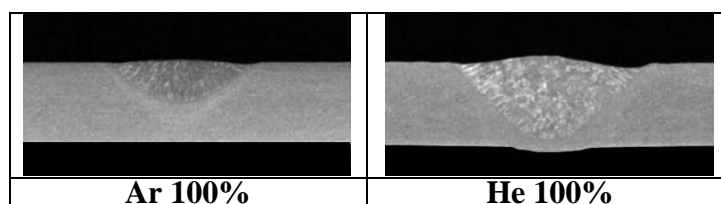


Рисунок 3.23 - Поперечні макрошліфи зварних швів сплаву АМГб  $\delta=4$  мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням зі швидкістю 100 см/хв (60 м/год) з різним складом захисного газу.

Застосування для захисту зони зварювання різних сумішей (75% Ar + 25% He, 50% Ar + 50% He, 25% Ar + 75% He) практично не впливає на глибину проплавлення швів, а змінює тільки їх ширину (вона дещо більша ніж в чистому аргоні, але менша ніж в чистому гелії) (рис. 3.24).

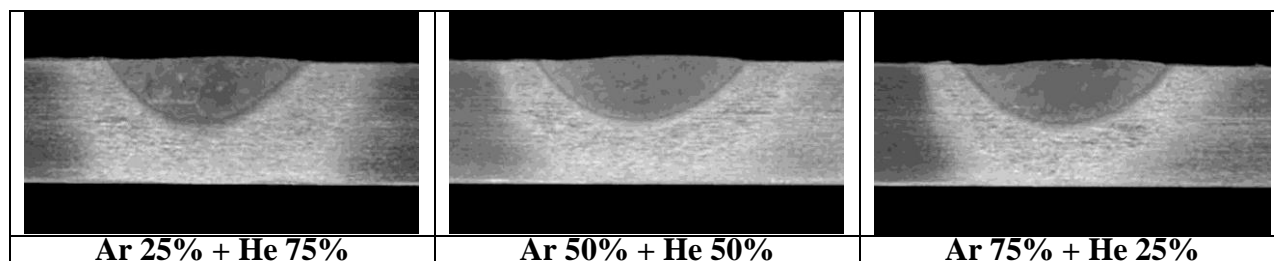


Рисунок 3.24. Поперечні макрошліфи швів сплаву АМг6  $\delta = 7$  мм, отриманих плазмовим зварюванням зі швидкістю 60 см/хв (36 м/год) при різному складі захисного газу.

Більш різке збільшення глибини проплавлення на металі товщиною 4 мм у порівнянні з більш товстим (7 мм) обумовлене, можливо, зміною умов передачі тепла від розплавленої зварювальної ванни в основний метал.

При наплавленні валика з використанням присадкового дроту застосування гелію замість аргону дозволяє також збільшити глибину та ширину наплавки в 1,5 рази при незмінних значеннях величини зварювального струму, швидкості зварювання, довжини дуги і витратах плазмоутворюючого газу. При цьому спостерігається, більше розтікання наплавленого валика. Це обумовлюється більшою теплопровідністю гелію в порівнянні з аргонем. При цьому висота валика підсилення зменшується (рис. 3.25).

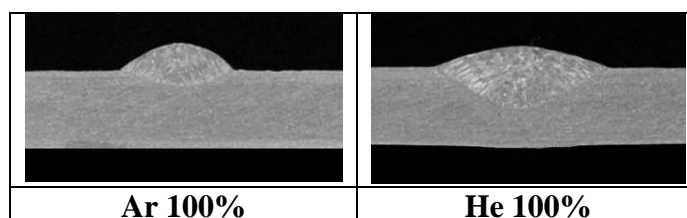


Рисунок 3.25 - Поперечні макрошліфи наплавки на сплав АМг6  $\delta=4$  мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням зі швидкістю 100 см/хв (60 м/год) з використанням присадкового дроту та різним складом захисного газу.

При отриманні стикових з'єднань із алюмінієвих сплавів товщиною 4 – 6 мм застосування чистого гелію в якості захисної атмосфери дозволяє зменшити приблизно на 30% величину струму, ніж при зварюванні у чистому аргоні.

Попри можливість покращити умови розтікання присадкового металу та можливість збільшити глибину проплавлення основного металу без нарощування зварювального струму, гелій має суттєвий недолік – вища ціна.

Так з метою пошуку можливості зменшення витрат на гелій в 2000-х роках в ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводили дослідження по можливості використання гелій-неонової суміші в якості захисного газу при зварюванні алюмінієвих сплавів. Гелій-неонова суміш є проміжною фазою на шляху отримання чистого гелію та чистого неону. Вартість гелій-неонової суміші з вмістом неону від 3 до 25% процентів дешевше у порівнянні з чистим гелієм. В ході досліджень [82] було встановлено, що гелій-неонова суміш не суттєво відрізняється по енергетиці утворення дуги від чистого гелію. Так при використанні гелій-неонової суміші з вмістом неону до 25% глибина проплавлення швів була лише на 7% менша, ніж у швів, отриманих у чистому гелії. Авторами статті було рекомендовано використовувати гелій-неонову суміш для формування зварних з'єднань при дуговому зварюванні як альтернативу чистому гелію з метою скорочення витрат.

Враховуючи той факт, що при чистий гелій використовується у якості захисного газу, то також постає питання зменшення витрат. Враховуючи досвід використання гелій-неонових сумішей для зварювання неплавким електродом, дані гелій-неонові суміші можна успішно використовувати в якості захисного газу для плазмового зварювання різнополярним асиметричним струмом. Прогнозоване зменшення глибини проплавлення не буде перевершувати 7%.



### 3.7. Визначення впливу зміни швидкості зварювання та величини зварювального струму на геометричні параметри швів

#### Вплив швидкості зварювання.

Швидкість зварювання суттєво впливає на погонну енергію, а значить і на параметри проплавлення швів. Тому зменшення швидкості переміщення плазмотрона з 36 м/год до 30 м/год (на 20%) при зварюванні сплаву АМгб товщиною 7 мм на струмі 260 А призвело до збільшення глибини проплавлення шва на 37% (рис. 3.26., а, б).

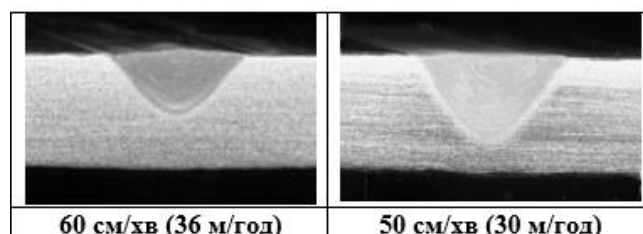


Рисунок 3.26 - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМгб товщиною 7 мм при різних швидкостях переміщення плазмотрона й однакових витратах плазмоутворюючого газу та силі струму ( $I_{зв}=260$  А,  $Q_{пл}=1,6$  л/хв).

#### Вплив величини зварювального струму.

Збільшення величини зварювального струму призводить до значного підвищення глибини проплавлення швів (рис. 3.27). При зварюванні сплаву АМгб товщиною 10 мм зростання струму зі 180 А до 260 А (на 44%) дозволяє підвищити глибину проплавлення з 3,2 мм до 5,5 мм (на 72%) при витратах плазмоутворюючого газу 1,2 л/хв. При зварюванні сплаву АМгб товщиною 7 мм в аналогічних умовах глибина проплавлення збільшується з 1,9 мм до 3,7 мм (на 95%), а товщиною 4 мм – з 1,8 мм до 3,0 мм (на 67%).

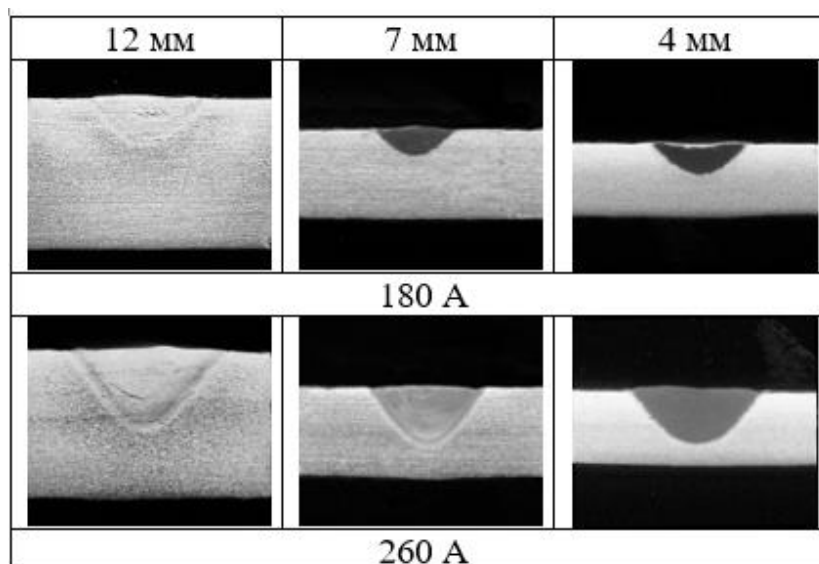


Рисунок 3.27 - Поперечні макрошліфи швів, отриманих при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМгб різної товщини при різних величинах зварювального струму.

### Висновки до розділу 3.

1. Встановлено, що зростання умовної довжини дуги при плазмовому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів викликає зменшення глибини проплавлення або ніяк не впливає на глибину проплавлення. При малих об'ємах рідкого металу зварювальної ванни, що утворюється при зварюванні листів товщиною 1 – 3 мм з великими швидкостями, зростання умовної довжини дуги на 2 мм може викликати зменшення глибини проплавлення до 17%, при збільшенні об'єму розплавленого металу зміна умовної довжини дуги майже не впливає на геометричні розміри шва.

2. Встановлено, що зростання витрат плазмоутворюючого газу при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів при незмінних значеннях сили струму, діаметрі каналу плазмоутворюючого сопла, частоті різнополярного струму та його балансі викликає збільшення напруги стисненої дуги до 18%.

3. Збільшення проплавлення при зростанні витрат плазмоутворюючого газу обумовлюється двома факторами: зростання потужності стисненої дуги за рахунок зростання напруги та збільшення силового впливу на рідкий метал ванни саме газової складової. Більш швидкісний потік газу занурює плазмовий

струмінь в рідкий метал, зменшує прошарок рідкого металу під плазмовим потоком, тим самим збільшуючи ефективність передавання тепла нерозплавленому металу.

4. Максимально-допустимі витрати плазмоутворюючого газу, при яких зварний шов на моделі формується без дефектів залежить від величини зварювального струму та об'єму рідкого металу зварювальної ванни. Більші витрати плазмоутворюючого газу можливі при значеннях струму до 150 А. При зростанні зварювального струму до 260 А величина максимально допустимих витрат плазмоутворюючого газу зменшується.

5. На напругу стисненої дуги також впливають геометричні розміри каналів плазмоутворюючого сопла. Так збільшення діаметру каналу плазмоутворюючого сопла з 3,2 до 4,2 мм призводить до зменшення напруги на стисненій дузі на 11% при незмінних значеннях зварювального струму.

6. Встановлено, що при плазмовому зварюванні алюмінієвих сплавів зі зростанням частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц глибина проплавлення збільшується більш як у 2 рази. Більш стрімко глибина проплавлення збільшується у діапазоні частот різнополярного струму від 100 Гц до 150 Гц. При цьому ширина шва зменшується. Збільшення глибини проплавлення можна пояснити зменшенням діаметру стовпа дуги при рості частоти струму, і як наслідок цього збільшення концентрації енергії в плямі нагрівання на деталі.

7. При зміщенні балансу різнополярного струму в бік оберненої полярності (зміна балансу від 85% прямої полярності до 50% прямої полярності) зростає середнє значення напруги на стисненій дузі. Це відбувається внаслідок збільшення долі струму оберненої полярності з більшим значенням напруги, ніж у струму прямої полярності. При цьому спостерігається збільшення ширини шва.

8. Зі збільшенням частки оберненої полярності з 85% до 50% спостерігається зменшення глибини проплавлення в 2 рази, це обумовлено зі зменшення концентрації енергії в плямі нагрівання із-за збільшення розмірів стовпа дуги та плями нагрівання при оберненій полярності.

9. Закономірності зміни глибини та ширини шва в залежності від балансу різнополярного струму діють у всьому діапазоні частот різнополярного струму від 50 до 200 Гц.

10. Використання чистого гелію в якості захисного газу при плазмовому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів дозволяє збільшити глибину проплавлення на 45 – 90% у порівнянні з використанням чистого аргону у якості захисного газу. Цей фактор дозволяє збільшити технологічні можливості стисненої дуги без збільшення струмового навантаження на плазмоутворююче сопло та вольфрамовий електрод плазмотрону.

11. Досліджено вплив більш дешевої гелій-неонової суміші у якості захисного газу при зварюванні неплавким електродом алюмінієвих сплавів. З метою зменшення витрат на захисний газ рекомендовано при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів замінити чистий гелій на гелій-неонову суміш з вмістом неону від 3 до 25%. При цьому прогнозоване зменшення глибини проплаву не буде перевищувати 7%.

12. Встановлено, що при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом додатковими факторами, що впливають на геометрію зварного шва, окрім традиційних для аргонодугового зварювання сили струму, швидкості зварювання та складу захисного газу, додатково впливають частота різнополярного струму, величина частки прямої полярності різнополярного струму та витрати плазмоутворюючого струму.

## РОЗДІЛ 4.

### ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

#### 4.1 Особливості формування кореневої частини швів при використанні підкладок з формуючими канавками

Для формування кореневої частини швів при зварюванні плавленням у нижньому положенні найчастіше використовують підкладки із нержавіючої сталі з формуючими канавками.

При плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг6 товщиною 6 мм використовували ряд підкладок з формуючим канавками різних розмірів.

При зварюванні з використанням канавки шириною 4 мм і глибиною 1,0 мм у нижній частині шва спостерігається утворення ввігнутості, яка обумовлена відбиванням плазмового струменя від дна канавки (рис. 4.1).

Збільшення ширини канавки до 10 мм суттєво не вплинуло на якість формування нижньої частини швів. Коренева частина формується нерівномірно. Спостерігається утворення пропалювань та ввігнутості (рис. 4.2).

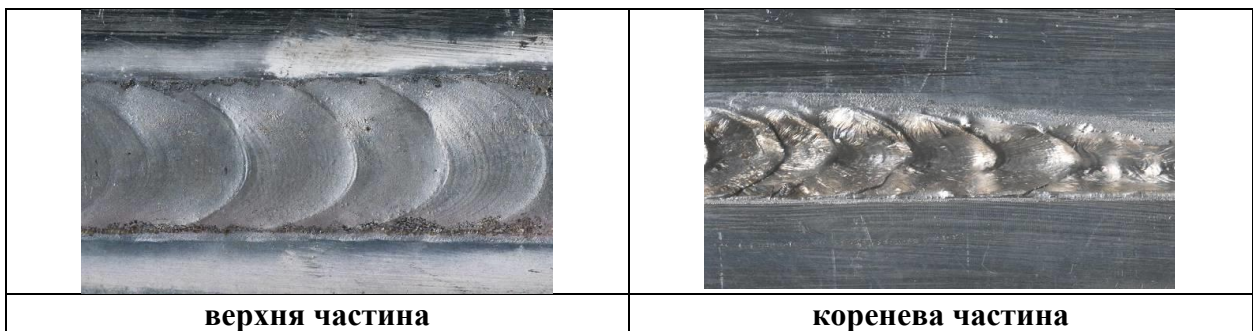


Рисунок 4.1 - Верхня та коренева частини зварного з'єднання листів товщиною 6 мм сплаву АМг6, сформованого при плазмо-дуговому зварюванні у нижньому положенні з використанням сталеві підкладки з канавкою розмірами 4x1 мм.

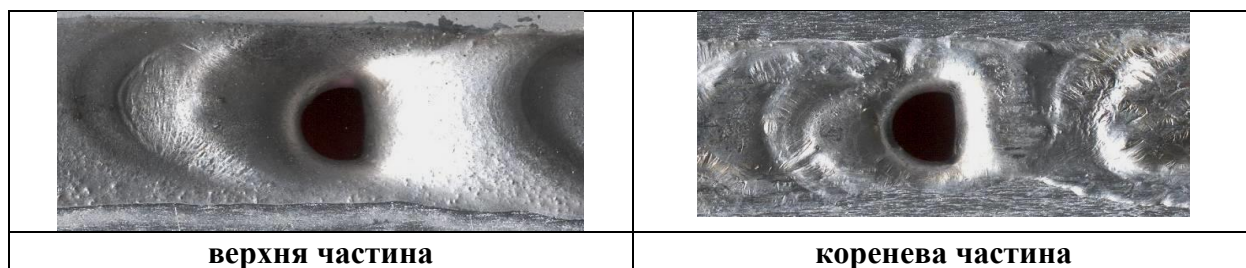


Рисунок 4.2 - Верхня та коренева частина зварного з'єднання листів товщиною 6 мм сплаву АМгб, сформованого при плазмо-дуговому зварюванні у нижньому положенні з використанням сталеві підкладки з канавкою розмірами 10x1,0 мм.

З метою усунення ефекту відбивання плазмового струменя від дна формуючої канавки її глибина була збільшена до 2,0 мм. При цьому для збільшення допуску на зміщення стисненої дуги відносно стика була вибрана канавка шириною 10 мм. Така глибина канавки достатня для формування якісного зварного з'єднання. В кореневій частині шва відсутня ввігнутість. На лицьовій поверхні не спостерігається утворення напливів, обумовлених нестабільним формуванням кореневої частини (рис. 4.3). У цьому випадку канавка забезпечуватиме лише стабільну глибину кореневої частини, а її ширина буде формуватися лише під дією сили тяжіння, яка буде долати опір сили поверхневого натягу розплавленого металу.

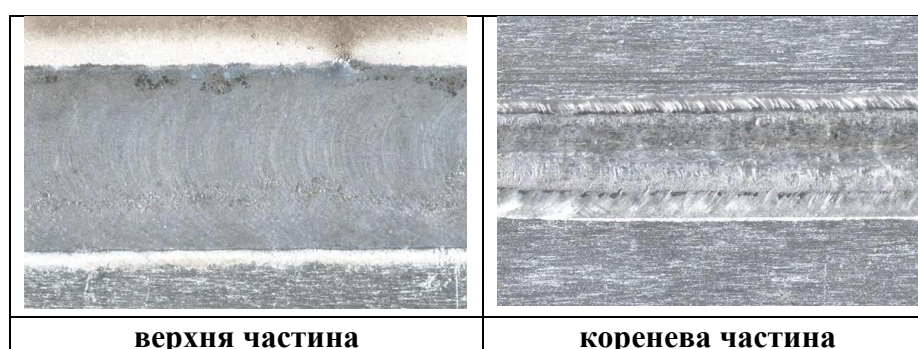


Рисунок 4.3 - Верхня та коренева частина зварного з'єднання листів товщиною 6 мм сплаву АМгб, сформованого при плазмо-дуговому зварюванні у нижньому положенні з використанням сталеві підкладки з канавкою розмірами 10x2,0 мм.

У більшості випадків зварні з'єднання сплавів АМг5 та АМг6 експлуатуються при знятому до рівня основного металу проплаві. При цьому характер переходу проплаву до основного металу суттєво не впливає на механічні властивості з'єднань.

При плазмо-дуговому зварюванні листів товщиною 6,0 мм збільшення ширини канавки до 6 мм позбавляє нижню частину шва від утворення напливів на границі переходу від проплаву до основного металу. При цьому глибину канавки збільшили до 1,2 мм (рис. 4.4). Вірогідність відбиття плазмового струменя від дна канавки зменшується.

Збільшення глибини формуючої канавки до 2 мм усуває ймовірність відбиття плазмового струменя від дна канавки внаслідок незначного порушення режиму зварювання.

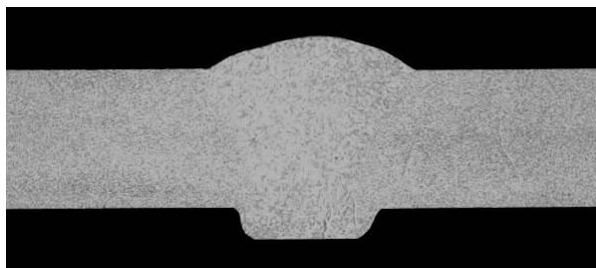


Рисунок 4.4 - Поперечний макрошліф зварного з'єднання сплаву АМг6 товщиною 6,0 мм, виконаний плазмо-дуговим зварюванням у нижньому положенні з використанням підкладки з канавкою розмірами 6x1,2 мм.

В процесі досліджень було встановлено, на відміну від аргонодугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, при плазмо-дуговому зварюванні геометричні розміри формуючої канавки в сталевій підкладці не впливають на ефективність видалення включень оксидної плівки. На перший план висувається проблема відбивання плазмового струменя від дна підкладки.

Цю проблему можна вирішити застосувавши сталеві підкладки з формуючими канавками спеціальної форми (рис. 4.5 - 4.7).

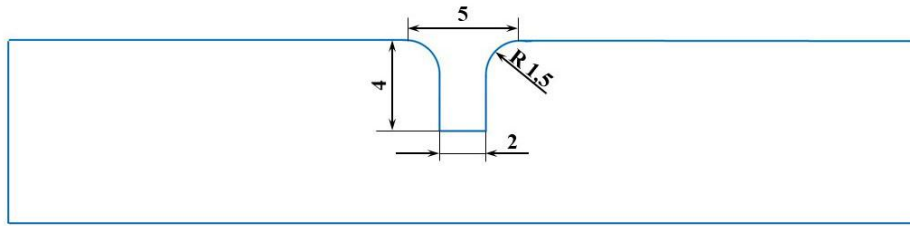


Рисунок 4.5 - Ескіз форми формуючої канавки в сталевій підкладці, призначеній для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів товщиною 2 – 5 мм.

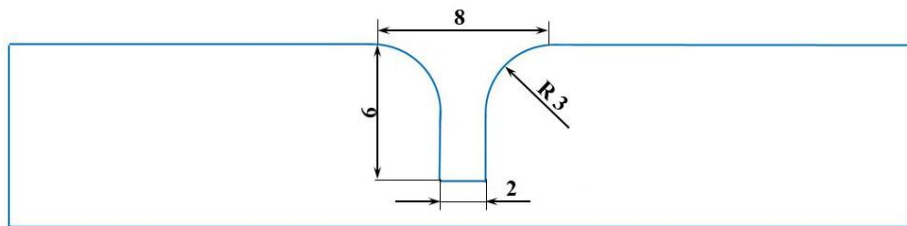


Рисунок 4.6 - Ескіз форми формуючої канавки в сталевій підкладці, призначеній для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів товщиною 6 – 8 мм.

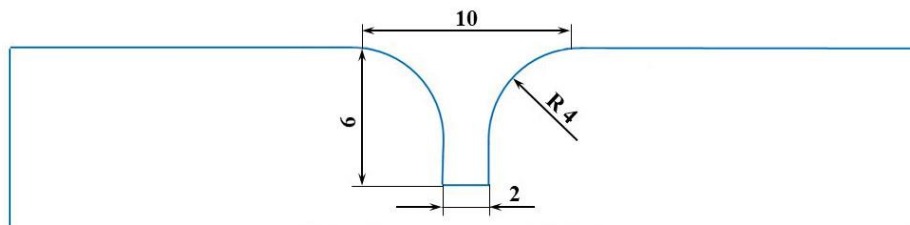


Рисунок 4.7 - Ескіз форми формуючої канавки в сталевій підкладці, призначеній для плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів товщиною 9 – 12 мм.

Розміри формуючих канавок в сталевих підкладках обираються таким чином, щоб забезпечити без перешкоди проходження плазмового струменю крізь усю товщину зварюваного металу. Валик проплавлення формується за у тому числі і за рахунок сил поверхневого натягу рідкого металу алюмінієвого сплаву. Під час зварювання не досягають мети повного заповнення металом всієї площі формуючої канавки.



Для зварювання більш товстого металу обирають канавку з більшим радіусом закруглення стінок канавки та з більшою глибиною. Більша глибина канавки обумовлена використанням для зварювання товстих листів алюмінієвих сплавів більш потужних режимів, за яких плазмовий струмінь може виходити за товщину зварюваного металу на більшу відстань, ніж при зварюванні металу товщиною 2 – 4 мм. З метою запобігання явищу відбивання плазмового променя від підкладки збільшують глибину канавки. При плазмо-дуговому зварюванні, як і при аргонодуговому зварюванні різнополярним струмом з ростом потужності дуги зростає ширина шва не тільки в його верхній частині, але і в нижній. У зв'язку з цим для зварювання більш товстого металу використовують підкладки з формуючими канавками з більшим закругленням стінок канавки.

#### **4.2 Особливості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвих сплавів без використання підкладних елементів у режимі наскрізного проникнення плазмового струменя**

При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом можливе формування зварного з'єднання не лише з використанням підкладки з формуючою канавкою, а також без використання підкладки в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

Високоєфективний процес плазмо-дугового зварювання з наскрізним проникненням плазмового струменя характеризується повним проваром, відносно вузькими швами й найбільшою близькістю до схеми лінійного джерела тепла в пластині. Внаслідок спільного силового впливу стисненої дуги та плазмоутворюючого газу в розплавленому металі зварювальної ванни утворюється порожнина кратера, яка існує на протязі всього процесу зварювання з наскрізним проникненням плазмового струменя.

Під час плазмо-дугового зварювання, коли порожнина кратера сформувалась, перехід розплавленого металу відбувається від передньої стінки

кратера в хвостову частину ванни по стінках порожнини. Це можна пояснити тим, що після дії на передню стінку порожнини кратера плазмовий струмінь деформується і в подальшому обтікає стінки порожнини як напівобмежений потік. Область найбільшого тиску визначається кутом нахилу передньої стінки порожнини. При оптимальних режимах зварювання ця область знаходиться на передньому краї діафрагми, розташованої на дні порожнини, що викликає зміщення рідкого металу в область зниженого тиску, тобто на стінки порожнини. В кінці порожнини під дією сил поверхневого натягу метал змикається, утворюючи шов. (рис. 4.8).

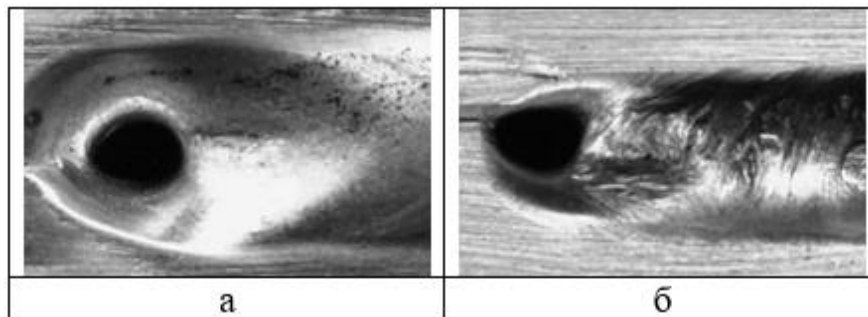


Рисунок 4.8 - Зовнішній вигляд порожнини кратера, який утворюється при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг5 товщиною 4 мм при наскрізному проникненні плазмового струменя: вид згори (а) та вид знизу (б).

Утримування рідкого металу пов'язане не лише з силами поверхневого натягу, але й з дією на нього частини плазмового потоку. Так швидкість цього потоку у дна порожнини вище, рідкий метал відтісняється від діафрагми по фронту кристалізації, що запобігає його витіканню. При цьому середня ширина бокових прошарків розплавленого металу складає приблизно 0,2 – 0,3 мм.

Можна виділити два механізми порушення стабільності утримання рідкої ванни без застосування підкладок з формуючими канавками при плазмо-дуговому зварюванні в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя: порушення рівноваги гравітаційних сил і сил поверхневого натягу та порушення балансу силових факторів на передній стінці порожнини кратера рідкої ванни.

Основними параметрами процесу зварювання стисненою дугою алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом прямокутної форми, які впливають на формування стабільного наскрізного проникнення плазмового струменя є величина сили зварювального струму  $I_{зв.}$ , витрати плазмоутворюючого газу  $Q_{пл.}$ , швидкість зварювання  $V_{зв.}$ , швидкість подавання присадкового дроту  $V_{пр.}$  та відстань від зрізу сопла до виробу. Стабільність формування зварного шва досягається за рахунок чіткого дотримання співвідношень між вищеназваними параметрами протягом всього часу зварювання (рис. 4.9.).

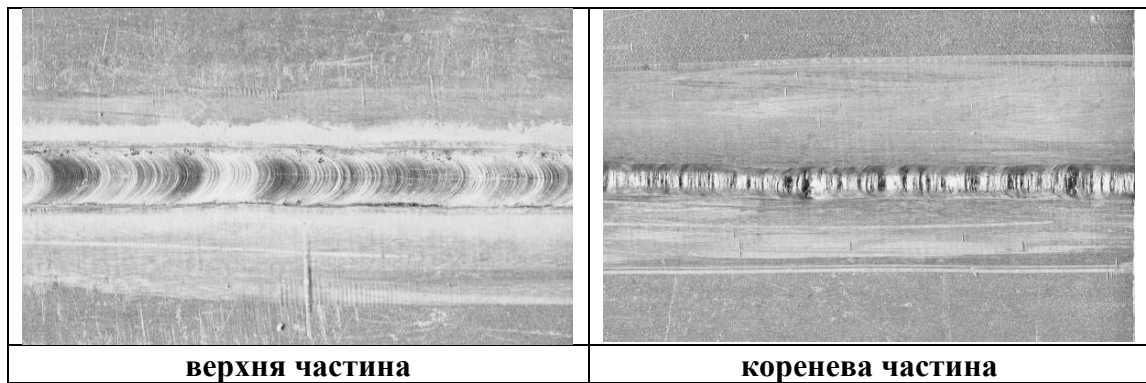


Рисунок 4.9 - Зовнішній вигляд зварного з'єднання сплаву АМг 6 (Al-6Mg-Mn) товщиною 6 мм, отриманого плазмо-дуговим зварюванням в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

Тісний зв'язок між наведеними параметрами призводить до того, що з виходом із області оптимальних режимів в бік підвищеної сили струму та швидкості зварювання зростає градієнт температур в площині перпендикулярній напрямку зварювання й зменшується ширина бокових прошарків рідкого металу. Зменшення ширини прошарків при одночасному збільшенні силового впливу дуги призводить до того, що навіть підвищена швидкість перетікання рідкого металу в бокових прошарках не забезпечує повної евакуації розплавленого металу в хвостову частину ванни. При цьому зростає швидкість його переміщення в вертикальній площині і настає видування рідкого металу. Спостерігається процес розрізання.

Зі зменшенням сили зварювального струму та швидкості зварювання (при тій же ширині ванни) зростає товщина бокових прошарків, що може призвести до витікання розплавленого металу.

Таким чином, для вільного перетікання рідкого металу по бокових прошарках кратера в хвостову частину зварювальної ванни з метою задовільного формування ванни і шва в цілому необхідне досить визначене температурне поле в зварювальних листах. Намагання компенсувати дефіцит тепла в твердому металі зварного виробу (при значному градієнті температур) силовим впливом стисненої дуги призводить до пропалу.

Додатковим чинником, який впливає на формування ванни при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів без використання підкладок з формуючими канавками є швидкість потоку плазмоутворюючого газу. За рахунок більших, у порівнянні зі зварюванням на підкладці, витрат утворюється порожнина кратера зварювальної ванни. Наявність кратера дозволяє проникати плазмовому струменю на всю товщину зварюваного металу, викликаючи більш рівномірне нагрівання шарів кромки.

Збільшення витрат плазмоутворюючого газу при незмінній силі струму та швидкості зварювання призводить до видування рідкого металу з зварювальної ванни.

При недостатній швидкості витікання плазмоутворюючого газу відбувається схлопування порожнини кратера. Наскрізне проникнення плазмового струменя припиняється.

В порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя витрати плазмоутворюючого газу зростають в 5 – 10 разів. Так при зварюванні стисненою дугою сплаву АМг5 товщиною 4 мм різнополярним асиметричним струмом при швидкості переміщення плазмотрона 40 см/хв (24 м/год) на підкладці витрати плазмоутворюючого газу склали 0,4 л/хв. Для формування зварного з'єднання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя ця величина стала 2,7 л/хв.

Для підвищення стабільності формування порожнини кратера зварювальної ванни при зварюванні стисненою дугою алюмінієвих сплавів в режимі наскрізного проникнення зварюванні листи збирали з гарантованим зазором. Величина зазору між листами вибирається відповідно до розмірів порожнини кратера. Використання технологічного зазору дозволяє знизити витрати плазмоутворюючого газу, який іде на утворення порожнини кратера зварювальної ванни. Так при зварюванні стисненою дугою алюмінієвих сплавів товщиною 4 мм наявність зазору дозволяє скоротити необхідні витрати плазмоутворюючого газу з 2,7 л/хв. до 1,2 л/хв.

При зварюванні стисненою дугою на підкладці з формуючою канавкою верхня частина зварюваних листів розплавляється під дією електричної дуги та високотемпературного плазмового струменя, нижня частина – переважно за рахунок конвективного теплообміну. Із-за цього виникає нерівномірність нагрівання зварюваних листів по товщині. Форма шва набуває вигляду переверненої трапеції.

За рахунок проникнення плазмового струменя крізь порожнину кратера зварювальної ванни нижня частина листів вже плавиться як під впливом конвективного тепла так і під безпосередньою дією плазмового струменя. Це обумовлює більш рівномірне нагрівання листів по товщині. При цьому форма шва набуває вигляду прямокутника.

Використання наскрізного проникнення плазмового струменя дозволяє зменшити величину сили зварювального струму в порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою в середньому на 40 – 45 А.

При зварюванні стисненою дугою сплаву АМг6 товщиною 6 мм використання режиму наскрізного проникнення плазмового струменя дозволяє зменшити силу зварювального струму з 230 А (при зварюванні на підкладці з формуючою канавкою) до 185 А. При цьому швидкість зварювання зросла на 33% (з 12 м/год до 16 м/год) (рис. 4.10).

Коренева частина шва, сформованого при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів з наскрізним проникненням плазмового струменя більша за кореневу частину, сформовану на підкладці з канавкою.



Рисунок 4.10 - Поперечні макрошліфи зварних з'єднань сплаву АМг 6 товщиною 6 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням.

Ця причина та можлива наявність технологічного зазору, необхідного для покращення умов існування наскрізного кратера, обумовлює збільшення швидкості подачі присадкового дроту при зварюванні стисненою дугою з наскрізним проникненням плазмового струменя на 15 % при швидкості переміщення плазмотрона 60 см/хв (36 м/год) (з 2 м/хв (123 м/год) при зварюванні металу товщиною 3 мм на підкладці до 2,4 м/хв. (141 м/год) при зварюванні з наскрізним проникненням плазмового струменя).

Режими плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя різних систем легування наведені в таблиці 4.1.

Частота зварювального струму має вплив на стабільність формування наскрізного каналу при зварюванні без використання підкладок з формуючими канавками. Так при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом збільшення частоти струму з 50 до 200 Гц призводить до стабільності існування наскрізного отвору в зварювальній ванні та покращує якість формування швів. Зовнішній вигляд алюмінієвих сплавів, отриманих стисненою дугою в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя при різних частотах зварювального струму наведено на рис. 4.11 – 4.13.

Таблиця 4.1 - Режими плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом на з наскрізним проникненням плазмового струменя.

Сплав	Товщина, мм	Швидкість зварювання, $V_{зв.}$ , см/хв (м/год)	Сила струму, $I_{зв.}$ , А	Витрати плазмоутворюючого газу, $Q_{пл.}$ , л/хв.	Швидкість подавання присадного дроту, $V_{пр.}$ , м/год	Діаметр присадного дроту, мм,
АМг6	3,0	60 (36)	142	1,1	141	1,6
1460			145	0,9	141	
1420	4,0	60 (36)	155	1,2	437	
АМг5			138	2,7	108	
АМг6	6,0	27 (16)	165	3,0	108	

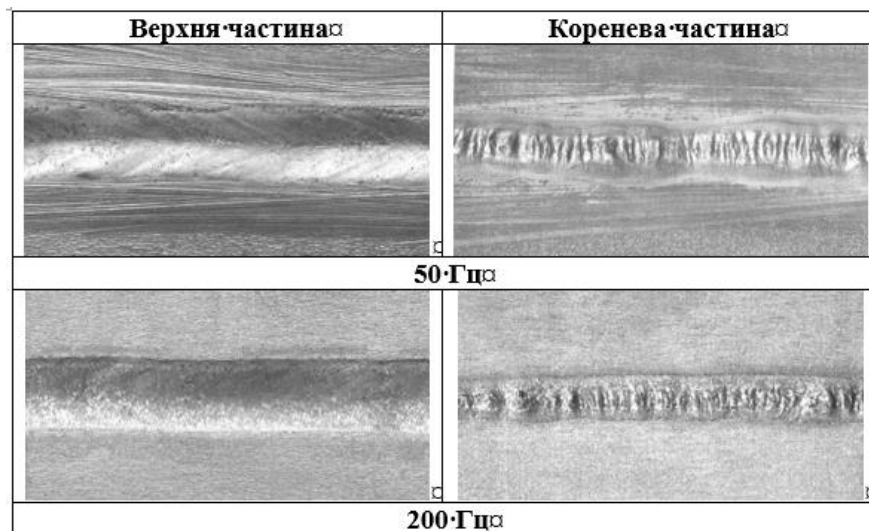


Рисунок 4.11 - Вид сплаву 1420 товщиною 4 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя при частоті зварювального струму.

Дослідження [83] показали, що окрім вище наведених параметрів на сталі формування зварного з'єднання при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом з наскрізним проникненням плазмового струменя також суттєво може впливати зазор між зварюваними кромками.

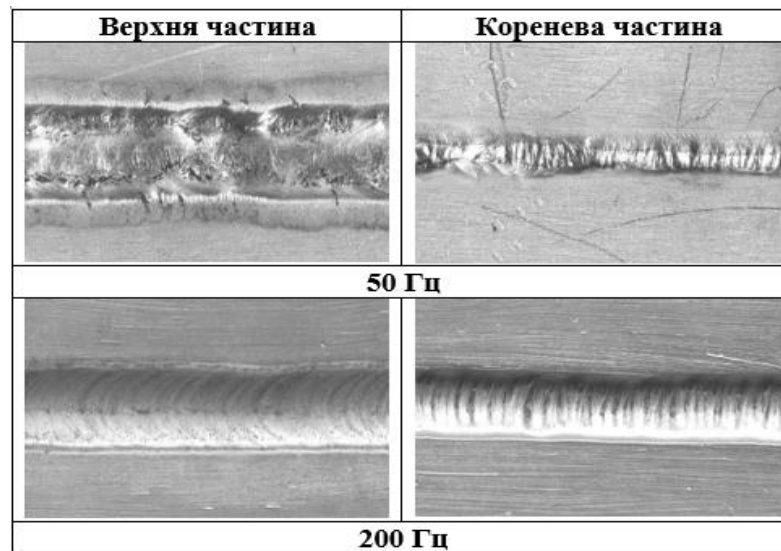


Рисунок 4.12 - Вид сплаву АМг 5М (Al-5Mg-Mn) товщиною 4 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя при різній частоті зварювального струму.

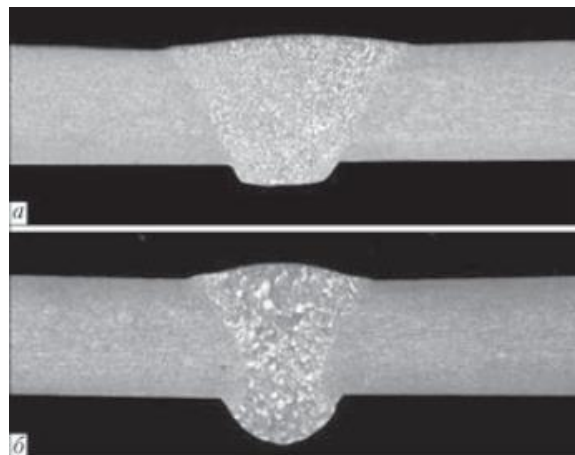


Рисунок 4.13 – Поперечні макрошліфи з'єднань листів сплаву 1420 товщиною 6 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом на підкладці з формуючою канавкою (а) та без підкладки в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя (б) [84].

Так при плазмо-дуговому зварюванні з наскрізним проникненням плазмового струменя у нижньому положенні листів алюмінієвого сплаву АМг6 товщиною 6 мм наявність постійного зазору під час зварювання покращує стабільність існування наскрізного проникнення, дає можливість до 50 % зменшувати витрати плазмоутворюючого газу та 30-35 А зменшувати величину



зварювального струму у порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням з наскрізним проникненням без постійного зазору.

Під час зварювання зміна зазору в діапазоні 0,8 – 1,0 мм не впливає на підтримання наскрізного каналу в рідкому металі та не погіршує якість формування зварного шва.

Зменшення ширини зазору менше ніж 0,8 мм викликає «схлопування» наскрізного каналу та припинення формування зварного шва. Збільшення зазору більше ніж 1,0 мм викликає оплавлення бокових стінок деталей, що зварюються плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом, без утворення зварного з'єднання.

Так для сплаву 1420 товщиною 6 мм величина гарантовано зазору між пластинами, який покращує умови утворення та сталого існування наскрізного проникнення становить 0,8 мм. Наявність такого зазору зменшує кількість розплавленого металу, який приймає участь при формуванні наскрізного каналу у рідкому металі зварювальної ванни. Зменшення кількості рідкого металу надає можливість силі поверхневого натягу утримувати метал до моменту його кристалізації та забезпечувати формування кореневого валика зварного шва.

Враховуючи малу величину гарантованого зазору (0,8 – 1,0 мм) та складність його виставлення та підтримання під час плазмо-дугового зварювання, рекомендується виконувати зазор на одній із деталей із формуванням притуплення внизу бокової стінки. Так для алюмінієвих сплавів товщиною 4 – 10 мм величина притуплення може становити 1...3 мм.

Використання технологічного зазору дозволяє знизити витрати плазмоутворюючого газу, який іде на утворення порожнини кратера зварювальної ванни. Так при зварюванні стисненою дугою алюмінієвого сплаву АМг5 (Al-5%Mg-Mn) товщиною 4 мм наявність зазору дозволяє скоротити необхідні витрати плазмоутворюючого газу з 2,7 л/хв. до 1,2 л/хв.

### **4.3. Запобігання утворенню газових пор при зварюванні алюмінієво-літійєвих сплавів вільною та стисненою дугою.**

Одним із характерних дефектів в високоміцних алюмінієвих сплавах є утворення газових пор під час зварювання. Більш чутливими до утворення газових пор є алюміній-літійєві сплави.

Наявність в складі високоміцних сплавів літію обумовлює утворення на їх поверхні шару гідратованого оксиду літію. Під час дугового зварювання саме цей шар є основним джерелом надходження водню в розплавлений метал водню. Досвід аргонодугового зварювання алюмінієво-літійєвих сплавів неплавким електродом показав, що покращення дегазації розплаву відбувається при збільшенні коливань рідкого металу ванни [85]. Цього можна досягти за рахунок зміни силового впливу дуги на ванну. Найкращі умови для дегазації досягаються при використанні модульованого струму з частотою пульсацій 5 Гц. Подальше збільшення частоти модуляції струму призводить зростання розмірів газової пори та до погіршення дегазації рідкого металу [85].

Плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів виконується на більших швидкостях у порівнянні зі звичайним аргонодуговим зварюванням. В зв'язку з чим зменшується час існування зварювальної ванни в рідкому стані, що в свою чергу погіршує умови спливання бульбашок газу на поверхню.

З метою покращення умов дегазації при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом необхідно збільшити коливання рідкого металу ванни для покращення умов спливання бульбашок газу. Для цього коливання ванни збільшували за рахунок зміни силового впливу зварювальної дуги та потоку плазмоутворюючого газу. Частоту пульсацій зварювальної дуги вибирали із співвідношень, які забезпечували кращі умови дегазації при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом – 5 Гц. Тривалість протікання та амплітуда струму паузи складала 30% від тривалості та амплітуди імпульсу струму. Результати досліджень зварних швів

алюміній-літійового сплаву 1460 (Al-Cu-Li)  $\delta = 3$  мм зі знятою кореневою частиною показали, що використання модульованої стисненої дуги з частотою модуляції струму 5 Гц (рис. 4.14, б) дозволяє зменшити кількість пор у зоні сплавлення у порівнянні зі стаціонарним режимом (рис. 4.14, а).

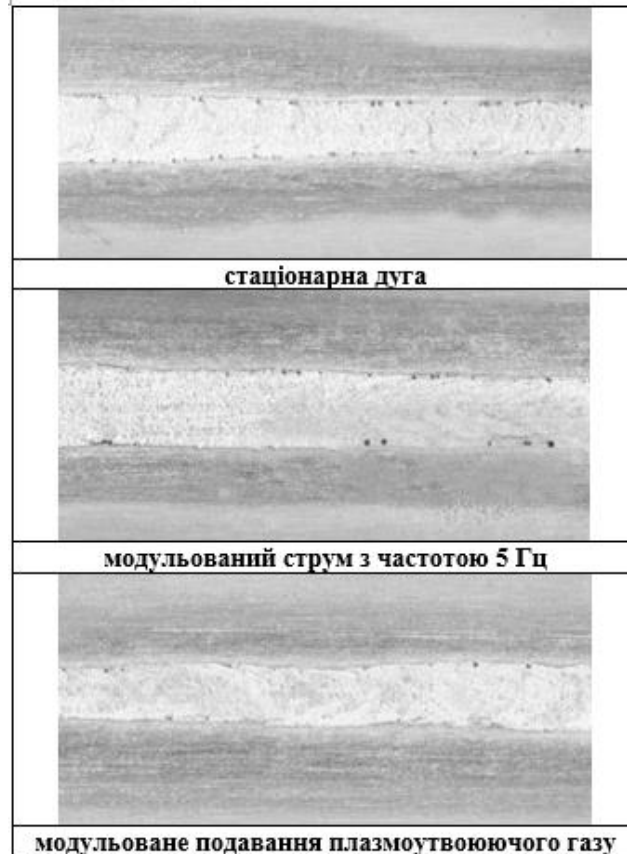


Рисунок 4.14 - Коренева частина швів сплаву 1460  $\delta = 3$  мм, отриманих різними способами плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою з присадковим дротом.

Другий варіант збільшення коливань ванни – зміна силового впливу газового потоку за рахунок періодичної зміни витрат плазмотворюючого газу [86]. Частота зміни витрат також складала 5 Гц, амплітудні значення витрат в імпульсі та паузі складали 1,0 л/хв. і 0,1 л/хв. відповідно. Модуляція витратами плазмотворюючого газу в меншій мірі впливає на утворення пор у порівнянні з модуляцією струмом (рис. 4.14, в).

Основним недоліком процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом з модуляцією зварювального струму є наявність на поверхні зварного шва грубої «луски» (рис. 4.15).

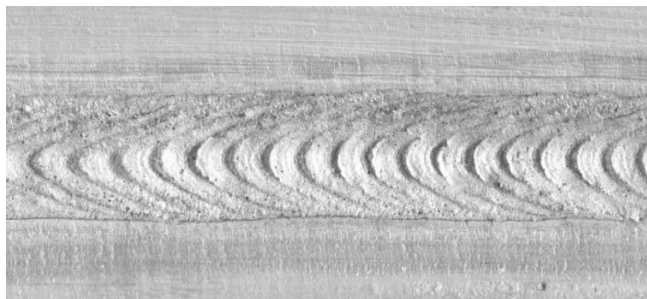


Рисунок 4.15 - Зовнішній вигляд верхньої частини зварного з'єднання із листів алюміній-літійового сплаву 1460 (Al-Cu-Li) товщиною 3 мм, отриманого плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом з модуляцією зварювального струму 5 Гц при швидкості зварювання 60 см/хв (36 м/ч).

Так «луска» не впливає на показники міцності при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом з модуляцією струму при швидкостях до 60 см/хв (36 м/год), але зі збільшенням швидкості зварювання до 100 см/хв (60 м/год) не відбувається перекриття ванни, утвореної під час дії струму імпульсу, наступною ванною, що призводить до утворення на поверхні глибоких підрізів у вигляді овалів. Такі поверхневі дефекти знижують міцність зварного з'єднання як при статичних, так і при динамічних навантаженнях.

При використанні плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом при модульованому подаванні плазмутворюючого газу на поверхні зварного шва не утворюється груба «луска» навіть при зростанні швидкості зварювання до 150 – 200 см/хв (90 – 120 м/год) (рис. 4.16).

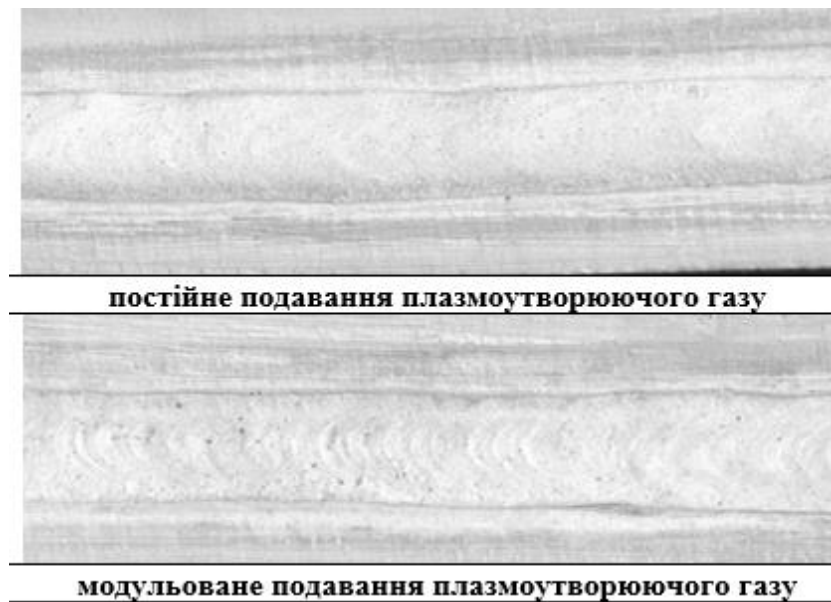


Рисунок 4.16 - Зовнішній вигляд верхньої частини зварного з'єднання із листів алюміній-літійового сплаву 1460 (Al-Cu-Li) товщиною 3 мм, отриманого плазмодуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом при швидкості зварювання 200 см/хв (120 м/ч).

При підвищенні швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом до 200 см/хв (120 м/год) спостерігається погіршення умов дегазації розплавленого металу зварювальної ванни. Також це явище більш ярко виявляється при зварюванні алюміній-літійових сплавів. При плазмодуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом з модульованим подаванням плазموутворюючого газу з частотою 5 Гц також спостерігається незначне погіршення умов дегазації рідкого металу, але при цьому збільшення кількість пор на модельних зразках у порівнянні зі зразками, отриманими на швидкості зварювання 60 см/хв (120 м/год), становило 3-5 % (рис. 4.17).

Отже модульоване подавання плазموутворюючого газу можна рекомендувати як додатковий захід боротьби з газовими порами при плазмодуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюміній-літійових сплавів на високих швидкостях зварювання (до 200 см/хв).

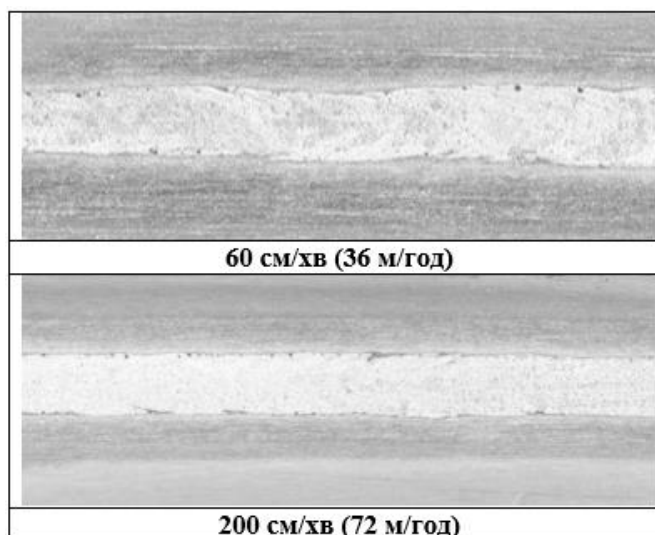


Рисунок 4.17 - Коренева частина швів алюміній-літійового сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li) товщина 3 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою з присадковим дротом з модульованим подаванням плазмоутворюючого газу.

#### **4.4. Розробка методів запобігання утворенню включень оксидної плівки у високомісних сплавів при зварюванні неплавким електродом з різним стисканням дуги потоком газу**

При аргонодуговому зварюванні стаціонарною дугою неплавким електродом алюмінієво-літійових сплавів з присадним дротом в центральній частині швів утворюються характерні протяжні ниткоподібні включення оксидних плівок.

Утворення цих дефектів обумовлене наявністю стрічкових виділень вторинних фаз по границях зерен в основному металі сплавів з літійом та вищою температурою плавлення присадкового матеріалу у порівнянні з основним металом. Про те, як стрічкові виділення в процесі нагрівання збільшуються в об'ємі, об'єднуються та утворюють прошарки, свідчать поперечні макрошліфи зони сплавлення шва з основним металом (рис. 4.18).

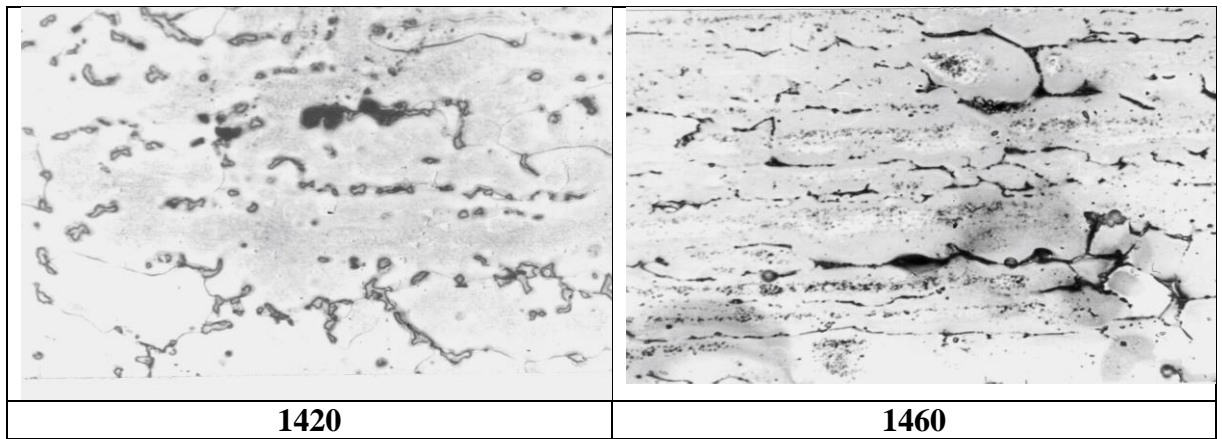


Рисунок 4.18 - Стрічкові виділення вторинних фаз по границях зерен в зоні сплавлення шва з основним металом при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом.

Повного катодного руйнування оксидної плівки на поверхні присадкового дроту, що надходить у зварювальну ванну, не відбувається, а тому незруйновані її частки попадають у розплав.

Під дією сили тяжіння оксидні частки поступово опускаються на дно зварювальної ванни, але сили поверхневого натягу запобігають їх повному занурюванню. Тому у більшості випадків дрібні оксидні включення знаходяться в центральній частині зварювальної ванни. В той же час, присадка, що має більш низьку температуру, ніж основний метал, поступаючи у ванну, сприяє накопиченню легкоплавких стрічкових виділень у зонах контактування розплавів. Під впливом сил, які діють на розплавлений метал у зварювальній ванні, відбувається змішування основного та присадного металів, а легкоплавкі елементи стрічкових виділень, які мають підвищену схильність до взаємодії з киснем, зосереджуються навколо незруйнованих часток оксидної плівки, утворюючи макровключення оксидів. Завдяки безперервності процесів плавлення та кристалізації металу, в зварювальну ванну поступають незруйновані частки оксидної плівки з присадного дроту та елементи стрічкових виділень з основного металу, формуючи в шві протяжні ниткоподібні оксидні включення.

З метою підвищення температури присадного дроту, що надходить у зварювальну ванну через його ділянку пропускали змінний струм. При цьому покращувались умови для катодного руйнування оксидної плівки на його поверхні під дією дугового розряду та змінювалась різниця температур між розплавленим матеріалом присадки, що надходить у зварювальну ванну, та основним металом.

Аналіз поздовжніх зламів швів сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li), отриманих звичайною стаціонарною дугою без підігрівання присадного дроту, та з коливаннями дуги, обумовленими пропусканням через ділянку присадки змінного струму величиною 125 А [87], показав, що незалежно від системи легування присадки в центральній частині швів утворюються протяжні включення оксидної плівки (рис. 4.19).

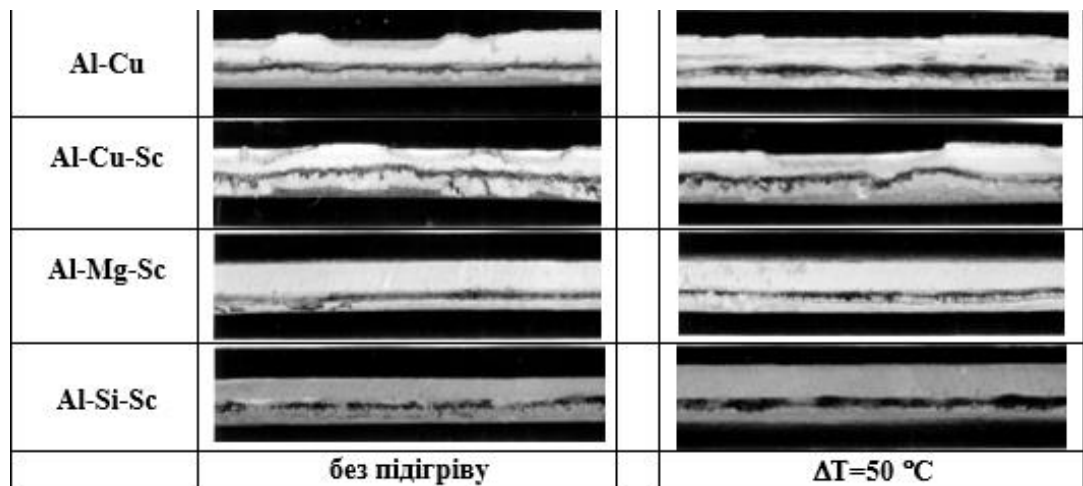


Рисунок 4.19 - Протяжні включення оксидної плівки на поздовжніх зламах швів сплаву 1460 товщиною 3 мм, отриманих стаціонарною дугою та з коливаннями дуги, обумовленими пропусканням змінного струму величиною 125 А через ділянку присадкового дроту різних ( $\Delta T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) систем легування.

При підігріванні присадки на  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  дефекти у вигляді оксидних плівок у швах повністю відсутні (рис. 4.20). Очевидно, під впливом тепла, яке виділяється в результаті пропускання струму через ділянку присадки, та одночасною дією дугового розряду присадний дріт нагрівається до температури ( $>475\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при якій



відбувається перебудова решітки стійкої аморфної плівки  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в кристалічну  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ . В результаті ефективність катодного руйнування такої оксидної плівки підвищується і в розплавленій метал шва потрапляє значно менша кількість незруйнованих її часток.

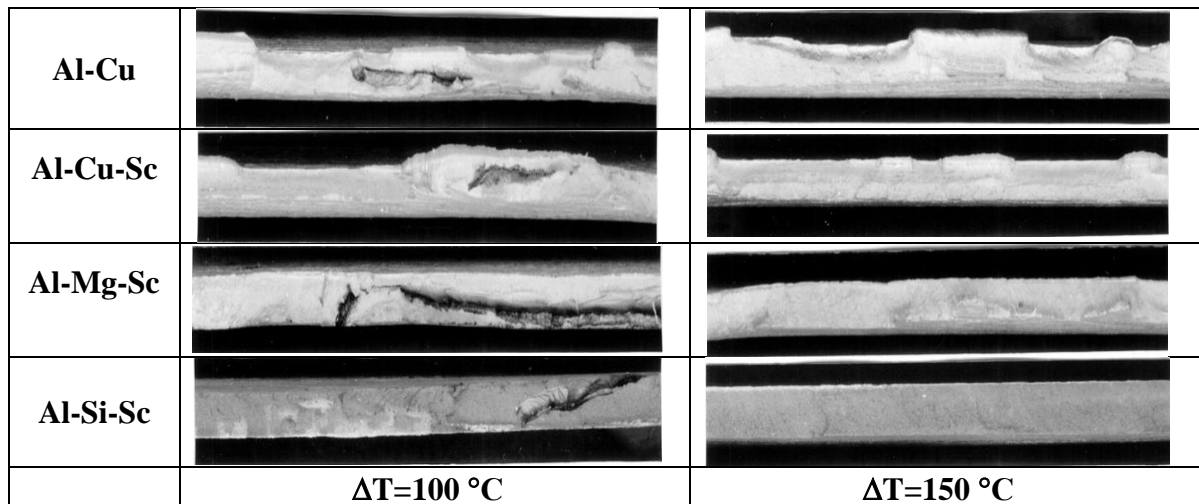


Рисунок. 4.20 - Поздовжні злами швів сплаву 1460 товщиною 3 мм, отриманих при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом з підігріванням присадкового дроту на  $100^\circ\text{C}$  та  $150^\circ\text{C}$  різних систем легування.

Крім того, в результаті підвищення температури присадкового дроту зникає перепад температур між розплавами основного металу та присадки і легкоплавкі елементи стрічкових виділень, які потрапляють у шов з основного металу, розосереджуються по всьому розплаву. Тому умови для формування протяжних включень у швах при зварюванні з підігріванням присадкового дроту до  $150^\circ\text{C}$  алюмінієво-літієвих сплавів зникають [88].

Нажаль даний спосіб боротьби з включеннями оксидної плівки при аргонодуговому зварюванні різнополярним струмом не діє при наявності між зварюваними деталями із алюміній-літієвих сплавів зазору порядку 0,8 – 1,0 мм.

Результати візуальних досліджень зламів зварних швів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням з присадковим дротом на підкладці показали, що не

залежно від системи легування присадки протяжні включення оксидної плівки не утворюються (рис. 4.21).

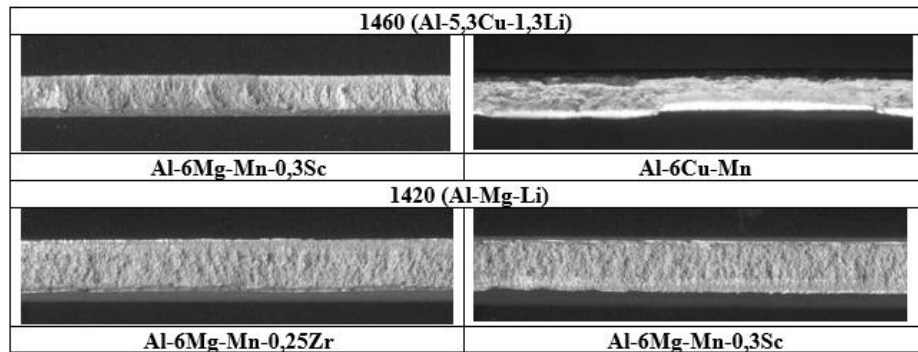


Рисунок 4.21 - Повздовжні злами швів сплаву 1460 (Al-Cu-Li) товщиною 3 мм і 1420 (Al-Mg-Li) товщиною 4 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою з присадними дротами різного хімічного складу.

Це явище в першу чергу обумовлене гідродинамічними процесами, які відбуваються в розплаві під впливом стисненої дуги. На розплавлений метал ванни тисне зварювальна дуга та додатково робить силовий вплив швидкісний потік газу. Під дією цих двох чинників у ванні посилюються процеси перемішування металу, що сприяє винесенню часток оксидної плівки на поверхню під безпосередній вплив зварювальної дуги та запобігає накопиченню легкоплавких сполук у центрі шва.

Для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом алюміній-літєвих різних систем легування в режимі наскрізного проникнення плазмового струменю, як правило, використовують постійний технологічний зазор. Такий зазор покращує стабільність утворення і підтримання наскрізного каналу при плазмо-дуговому зварюванні. Наявність такого зазору при аргонодуговому зварюванні викликає гарантоване утворення включень оксидної плівки. При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюміній-літєвих різних систем легування в режимі наскрізного проникнення плазмового струменю з постійним зазором включення оксидної плівки не утворюються (рис. 4.22).

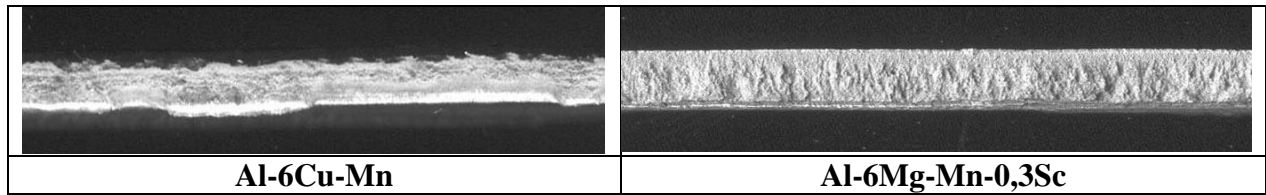


Рисунок 4.22 - Повздовжні злами швів сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li) товщиною 3 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя з постійним зазором при використанні присадних дротів різних систем легування.

#### 4.5. Методика розрахунку параметрів режиму плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом

Для розрахунку параметрів режиму зварювання стисненою дугою сплаву використовуємо формулу визначення максимальної температури на відстані від осі шва при дії лінійного джерела нагрівання:

$$T_{\max}(y) = 0,484 q_{\text{н}} (1 - by^2/2a)/v c \gamma \delta 2 y \quad (4.1),$$

де  $q_{\text{н}}$  – ефективна потужність джерела нагрівання, Дж;

$b$  – коефіцієнт температуровіддачі,  $1/\text{с}$ ;

$y$  –  $1/2$  ширини шва, см;

$a$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{см}^2/\text{с}$ ;

$v$  – швидкість зварювання,  $\text{см}/\text{с}$ ;

$c$  – теплоємність матеріалу,  $\text{Дж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$ ;

$\gamma$  – питома вага матеріалу,  $\text{кг}/\text{см}^3$ ;

$\delta$  – товщина зварюваного металу, см.

Ефективна потужність визначається за формулою (4.2):

$$q_{\text{н}} = \eta I_{\text{зв}} U_{\text{д}} \quad (4.2),$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії джерела нагрівання;

$I_{\text{зв}}$  – сила зварювального струму, А;

$U_{\text{д}}$  – напруга на дузі, В.

Коефіцієнт температуро віддачі знаходимо з формули (4.3):

$$b = 2 \alpha / (c \gamma \delta) \quad (4.3),$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, Дж/(с см<sup>2</sup> °С);

$c$  – теплоємність матеріалу, Дж/(кг °С);

$\gamma$  – питома вага матеріалу, кг/см<sup>3</sup>;

$\delta$  – товщина зварюваного металу, см.

Коефіцієнт температуропровідності розраховуємо за формулою (4.4):

$$a = \lambda / (c \gamma) \quad (4.4),$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт температуропровідності, Дж/(с см °С);

$c$  – теплоємність матеріалу, Дж/(кг °С);

$\gamma$  – питома вага матеріалу, кг/см<sup>3</sup>.

Для визначення необхідної величини зварювального струму стисненої дуги виконуємо перетворення формули 4.1 з метою отримання значення ефективної енергії, яка необхідна для формування зварного з'єднання із алюмінієвого сплаву.

Для випадку плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом з використанням сталеві підкладки та без використання присадкового дроту формула для визначення ефективної енергії, необхідної для формування зварного з'єднання набуває такого вигляду:

$$q_{\text{н}} = 4,87 T_{\text{max}} v c \gamma \delta 2 y / (1 - by^2/2a) \quad (4.5).$$

У даній формулі 4.5 емпіричний коефіцієнт **4,87** визначено експериментальним шляхом для випадку використання сталеві підкладки.

Значення зварювального струму можна визначити за графіком залежності ефективної енергії стисненої дуги в залежності від сили різнополярного асиметричного струму (рис. 4.23).

Ефективна енергія обраховувалася з урахуванням напруги на дузі в прямій та оберненій полярності та їх балансу.

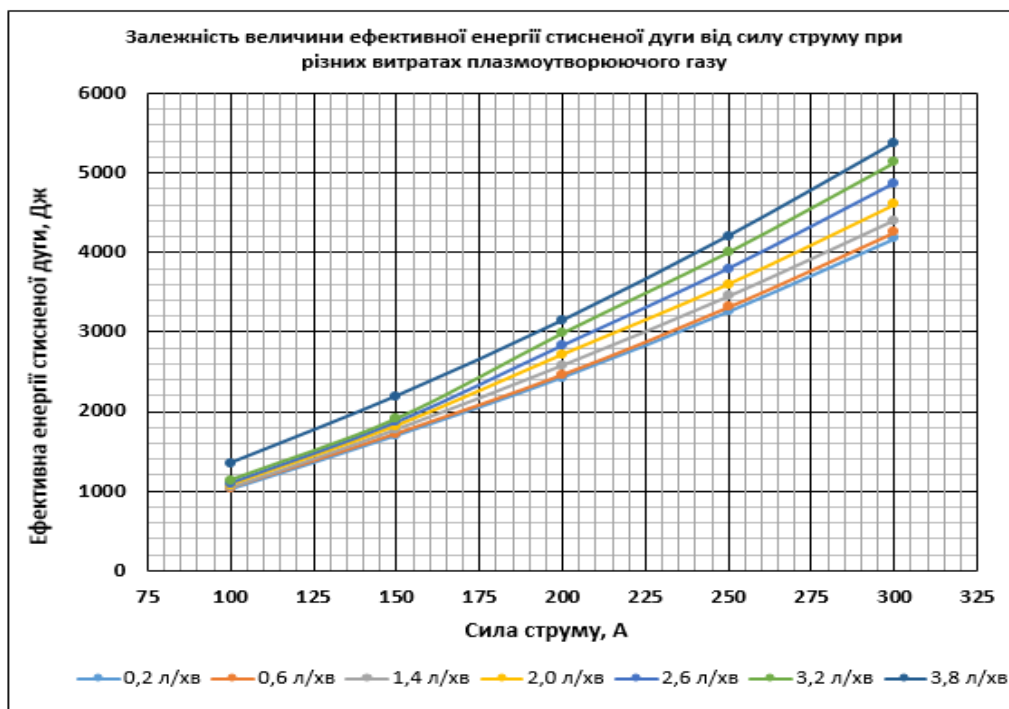


Рисунок 4.23 - Залежність ефективної потужності стисненої дуги від амплітуди зварювального струму.

У випадку використання присадкового дроту також необхідно врахувати витрати енергії стисненої дуги на плавлення присадкового дроту. Для цього необхідно визначити необхідну швидкість подавання присадкового дроту.

Розрахунок швидкості подавання присадкового дроту, необхідного для формування шва можна виконати використовуючи формулу:

$$V_{\text{пр.}} = 0,892 V_{\text{зв.}} (g_1 e_1 + g_2 e_2) / d_{\text{пр.}}^2 \quad (4.6),$$

де  $V_{\text{зв.}}$  – швидкість зварювання, см/хв.;

$g_1$  – висота підсилення, см;

$e_1$  – ширина підсилення, см;

$g_2$  – глибина проплаву, см;

$e_2$  – ширина проплаву, см;

$d_{\text{пр.}}$  – діаметр присадкового дроту, см.

Параметри шва приведені на схемі зварного з'єднання (рис. 4.24).

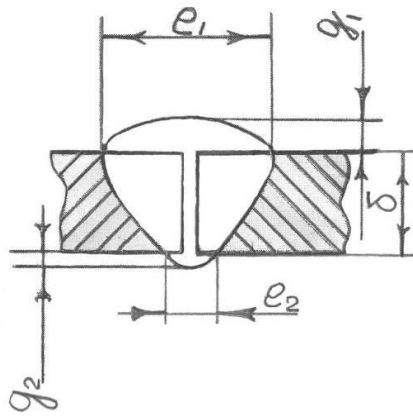


Рис. 4.24. Схема шва стикового з'єднання, отриманого дуговим зварюванням за один прохід без розкриття кромки.

Для визначення кількості теплоти, яка буде витрачатися на плавлення присадкового дроту приймаємо умови, що присадний дріт буде плавитися протягом існування зварювальної ванни.

Час ( $t_p$ ) існування ванни у розплавленому стані можна визначити за формулою:

$$t_p = q_{\text{н}} / (2 \pi \lambda V_{\text{зв}} T_{\text{пл}}) \quad (4.7)$$

де  $q_{\text{н}}$  – ефективна потужність джерела нагрівання, Дж;

$V_{\text{зв}}$  – швидкість зварювання, см/с;

$\lambda$  - коефіцієнт температуропровідності, Дж/(с см °С).

Об'єм металу присадкового дроту, який надходить у ванну протягом її існування визначаємо за формулою:

$$v_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} V_{\text{пр}} t_p \quad (4.8)$$

де  $S_{\text{пр}}$  – площа поперечного перетину присадкового дроту, см<sup>2</sup>;

$V_{\text{пр}}$  – швидкість подавання присадкового дроту, см/с;

$t_p$  – час існування ванни у рідкому стані, с.

З урахуванням діаметру присадкового дроту формула 4.8 набуває такого вигляду:

$$v_{\text{пр}} = (\pi d_{\text{пр}}^2 / 4) V_{\text{пр}} t_p \quad (4.9)$$

де  $q_{\text{н}}$  – ефективна потужність джерела нагрівання, необхідна для розплавлення основного металу, Дж;

$V_{\text{зв}}$  – швидкість зварювання, см/с;

$\lambda$  - коефіцієнт температуропровідності, Дж/(с см °С)

$V_{\text{пр}}$  – швидкість подавання присадкового дроту, см/с.

$T_{\text{пл}}$  – температура плавлення основного металу, °С.

Кількість енергії, необхідну для розплавлення присадного дроту можна визначити за формулою:

$$Q_{\text{пр}} = c_{\text{пр}} \gamma_{\text{пр}} v_{\text{пр}} (T_{\text{пр}} - T_0) t_p \quad (4.10)$$

де  $T_{\text{пр}}$  – температура плавлення присадкового дроту, °С;

$T_0$  - температура оточуючого середовища, °С

$t_p$  – час існування ванни у рідкому стані, с;

$c_{\text{пр}}$  – теплоємність матеріалу присадкового дроту, Дж/(кг °С);

$\gamma_{\text{пр}}$  – питома вага матеріалу присадкового дроту, кг/см<sup>3</sup>;

Загальна кількість енергії, яка необхідна для формування шва з присадним дротом становить:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{и}} + Q_{\text{пр}} \quad (4.11)$$

де  $q_{\text{и}}$  – енергія, яка необхідна для формування шва без присадки, Дж;

$q_{\text{пр}}$  - енергія, яка необхідна для плавлення присадки, Дж.

Основні фізичні величини для більш поширених алюмінієвих сплавів наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. - Основні фізичні величини сплавів, що досліджуються.

Сплав	Фізичні величини				
	$c$ , Дж/(кг °С)	$\gamma$ , кг/см <sup>3</sup>	$\lambda$ , Дж/(с см °С)	$T_{\text{пл}}$ , °С	$a$ , см <sup>2</sup> /с
АД1	1090	$2,71 \cdot 10^{-3}$	2,18	645-660	0,75
АМГ3	1090	$2,67 \cdot 10^{-3}$	1,68	625-650	0,58
АМГ5	1090	$2,65 \cdot 10^{-3}$	1,47	575-640	0,51
АМГ6	1090	$2,64 \cdot 10^{-3}$	1,38	570-635	0,49
1201	1090	$2,85 \cdot 10^{-3}$	1,67	545-645	0,55

#### 4.5.2 Зварювання за один прохід без розкриття кромок сплаву алюмінієвих сплавів різних систем легування товщиною $\delta = 4 - 6$ мм.

Попередні розрахунки режимів зварювання виконуємо за умови зварювання без присадкового дроту. Величину зварювального струму вираховуємо для

джерела нагрівання, яке переміщується зі швидкістю (20 см/хв.). Сплав АМг6 має такі фізичні властивості  $c = 1022$  Дж/(кг °С),  $\gamma = 2,64 \cdot 10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>,  $\lambda = 1,38$  Дж/(с см °С). Температура плавлення сплаву АМг6 складає 570 – 635 °С. Для розрахунків приймаємо  $T_{\max} = 645$  °С. Стандартів, які регламентують геометричні розміри зварних з'єднань алюмінієвих сплавів, отриманих стисненою дугою різнополярним асиметричним струмом на Україні та в країнах СНД не існує. Для попередніх розрахунків використовували ГОСТ 14806-80 «Дуговая сварка алюминия и алюминиевых сплавов в инертных газах, соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры». Розміри шва, а саме його ширину та висоту вибирали для стикового з'єднання типу С4, отриманого автоматичним аргонодуговим зварюванням неплавким електродом на сталевій підкладці з формуючою канавкою.

Так ширина підсилення шва (згідно ГОСТ 14806-80) становила 16 мм, а його висота – 2 мм. Розміри канавки для формування проплаву шва ГОСТом не регламентуються. Так для товщини зварюваного металу 6 мм орієнтовні розміри прямокутної канавки становили 6x2 мм.

Швидкість подавання присадкового дроту визначаємо за формулою 4.6. Згідно параметрів шва, які відповідають з'єднанню типу С4 ГОСТ 14806-80 швидкість подавання присадкового дроту діаметром 1,6 мм становить 275 см/хв.

Проведені дослідження показали, що ширина шва при плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг6 товщиною 6 мм зі швидкістю 20 см/хв. становить 13,4 мм. Коефіцієнт, який враховує співвідношення між шириною реальною шириною шва та шириною шва згідно ГОСТ при швидкості зварювання 20 см/хв становить 0,84.

Коригуючі коефіцієнти визначено експериментальним шляхом для різних товщин алюмінієвих сплавів (1,8 мм, 4 мм і 6 мм) для діапазону швидкостей від 20 до 200 см/хв.

За формулою 4.5 визначаємо ефективну потужність джерела нагрівання, необхідну для формування шва шириною 13,4 мм при швидкості зварювання 20 см/хв.



$$q_{и} = 4,97 * 645 * 0,33 * 2,89 * 0,6 * 2 * 0,67 / (1 - 0,009 * 0,672 / 2 * 0,49) = 2458,01 / 0,9941 = 2472,6 \text{ Дж.}$$

Розрахункова швидкість подавання присадкового дроту згідно формули 4.6 становить 190 см/хв.

Максимально допустимі значення ширини шва для різних товщин алюмінієвих сплавів згідно для типу з'єднання С4 (зварювання за один прохід без розкриття крайок) згідно ГОСТ 14806-80 наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3. - Максимально допустимі значення ширини шва для кожної товщини листів алюмінієвих сплавів при виконанні зварювання без розкриття крайок на сталевій підкладці

Товщина листів, мм	2	4	6	8	10	12
Ширина шва, мм	10	12	15	16	19	21

Час існування ванни у рідкому стані становить 1,12 с. Розрахункова кількість енергії стисненої дуги, яка витрачається на плавлення присадкового дроту становить 142 Дж. Загальна ефективна енергія джерела нагрівання, яку необхідно витратити на плавлення основного металу та присадкового дроту становить 3785 Дж. З урахуванням ефективного коефіцієнту корисної дії  $\eta_{и} = 0,55$  згідно графіка на рис. 4.30 величина зварювального струму становить 235А.

Експериментальне значення струму стисненої дуги при зварюванні сплаву АМг6 товщиною 6 мм зі швидкістю 20 см/хв становить 230 А. Розбіжність між експериментальним та розрахунковим значенням струму становить 2%.

Попередні експерименти показали, що при плазмо-дуговому зварюванні сплавів товщиною 6 мм зі швидкістю 40 см/хв. ширина шва становить 11 мм.

Виконуємо розрахунок зварювального струму за формулою 4.5:

Час існування ванни у рідкому стані 0,89 с. При швидкості подавання присадкового дроту 330 см/хв., величина енергії для плавлення присадки становить 158 Дж.

Загальна ефективна енергія джерела нагрівання, яку необхідно витратити на плавлення основного металу та присадкового дроту становить 4183 Дж.

Експериментальне значення струму стисненої дуги при зварюванні сплаву АМгб товщиною 6 мм зі швидкістю 40 см/хв. становить 335 А. Аналогічним чином вирахуємо вилічну зварювального струму, необхідну для зварювання листів сплаву АМгб товщиною 6,2 та 6,4 мм для швидкостей переміщення 20 і 40 см/хв. Результати розрахунків та дані експериментів наведені в таблиці 4.4.

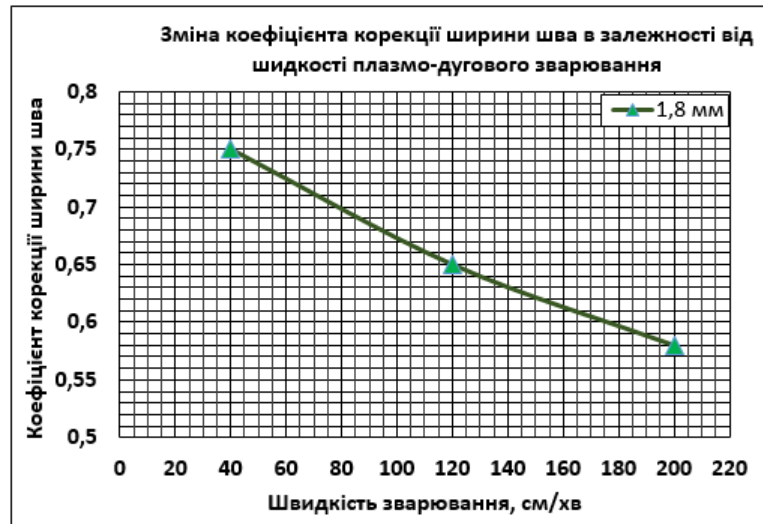


Рисунок 4.25 - Корируючий коефіцієнт між максимально допустимою шириною шва згідно стандарту та реальним значенням ширини шва при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів товщиною 1,8 мм з різними швидкостями зварювання.



Рисунок 4.26 - Корируючий коефіцієнт між максимально допустимою шириною шва згідно стандарту та реальним значенням ширини шва при плазмо-дуговому

зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів товщиною 4,0 мм з різними швидкостями зварювання.

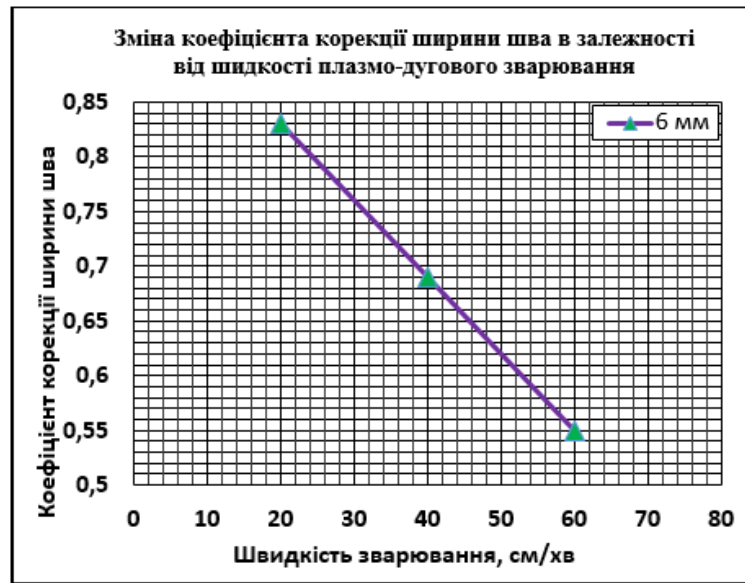


Рисунок 4.27. Корируючий коефіцієнт між максимально допустимою шириною шва згідно стандарту та реальним значенням ширини шва при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів товщиною 6,0 мм з різними швидкостями зварювання.

Таблиця 4.4 - Розрахункові та експериментальні значення параметрів зварювання листів сплаву АМг6 різної товщини.

Товщина листів, мм	Швидкість зварювання, см/хв.	Сила струму, А	
		Розрахунок	Експеримент
6,0	20	230	232
	40	335	335

Таблиця 4.5 - Розрахункові та експериментальні значення параметрів зварювання листів сплаву АМг3.

Товщина листів, мм	Швидкість зварювання, см/хв.	Сила струму, А	
		Розрахунок	Експеримент
6,0	20	245	250
	40	338	340

Таблиця 4.6. - Розрахункові та експериментальні значення параметрів зварювання листів сплаву АД1.

Товщина листів, мм	Швидкість зварювання, см/хв.	Сила струму, А	
		Розрахунок	Експеримент
6,0	20	257	260
	40	365	370

Таблиця 4.7 - Розрахункові та експериментальні значення параметрів зварювання листів сплаву АМг5.

Товщина листів, мм	Швидкість зварювання, см/хв.	Сила струму, А	
		Розрахунок	Експеримент
4,0	40	198	202
	60	260	263

#### Висновки до розділу 4.

1. Формування та підтримання сталого процесу плазмо-дугового зварювання з наскрізним проникнення плазмового струменя алюмінієвих сплавів стає можливим при урахуванні взаємного впливу таких основних параметрів: сила струму, швидкість зварювання, витрати плазмоутворюючого газу, швидкість подавання присадкового дроту, баланс струму та частота різнополярного струму.

2. Збільшення частоти різнополярного струму з 50 до 150 Гц при плазмо-дуговому зварюванні з наскрізним проникнення плазмового струменя покращує стабільність формування зварного з'єднання як у його лицьовій, так і в кореневій частині.

3. Наявність постійного зазору під час плазмо-дуговому зварюванні з наскрізним проникнення плазмового струменя алюмінієвих сплавів підвищує стабільність формування зварного шва. Це досягається за рахунок зменшення частки розплавленого металу в процесі утворення та підтримання наскрізного каналу. Зменшення об'єму розплавленого металу дозволяє краще утримувати його залишок за допомогою сили поверхневого натягу.

4. Як при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом різнополярним асиметричним струмом, так і при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюміній-літійєвих сплавів одним із ефективних заходів боротьби із газовими порами є модуляція зварювального струму з частотою 5 Гц. При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним

асиметричним струмом модуляція струму може ефективно застосовуватися при швидкості зварювання до 60 см/хв, збільшення швидкості зварювання при використанні модуляції струмом викликає дефекти формування поверхні зварного шва у вигляді глибоких підрізів.

5. Імпульсне подавання плазмоутворюючого газу плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюміній-літієвих сплавів дозволяє так само ефективно запобігати утворенню газових пор, як і модуляція зварювальним струмом. При цьому навіть при високих швидкостях плазмо-дугового зварювання (до 200 см/хв) при імпульсному подаванні плазмоутворюючого газу не відбувається погіршення формування поверхні зварного шва.

6. Одним із ефективних методів боротьби із включеннями оксидної плівки при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом різнополярним струмом алюміній-літієвих сплавів є використання підігріву присадкового дроту до температури 150°C. Але даний спосіб не діє при наявності зазору між зварюваними деталями.

7. Наявність зазору між зварюваними деталями із алюміній-літієвого сплаву не сприяють утворенню включень оксидної плівки при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом, як при формуванні з'єднання на підкладці, так і в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

8. Розроблена методика розрахунку параметрів режиму плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом, яка враховує теплофізичні властивості алюмінієвих сплавів, товщину зварюваного металу, а також швидкість зварювання. Достовірність методики розрахунку перевірена експериментально. Розходження між експериментальними значеннями режиму зварювання та розрахунковими даними не перевищує 2%.

## РОЗДІЛ 5.

### ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПЛАЗМО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.

#### 5.1 Характер формування швів, структури та зміни механічних властивостей з'єднань в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом

За критерій «швидкісне зварювання» обирали перевищення в 2 або більше разів швидкості базового процесу дугового зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів (з міцністю вище 300 МПа) – аргонодугового зварювання різнополярним струмом (АДЗНЕ).

Обмежуючим фактором при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом у нашому випадку виступали технологічні можливості зварювальних плазмотронів, а саме максимальне струмове навантаження, яке становило 325 А.

Згідно методики розрахунку параметрів режиму плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом було обчислені максимальні швидкості зварювання для алюмінієвих сплавів різних систем легування (Al-Mg-Mn, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Li). Товщина листів алюмінієвих сплавів була в діапазоні від 2 до 6 мм.

Максимальні швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом у нижньому положенні на підкладці з формуючою канавкою та використанням присадкового дроту наведено в таблиці 5.1.

Розглядали зміни показників міцності – міцність зварного з'єднання та міцність металу шва.

Розглядали сплав АМг5М системи легування Al-Mg-Mn, який термічно не зміцнений і має бути мало чутливий до втрати міцності в зоні термічного впливу. А також розглядали термічно зміцнювані сплави 1201 (Al-Cu-Mn) та алюміній-

літєвий сплав 1460 (Al-Cu-Li). Основний метал даних сплавів схильний втрачати міцність в зоні термічного впливу дуги.

Таблиця 5.1 - Максимальні швидкості зварювання в залежності від теплофізичних властивостей алюмінієвих сплавів

Сплав	Товщина, мм	Максимальна швидкість зварювання, см/хв
АМг5М (Al-Mg-Mn)	2,0	300
1201 (Al-Cu-Mn)	1,8	200
1460 (Al-Cu-Li)	2,0	300

Збільшення швидкості плазмо-дугового зварювання листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn) з 30 до 300 см/хв обумовлює зменшення на 40% величини погонної енергії (з 124 кДж/м до 74 кДж/м), а також звуження на 33% зони розміцнення основного металу під впливом діє тепла від зварювальної дуги (рис. 5.1).

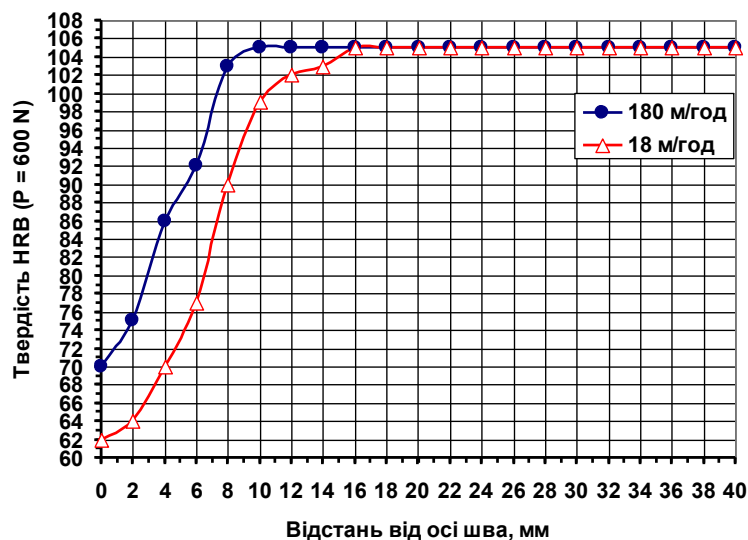


Рисунок 5.1 - Розподіл твердості у поперечних шліфах з'єднань листів сплаву 1201 (Al-Cu-Mn) товщиною 1,8 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом у нижньому положенні зі швидкістю 30 см/хв та 300 см/хв.

При цьому дендрити орієнтовані чітко перпендикулярно до осі шва, на відміни від зварювання з малою швидкістю, де спостерігається завертання дендритів і їх стиковка по осі шва під гострим кутом.

Мікроструктура зварних з'єднань листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201, отриманих плазмо-дуговим зварюванням зі швидкістю 30 см/хв наведено на рис. 5.2.

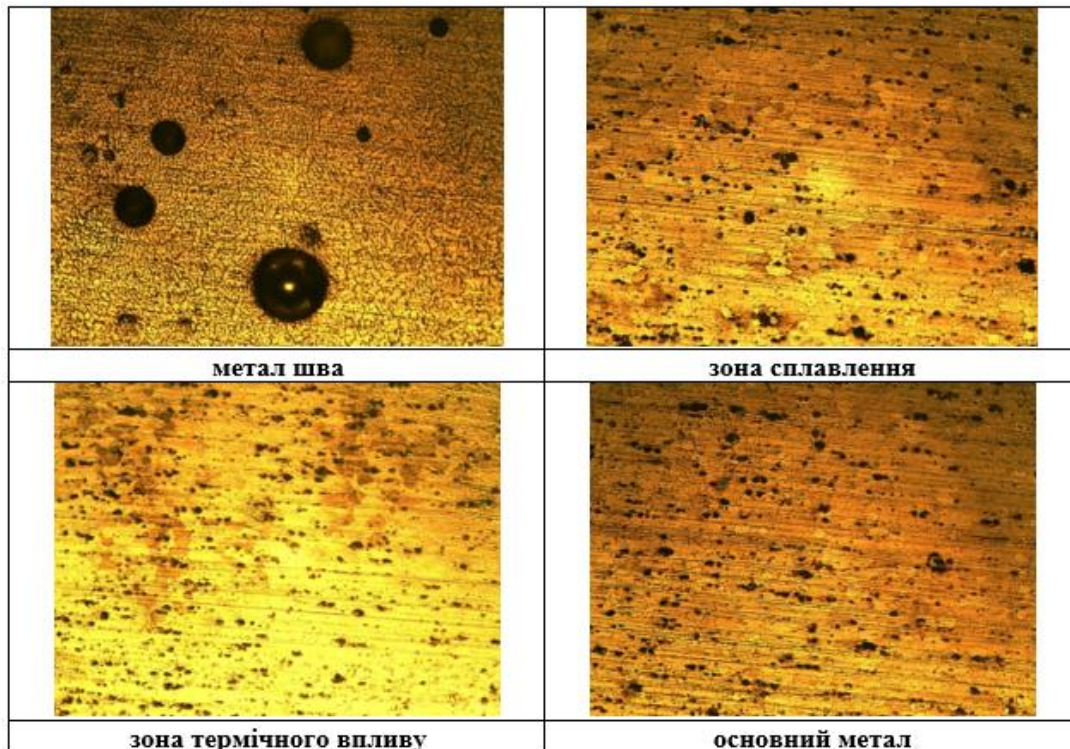


Рисунок 5.2 - Мікроструктура зварного з'єднання листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn), отриманого плазмо-дуговим зварюванням у нижньому положенні без присадки зі швидкістю 30 см/хв (x150).

У металі швів сплаву 1201 системи легування Al-6Cu-Mn, отриманих стисненою дугою різнополярного асиметричного струму на швидкості зварювання 30 см/хв спостерігаються пори, розміром до 60 мкм. Локалізація цих пор, переважно, по границях зони сплавлення з основним металом. В металі шва спостерігаються дендрити, осі першого порядку яких розташовані переважно вздовж осі шва. По границях зерен спостерігаються грубі скупчення евтектики. Зустрічаються зони рихлот.



Мікроструктура з'єднань листів сплаву 1201 товщиною 1,8 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом зі швидкістю 300 см/хв у нижньому положенні на підкладці без використання присадки наведено на рис. 5.3.

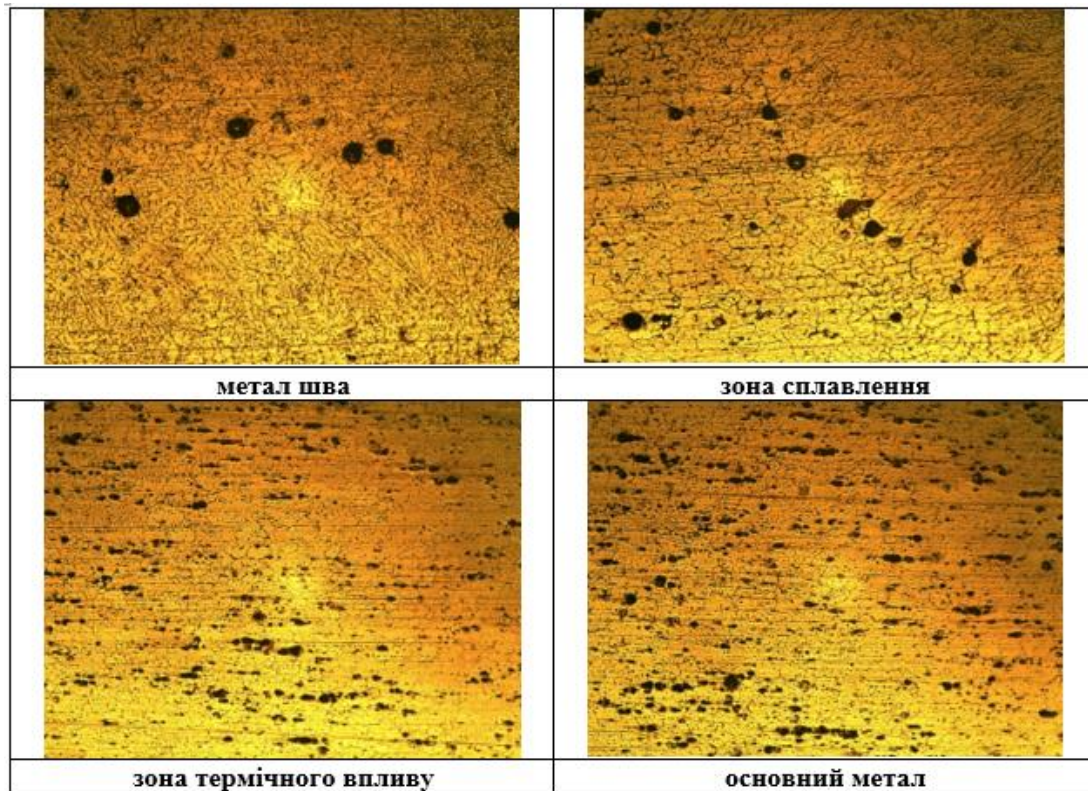


Рисунок 5.3 - Мікроструктура зварного з'єднання листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn), отриманого плазмо-дуговим зварюванням у нижньому положенні без присадки зі швидкістю 300 см/хв (x150).

Зі збільшенням швидкості плазмо-дугового зварювання з 30 см/хв до 300 см/хв кількість пор у металі шва зростає, але їх розміри у порівнянні зі зварюванням стисненою дугою на швидкості 30 см/хв зменшився у 1,5 рази. Поясненням цього явища може служити те, що внаслідок більшої швидкості зварювання пори не встигали вирости до великих розмірів, а малий час існування ванни у рідкому стані погіршує умови дегазації шва. Пори локалізуються переважно по зоні сплавлення шва з основним металом. При високій швидкості зварювання (300 см/хв) формуються дендрити у 3 – 4 рази менші ніж при

зварюванні зі швидкістю 30 см/хв. Змінюється направленість осей дендритів першого порядку. На відміну від зварювання зі швидкістю (30 см/хв), ці осі дендритів направлені перпендикулярно повздовжній осі шва.

При плазмо-дуговому зварюванні листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn) на швидкості 300 см/хв з присадковим дротом розплавлений метал, що утворюється під час плавлення присадкового дроту, не встигає перемішатися з розплавленим металом зварювальної ванни. Надлишок металу, який має формувати верхній валик зварного шва, нормально не розтікається і відбувається нерівномірне формування верхнього валика шва та утворюються глибокі подрізи по границі зони сплавлення шва з основним металом. Використання у вигляді присадки вставки із стрічки, вирізаної із осново металу, також не забезпечує якісного формування поверхні шва. Стрічка плавиться нерівномірно. Спостерігається випліскування розплавленого металу під впливом плазмового струменя. На поверхні по центру шва залишається ланцюжок пор, які виходять на поверхню.

Наявність глибоких подрізів (до 0,5 мм і більше) та наявність пор по всьому металу шва обумовлюють не надто високу міцність як зварного з'єднання (249 – 251 МПа). При зменшенні швидкості зварювання до 200 см/хв зникає з поверхні ярко виражений ланцюжок поверхневих пор, а також покращуються умови формування переходу від шва до основного металу. При цьому міцність зварного з'єднання становить 279 - 280 МПа, що перевищує міцність зварного з'єднання сплаву 1201 товщиною 2,0 мм (246 МПа), отриманого аргонодуговим зварюванням неплавким електродом зі швидкістю зварювання 20 см/хв. (рис. 5.4).

Зменшення показників міцності при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn) при швидкості зварювання 200 см/хв у порівнянні показників міцності при швидкості 120 см/хв обумовлюється погіршенням умов дегазації металу шва, що знижує показники міцності металу шва, а також початку утворення подрізів по границі сплавлення шва і основного металу (зона сплавлення).

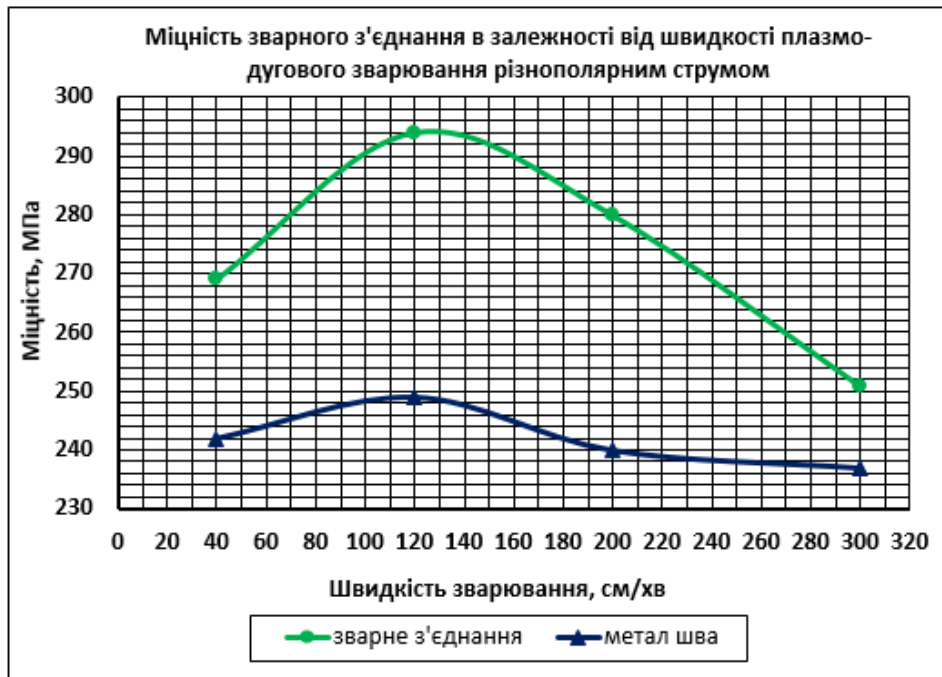


Рисунок 5.4. Графік залежності показників міцності зварних з'єднань листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn), отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом з різними швидкостями зварювання.

Згідно металографічного аналізу структура шва уявляє собою твердий розчин і дрібнодисперсні включення фази  $\text{CuAl}_2$  та евтектики типу  $(\alpha + \text{CuAl}_2)$ . Включення оксидних плівок і мікротріщин не спостерігаються, але в місцях знаходження виділень надлишкових фаз мають місце окремі мікропори розміром менше 0,1 мкм і мікрорихлоти, кількість і характер розташування яких залежить від швидкості зварювання та кристалізації.

Структура шва, отриманого плазмо-дуговим зварюванням на швидкості 40 см/хв, містить кристаліти, які відрізняються поміж собою за формою та направленням. Поблизу границі сплавлення, де відбувається перший етап кристалізації, структура переважно дрібнокристалічна. Процеси тепловідводу та кристалізаційного переохолодження, що протікають у зварювальній ванні під час охолодження металу та його кристалізації, сприяють формуванню зони стовпчастих кристалітів, що зорієнтовані переважно до вектору ізотерм плавлення. В центрі шва спостерігається центральний кристаліт, границя якого

примикає до бокових кристалітів. При збільшенні швидкості зварювання до 120 і 200 см/хв утворення центрального кристаліту не спостерігається.

Шви, отримані на швидкості 40 см/хв (24м/год), мають типову чарунково-дендритну структуру, характерну для литого стану. Структура швів, отриманих на швидкостях 120 і 200 см/хв, характеризується відсутністю центрального кристаліту та більш вузькою зоною стовбчастих витягнутих дрібних кристалів з значною кількістю чарунок і дрібними рівновісними дендритами у центральній частині шва. Збільшення швидкості кристалізації при швидкості зварювання 120 см/хв забезпечує утворення розгалужених дендритів твердого розчину та рівномірно розташованих між ними фаз, що не увійшли до їх складу, форма і розміри яких визначаються значенням швидкості кристалізації (рис. 5.5).

Особливістю мікроструктури є зменшення розмірів до 3-14 мкм та кількості проміжних фаз  $\theta'$ (CuAl<sub>2</sub>) і S' (Al<sub>2</sub>CuMg) при незмінній кількості стійкої до термічного впливу фази  $\theta$  (CuAl<sub>2</sub>). Ще більша тенденція щодо зменшення розмірів і кількості зазначених фаз спостерігається у структурі швів, отриманих на швидкості 200 см/хв.

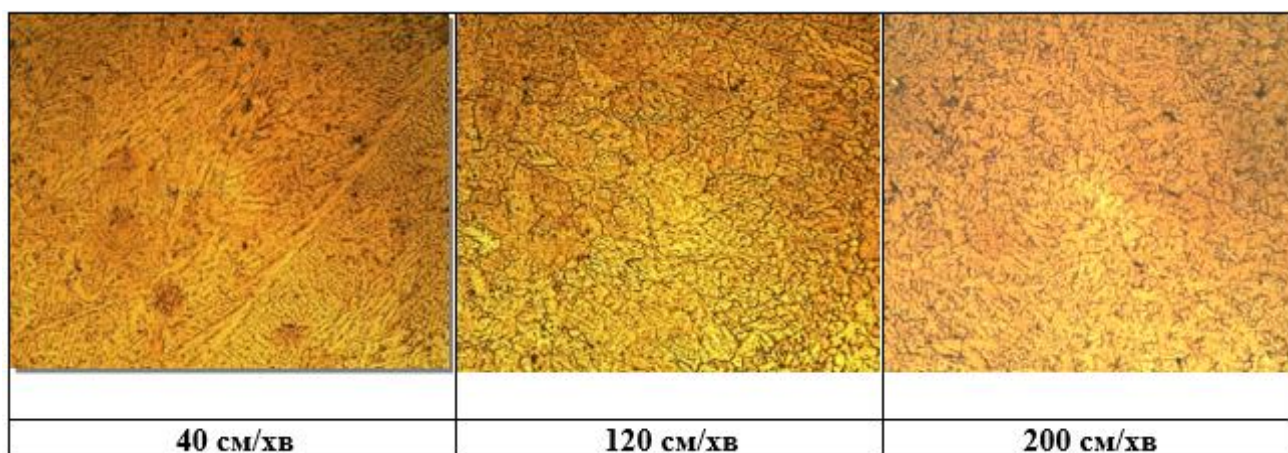


Рисунок 5.5 - Мікроструктура металу шва, отриманого плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn) при різних швидкостях зварювання (x150).

В структурі спостерігається дендрити у 3 – 4 рази менші ніж при зварюванні зі швидкістю 40 см/хв. Змінюється направленість осей дендритів першого

порядку. На відміну від зварювання з малою швидкістю, ці осі направлені перпендикулярно повздовжній осі шва, що, можливо, є наслідком не тільки високій швидкості зварювання, але й концентрації енергії в плазмовому струмені та додатковому силовому впливу плазмоутворюючого газу.

Скорочення етапу кристалізації, на якому відбувається поява та розвиток зародків фаз та періоду переплетіння дендритів, сприяє збільшенню об'єму твердого розчину, що може бути основою для підвищення міцності металу шва. Проміжок між гілками дендритів заповнюються рідким металом, міжфазні границі стабілізуються. В результаті цього тверда фаза становиться чарунковою, а розміри кристалітів у шві зменшуються в 3 рази.

При зростанні швидкості зварювання в 5 раз (з 40 до 200 см/хв) процеси перетворення відбуваються інтенсивно, що викликає перехід мікробудови швів до дендритної структури з високою щільністю і дисперсністю виділень часток і зміцнюючих фаз. Це зумовлено зміною величини градієнта температури на поверхні розділення твердого розчину рідкого металу та фаз, швидкості зростання і розподілу розчину на міжфазній границі їх зростання (вдовж фронту кристалізації). В результаті цього формується мікроструктура металу шва,

Також зміна показників міцності спостерігається при плазмо-дуговому зварюванні термічно зміцнюваного сплаву 1460, що містить мідь та літій, з різними швидкостями зварювання. За рахунок введення в хімічний склад сплаву 1460 до 1,3% літію зменшили питому вагу сплаву 1460 у порівнянні зі сплавом 1201. Ведення до складу сплаву літію дозволило збільшити міцність основного металу сплаву 1460 до 574 МПа у порівнянні з 439 МПа у сплаву 1201.

Збільшення інтервалу наростання показників міцності та плавне зменшення їх при швидкості 300 см/хв можна пояснити більшою плинністю рідкого металу сплаву 1460 у порівнянні зі сплавом 1201 за рахунок введення літію. Зниження міцності при швидкості зварювання 300 см/хв обумовлюється початком утворення підрізів та погіршенням умов дегазації шва (рис. 5.6).



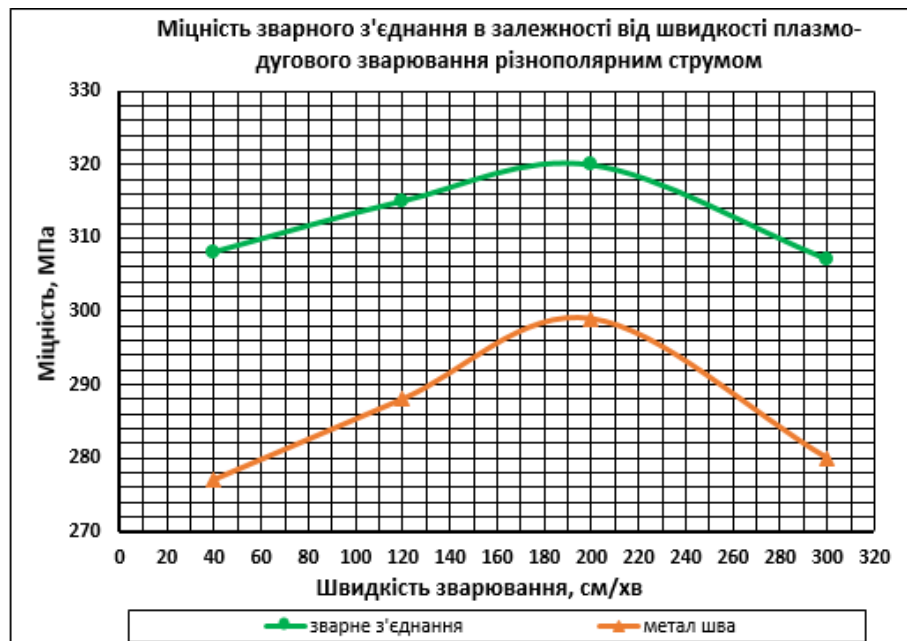


Рисунок 5.6 - Графік залежності показників міцності зварних з'єднань листів товщиною 2,0 мм із сплаву 1460 (Al-3,0%Cu-1,8%Li), отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом з різними швидкостями зварювання.

У сплаву 1460 процес зменшення показників міцності починається після зростання швидкості зварювання вище 200 см/хв. Як і у сплаву 1201 процес зниження показників міцності також обумовлений утворенням підрізів по зоні сплавлення та зростання пористості в металі шва.

При плазмо-дуговому зварюванні термічно не зміцнюваного сплаву АМг5М (Al-5%Mg-Mn) товщиною 2,0 мм також спостерігається збільшення показників міцності зварного з'єднання з ростом швидкості плазмо-дугового зварювання (рис. 5.7). Але на відміну від сплавів 1201 та 1460, які термічно зміцнюються, та більш чутливі до внесення тепла, у даного сплаву зростання показників міцності відбувається більш повільно. При цьому при перевищенні швидкості зварювання 200 см/хв спостерігається зменшення показників міцності зварного з'єднання також на рахунок утворення підрізів по зоні сплавлення. При цьому величина підрізів менша у порівнянні зі сплавами, що містять мідь.

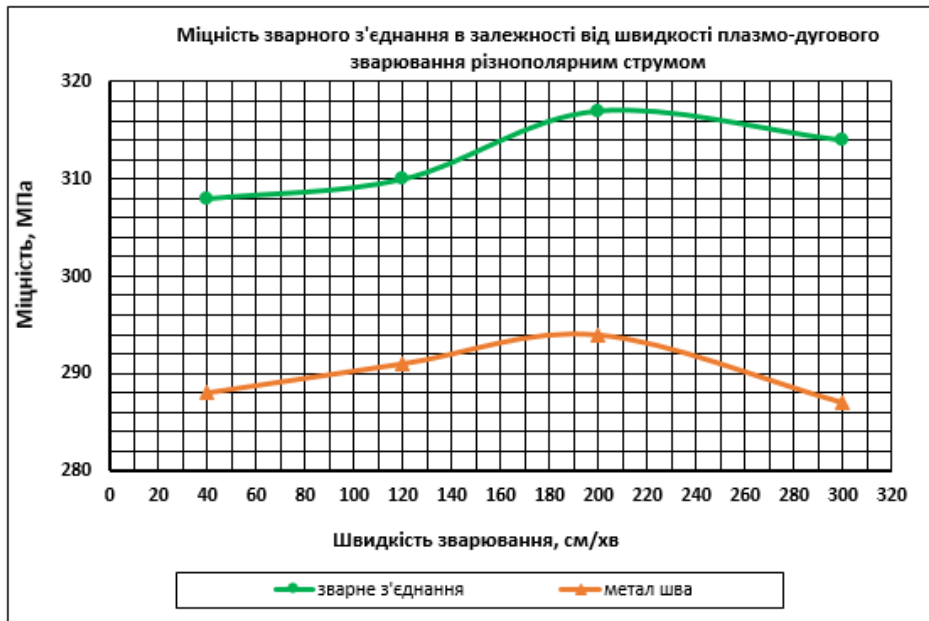


Рис. 5.7. Графік залежності показників міцності зварних з'єднань листів товщиною 2,0 мм із сплаву АМг5М (Al-5% Mg-Mn), отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом з різними швидкостями зварювання.

## 5.2. Вплив способу формування кореневої частини шва при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвих сплавів на структуру зварних швів та механічні властивості алюмінієво-літєвих сплавів при статичному одинісному та позацентровому навантаженнях

При плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів з літєм отримати стабільне формування шва в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя без використання технологічного зазору досить важко. Підвищена, у порівнянні з алюмінієвими сплавами інших систем легування, плинність розплавленого металу алюмінієво-літєвих вимагає мінімізувати температурне поле в зварюваних листах та силовий вплив плазмового струменя на зварювальну ванну. Технологічного зазор покращую умови утворення та підтримання наскрізного проникнення плазмового струменя. Його величина залежить від товщини і не залежить від хімічного складу зварюваних матеріалів.

В порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя витрати плазмоутворюючого газу зростають в 5 – 10 разів. Так при зварюванні стисненою дугою листів товщиною 4 мм сплаву 1420 різнополярним асиметричним струмом при швидкості переміщення плазмотрона 60 см/хв (36 м/год) на підкладці витрати плазмоутворюючого газу склали 0,2 л/хв. Для формування зварного з'єднання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя ця величина зростає до 1,2 л/хв. На рис. 5.8 наведені зовнішній вигляд зварного з'єднання листів  $\delta = 3\text{мм}$  сплаву 1460, отриманого плазмо-дуговим зварюванням в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя з попереднім зазором.

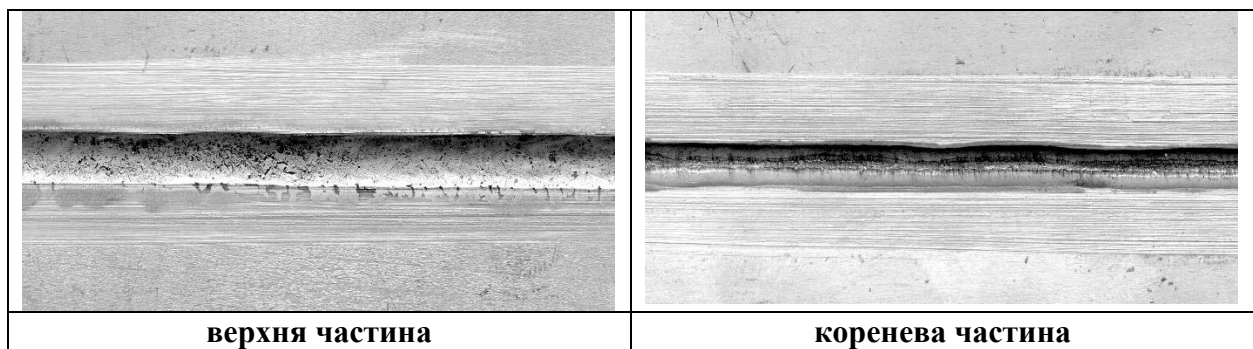


Рисунок 5.8 - Зовнішній вигляд зварного з'єднання сплаву 1460 товщиною 3 мм, отриманого плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом прямокутної форми зі швидкістю 60 см/хв (36 м/год) в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя.

Використання наскрізного проникнення плазмового струменя дозволяє зменшити величину сили зварювального струму в порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою в середньому на 40 – 45 А. Так при зварюванні стисненою дугою різнополярним асиметричним струмом сплаву 1460 товщиною 3 мм зі швидкістю 36 м/год з використання підкладки з формуючою канавкою сила струму, необхідна для якісного формування зварного з'єднання, складала 185 А. Використання наскрізного проникнення плазмового



струменя дозволяє зменшити цю величину до 145 А. При цьому зменшується ширина зварного шва (рис. 5.9).

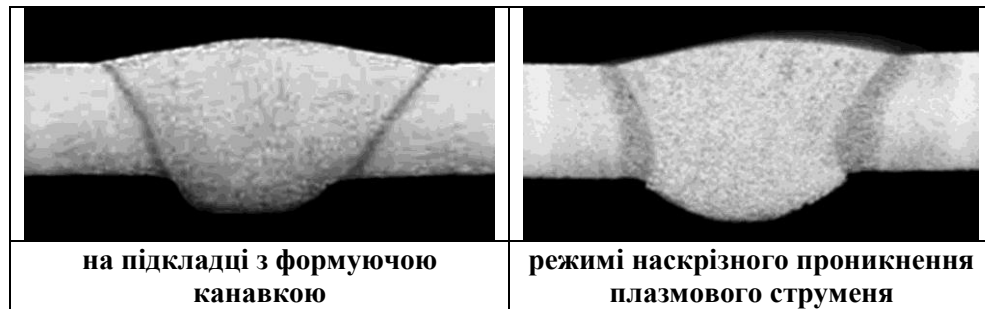
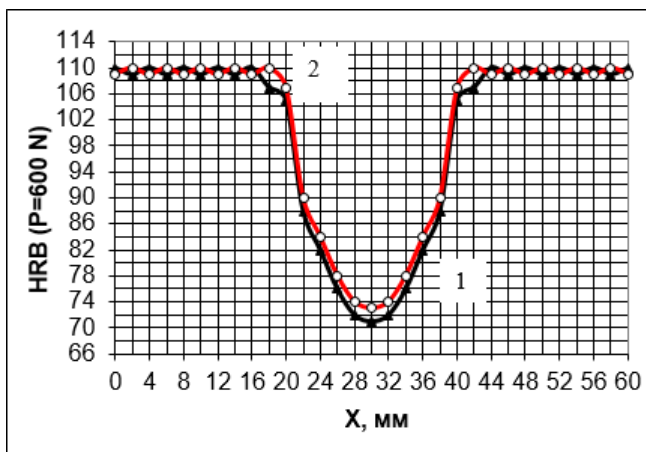
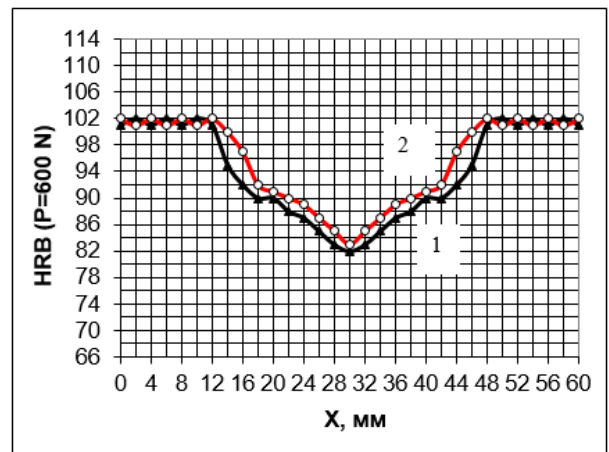


Рисунок 5.9 - Поперечні макрошліфи зварних з'єднань листів товщиною 3 мм сплаву 1460 (Al-5,3Cu-1,8Li), отриманих плазмо-дуговим зварюванням з швидкістю 60 см/хв (36 м/год) за різних умов формування кореневої частини шва.

Зменшення загального теплового внеску в зварювальні листи при плазмо-дуговому зварюванні алюмінієво-літєвих сплавів режимі наскрізного проникнення плазмового струменя в порівнянні зі зварюванням на підкладці з формуючою канавкою обумовлює скорочення протяжності зони розміщення основного металу (рис. 5.10).



а



б

Рисунок 5.10 - Твердість зварних з'єднань листів товщиною 3,0 мм сплаву 1460 (Al-Cu-Li) (а) і листів товщиною 4,0 мм сплаву 1420 (Al-Mg-Li) (б), отриманих плазмо-дуговим зварюванням з використанні 2 підкладки з формуючою канавкою (1) та в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя (2).

Аналіз результатів випробувань зварних з'єднань показав, що зразки, які отримані плазмо-дуговим зварюванням на підкладці, характеризуються більшим рівнем номінального руйнуючого напруження ( $\sigma_p$ ), ніж зварені в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя (табл. 5.2.). Але коефіцієнт інтенсивності напружень ( $K_C$ ) в 1,5÷2 рази вище для швів, отриманих в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя. Енергетичний показник, який характеризує роботу зародження тріщини ( $J_C$ ), вище для швів, зварених на підкладці, а питома робота розповсюдження тріщини (УРРТ) – для з'єднань, отриманих з наскрізним проникненням плазмового струменя. Вища в останньому випадку й ударна в'язкість металу швів [89].

Таблиця 5.2 - Показники опору руйнування зварних з'єднань алюмінієво-літійєвих сплавів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням [89].

Марка сплаву	Марка присадки	Спосіб виконання	$\sigma_p$ , МПа	$K_C$ , МПа $\sqrt{м}$	$J_C$ ,	УРРТ,	$KCV$ ,
					Дж/см <sup>2</sup>		
1420	СвАМг63	З наскрізним проникненням	<u>303÷341</u> 322	<u>45÷50</u> 47	<u>6,3÷10,2</u> 7,4	<u>9,6÷10,7</u> 10,2	<u>7,2÷7,6</u> 7,4
		На підкладці	<u>379÷428</u> 401	<u>25÷35</u> 30	<u>6,8÷7,3</u> 7,1	<u>5,3÷7,5</u> 6,4	<u>4,4÷7,9</u> 5,9
1460	Св1201	З наскрізним проникненням	<u>341÷356</u> 349	<u>49÷51</u> 50	<u>8,4÷9,3</u> 8,8	<u>10,5÷10,9</u> 10,7	<u>12,1÷15,4</u> 13,8
		На підкладці	<u>400÷408</u> 403	<u>31÷36</u> 35	<u>5,3÷7,1</u> 7,1	<u>7,0÷8,1</u> 7,5	<u>8,6÷10,4</u> 9,5

При плазмо-дуговому зварюванні алюмінієвих сплавів в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя зменшується теплове навантаження на зварне з'єднання за рахунок виконання процесу на менших на 40 – 45 А значеннях сили струми.

Наявність наскрізного каналу змінює перетікання рідкого металу в хвостову частину ванни, що в свою чергу змінює умови кристалізації та характер структури металу швів алюмінієво-літійєвих сплавів.

Характерною особливістю всіх алюмінієво-літійєвих сплавів є утворення в металі шва в близькості з границею сплавлення зони рівноосних мілких зерен. Ця зона утворюється незалежно від наявності в металі шва модифікаторів. Розмір таких субзерен менше за розмір дендритів у загальному об'ємі металу шва. Товщина прошарку дрібних субзерен із-за шарової структури може змінюватись від одного до декількох десятків зерен.

Сплав 1420. Структуру металу шва, звареного стисненою дугою на підкладці з формуючою канавкою складають дендрити, розмір яких менше ніж при аргонодуговому зварюванні. Розташування виділень спостерігається по границях зерен і по осях дендритів, але вони значно дисперсніші у порівнянні зі звичайним аргонодуговим зварюванням (рис. 5.11, а). При плазмо-дуговому зварюванні в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя структура металу шва дендритна з елементами субдендритної. Виділення розташовані також по границях зерен та осях дендритів. Розміри зерен та товщина виділень менша ніж при плазмо-дуговому зварюванні на підкладці з формуючою канавкою (рис. 5.11, б).

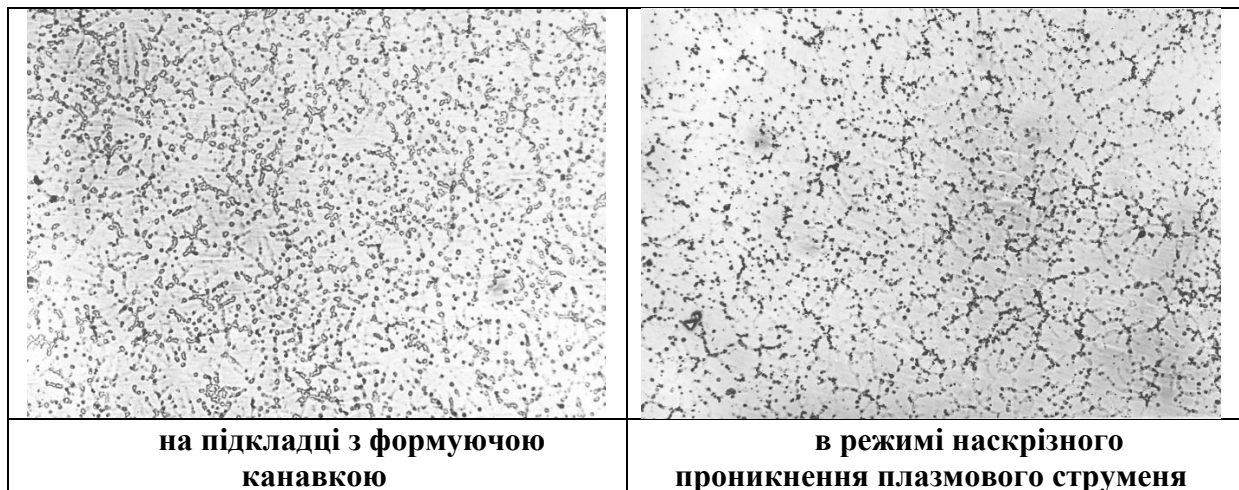


Рисунок 5.11 - Фрагменти структури металу швів сплаву 1420 (Al-Mg-Li) товщиною 4мм, отриманих із присадкою СвАМг63 плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини шва; x 200.

В зоні термічного впливу дуги біля лінії сплавлення спостерігається незначне оплавлення границь зерен (рис. 5.12).

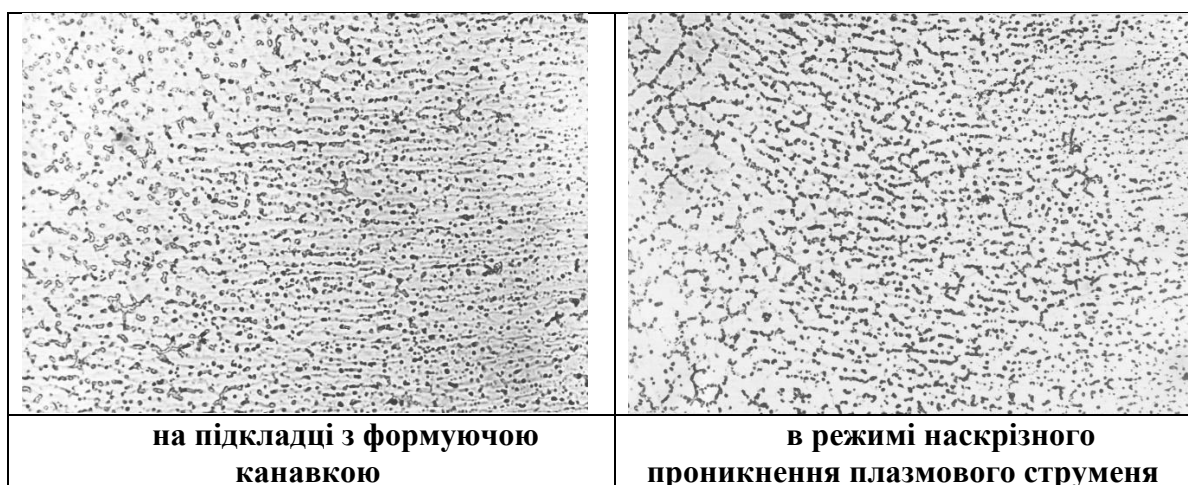


Рисунок 5.12 - Фрагменти структури металу зони сплавлення з'єднання сплаву 1420 товщиною 4мм, отриманих із присадкою СвАМг63 плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини шва; х 200.

При зварюванні в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя це проявляється менше ніж при плазмо-дуговому зварюванні на підкладці з формуючою канавкою. Крім того спостерігається зменшення перегріву та росту зерен основного металу.

Сплав 1460. Метал шва, що формується при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом з присадкою Св1201, являє собою в основному спрямовані витягнуті дендрити (рис. 5.13, а). Виділення евтектик розташовані по границях зерен. Підвищена потужність джерела нагрівання та швидкість його переміщення при плазмо-дуговому зварюванні змінюють характер кристалізації. Статура металу шва змінюється від дендритної до дендритної з елементами субдендритної рис. 5.13, б).

При цьому розмір зерен та товщина приграничних виділень зменшується. В зоні термічного впливу дуги біля лінії сплавлення спостерігається незначне оплавлення границь зерен. При зварюванні в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя це проявляється менше ніж при плазмо-дуговому

зварюванні на підкладці з формуючою канавкою. Крім того спостерігається зменшення перегріву та росту зерен основного металу (рис. 5.14).

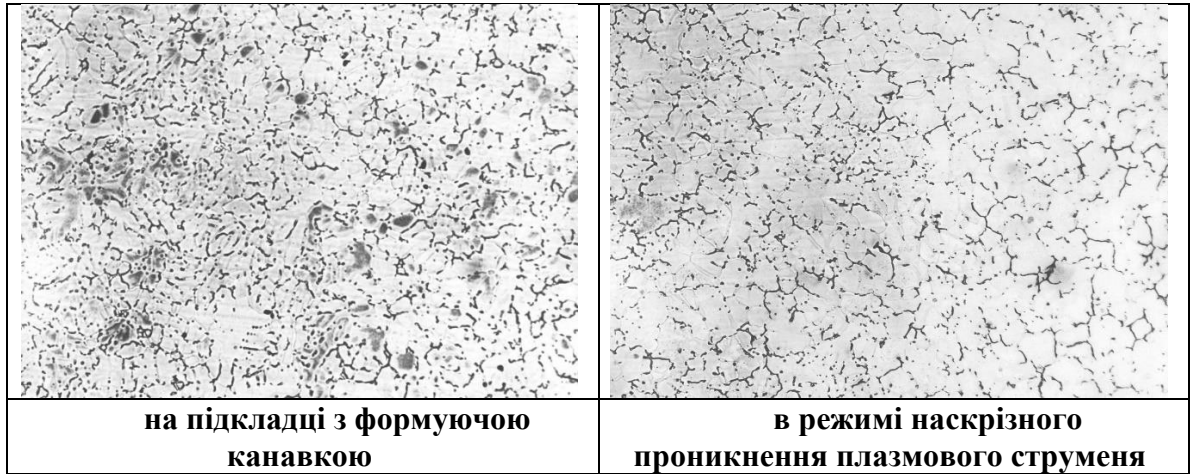


Рисунок 5.13 - Фрагменти структури металу швів сплаву 1460 (Al-Cu-Li) товщиною 3мм, отриманих із присадкою Св1201 (Al-Cu-Mn) плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини шва; x 200.

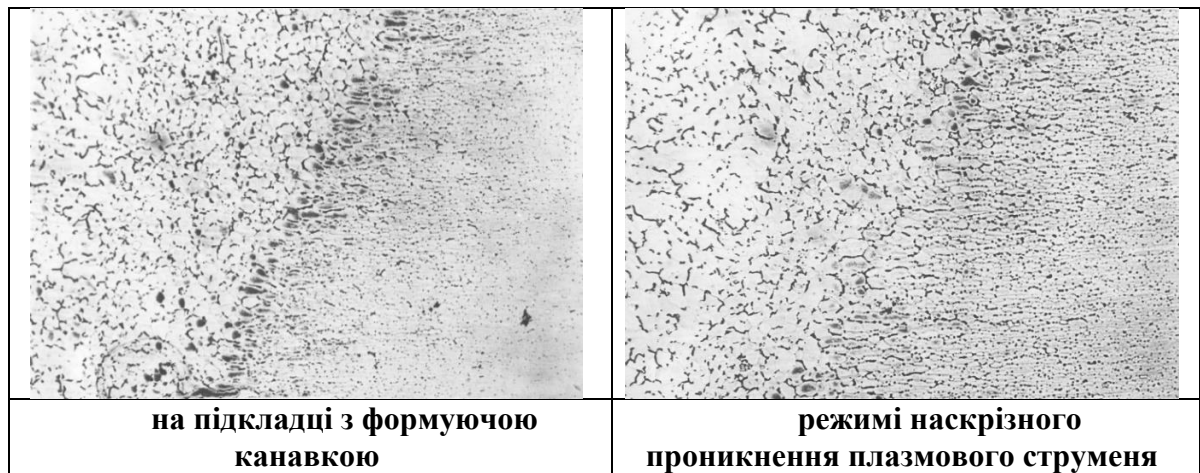


Рисунок 5.14 - Фрагменти структури металу зони сплавлення з'єднання сплаву 1460 (Al-Cu-Li) товщиною 3 мм, отриманих із присадкою Св1201 (Al-Cu-Mn) плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при різних умовах формування кореневої частини шва; x 200.

### 5.3 Розподіл температурних полів у зварюваних пластинах в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання

Метою розрахунків було отримання закономірностей зміни температури в залежності від способу зварювання, швидкості зварювання, просторового положення виконання швів. За основу було обрано методику Рикаліна для розрахунку температурного поля в пластині при швидкостях зварювання до 20 см/хв (12 м/год) та від 30 до 300 см/хв (від 18 до 180 м/год). Для дослідження особливостей використовували максимальні температури в пластині, які можуть виникати під час зварювання у напрямку перпендикулярному осі шва.

Для швидкостей зварювання до 20 см/хв видирали схему розрахунку з використанням точкового рухливого джерела нагрівання, а для швидкостей зварювання вище 30 см/хв – потужного лінійного джерела нагрівання.

Максимальні температури визначалися із графіків розподілу температур (рис. 5.15) для зварювання зі швидкістю до 20 см/хв та графіків термічних циклів (рис. 5.16) для процесів зі швидкістю вище 30 см/хв.

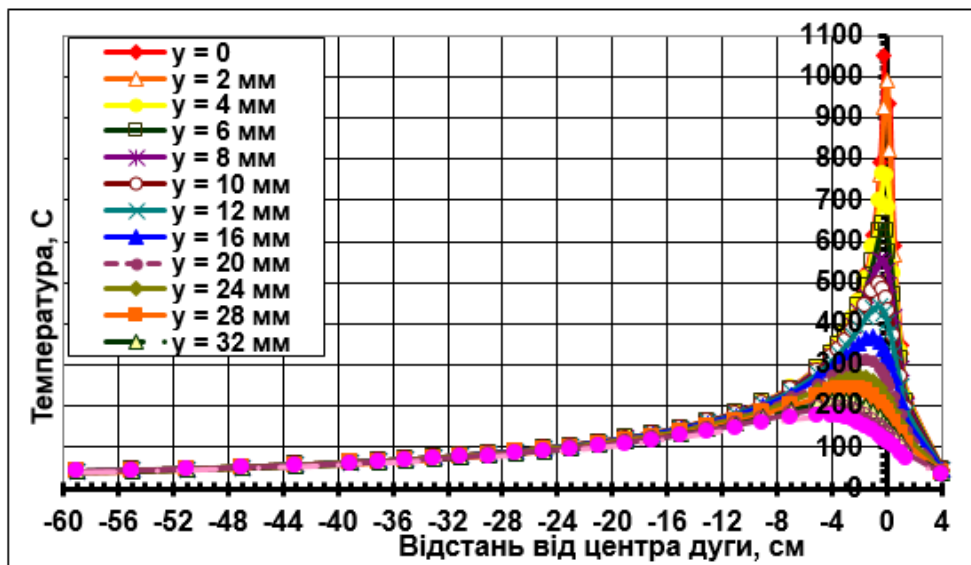


Рисунок 5.15 - Графік розподілу температур при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвого сплаву 1201 (Al-Cu-Mn) товщиною 6,0 мм у нижньому положенні зі швидкістю 20 см/хв (12 м/год).

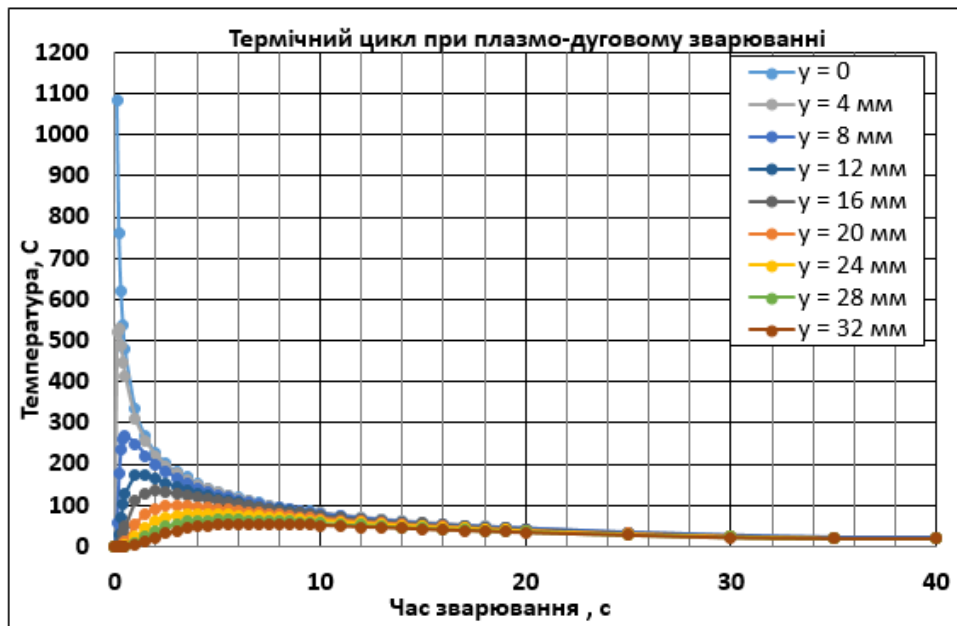


Рисунок 5.16. - Термічний цикл при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-Cu-Mn) зі швидкістю 200 см/хв (120 м/год).

На рис. 5.17 та рис. 5.18 наведено графіки максимальних температур у поперечному перерізі зварного з'єднання.

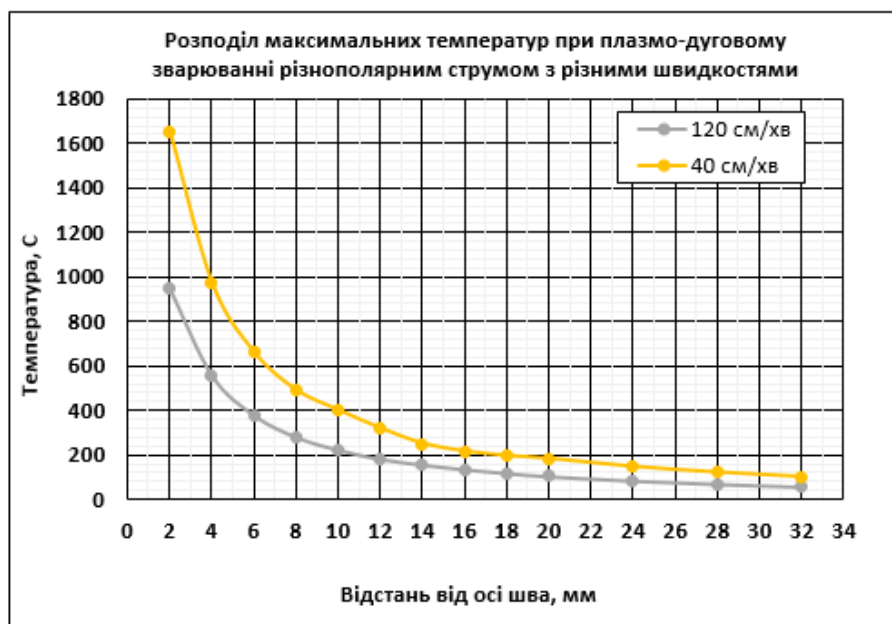


Рисунок 5.17 - Розподіл максимальних температур, які виникають у листах сплаву 1201 товщиною 1,8 мм, з'єднаних плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при швидкостях зварювання 40 см/хв та 120 см/хв.

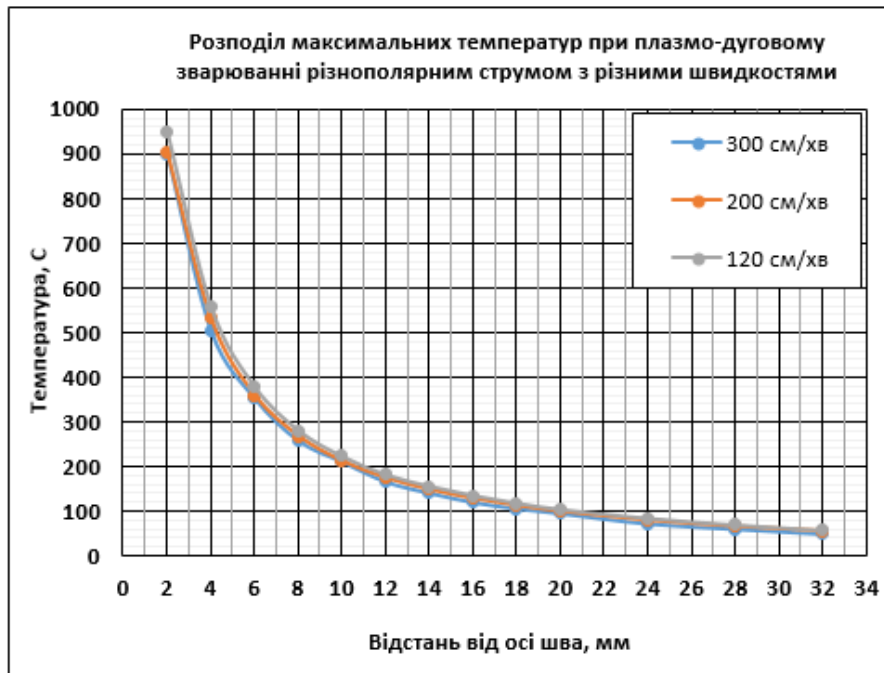


Рисунок 5.18 - Розподіл максимальних температур, які виникають у листах сплаву 1201 товщиною 1,8 мм, з'єднаних плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом при швидкостях зварювання від 120 см/хв до 300 см/хв.

При аналізі графіків розподілу максимальних температур (рис. 5.17 та рис. 5.18) при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 зі швидкостями зварювання від 40 см/хв до 300 см/хв було встановлено, що при однаковому кроці між швидкостями 80 см/хв різниця у температурі між кривими графіку розподілу максимальних температур залежить від діапазону зміни швидкостей (у діапазоні від 40 см/хв до 120 см/хв різниці в температурі між точками на відстані 5 мм від осі шва у 3-4 рази вище, ніж у діапазоні швидкостей від 120 см/хв до 200 см/хв).

На відстані від осі більше 4 мм при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним струмом алюмінієвого сплаву 1201 товщиною 1,8 мм при зміні швидкості зварювання від 120 см/хв до 180 см/хв температура змінюється в середньому на 50°C, що не суттєво не впливає як зміну твердості, так і на зміну механічних властивостей зварних з'єднань.



#### 5.4. Напружено-деформований стан у зварних з'єднаннях, отриманих зварюванням стисненою дугою з різними швидкостями зварювання

Розрахунок напружено-деформованого стану дає можливість провести якісну оцінку впливу швидкості плазмо-дугового зварювання.

Розрахунок проведено за методикою Трочуна з залучення комп'ютерної програми для інженерних розрахунків MatCAD. Розрахунок проводився по декількох показниках напружено деформованого стану плоских зразків після зварювання. В розрахунках враховували товщину зварюваних пластин та їх теплофізичні та механічні властивості.

На рис. 5.19 наведено особливості зміни ширини зони пластичних деформацій при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів зразків товщиною 2,0 мм з сплаву АМг5М (Al-5Mg-Mn) та зразків товщиною 1,8 мм з сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn).

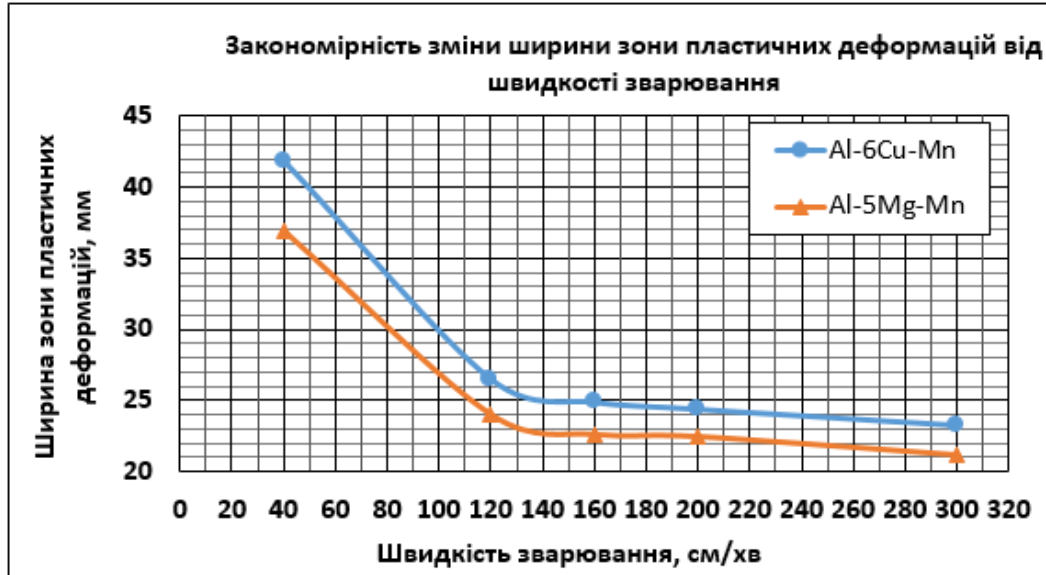


Рисунок 5.19 - Зміна ширини зони пластичних деформацій в зварних зразках товщиною 1,8...2,0 мм сплавів АМг5М (Al-5Mg-Mn) та 1201 (Al-6Cu-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

Така закономірність спостерігається і для інших показників, таких як поєздовжнє скорочення зразка (рис. 5.20) та сила усадки шва при зварюванні (рис. 5.21).

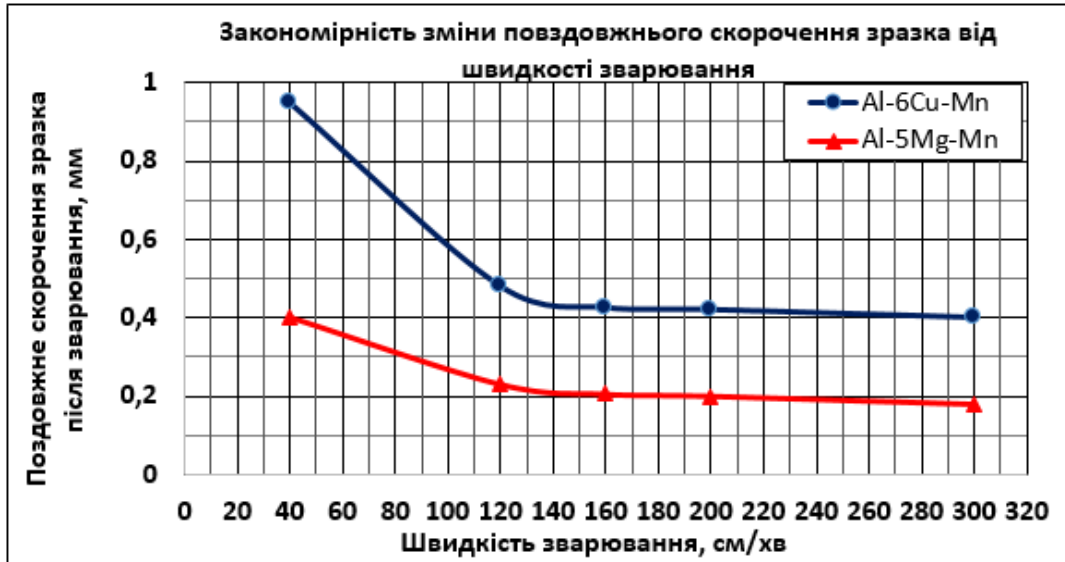


Рисунок 5.20 - Зміна поєздовжнього скорочення зразка товщиною 1,8...2,0 мм сплавів АМг5М (Al-5Mg-Mn) та 1201 1201 (Al-6Cu-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

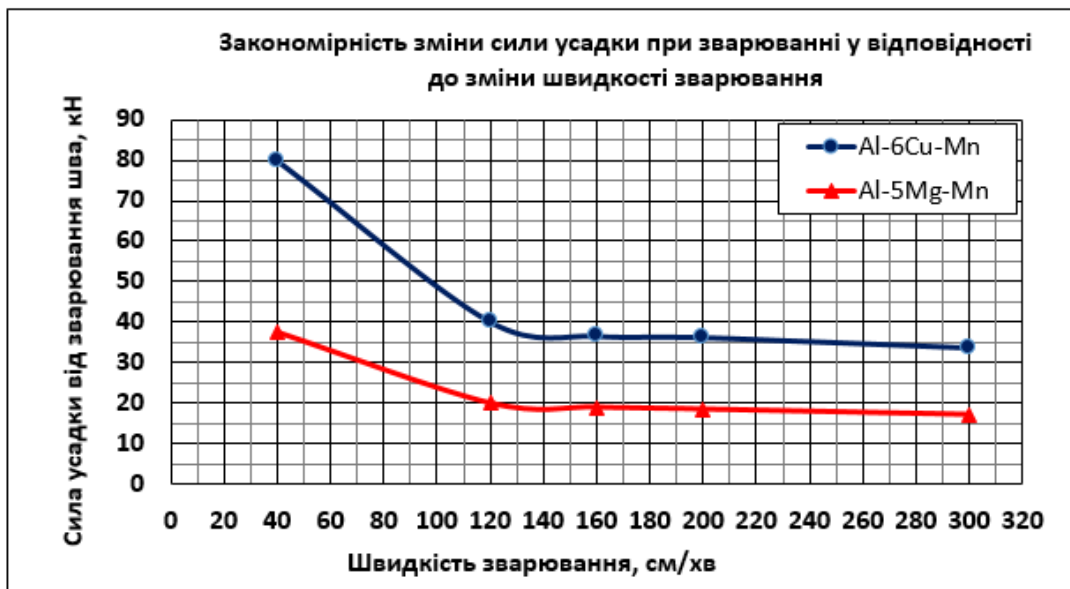


Рисунок 5.21 - Зміна сили усадки шва зразка товщиною 1,8...2,0 мм сплавів АМг5М (Al-5Mg-Mn) та 1201 1201 (Al-6Cu-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

Така тенденція зменшення інтенсивності показників напружено-деформованого стану спостерігається і при плазмо-дуговому зварюванні зразків товщиною 4,0 мм (рис. 5.22 - 5.24).



Рисунок 5.22 - Зміна ширини зони пластичних деформацій в зварних зразках товщиною 4,0 мм сплаву АМг5М (Al-5Mg-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.



Рисунок 5.23 - Зміна повздожнього скорочення зразка товщиною 4,0 мм з сплаву АМг5М (Al-5Mg-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.



Рисунок 5.24 - Зміна сили усадки шва зразка товщиною 4,0 мм з сплаву АМг5М (Al-5Mg-Mn) в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

Закономірність стрімкого зменшення показників напружено-деформованого стану в зразках після зварювання спостерігається і при плазмо-дуговому зварюванні листів сплаву системи легування Al-6Mg-Mn у двох станах поставки даного сплаву АМг6М та АМг6Н. Сплави мають подібний хімічний склад, але відрізняються показниками міцності основного металу та межею плинності (рис. 5.25, 5.26). У сплав АМг6Н за рахунок пластичної деформації (нагартування) збільшено показники міцності та межі плинності у порівнянні зі сплавом АМг6М. Враховуючи подібний хімічний склад обидвох сплавів, плазмо-дугове зварювання виконували на однакових режимах струму, балансу різнополярного струму, частоти різнополярного струму та витрат плазмоутворюючого газу.

Аналізуючи закономірності зміни показників напружено-деформованого стану при плазмо-дуговому зварюванні можна зробити висновок, що швидкість зварювання, при якій стрімке зменшення показників напружено-деформованого стану закінчуються та починаються зміни на 1-2% в першу чергу залежить від товщини зварюваного металу. Так на рис. 5.27 наведено графік залежності такої швидкості від товщини алюмінієвих сплавів.

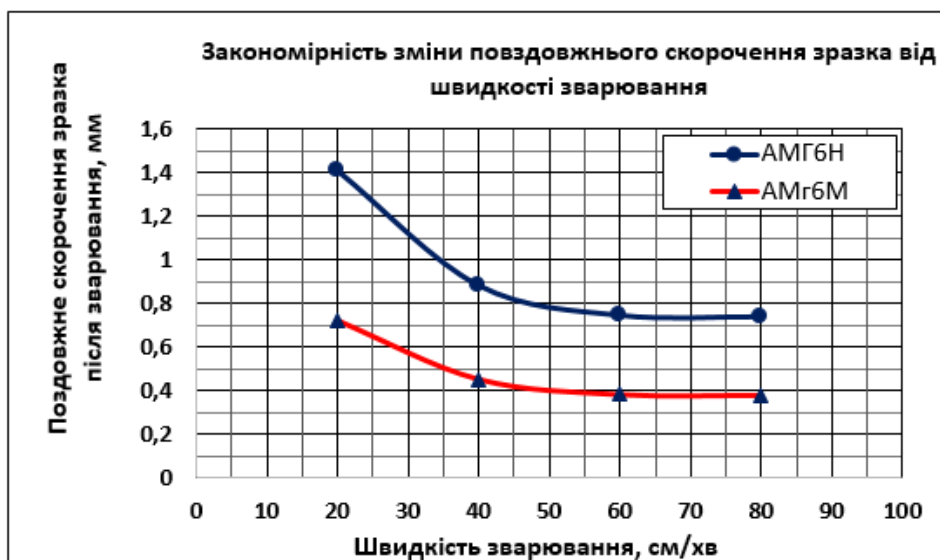


Рисунок 5.25 - Зміна поздовжнього скорочення зразка товщиною 6,0 мм сплавів АМг6М та АМг6Н в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

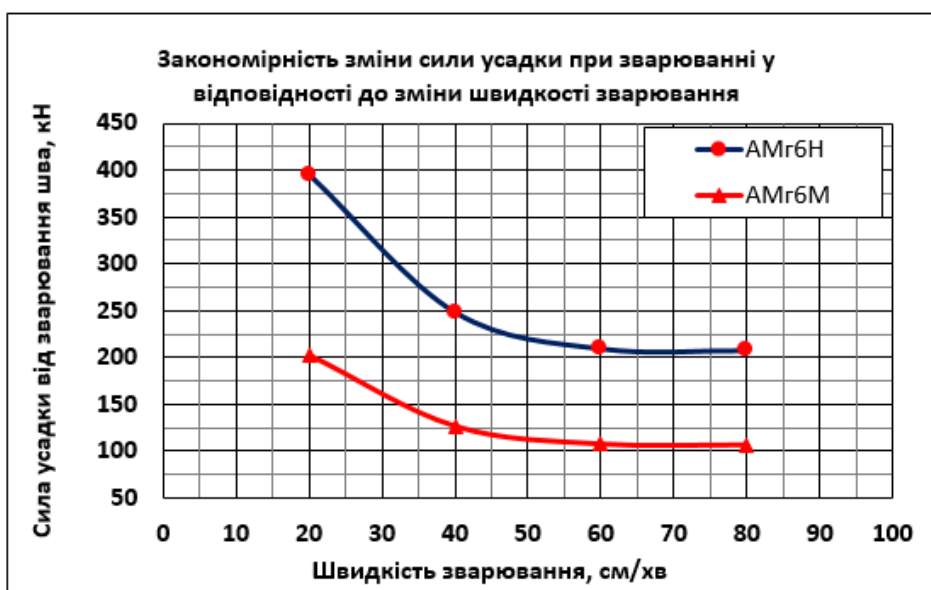


Рисунок 5.26 - Зміна сили усадки шва зразка товщиною 6,0 мм сплавів АМг6М та АМг6Н в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання.

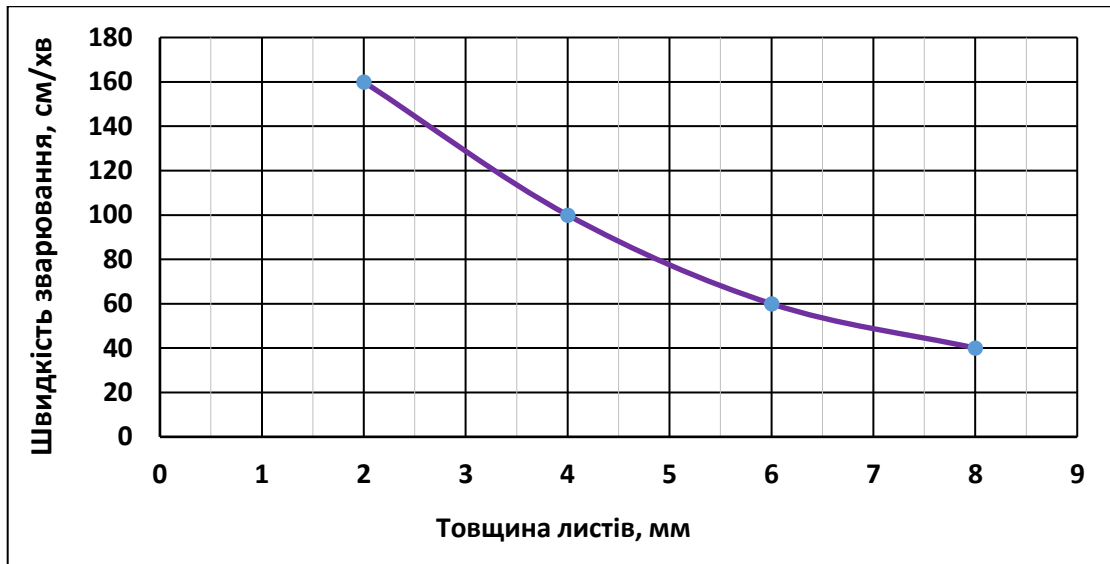


Рис. 5.27. Залежність швидкості зварювання, при якій закінчується зменшення показників напружено-деформованого стану в зварних зразках, в залежності від товщини зварюваного металу.

### 5.5. Порівняльний аналіз процесів аргонодугового та плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом

На рис. 5.28 приведено поперечні шліфи із сплаву АМг6 (Al-Mg-Mn), отримані при виконанні проплавлення аргонодуговим та плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом при однакових значеннях зварювального струму та швидкості зварювання.

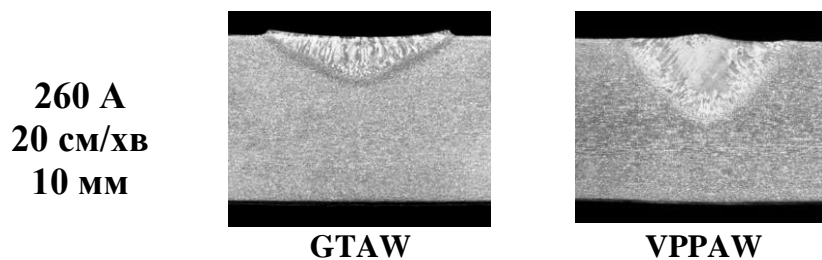


Рисунок 5.28 - Поперечні макрешліфи швів, отриманих при аргонодуговому та плазмо-дуговому зварюванні сплаву АМг6.

За рахунок більшого значення напруги на дузі при плазмо-дуговому зварюванні ніж при аргонодуговому зварюванні збільшується глибина

проплавлення, при цьому ширина шва менша за рахунок меншої площі активної плями саме

Більш висока концентрація енергії в плямі нагрівання дозволяє виконувати плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів, в тому числі і високоміцних алюміній-літєвих сплавів систем легування Al-Mg- Li, Al-Cu-Li та Al-Cu-Mg-Li, на більших швидкостях зварювання у порівнянні зі звичайним аргонодуговим зварюванням різнополярним струмом на підкладці з використанням присадкового дроту (рис. 5.29 – 5.33).

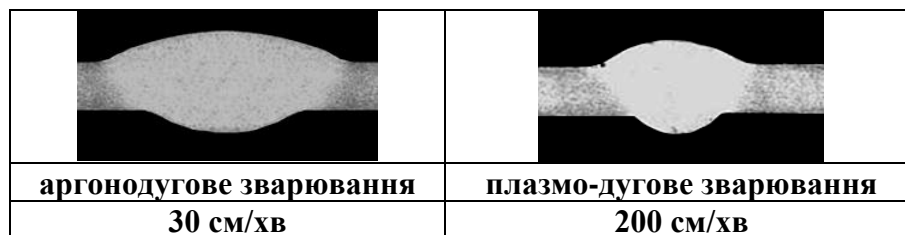


Рисунок 5.29 - Поперечні шліфи зварного з'єднання листів товщиною 1,8 мм із сплаву 1201 (Al-6Cu-Mn), отриманих різними способами зварювання неплавким електродом з використанням присадкового дроту Св1201.



Рисунок 5.30 - Поперечні макрошліфи зварних з'єднань листів сплаву 1460 (Al-3Cu-1,8Li) товщиною 3,0 мм, отриманих різними способами зварювання неплавким електродом з використанням присадкового дроту Св1201.

При цьому з'єднання, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом характеризуються меншою шириною швів в діапазоні товщин від 2 до 10 мм.

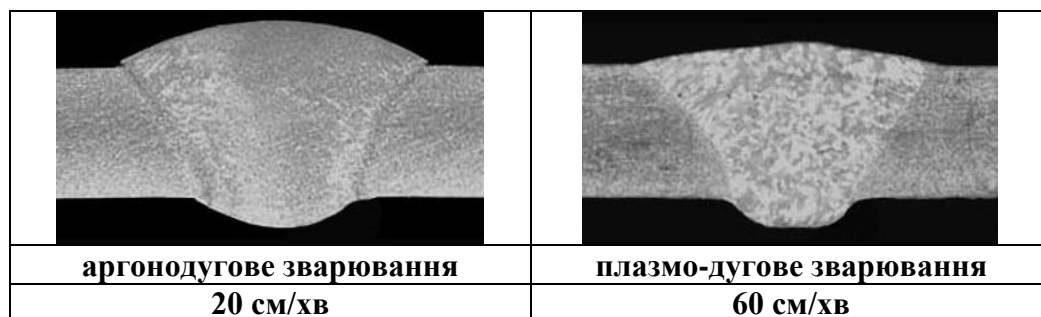


Рисунок 5.31 - Поперечні шліфи зварного з'єднання листів товщиною 4,0 мм із сплаву АМг5М отриманих різними способами зварювання неплавким електродом з використанням присадкового дроту СвАМг6.

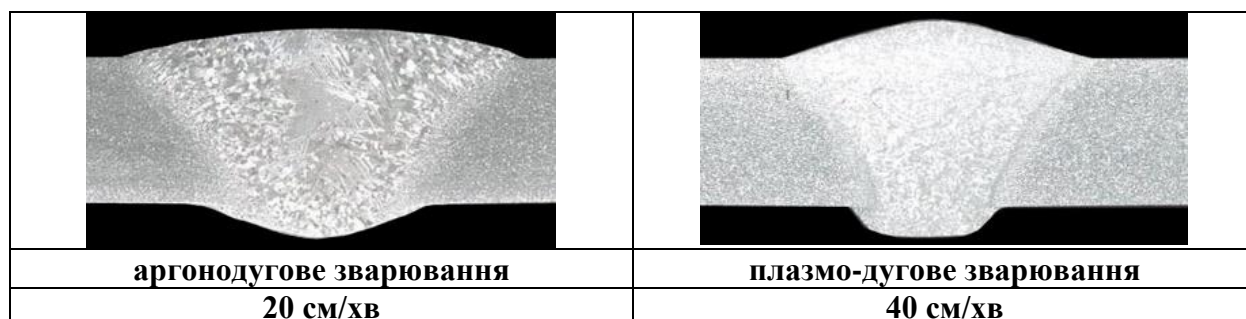


Рисунок 5.32 - Поперечні шліфи зварного з'єднання листів товщиною 6,0 мм із сплаву АМг6Н отриманих різними способами зварювання неплавким електродом з використанням присадкового дроту СвАМг6.

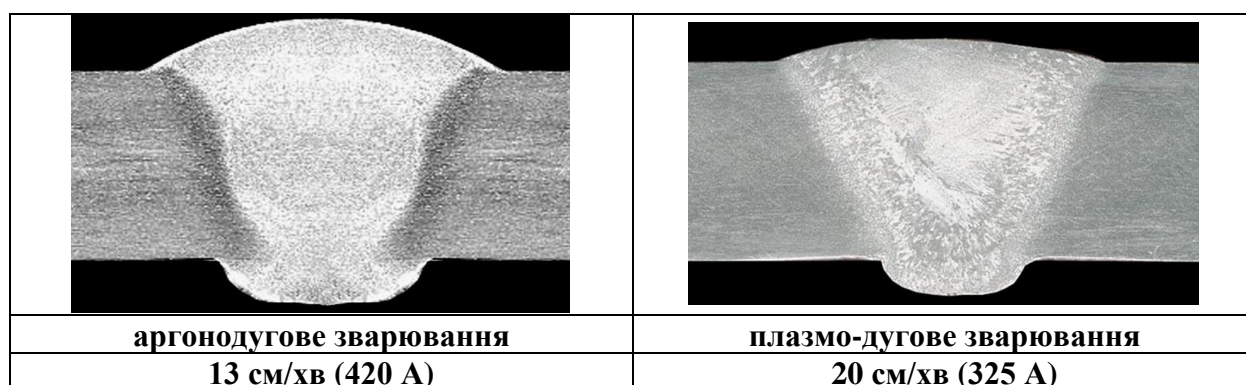


Рисунок 5.33 - Поперечні шліфи зварного з'єднання листів товщиною 10,0 мм із сплаву АМг6Н отриманих різними способами зварювання неплавким електродом з використанням присадкового дроту СвАМг6.



При плазмо-дуговому зварюванні на підкладці на ширина швів 15% менша, ніж при звичайному аргонодуговому зварюванні. Менший нагрів основного металу поза зоною розплавлення призводить до скорочення зони термічного впливу джерела нагрівання та зменшення розміщення зварного з'єднання (рис. 5.34).

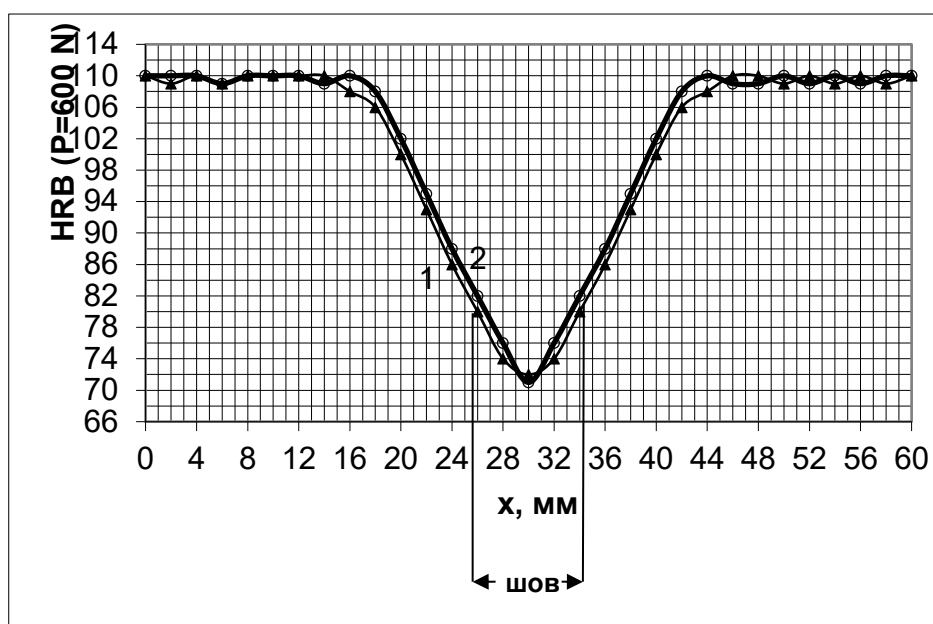


Рисунок 5.34 - Твердість зварних з'єднань листів сплаву 1460 товщиною 3,0 мм, отриманих аргонодуговим зварюванням (1) та плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою (2).

Встановлено особливості поведінки зварних з'єднань із алюміній-літійових сплавів, отриманих плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом, в умовах зародження та розвитку тріщини. Так аналіз результатів випробування зразків при позацентровому розтягуванні показав, що показники міцності та в'язкості руйнування швів суттєво залежать від способу зварювання (табл. 5.3).

Різні теплові умови нагрівання та швидкості охолодження металу, які супроводжують процес формування зварних з'єднань, призводить до зміни показників міцності, пластичності та в'язкості руйнування швів. Руйнуюче напруження ( $\sigma_p$ ) в металі швів, отриманих при аргонодуговим зварюванням

неплавким електродом сплаву 1420, складає 289...320 МПа, а сплаву 1460 – 278...306 МПа.

Таблиця 5.3 - Показники міцності, в'язкості руйнування и ударної в'язкості зварних з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів 1420 и 1460 при позацентровому розтягуванні [89].

Марка сплаву	Марка присадки	$\sigma_r$ , МПа	$K_C$ , МПа $\sqrt{м}$	$J_C$	УРРТ,	КСУ,
Аргонодугове зварювання						
1420	СВАМГ63	$\frac{289 \div 320}{304}$	$\frac{23 \div 25}{24}$	$\frac{3,5 \div 5,8}{4,4}$	$\frac{4,5 \div 5,7}{4,9}$	$\frac{3,5 \div 5,3}{4,9}$
1460	Св1201	$\frac{278 \div 306}{293}$	$\frac{25 \div 27}{26}$	$\frac{5,8 \div 7,2}{6,5}$	$\frac{5,3 \div 6,1}{5,7}$	$\frac{6,7 \div 7,1}{7,2}$
Плазмо-дугове зварювання						
1420	СВАМГ63	$\frac{379 \div 428}{401}$	$\frac{25 \div 35}{30}$	$\frac{6,3 \div 10,2}{7,4}$	$\frac{5,3 \div 7,5}{6,4}$	$\frac{4,4 \div 7,9}{5,9}$
1460	Св1201	$\frac{383 \div 420}{403}$	$\frac{31 \div 36}{35}$	$\frac{8,4 \div 9,3}{8,8}$	$\frac{7,0 \div 8,1}{7,5}$	$\frac{8,6 \div 10,4}{9,5}$

Примітка: В чисельнику приведено діапазон експериментальних значень фізико-механічних властивостей зварних з'єднань, а в знаменнику – їх середньоарифметичне значення.

Значення  $K_C$  для швів сплаву 1420 дорівнюють  $23 \div 25$  МПа $\sqrt{м}$ , а для сплаву 1460 -  $25 \div 27$  МПа $\sqrt{м}$ . Менше у порівнянні зі сплавом 1420 значення  $\sigma_r$ , можливо, обумовлені здібністю міді, яка входить до його складу, зменшувати стабільність складу перенасичених твердих розчинів и викликає більш інтенсивний їх розпад при технологічних нагріваннях, включаючи зварювальні. Шви сплаву 1460 при цьому характеризуються більш високими значеннями енергії утворення тріщини:  $J_C$  –  $5,8 \dots 7,2$  Дж/см<sup>2</sup> і питомої роботи розповсюдження тріщини КСУ –  $5,3 \dots 6,1$  Дж/см<sup>2</sup> [88].

Аналіз діаграм випробувань при позацентровому розтягуванні показав, що шви з'єднань із алюміній-літєвих сплавів, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним струмом мають проміжок часу між утворенням тріщини та повним руйнуванням зразка. У шва з'єднань алюміній-літєвих сплавів, отриманих аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом

руйнування зразка після утворення тріщини відбувається майже миттєво (рис. 5.35).

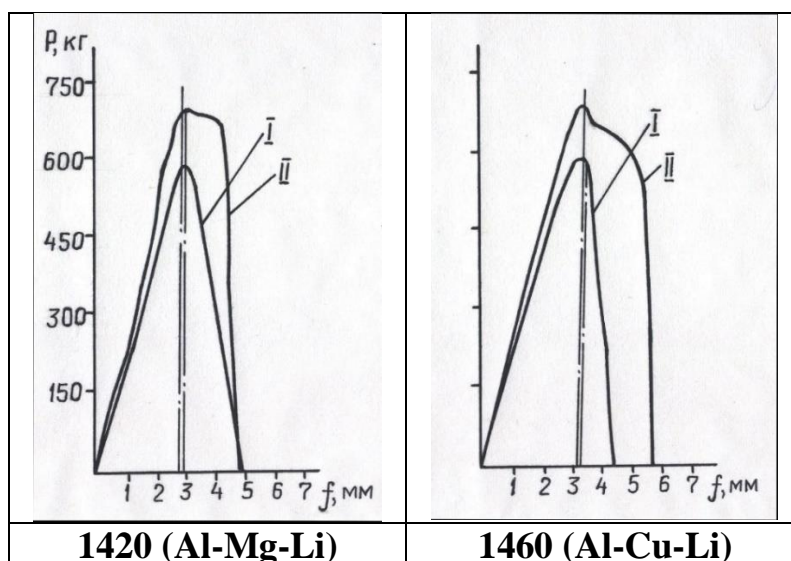


Рисунок 5.35 - Діаграми випробувань при позацентровому розтягуванні зварних з'єднань алюміній-літієвих сплавів, отриманих звичайним аргонодуговим (I) і плазмо-дуговим (II) зварюванням.

Таким чином, для забезпечення сприятливих умов поєднання силових і енергетичних характеристик в'язкості руйнування зварних з'єднань алюмінієво-літієвих сплавів 1420 и 1460 доречно використовувати спосіб зварювання з мінімальною погонною енергією. При цьому забезпечується більш висока якість металу шва, обмежується ступінь розміщення металу в зоні термічного впливу джерела нагрівання та зменшується схильність алюмінієво-літієвих сплавів до окрихчення при зварюванні. Більш високий опір руйнуванню металу шва може збільшити рівень працездатності й надійності зварних з'єднань в конструкціях.

Більш високі питома потужність та швидкість зварювання при використанні стисненої дуги як джерела нагрівання впливають на зміну умов кристалізації металу шва.

Сплав 1420. В структурі металу шва, отриманого аргонодуговим зварюванням неплавким електродом переважає дендритна структура. Виділення розташовуються по осях дендритів і границях зерен (рис. 5.36, а). Структуру металу шва, звареного стисненою дугою на підкладці з формуючою канавкою,

також складають дендрити, розмір яких менше ніж при аргонодуговому зварюванні. Розташування виділень спостерігається по границях зерен і по осях дендритів, але вони значно більш дисперсійні у порівнянні зі звичайним аргонодуговим зварюванням (рис. 5.36, б).

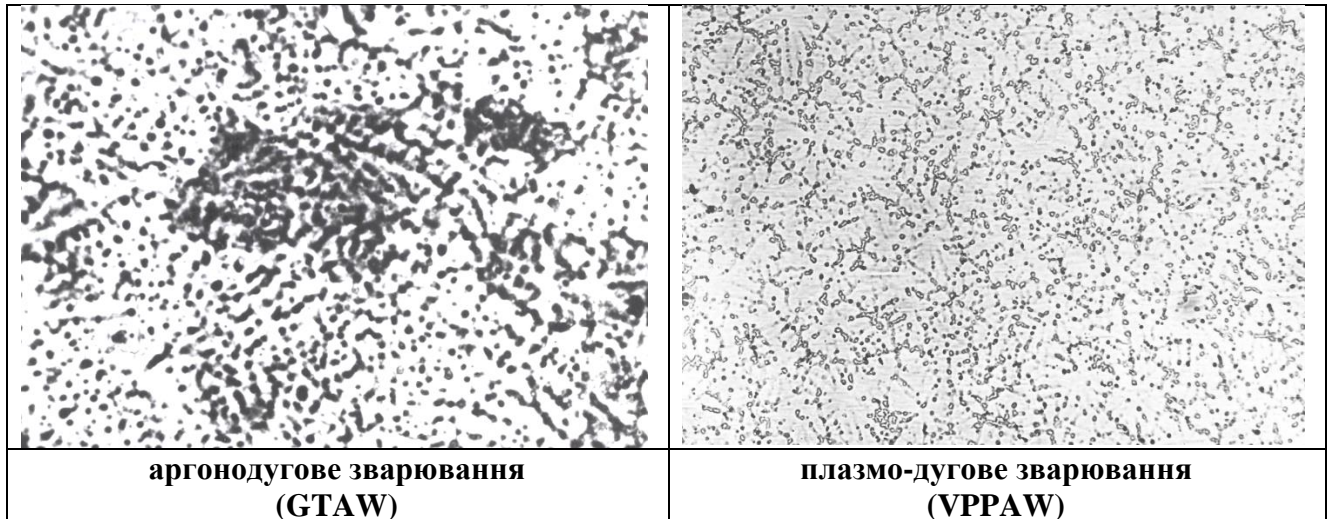


Рисунок 5.36 - Фрагменти структури металу швів сплаву 1420, отриманих двома способами дугового зварювання неплавким електродом з присадкою СвАМг63 на підкладці з формуючою канавкою; x 200.

Сплав 1460. Метал шва, що формується при аргонодуговому зварюванні неплавким електродом з присадкою Св1201, являє собою в основному спрямовані витягнуті дендрити (рис. 5.37, а).

Виділення евтектик розташовані по границях зерен. Підвищена потужність джерела нагрівання та швидкість його переміщення при плазмо-дуговому зварюванні змінюють характер кристалізації. Статура металу шва змінюється від дендритної до дендритної з елементами субдендритної (мал. рис. 5.37, б). При цьому розмір зерен та товщина приграничних виділень зменшується.

В цілому зварні з'єднання алюмінієвих сплавів різних систем легування, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом показують вищі значення показників міцності як зварного з'єднання, так і металу шва, у порівнянні з аргонодуговим зварюванням вольфрамовим електродом різнополярним струмом (табл. 5.4) [90, 91].

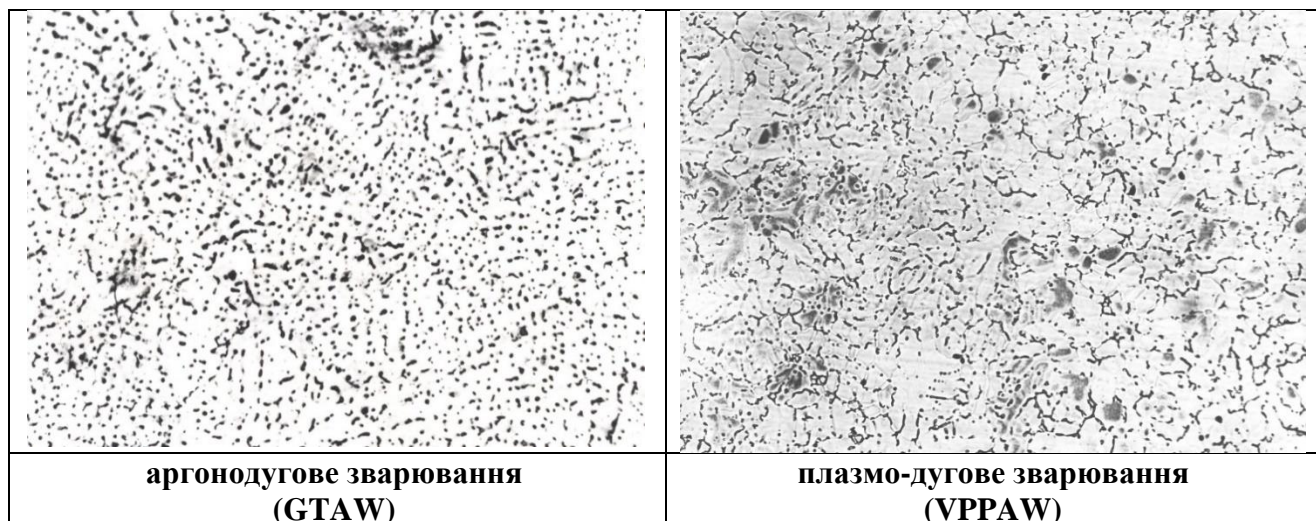


Рисунок 5.37 - Фрагменти структури металу швів сплаву 1460, отриманих двома способами дугового зварювання неплавким електродом з присадкою Св1201 на підкладці з формуючою канавкою; х 200.

Таблиця 5.4 - Механічні властивості зварних з'єднань алюмінієвих сплавів різних систем легування

Марка сплаву	Присадка	Товщина, мм	Спосіб зварювання	Міцність зварного з'єднання $\sigma_{в.з.}^{зз}$ , МПа	Міцність металу шва $\sigma_{в.мш}$ , МПа	Коефіцієнт міцності зварного з'єднання $\sigma_{в.з.}^{зз}/\sigma_{в.ом}$	Коефіцієнт міцності металу шва $\sigma_{в.мш}/\sigma_{в.ом}$
АМг5	5183	4,0	GTAW	289	267	0,95	0,88
			VPPAW	293	294	0,96	0,96
АМг6Н	СвАМг6	6,0	GTAW	315	293	0,74	0,69
			VPPAW	344	321	0,81	0,76
1420	СвАМг63	4,0	GTAW	331	323	0,70	0,69
			VPPAW	330	321	0,70	0,68
1441	СвАМг63	2,5	GTAW	279	268	0,67	0,64
			VPPAW	305	266	0,73	0,64
1460	Св1201	2,0	GTAW	295	263	0,61	0,54
			VPPAW	320	289	0,66	0,59
		3,0	GTAW	273	249	0,48	0,43
			VPPAW	303	263	0,53	0,46
1201	Св1201	2,0	GTAW	246	236	0,58	0,55
			VPPAW	294	249	0,69	0,58
		4,0	GTAW	263	254	0,62	0,59
			VPPAW	281	258	0,66	0,60
		6,0	GTAW	241	236	0,56	0,55
			VPPAW	265	249	0,62	0,58

### **Висновки до розділу 5.**

1. Встановлено, що зі збільшенням швидкості зварювання змінюється характер пористості в швах. При швидкості зварювання 30 см/хв зустрічаються поодинокі пори розміром до 60 мкм, зі збільшенням швидкості до 300 см/хв кількість пор в шві збільшується, але їх максимальні розміри зменшуються у 1,5 – 2 рази у порівнянні з розмірами пор при швидкості зварювання 30 см/хв. Збільшення кількості пор обумовлено зменшенням часу існування зварювальної ванни та зменшення об'єму розплавленого металу з ростом швидкості зварювання.

2. Встановлено, що при плазмо-дуговому зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів вплив збільшення швидкості зварювання спостерігається лише у термічно зміцнених сплавах. При цьому спостерігається збільшення міцності зварного з'єднання при зростанні швидкості зварювання до певної швидкості, а далі зменшення його до значень, навіть менших ніж при швидкості зварювання 40 см/хв. Так у сплаву Al-6%Cu-Mn спостерігається максимальне зростання міцності зварного на 9% при зростанні швидкості зварювання від 40 до 120 см/хв, після цього в інтервалі швидкостей від 120 до 300 см/хв спостерігається падіння показників міцності шва. Падіння міцності зварного з'єднання утворенням підрізів по границі шов зона сплавлення глибиною до 0,5 мм і глибше. Зменшення міцності металу шва обумовлено погіршенням дегазації металу шва.

3. Встановлено, що при зменшенні кількості міді в складі алюмінієвого сплаву (Al-3%Cu-1,8%Li) швидкість зварювання у меншій мірі впливає на зміну міцності зварного з'єднання (4 – 5 %), а трохи більше спостерігаються вплив на міцність металу шва, він зростає на 7% при збільшенні швидкості плазмо-дугового зварювання від 40 до 200 см/хв. Далі також спостерігається спад показників міцності, обумовлений початком утворення підрізів та погіршенням дегазації металу шва

4. При плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів, що термічно не зміцнюється, зміна розподілу

тепла в зварюваних листах, обумовлена зміною швидкості зварювання не впливає на показники міцності. При цьому можливе незначне зменшення (2-3%) міцності металу шва внаслідок погіршення умов дегазації розплавленого металу.

5. З ростом швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом від 30 до 300 см/хв як у сплавів системи легування Al-Cu-Mn, так у сплавів системи Al-Mg-Mn спостерігається перехід від структури з центральним кристалітом до дендритної структури. При швидкості зварювання 300 см/хв дендрити своїми більшими осями орієнтовані перпендикулярно до осі шва.

6. Встановлено, що зі збільшенням швидкості зварювання змінюється характер пористості в швах. При швидкості зварювання 30 см/хв зустрічаються поодинокі пори розміром до 60 мкм, зі збільшенням швидкості до 300 см/хв кількість пор в шві збільшується, але їх максимальні розміри зменшуються у 1,5 – 2 рази у порівнянні з розмірами пор при швидкості зварювання 30 см/хв. Збільшення кількості пор обумовлено зменшенням часу існування зварювальної ванни та зменшення об'єму розплавленого металу з ростом швидкості зварювання.

7. Встановлено, що при плазмо-дуговому зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів вплив збільшення швидкості зварювання спостерігається лише у термічно зміцнених сплавах. При цьому спостерігається збільшення міцності зварного з'єднання при зростанні швидкості зварювання до певної швидкості, а далі зменшення його до значень, навіть менших ніж при швидкості зварювання 40 см/хв. Так, у сплава Al-6%Cu-Mn спостерігається максимальне зростання міцності зварного на 9% при зростанні швидкості зварювання від 40 до 120 см/хв, після цього в інтервалі швидкостей від 120 до 300 см/хв спостерігається падіння показників міцності шва. Падіння міцності зварного з'єднання утворенням підрізів по границі шов зона сплавлення глибиною до 0,5 мм і глибше. Зменшення міцності металу шва обумовлено погіршенням дегазації металу шва.



8. Встановлено, що при зменшенні кількості міді в складі алюмінієвого сплаву (Al-3%Cu-1,8%Li) швидкість зварювання у меншій мірі впливає на зміну міцності зварного з'єднання (4 – 5 %), а трохи більше спостерігаються вплив на міцність металу шва, він зростає на 7% при збільшенні швидкості плазмо-дугового зварювання від 40 до 200 см/хв. Далі також спостерігається незначний спад показників міцності, обумовлений початком утворення підрізів та погіршенням дегазації металу шва.

9. Зварні з'єднання сплавів 1420 та 1460 товщиною 3 – 4 мм, отримані плазмо-дуговим зварюванням на підкладці з формуючою канавкою, мають більш високі показники руйнуючого напруження  $\sigma_p$  при позацентровому навантаженні (відповідно 401 МПа та 403 МПа), ніж зразки, отримані звичайним аргонодуговим зварюванням неплавким електродом (відповідно 304 МПа та 293 МПа). При цьому коефіцієнт інтенсивності напружень, енергетичний показник зародження тріщини, питома робота розповсюдження тріщини та ударна в'язкість металу шва на 30- 35% вищі, ніж при використанні звичайної дуги.

10. Випробування при позацентровому навантаженні зразків зварних з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів 1420 та 1460 товщиною 3 – 4 мм, отриманих плазмо-дуговим зварюванням на підкладці та в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя, показав, що більший рівень руйнуючого напруження мають з'єднання, отримані на підкладці (для сплаву 1420 – 401 МПа, а для сплаву 1460 – 403 МПа). Зразки отримані з наскрізним проникненням плазмового струменя, мають показники руйнуючого напруження 322 МПа та 349 МПа відповідно. При цьому вище значення для зразків, отриманих на підкладці, має показник енергії зародження тріщини, а зразки, зварені з наскрізним проникненням плазмового струменя, мають вищі показники питомої роботи розповсюдження тріщини та ударної в'язкості металу шва.

11. Встановлено, що при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом зниження показників напружено-деформованого стану різко знижується до певного значення швидкості зварювання. Після досягнення цієї швидкості зварюванні подальше збільшення у 2 і більше разів швидкості



зварювання викликає зменшення показників напружено деформованого стану лише на 2-3 %. Гранична швидкість, після досягнення якої не відбувається різке зменшення показників напружено-деформованого стану залежить від товщини зварюваного металу.

12. Розповсюдження температури в алюмінієвих листах також залежить від швидкості зварювання. Так для листів товщиною 2,0 мм різних систем легування зростання швидкості плазмо-дугового зварювання від 40 см/хв. до 120 см/хв. викликає зменшення температури на ділянках, віддалених від осі шва не більше 10 мм у 200-400°C. Зростання швидкості з 120 см/хв до 200 см/хв (ті ж самі 80 см/хв) викликає зменшення температури в тих самих точках не більше як на 40-50°C. Подальше збільшення швидкості зварювання до 300 см/хв викликає зменшення температури на 20-30°C.

13. Порівнюючи залежність міцності зварних з'єднань, показників напружено-деформованого стану та розподілу температури в залежності від швидкості плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом встановлено, що є певна швидкість зварювання, перевищення якої вже не викликає позитивний ефект збільшення міцності зварного з'єднання, зменшення його деформації та розміщення основного металу під впливом теплоти від стисненої дуги.

## РОЗДІЛ 6.

### РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ РІЗНОПОЛЯРНИМ АСИМЕТРИЧНИМ СТРУМОМ.

#### 6.1 Комп'ютерне моделювання конструкції та натурні випробування універсального плазмотрону для автоматичного шовного та точкового плазмо-дугового зварювання алюмінієвих сплавів.

Плазмотрон РWM-300, який використовували в дослідках по плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом, показав низьку стійкість плазмоутворюючих сопел особливо в діапазоні струмів вище 250 А. При цьому він розрахований на роботу на струмах до 300 А. Тому постала потреба в розробці більш потужного (до 400 А) зварювального плазмотрону з підвищеним ресурсом роботи плазмоутворюючих сопел.

За допомогою пакету програм для комп'ютерного моделювання Solidworks було розроблено комп'ютерну модель плазмотрона для зварювання з максимальним струмовим навантаженням до 400 А при ПВ 100% (рис. 6.1).

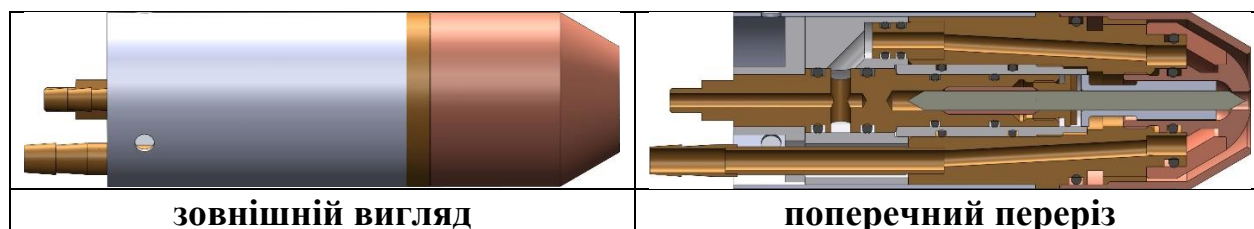


Рисунок 6.1 - Комп'ютерна модель плазмотрона для зварювання з підвищеною стійкістю плазмоутворюючого сопла.

Враховуючи складність конструкцій плазмотронів та високу вартість їх виготовлення необхідним етапом проектування є моделювання газодинаміки потоків плазмоутворюючого та захисного газів у контурах плазмотрона з метою прийняття рішення о працездатності моделі.

Для моделювання газодинаміки був використаний розрахунковий програмний пакет Solidworks Flow Simulation [91-93]. Даний пакет використовує для моделювання один із розділів гідродинаміки – механіку суцільних

середовищ, який включає сукупність фізичних, математичних та чисельних методів, призначених для обрахування характеристик потокових процесів.

Враховуючи наявність тертя та стискання середовища для побудови рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса (6-1), яка доповнена рівнянням для урахування турбулентності (6-2) [91-95]. На основі цих рівнянь створюється система диференціальних рівнянь другого порядку.

Рівняння неперервності, руху та енергії [93-95]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i$$

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial P}{\partial t} - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H$$

(6-1)

$$H = h + \frac{1}{2} u_i u_i \quad \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Рівняння для турбулентності енергії та дисипації турбулентності [92-94]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}) + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}((\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}) + S_\varepsilon$$

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$$

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad \sigma_B = 0.9$$

(6-2)

$$\mu_t = f_\mu C_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon}$$

$$f_\mu = (1 - \exp(-0.025 R_y))^2 \left(1 + \frac{20.5}{R_T}\right) \quad R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$$

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0.05}{f_\mu}\right)^3 \quad f_2 = 1 - \exp(-R_T^2) \quad C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad \sigma_k = 1$$

Результати моделювання показали (рис. 6.2 – 6.3), що при витратах плазмоутворюючого та захисного газу, притаманних процесу плазмо-дугового зварювання, потік плазмоутворюючого газу в каналі сопла і на виході із нього

залишається ламінарним, швидкість потоку газу достатня для формування стабільного стовпа плазми.

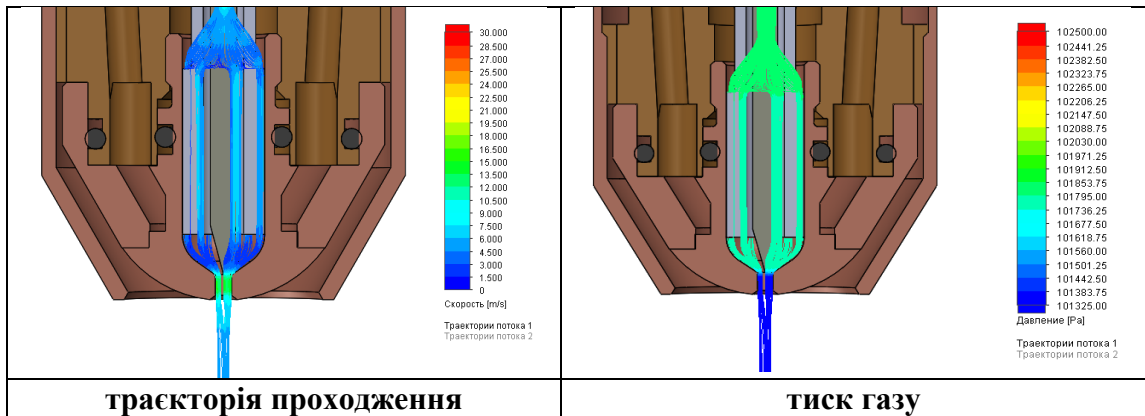


Рисунок 6.2 - Швидкість, тиск та траєкторія проходження газу в плазмoутворюючому соплі.

Потік захисного газу (рис. 6.3) на виході із сопла рухається з малою швидкістю, майже ламінарно, формуючи при цьому захисну область достатніх розмірів для надійного захисту рідкого та гарячого металу в зоні ведення процесу плазмо-дугового зварювання.

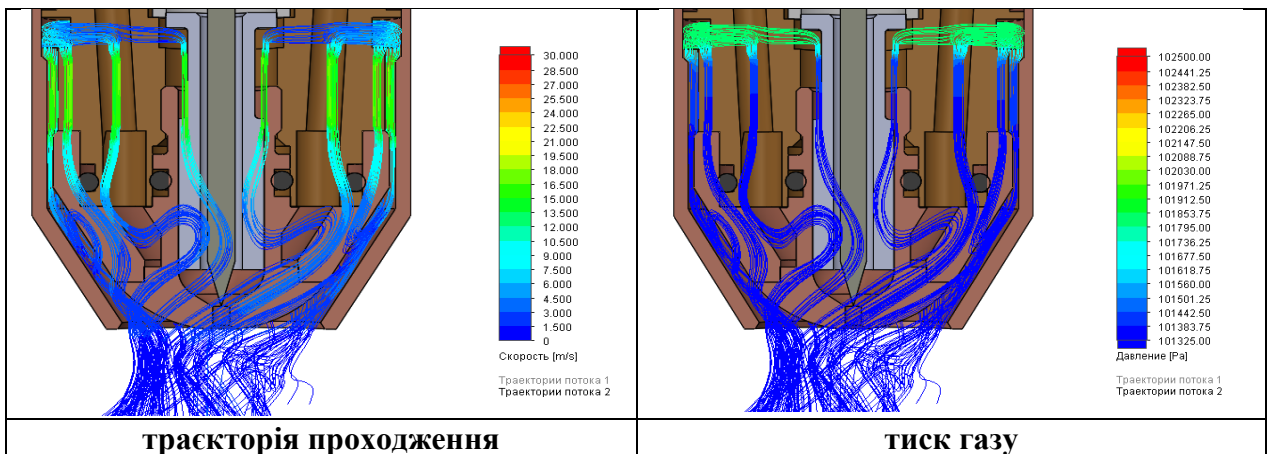


Рисунок 6.3 - Швидкість, тиск та траєкторія проходження газу в захисному соплі.

На основі аналізу даних комп'ютерного моделювання газових потоків була розроблена конструкторська документація та виготовлено робочу модель плазмотрону для плазмо-дугового зварювання (рис. 6.4).

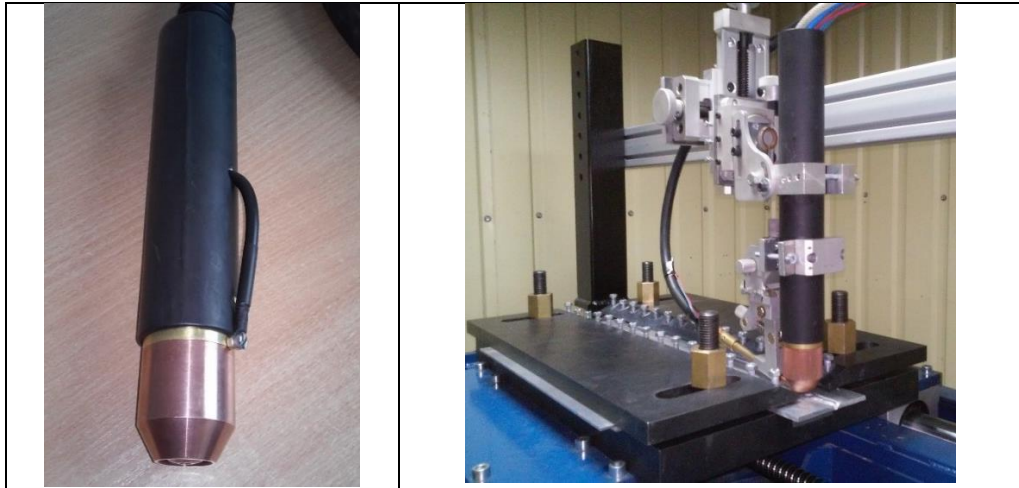


Рисунок 6.4 - Зовнішній вигляд плазмотрону для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом з максимальним струмовим навантаженням 400 А та збільшеним ресурсом роботи плазмоутворюючого сопла.

Дана конструкція плазмотрону може виступати базою для створення зварювального інструменту для інших способів дугового зварювання, таких як плазмо-дугове точкове зварювання з подаванням присадкового дроту (рис. 6.5) [96,97].

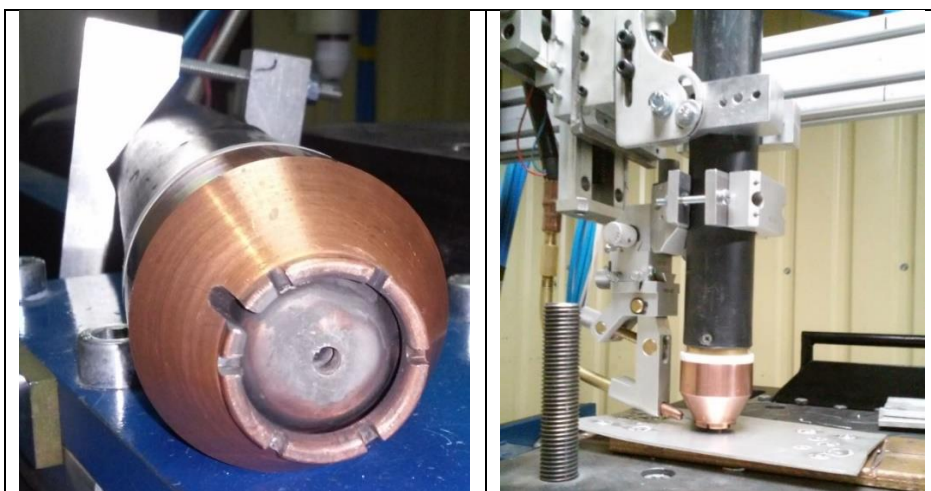


Рисунок 6.5 - Зовнішній вигляд плазмотрону зі спеціальним захисним соплом для плазмо-дугового точкового зварювання різнополярним струмом з подаванням присадкового дроту.

Також плазмотрон може входити до складу зварювального інструменту для виконання комбінованого зварювання стисненою дугою та плавким електродом (рис. 6.6), комбінованого процесу зварювання стисненою дугою та гібридним плазмо-дуговим зварюванням плавким електродом (рис. 6.7).

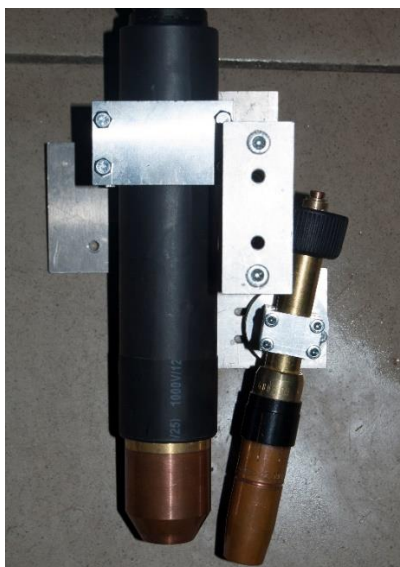


Рисунок 6.6 - Зовнішній вигляд інструменту для комбінованого зварювання стисненою дугою різнополярного струму та дугою плавкого електроду постійного струму оберненої полярності.

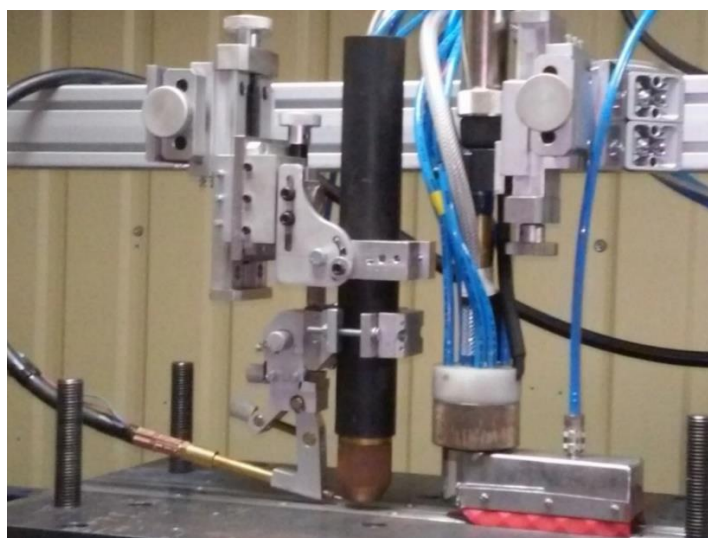


Рисунок 6.7 - Зовнішній вигляд інструменту для комбінованого зварювання стисненою дугою різнополярного струму та гібридним плазмо-дуговим зварюванням плавким електродом.



## **6.2. Розробка конструкції плазмового модулю для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання**

Плазмовий модуль є однією із головних складових установки для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом. В досліджах по дослідженню особливостей формування зварних з'єднань при різних швидкостях плазмо-дугового зварювання використовували модуль FPM австрійської фірми Fronius. Даний плазмовий модуль добре себе зарекомендував при роботі з джерелами струму для зварювання вольфрамовим електродом постійним або різнополярним струмом.

Основною даного модуля складає електронний регулятор-витратомір плазмоутворюючого газу. При роботі в автоматичному режимі по командах із зовнішньої системи керування даний регулятор може змінювати витрати плазмоутворюючого газу із витрат підпалювання чергової дуги до робочих витрат. Витрати чергової дуги можуть бути в 10 разів більші ніж витрати при зварюванні.

При роботі в складі установки для ручного плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом модуль FPM не має можливості переключати витрати і весь процес як підпалювання, так і зварювання має проходити при одному значенні витрат плазмоутворюючого газу. Така особливість погіршує умови роботи з даним плазмовим модулем у режимі ручного плазмо-дугового зварювання.

Другим недоліком модуля FPM є той факт, що з 2005 року він знятий з виробництва. Наступна модель зварювального модуля PlasmaModul 10 не підтримує роботу в режимі різнополярного струму. Також зняті з виробництва плазмові модулі фірм Castolin, ESAB та SBI.

Для впровадження у виробництво процесу плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом як в автоматичному, так і в ручному режимах роботи необхідно розробити та виготовити власний, відносно не дорогий плазмовий модуль.

Як прототип для розробки плазмового модуля використали плазмовий модуль FPM, але було внесено ряд змін на спрощення конструкції модуля та його собівартості. В процесі конструкторських розробок вирішили відмовитися від електронного регулятора витрат плазмоутворюючого газу та замінити його блоком поплавкових ротаметрів з газовими клапанами, що керуються програмованим реле. На рис. 6.8 наведена газо-пневматична схема плазмового модуля.

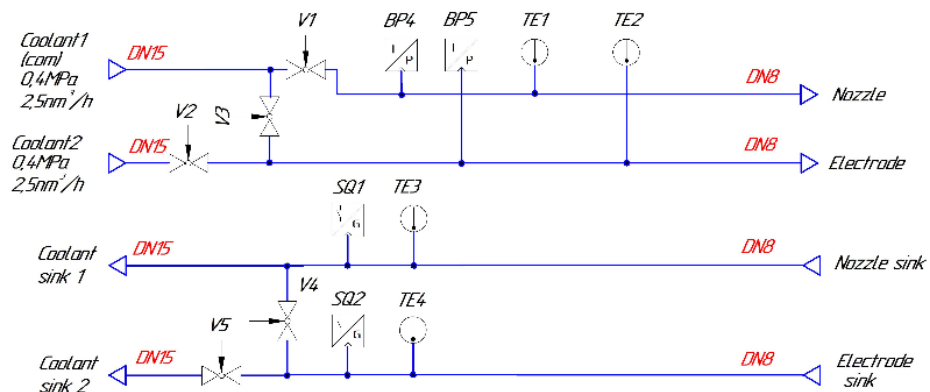


Рисунок 6.8 - Газо-пневматична схема плазмового модуля власної розробки.

Особливістю конструкції плазмового модуля є те, що у нього є два канали подавання плазмоутворюючого газу з двома різними витратами газу: канал подавання з витратами газу чергової дуги та канал подавання газу з витратами зварювання. Для кожного каналу є свій окремий ротаметр та свій газовий клапан. Витрати газу на обидвох ротаметрах виставляються попередньо до початку роботи без запалювання чергової дуги.

При запалюванні чергової дуги відкривається клапан каналу чергової дуги і чергова дуга горить при витратах чергової дуги, при підпалюванні основної стисненої дуги відбувається автоматичне переключення з каналу газу чергової дуги на канал газу зварювання. При зниканні сигналу основної стисненої дуги знову відбувається переключення на канал газу чергової дуги.

Датчик наявності основної дуги вбудовано в сам плазмовий модуль і він не потребує для переключення каналів подавання газу додаткових сигналів із зовнішніх систем керування. Переключення каналів можливе як при роботі



плазмового модуля в складі автоматичного комплексу для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом, так і в складі установки для ручного плазмо-дугового зварювання з автоматичним подаванням присадкового дроту.

На рис. 6.9 наведено зовнішній вигляд плазмового модуля для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання.



Рисунок 6.9 - Плазмовий модуль для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

Плазмовий модуль може бути підключений до джерела живлення вольфрамовим електродомлюбої потужності талюбоговиробника (рис. 6.10). Для підключення модуля не потрібно вносити будь які зміни в конструкцію джерела живлення для зварювання вольфрамовим електродом. При відключенні модуля здатність виконувати зварювання вольфрамовим електродом залишається.

Вибір витрат плазмоутворюючого газу та величини струму чергової дуги виконується вручну на передній панелі плазмового модуля. Підпалювання чергової дуги може виконуватися вручну з передньої панелі або через роз'єм по команді з системи керування.

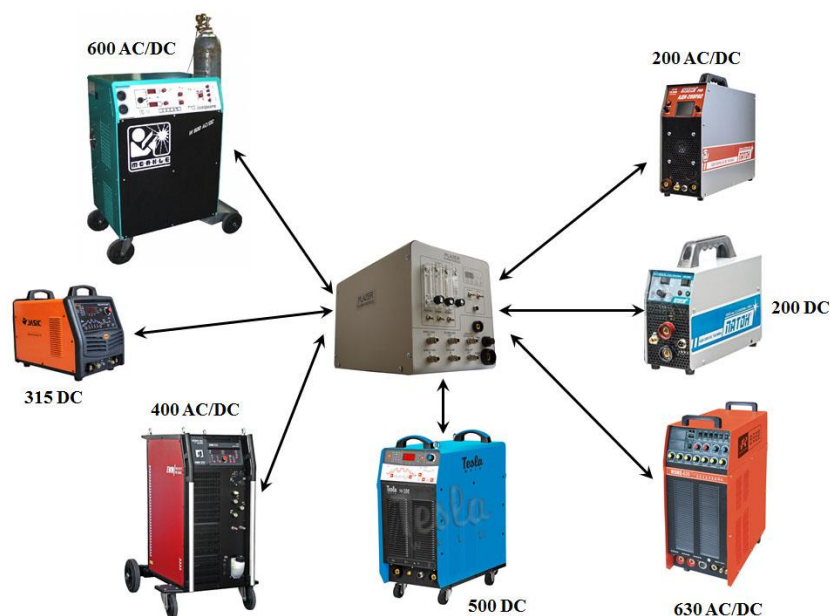


Рисунок 6.10 - Варіанти підключення плазмового модуля до джерел живлення для аргонодугового зварювання вольфрамовим електродом.

### 6.3. Перспективи використання стисненої дуги у комбінованих способах швидкісного дугового зварювання алюмінієвих сплавів

Одним із шляхів підвищення швидкості зварювання, зменшення витрат зварювальних матеріалів (дроту) є використання комбінованих процесів дугового зварювання. Так одним із перспективних комбінованих способів зварювання може бути спосіб плазма-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом та імпульсне-дугове зварювання плавким електродом постійним струмом оберненої полярності.

Поперечні шліфи наплавлень на зразки із сплаву АМгб товщиною 12 мм, виконаних імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та комбінованим плазма-дуговим зварюванням та зварюванням плавким електродом при однаковій швидкості зварювання та з досягненням однакової глибини проплавлення, приведені на рис. 6.11.

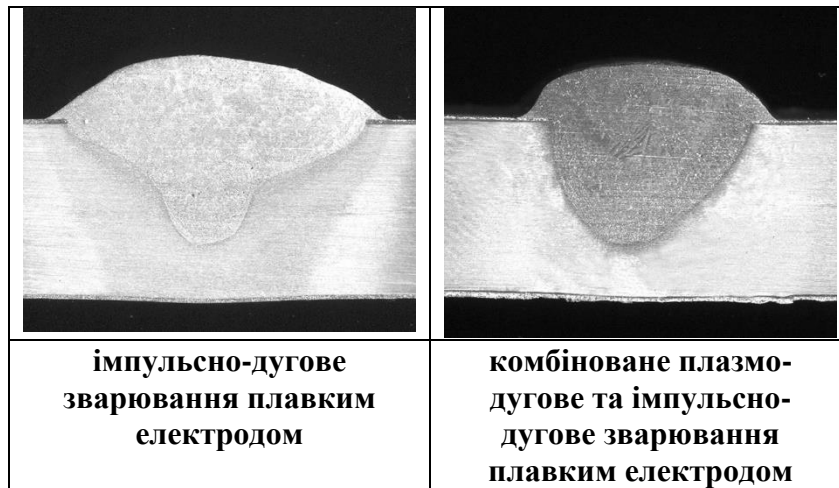


Рисунок 6.11 - Поперечні шліфи наплавлень на сплав АМг6 товщиною 12 мм, виконаних зі швидкістю 35 см/хв (21 м/год) різними способами дугового зварювання.

При однаковій глибині проплавлення ширина шва при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом становила 22,5 мм, що в 1,3 рази більше ніж при зварюванні комбінованим способом. Зросла також і висота підсилення шва (3,5 мм при комбінованому і 4,2 при ПЗЕ). Для отримання проплаву лише за рахунок дуги плавкого електроду необхідно було витратити в 1,5 рази більше дроту ніж при комбінованому способі.

Дослідження твердості проплавів на глибині 4 мм від поверхні зразка показали, що шви, отримані комбінованим способом (плазмо-дугове зварювання та зварювання плавким електродом без утворення спільної ванни), мають вищу твердість металу шва (87,5 HRB) ніж шви, отримані імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом (82 HRB). Більшу твердість має також границя сплавлення шва при комбінованому способі 88 HRB (85,5 HRB при імпульсно-дуговому зварюванні). В зоні термічного впливу дуги у зразках, отриманих лише дугою плавкого електроду, на відстані 8 мм від границі сплавлення спостерігається зменшення твердості до 79 HRB. Таке саме падіння твердості спостерігаються і у зразків, отриманих комбінованим способом, але на відстані 5 мм від границі сплавлення і мінімальне значення становить 81 HRB. Крім того попередній підігрів стисненою дугою та зварювання плавким електродом на менших значеннях струму при комбінованому зварюванні призводять до

скорочення на 4 мм загальної зони розміщення основного металу ніж при використанні лише одного плавкого електроду (рис. 6.12).

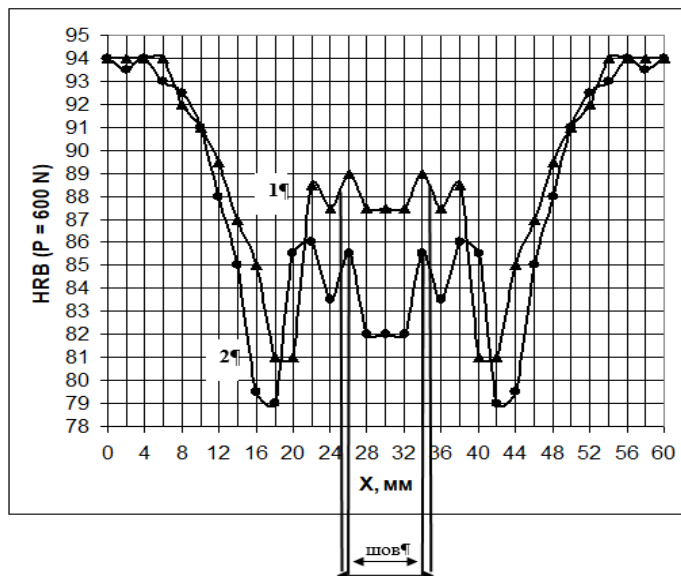


Рисунок 6.12 - Твердість наплавлень на сплав АМГб товщиною 12 мм, отриманих комбінованим зварюванням (плазмо-дугове різнополярним струмом + імпульсно-дугове плавким електродом) (1) і імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом (2).

Структурою металу шва зразків, отриманих комбінованим (плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом і імпульсно-дугове зварювання плавким електродом) способом, є рівновісні дендрити правильної форми. Виділення розташовані по границях зерен. Немає ділянок перегріву металу. При зварюванні лише одним плавким електродом в металі зразків присутні витягнуті спрямовані дендрити з окремими перегрітими ділянками. Виділення фаз також розташовані по границях зерен. Товщина виділень при використанні комбінованого способу і аргонодугового зварювання плавким електродом майже однакові (рис. 6.13).

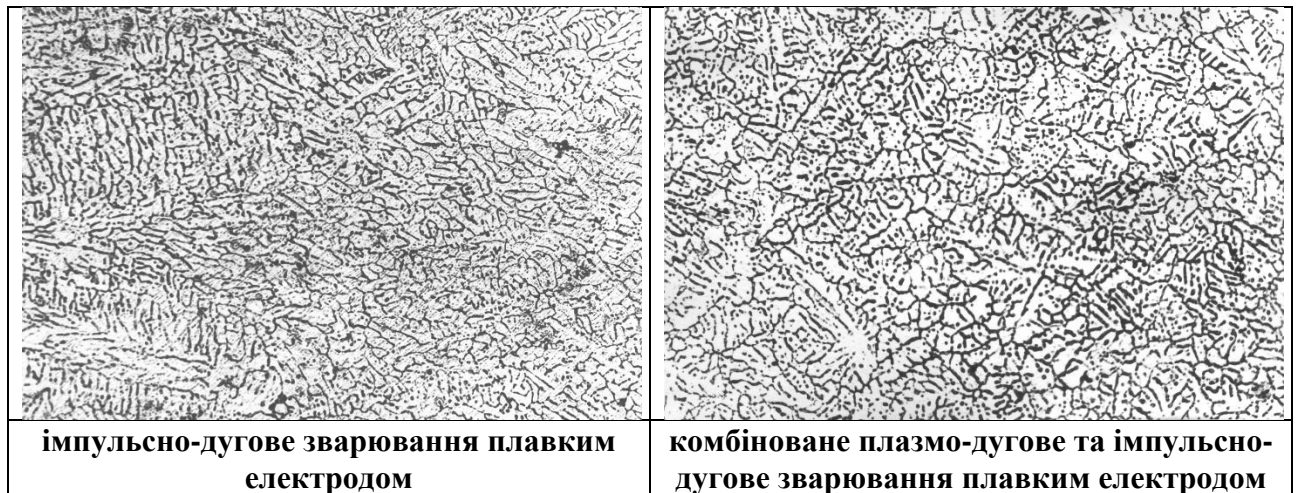


Рисунок 6.13 - Мікроструктура металу швів, отриманих на сплаві АМг 6 товщиною 12 мм двома способами дугового зварювання з однаковою швидкістю та за умови досягнення однакової глибини проплавлення; x 150.

У зразках, отриманих зварюванням плавким електродом в аргоні на границі зони сплавлення присутні дефекти у вигляді пор. Характер кристалізації ванни при ЗПЕ ускладнює процеси видалення бульбашок газу із розплаву. При зварюванні комбінованим способом такі дефекти не спостерігаються. Дуга плавкого електроду горить по вже закристалізованому шву, попередньо сформованому плазмо-дуговим зварюванням. Стиснена дуга створює умови для дегазації своєї зварювальної ванни. Плавкий електрод горить по ділянці, у якій вміст газу менший за основний метал за рахунок попереднього видалення із шва стисненої дуги. Крім того підігрів металу, який створює стиснена дуга сприяє видаленню бульбашок газу при зварюванні плавким електродом.

В зоні термічного впливу дуги на зразках, зварених імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом, на ділянці, яка прилягає до границі сплавлення, спостерігається оплавлення границь зерен. Включення фаз основних легуючих елементів збільшені у порівнянні з металом шва. Ділянка оплавлених границь зерен присутня на проміжку 1...1,2 мм від зони сплавлення (рис. 6.14). Рекристалізація зерен основного металу присутня на проміжку 12 мм від зони сплавлення.



Рисунок 6.14 - Мікроструктура зварного шва на сплаві АМг 6 товщиною 12 мм, отриманого імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом зі швидкістю зварювання 35 см/хв (21 м/год) та глибиною проплавлення зразка 8,2 мм.

У швах, отриманих комбінованим способом, на границі сплавлення з боку металу шва присутній прошарок дрібних зерен, який є характерним для зварювання концентрованими джерелами живлення (електронний промінь, плазмовий стумінь) (мал. 6.15.). Як і при зварюванні плавким електродом спостерігається оплавлення границь зерен, але трохи в меншій мірі. Включення фаз більших розмірів ніж у металі шва, але менші за аналогічні ділянки зразків плавкого електрода. Ділянка оплавлених границь зерен присутня на проміжку 0,5...0,6 мм від зони сплавлення. Розміри рекристалізованих зерен основного металу при комбінованому способі менші ніж при використанні лише одного плавкого електрода. Протяжність зони рекристалізації складає 10 мм від границі сплавлення.

На рис. 6.16 наведено поперечні шліфи зварних з'єднань листів товщиною 5 мм із сплаву АМг6, отриманих імпульсно-дуговим та комбінованим плазмо-дуговим зварювання різнополярним струмом та імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом.

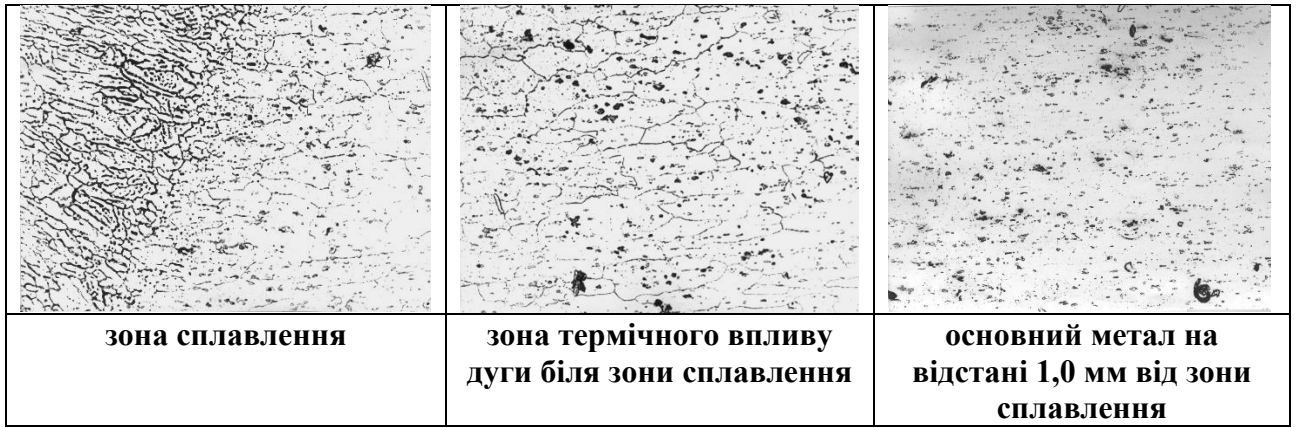


Рисунок 6.15 - Мікроструктура зварного шва на сплаві АМг 6 товщиною 12 мм, отриманого комбінованим способом зварювання (плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом та імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом) зі швидкістю зварювання 35 см/хв (21 м/год) та глибиною проплавлення зразка 8,2 мм.



Рисунок 6.16 - Поперечні шліфи зварних з'єднань листів товщиною 5 мм із сплаву АМг6, виконаних зі швидкістю 60 см/хв (36 м/год) різними способами дугового зварювання.

#### **6.4. Приклади використання результатів роботи для створення промислового обладнання для виготовлення конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням VPPA зварювання**

На основі проведених досліджень особливостей формування зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів за допомогою плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом було розроблено основні вимоги та перелік необхідного

обладнання для створення автоматизованого та роботизованого комплексу обладнання для плазмо-дугового зварювання.

В перелік обов'язкового зварювального та механічного обладнання має входити для створення комплексу для автоматичного зварювання:

1. Джерело живлення для аргонодугового вольфрамовим електродом зварювання постійним та різнополярним струмом;
2. Плазмовий модуль з можливістю роботи на різнополярному струмі.
3. Механізм подавання присадкового дроту.
4. Блок автоматичного охолодження зварювального плазмотрону.
5. Зварювальний плазмотрон на 400 А з системою позиціонування присадкового дроту та подовженим соплом додаткового газового захисту.
6. Система керування процесом зварювання з оригінальним програмним забезпеченням.
7. Установа для імпульсно-дугового зварювання плавким електродом (може вводиться в комплекс обладнання як додаткова опція для реалізації процесів комбінованого плазмо-дугового зварювання та імпульсно-дугового зварювання плавким електродом.
8. Механізм переміщення зварної деталі (вибирається із специфіки виробництва замовника). Може бути у вигляді спеціальної установки для зварювання повздовжніх швів на обичайці, зварювальна колона, зварювальні ролики, зварювальний маніпулятор-обертач.

На основі таких вимог було створено універсальний комплекс дугового зварювання (рис. 6.17) [98-101]. Даний комплекс обладнання може працювати в таких режимах:

- аргонодугове зварювання постійним та різнополярним струмом з подаванням присадкового дроту;
- імпульсно-дугове зварювання плавким електродом в середовищі захисних газів;
- плазмо-дугове зварювання потісним та різнополярним струмом з подаванням присадкового дроту;



- комбіноване плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом та імпульсно-дугове зварювання плавким електродом без утворення спільної ванни.



Рисунок 6.17 - Універсальний комплекс обладнання для автоматичного дугового зварювання, включаючи плазмо-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом та комбіноване плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом та імпульсно-дугове зварювання плавким електродом.

Управління роботою всіх електричних компонентів, що входять до складу універсального комплексу виконували за допомогою системи керування з програмним забезпеченням розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона (рис. 6.18). Даний комплекс обладнання поставлено в КНР в провінцію Гуандун.

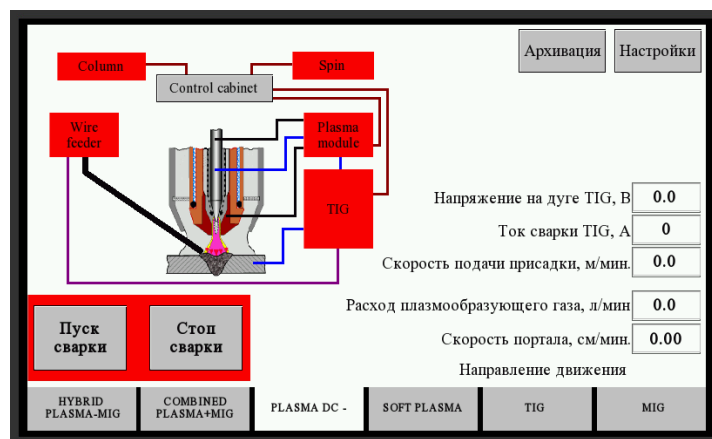


Рисунок 6.18 – Вікно програми керування процесом плазмо-дугового зварювання на операторській панелі шафи системи керування комплексом обладнання для автоматичного дугового зварювання.

При розробці вимог до створення роботизованого комплексу обладнання для плазмо-дугового зварювання необхідно враховувати вимоги як до самого процесу плазмо-дугового зварювання з можливими змінами просторового положення деталей та режиму зварювання. Так на відміну від процесу автоматизованого зварювання, де функція програмна зміна параметрів зварювання в процесі роботи не обов'язкова, для роботизованого зварювання необхідною умовою придатності зварювальних джерел живлення є можливість зміни параметрів плазмо-дугового зварювання (зварювальний струм, витрати плазмоутворюючого газу, швидкість подавання присадкового дроту) за встановленою програмою. Для цього необхідно використовувати джерела живлення зі шинним інтерфейсом зв'язку з контролером робота. На основі даних вимог та враховуючи досвід експлуатації як власного лабораторного зварювального комплексу, так і універсального комплексу для автоматичного дугового зварювання було розроблено лабораторний роботизований комплекс для досліджень особливостей дугового зварювання неплавким електродом, включаючи плазмо-дугове зварювання різнополярним струмом, та виготовлення дрібно-серійних партій деталей (рис. 6.19).

До складу роботизованого комплексу для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом входить:

- джерело живлення для зварювання різнополярним асиметричним струмом з шинним інтерфейсом для зв'язку з контролером робота;
- плазмовий модуль з шинним інтерфейсом для зв'язку з контролером робота;
- механізм подавання присадкового дроту;
- антропоморфний робот;
- двохосьовий маніпулятор-обертач;
- контролер робота;
- плазмотрон для шовного зварювання з системою позиціонування положення присадки;

- пневматична система притискання плазмотрона для процесу плазмо-дугового точкового зварювання;
- плазмотрон для плазмо-дугового точкового зварювання з подаванням присадкового дроту;
- складально-зварювальний стіл;
- платформа для монтажу робота та зварювального обладнання.

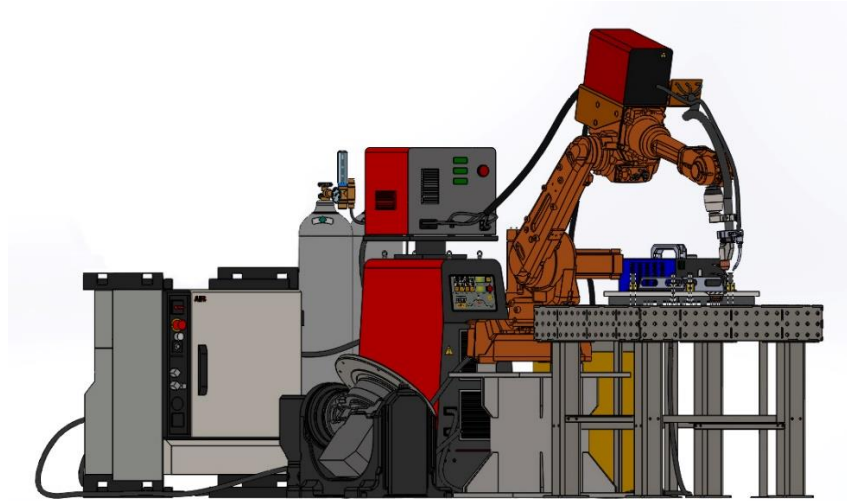


Рисунок 6.19 - Комп'ютерна модель лабораторного роботизованого комплексу плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом.

На основі даних вимог було розроблено, виготовлено, змонтовано та запущено в експлуатацію роботизований комплекс для плазмо-дугового зварювання постійним і різнополярним струмом в Науково-дослідний центр Зони спеціального розвитку м. Санменся (КНР) (рис. 6.20).

Із залученням даного комплексу обладнання було виготовлено партію деталей із алюмінієвого сплаву 5083H-113 (Al-5Mg-Mn) з товщиною стінки 5 мм та передано замовнику для подальших досліджень.



Рисунок 6.20 - Лабораторний роботизований комплекс плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом з подаванням присадкового дроту.

### **Висновки до розділу 6.**

1. За допомогою програмних пакетів було розроблено комп'ютерну модель плазмотрона для зварювання на струмах до 400 А. Проведено моделювання проходження плазмоутворюючого та захисного газів по каналах плазмотрона, встановлено що для даної конструкції забезпечується ламінарний потік плазмоутворюючого газу в діапазоні робочих витрат аргону від 0,2 до 5,0 л/хв. Також забезпечується нормальний ламінарний потік газу із захисного сопла з витратами аргону у 35 л/хв. На основі креслень виготовлено робочу модель плазмотрону, яка біла вдало випробувана при плазмо-дуговому зварюванні різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів товщиною від 1,0 до 10,0 мм.

2. Розроблена конструкція плазмотрону для плазмо-дугового зварювання може слугувати базою для розробки зварювального інструменту для автоматичного точкового плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом

з подаванням присадкового дроту, комбінованого плазмо-дугового зварювання та імпульсно-дугового зварювання плавким електродом, також інших комбінованих та гібридних технологій на основі стисненої дуги різнополярного асиметричного струму.

3. Розроблено конструкцію та випробувано дослідно-промисловий зразок плазмового модуля для комплектації установок для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом. Даний модуль може підключатися до джерела живлення для зварювання неплавким електродом любого виробника без внесення будь-яких змін в конструкцію джерела живлення. Дана конструкція плазмового модуля може бути основою для створення установок для автоматичного або ручного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом різної потужності в залежності від завдань та вимог замовника. При цьому для плазмо-дугового зварювання можна використовувати особливі функції джерел живлення для зварювання неплавким електродом такі, як модульований струм, зварювання різнополярним струмом + імпульси постійного струму прямої полярності, зміна форми хвилі струму різнополярного струму.

4. Показано можливість створення комбінованого плазмо-дугового різнополярним струмом та імпульсно-дугового плавким електродом способу зварювання. Встановлено, що при однаковій глибині проплавлення з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом при комбінованому способі зварювання витрачається на 30% менше електродного дроту. Шви характеризуються відсутністю газових пор та більш дрібною структурою металу шва і зони сплавлення.

5. Розроблено методику виготовлення автоматизованих та роботизованих комплексів для плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом алюмінієвих сплавів. Поставлено для комплекси обладнання для плазмо-дугового зварювання різнополярним струмом алюмінієвих сплавів в КНР.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ:

1. Виконане дослідження фізико-металургійних особливостей процесів плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (VPPAW) алюмінієвих сплавів показало, що додатковими шляхами окрім збільшення глибини проплавлення алюмінієвих сплавів шляхом збільшення сили струму, є використання частоти різнополярного струму 150 - 200 Гц та збільшення тривалості протікання струму при прямій полярності до 75% від загального часу періоду зварювання.

2. Встановлено, що формування зварного з'єднання в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя дозволяє зменшити величину зварювального струму на 40-45 А у порівнянні з плазмо-дуговим зварюванням на підкладці. При цьому зменшується ширина зварного шва. Для підвищення стабільності горіння стисненої дуги в режимі наскрізного проникнення плазмового струменя необхідно збільшувати частоту різнополярного асиметричного струму до 150 Гц.

3. У разі зварювання у вертикальному положенні «на підйом» з підкладкою погона енергія VPPAW на 10...15% менша, ніж при аналогічному зварюванні в нижньому положенні, проте кращі механічні властивості з'єднань досягаються при зварюванні в нижньому положенні.

4. Встановлено, що з'єднання алюміній-літійових сплавів, отримані плазмо-дуговим зварюванням різнополярним асиметричним струмом, мають вищі на 10-30% показники міцності при статичному та позацентровому навантаженні, ніж зразки, отримані аргонодуговим зварюванням неплавким електродом. При цьому вищі показники мають зразки, отримані з використанням підкладок.

5. Зростання швидкості зварювання при VPPAW обумовлює підвищення показників міцності зварного з'єднання. Але таке зростання має певне «пікове значення» швидкості зварювання, після досягнення якого спостерігається спад міцності, обумовлений погіршенням умов формування та дегазації шва.

6. Залишкові напруження в зварних швах мають тенденцію до зниження при зменшенні погонної енергії з ростом швидкості зварювання. Таке зменшення напружень має дві характерних ділянки – стрімкого зниження та повільного зниження на 2-3%. Швидкість зварювання, при якій починається перехід від

стрімкого до ледь помітного зниження напружень в першу чергу залежить від товщини з'єднуваного металу.

7. Встановлено, що більш ефективним, порівняно з модуляцією частоти струму, шляхом мінімізації утворення внутрішніх пор в швах при VPPAW алюмінієвих сплавів є імпульсне (з частотою 4-6 Гц) подавання плазмоутворюючого газу за законом неперервної прямокутної хвилі із співвідношенням максимальних витрат до мінімальних 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв.

8. Встановлено, що вольт-амперна характеристика стовпа стисненої дуги при VPPAW має чітку тенденцію на прямолінійне збільшення напруги з ростом величини струму, в діапазоні робочого струму 100-200 А напруга прямої полярності менша від напруги оберненої полярності на сталу величину, при збільшенні струму від 200 до 350 А різниця в напрузі зменшується до 25% за рахунок більш стабільного горіння дуги при прямій полярності.

9. Розроблено методичку розрахунку параметрів режиму зварювання з урахуванням розмірів швів та теплофізичних властивостей алюмінієвих сплавів.

10. Проведено розробку комп'ютерної моделі конструкції плазмотрону, виконано комп'ютерне моделювання газових потоків та виготовлено дослідний зразок плазмотрону.

11. Розроблено плазмовий модуль для комплектування комплексів обладнання для ручного та автоматичного плазмо-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом.

12. Результати роботи впроваджені в виробництва серійних зразків обладнання для VPPAW в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) для ручного, автоматичного (роботизованого) зварювання, із яких два комплекси в даний час експлуатуються на підприємства та організаціях КНР, Встановлено, що зварені за розробленими технологіями шви мають вартість погонного метру на 1,3 рази меншу за вартість аналогів, одержаних MIG зварюванням, та 2,2 рази меншу - одержаних TIG зварюванням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Никонов Г.Д. Сварка сплавов АМг5В и АМг6 в смеси аргона и гелия. *Сварочное производство*. 1965. № 1. С. 24-26.
2. Влияние технологических параметров на качество металла сварных соединений сплава АМг6 / Терентьев И.М., Слюсаревский В.В., Калиниченко Б.Г. и др. *Сварочное производство*. 1971. № 4. С. 36-37.
3. Стебловский Б.А., Лобанов Л.М. Влияние формы шва на прочность сварных соединений из сплава АМг6. *Автоматическая сварка*. 1974. №7. С. 44-47.
4. Устиловский С.Я., Игнатъев В.Г., Порицкий М.П., Рабкин Д.М., Шехирев В.И. Соппротивление усталости сварных соединений сплавов 1915, АМг5 и АМг2. *Автоматическая сварка*. – 1977. - №10. - с. 41-43.
5. Фатеев Ю.Ф., Воропай Н.М., Вржосек Г.Г., Рабкин Д.М., Никольский А.В. Определение толщины и строения окисной пленки на алюминиевых сплавах. *Автоматическая сварка*. 1969. № 11. С. 71-72.
6. Скачков Ю.Н., Новиков О.М., Мамон М.Д. Причины появления окисных плен в сварных швах сплава АМг6. *Сварочное производство*. 1973. № 4. С. 27-29.
7. Склонность легких сплавов к образованию окисных включений при сварке. Сушков В.Н., Скачков Ю.Н., Новиков О.М. и др. *Сварочное производство*. 1975. №5. С. 23 - 24.
8. О некоторых факторах, влияющих на образование окисных включений в сварных швах сплава АМг6. Зубриенко Г.Л., Тэненбаум Ф.З., Петрованов В.М. и др. *Сварочное производство*. 1977. № 5. С. 24 - 27.
9. Короткова Г.М., Славин Г.А., Филиппов М.А. Исследование процесса сварки дугой переменного тока прямоугольной формы. *Сварочное производство*. 1971. № 10. С.4-6.
10. Аргоно-дуговая сварка алюминиевого сплава 01420 разнополярными прямоугольными импульсами тока. Ищенко А.Я., Чаюн А.Г., Мишенков В.А. и др. *Автоматическая сварка*. 1978. №10. С.48-50.



11. Лапин И.Е., Косович В.А., Савинов А.В. Об устойчивости дуги при сварке неплавящимся электродом тонколистового алюминия и его сплавов / *Сварочное производство*. 1996. № 10. С. 17-19.
12. Ищенко А.Я., Покляцкий А.Г., Яворская М.Р. Предотвращение включений оксидной пленки в швах при аргоно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 1989. № 6. С.38-41.
13. Ищенко А.Я., Покляцкий А. Г., Яворская М.Р., Легостаев В.А., Стемковский Е.П. Влияние асимметрии разнополярного тока прямоугольной формы на параметры швов при аргоно-дуговой сварке сплава Амгб. *Автоматическая сварка*. 1990. № 1. С. 26-28.
14. Покляцкий А.Г., Ищенко А.Я., Бессонов А.С., Ржанов Б.П. Предотвращение образования включений оксидной пленки в швах при сварке алюминиевых сплавов пульсирующей дугой. *Автоматическая сварка*. 1991. № 7. С. 43-47.
15. Покляцкий А.Г. Особенности образования макровключений оксидной пленки в металле швов алюминиевых сплавов (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2001. № 3. С. 38-40.
16. Рязанцев В.И., Славин Г.А., Овчинников В.В. Образование и разрушение оксидных пленок на алюминиевых сплавах. *Сварочное производство*. 1991. №1. С. 31-32.
17. Лабур Т.М., Бондарев Андр.А., Лозовская А.В., Машин В.С., Покляцкий А.Г. Влияние способа сварки на сопротивление разрушению соединений алюминево-литиевых сплавов 1420 и 1460. *Автоматическая сварка*. 2001. №7. С. 12-16.
18. Лабур Т.М. Влияние единичных внутренних дефектов на сопротивление разрушению сварных соединений алюминево-литиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2001. №9. С. 21-23.
19. Лабур Т. М., Ищенко А. Я., Таранова Т. Г., Костин В.А., Григоренко Г. М. Особенности зарождения и распространения трещин в условиях внецентренного растяжения сварных соединений алюминево-литиевого сплава 1441. *Автоматическая сварка*. 2005. № 11. С. 11-16.

20. Лабур Т.М. Прочность и особенности разрушения сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов при низкой температуре. *Автоматическая сварка*. 2011. №5. С. 18-25.
21. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Тепловая эффективность процесса сварки плазменной дугой переменного тока. *Автоматическая сварка*. 1967. № 11. С. 27–30.
22. Дудко Д.А., Лакиза С.П., Виноградский Ф.М., Корниенко А.Н. Сварка сжатой дугой на переменном токе. *Автоматическая сварка*. 1966. №. 68. С. 47–49.
23. Дудко Д.А., Корниенко А.Н. Термическая эффективность процесса плавления при сварке плазменной дугой. *Автоматическая сварка*. 1968. № 4. С. 18-20.
24. Малин В.Е. Исследование тепловых характеристик сжатой дуги переменного тока. *Сварочное производство*. 1969. № 9. С. 3-5.
25. Измерение температуры в сжатой дуге переменного тока. Фетисов Г.П., Кипаренко Г.Ф., Мордвинцев Л.А. и др. *Сварочное производство*. 1970. № 6. С. 1-2.
26. Быховский Д.Г., Беляев В.М. Энергетические характеристики плазменной дуги при сварке на обратной полярности. *Автоматическая сварка*, 1971. №5. с. 27-30.
27. Гарбуль А.Ф. Влияние параметров режима на формирование шва при сварке на весу стыковых соединений плазменной дугой. *Сварочное производство*. 1971. №8. С. 28–30.
28. Быховский Д.Г., Данилов А.И. Возможности плазменной дуги как универсального способа сварки цветных металлов, нержавеющей и жаропрочных сталей. *Сварочное производство*. 1973. №5. с. 14-16.
29. Демянцевич В.П., Соснин Н.А. Точность поддержания режима при сварке плазменной дугой. *Сварочное производство*. 1974. № 8, с. 20-21.
30. Демянцевич В.П., Соснин Н.А. Некоторые пути повышения эффективности плазменной дуги. *Сварочное производство*. 1974. №4. С. 15-17.
31. Poth L. Plasmaschweissen von Aluminiumlegierungen. *DVS-Berichte*, 1977. № 43. S. 79 - 80.

32. Ranke P. Vergleich zwischen WIG – und Plasmaweissen einschliesslich der Impulstechnik. *DVS-Berichte*. 1977. №43. S. 72-78.
33. Wanschen W. Plasmalichtbogen – bewahrtes Werkzeug der Schweisstechnik. *Praktiker*. 1979. 31. №4. S. 96-97.
34. Trardach K. Verhindern von Fehler beim Plasmaschwessen. *Bänder – Bleche – Rohre*. 1983. 24. № 10. S. 284-287.
35. Knab M. Aluminium mit Pluspol an der Elektrode Plasmaschweissen. *Praktiker*. 1983. 35. № 10. S. 469-470.
36. Ruge J., Lutze P. Eignung von Aluminiumdruckguss zum Plasma und Elektronenstralsweißen – Gasgehalt von Druckguss und Folgen für das Schweißen. *Schweißen und Schneiden*. 1989. Bd. 41. №4, S. 225-229.
37. Сычев А.А., Белова К.И. Ручная плазменная сварка алюминия постоянным током обратной полярности. *Химическое и нефтехимическое машиностроение*. 1979. № 11. С. 33.
38. Сычев А.А., Егоров В.А., Белова К.И. Ручная и механизированная плазменная сварка технического алюминия. *Актуальные проблемы сварки цветных металлов* : сб. мат. докл. 1-й Всесоюзной конференции, Киев, 1978. Киев, 1980. С. 154-157.
39. Некрасов С.А., Салкин Г.П., Бычков А.С., Астахин В.И. Применение плазменно-дуговой сварки при производстве криогенного оборудования из алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*. 1976. № 4. С. 16-17.
40. Сычев А.А., Елпатов А.В., Провотор В.Г., Полозенко О.Н. Опыт внедрения плазменной сварки технического алюминия. *Химическое и нефтехимическое машиностроение*. 1984. №5 С. 34- 6.
41. Тыткин Ю.М., Кузмин Г.С. Плазменно-дуговая сварка алюминия и его сплавов на весу. *Сварочное производство*. 1974. №10. С. 27-28.
42. Ищенко Ю.С. Сварка неповоротных стыков труб без разделки кромок проникающей дугой/ Ищенко Ю.С., Букаров В.А., Пищик В.Т.// *Сварочное производство*, 1975, №5, с. 17 – 18.
43. Орлов М.П. Плазменно-дуговая сварка алюминиевых сплавов без формирующих подкладок/ Орлов М.П., Шиганов Н.В., Кузнецов Е.Н., Картышева Т.С.// *Сварочное производство*, 1975, №11, с. 23 – 24.

44. Соснин Н.А., Щипков М.Д. Исследование сварки сжатой дугой тонколистовых соединений из сплава АМг6. *Автоматическая сварка*. 1977. №12. С. 19–20.
45. Букаров В.А., Ищенко Ю.С., Корнеев Ю.Н., Пищик В.Т. Особенности проникания струи плазмы на первой стадии процесса сварки. *Сварочное производство*. 1978. № 4. С. 2-4.
46. Соснин Н.А., Шемонаев Л.Ф. Формирование шва при сварке проникающей дугой. *Автоматическая сварка*. 1981. № 11. с. 8–11.
47. Ищенко Ю.С., Букаров В.А., Пищик В.Т. Оценка величины проплава при сварке неповоротных стыков труб плазменной проникающей дугой. *Сварочное производство*. 1981. № 3. С. 10-11.
48. Соснин Н.А. Оптимизация режимов плазменной сварки проникающей дугой. *Автоматическая сварка*. 1987. №6. С. 38-41.
49. Соснин Н.А. Федотов Б.В. Формирование ванны и тепловая обстановка при плазменной сварке проникающей дугой. *Сварочное производство*. 1989. №9. С. 35-37.
50. Шаратов М.Г., Ерышов О.Н., Куражев А.А. О разрушении окиси алюминия при сварке проникающей дугой. *Сварочное производство*. 1984. №9. С. 1-2.
51. Ruge J., Lutze P. Eignung von Aluminiumdruckguß zum Plasma- und Elektronenstrahlschweißen – Gasgehalt von Druckguß und Folgen für das Schweißen. *Schweissen und Schneiden*. 1989. 41. № 5. S. 225-229.
52. Ruge J., Lutze P., Nörenberg K. Eignung von Aluminiumdruckguß zum Plasma- und Elektronenstrahlschweißen – Entgasungsmechanismen und Nahtgüte. *Schweissen und Schneiden*. 1989. 41. № 7. S. 327-332.
53. Dilthey U., Kabatnik L. Plasmaschweißen von Aluminiumlegierungen mit Pluspolung in hohen Leistungsberichen. *Schweissen und Schneiden*. 2001. 53. №3. S. 156-163.
54. Овчинников В.В., Дриц А.М., Растопчин Р.М. Особенности сварки листов из алюминнииевого сплава 1565чМ при производстве бензовозов. *Машиностроение и инженерное образование*. 2013. №4. С. 28-36.

55. Овчинников В.В., Дриц А.М., Растопчин Р.М., Гуреева М.А. Современные тенденции развития технологии плазменной сварки алюминиевых сплавов. *Машиностроение и инженерное образование*. 2016. № 3. С. 10-23.
56. Study on the square wave alternating plasma arc welding for aluminum alloys/ Dong S.S., Yang S.Q., Li T.W. a. o.// Harbin. – 1985. - 6 p. (International Institute of Welding; Doc. IV-404-85).
57. Tomsis M., Barhorst Keyhole plasma arc welding of aluminum with variable polarity power. *Welding Journal*. 1984. 63. № 3. P. 25-32.
58. Variable polarity plasma arc reduced welding cost. *Welding and Metal Fabrication*. 1984. 52. № 7. P. 220.
59. Хирохиса Мацуяма. Сварка алюминия плазмой переменного тока. *Есэцу гидзюцу=Welding Technology*. 1987. 35. № 11. С.60 - 64.
60. Martikainen J. K. Plasma arc keyhole welding of aluminum alloys// *Welding World*, 1994, 34, p. 391-392.
61. Marques R.E., McClure J.C., Nunes A.C. Front side keyhole detection in aluminum alloys. *Welding Journal*. 1992. 71. № 5. P. 49-52.
62. Halmy E., Fostervoll H., Ramsland A.R. New applications of plasma keyhole welding. *Welding World*. 1994. 34. P. 285-291.
63. Effect of weld gas on melt zone size in VPPA welding on Al 2219/ Martines B. L., Natlock C., Marques R.E. and o. *Welding Journal*. 1994. 74. №10. P. 52-55.
64. Zhang Y.M., Zhang S.B. Observation of the keyhole during plasma arc welding. *Welding Journal*. 1999. 78. №2. P. 53 - 58.
65. Zhang B., Wang H.J., Wang Q.J., Kovacevic R. Control for weld penetration in VPPAW of aluminium alloys using the front weld pool image signal. *Welding Journal*. 2000. № 12. P. 363-371.
66. Torres M.R., McClure J.C., Nunes A.C., Gurevitch A.C. Gas Contamination Effects in Variable Polarity Plasma Arc Welded Aluminum. *Welding Journal*. 1992. № 4. P. 123s - 132s.
67. Srivatsan T. S., Sudarshan T.S. Welding of Lightweight Aluminum-Lithium Alloys. *Welding Journal*. 1991. № 7. P. 173s - 185s.

68. Запарованый А.Г., Игнатченко Г.Н., Яринич Л.М., Брик Е.Ю. Источник питания дежурной дуги для плазменной сварки алюминия разнополярным током. *Автоматическая сварка*. 1989. №9. С. 73-74.
69. Сварка алюминиевых сплавов плазменной дугой на переменном токе. Е.Ю. Брик, И.В. Довбищенко, А.П. Запарованный, А.Г. Покляцкий и др. *Автоматическая сварка*. 1992. № 4. С. 52-53.
70. Ищенко А.Я. Особенности применения высокопрочных алюминиевых сплавов для сварных конструкций. *Автоматическая сварка*. 2004. №9. С. 16-26.
71. Mi G. Finite element analysis of welding residual stress of aluminum plates under different butt joint parameters / G. Mi, C. Li, Z. Gao, D. Zhao, J. Niu // *Engineering Review*. – 2014. - Vol. 34.- Issue 3. – P. 161 - 166.
72. Yana Zhaoyang, Chena Shujun, Jianga Fan, Huang Ning, Zhang Suolai. Material flow in variable polarity plasma arc keyhole welding of aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. 36. P. 480 – 486.
73. Shujun Chen, Bin Xu, Fan Jiang. Blasting type penetrating characteristic in variable polarity plasma arc welding of aluminum alloy of type 5A06. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. 118. P. 1293 – 1306.
74. Zhaoyang Yan, Shujun Chen, Fan Jiang, Ooi Tian, Ning Huang, Suolai Zhang. Weld properties and residual stresses of VPPA Al welds at varying welding positions. *Journal of Material Research and Technology*. 2020. Volume 9. Issue 3. P. 2892-2902.
75. Ищенко А.Я. Кинетика превращений при сварке термически упрочненного алюминиевого сплаву 1201. *Автоматическая сварка*. 1980. № 1. С. 29-31.
76. Ищенко А.Я., Чаюн А.Г., Илюшенко Р.В. Свариваемость и технология дуговой зварювання высокопрочного сплаву системы алюминий - магний – литий. *Автоматическая сварка*. 1985. № 10, С. 47-49.
77. Лещинер Л.Н., Латушкина Л.В., Федоренко Т.П. Ресурсный высокотехнологичный сплав 1441 пониженной плотности системы Al-Cu-Mg-Li. *Технология легких сплавов*. 1994. № 3-4. С. 38-42.

78. Бирд Р.К., Дайкус Д.Л., Фридляндер И.Н., Сандлер В.С. Алюминиево-литиевый сплав 1441 как перспективный материал для фюзеляжа. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 8. С. 7-10.
79. Третьяк Н.Г., Илюшенко Р.В., М.Р. Яворская, Лещинер Л.Н., Латушкина Л.В. Свариваемость листовых полуфабрикатов сплава 1440. *Автоматическая сварка*. 1995. № 4. С. 27-30.
80. Овчинников В.В., Дриц А.М., Крымова Т.В. Технологические особенности производства сварных конструкций летательных аппаратов из алюминиево-литиевого сплава 1460. *Сварочное производство*. 1997. № 12. С.26-43.
81. Напряжения и деформации при сварке / Б.С. Касаткин, В.М. Прохоренко, И.М. Чертов // Киев: Вища школа. Головное издательство. - 1987. – 246 с.
82. Ищенко А.Я., Будник В.П., Покляцкий А.Г., Гринюк А.А. Влияние состава защитных газов на технологические характеристики дуги при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*. 2000. № 2. С.19-22.
83. Покляцкий А.Г. Устойчивость процесса плазменной сварки алюминиевых сплавов проникающей дугой/ А.Г. Покляцкий, А.А. Гринюк // *Автоматическая сварка*. – 2000. - №4. - с. 42 – 46.
84. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко В.Г. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. № 11. С. 31 – 41.
85. Покляцкий А.Г. Влияние параметров асимметричного и модулированного токов на качество сварных соединений алюминиевых сплавов / А.Г. Покляцкий, А.А. Гринюк // *Автоматическая сварка*. – 2001. - №7. - с. 33 – 36.
86. Патент на корисну модель №117164 UA, МПК В23К 10/02 (2006.01). Спосіб плазмового зварювання алюмінієвих сплавів з імпульсною подачею газу / І.В. Кривцун, А.А. Гринюк, В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін. - № а201608285; опубл. 25.06.2018., Бюл. № 12/2018.

87. Покляцкий А.Г. Аргодуговая сварка алюминиевых сплавов неплавящимся электродом с колебаниями дуги/ А.Г. Покляцкий, А.Я. Ищенко, А.А. Гринюк, А.А. Чайка, В.Е. Федорчук // Автоматическая сварка. – 2002. - №2. - с. 18 – 22.
88. Покляцкий А.Г. Предотвращение образования оксидных плен в швах при сварке литийсодержащих алюминиевых сплавов/ А.Г. Покляцкий, А.В. Лозовская, А.А. Гринюк // Автоматическая сварка. – 2002. - №12. - с. 45 – 48.
89. Лабур Т.М., **Гринюк А.А.**, Таранова Т.Г., Костин В.А., Покляцкий А.Г. Особенности микромеханизма разрушения соединений алюминиево-литиевых сплавов, полученных плазменной сваркой. *Автоматическая сварка*. 2007. №9. С. 11 – 16.
90. Покляцкий А.Г., Ищенко А. Я., Гринюк А.А., Яворская М.Р. Механические свойства соединений алюминиевого сплава 1441, полученных при различных способах сварки. *Автоматическая сварка*. 2007. №3. С. 31 – 33.
91. Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. Механические свойства алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*. 2005. № 9. С. 43–49.
92. Новые возможности Solid Works 2015 Dassault Systèmes Solid Works Corporation, a Dassault Systèmes S.A. company, 175 Wyman Street, Waltham, Mass, 1995—2014. 02451 USA. Электронный ресурс [http://www.leninsw.com/Files/Whats\\_New/whatsnew\\_2015.pdf](http://www.leninsw.com/Files/Whats_New/whatsnew_2015.pdf).
93. Попов А.Ю. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук - № 3. - 2017. с. 35-38.
94. Моделирование распределения воздушного потока в программном комплексе solidworks /Flow Simulation Dassault Systems SolidWorks Corporation. SolidWorks Flow Simulations 2009 Электронный ресурс <http://mexalib.com/view/48303>.
95. Ошовский В.В., Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов, возникающих в сужающем устройстве Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. - 2013. - № 2(21). - С. 168-168.



96. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Лекции по математическим моделям и численным методам в динамике газа и жидкости. — М.: Научный Мир, 2007. — 350 с.
97. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Бабич А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом. *Технологические системы*. 2016. №4. С. 86-89.
98. Коржик В.Н., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., Бабич А.А., Хаскин В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. № 4. С. 32–37.
99. Korzhyk V., Kvasnytskyi V., Khaskin V., Prokhorenko D., Perepychai A., Grynyuk A., Babych O. The impact of consolidation in a rigid tool on the formation of residual stress-strain state of butt joints of plates from an alloy 1561 at MIG, PAW and hybrid PAW-MIG welding. *American Scientific Journal*. 2017. № 17. Vol.2. P. 14–29.
100. Коржик В.Н., Войтенко А.Н., Пелешенко С.И., Ткачук В.И., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А. Разработка автоматического оборудования для изготовления трехмерных металлических изделий на основе аддитивных технологий. *Автоматическая сварка*. 2017. № 5–6. С. 91–98.
101. Бабич О.А., Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., Dong Chunlin, Han Shanguo. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. № 7. С.11-22.