

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ІМ. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ГЛУШАК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 539.234:620.186:539.52

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ
ЕЛЕКТРОННО – ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ КОСМОСУ**

Спеціальність 05.03.06. «Зварювання та споріднені процеси і технології»
Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ С.О. Глушак

Науковий керівник: _____ **Піскун Наталія Василівна**
доктор технічних наук

КИЇВ – 2024

АНОТАЦІЯ

Глушак С.О. Розробка обладнання та технології для електронно – променевого зварювання алюмінієвих сплавів в умовах космосу. -
Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 «Зварювання та споріднені процеси і технології» (13 – Механічна інженерія). – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної задачі: створенню принципової технології електронно-променевого зварювання в умовах космосу та на поверхні Місяця для застосування при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт.

Задачу вирішено шляхом встановлення закономірностей пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації та аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несучільностей такого типу, а також за допомогою обладнання нового покоління, яке дозволяє виконувати процес однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою з періодичним відхиленням електронного пучка та зварювати алюмінієві сплави товщиною до 6 мм, які в основному застосовуються в сучасному ракетобудуванні.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки нових наукових підходів при створенні сучасного технологічного процесу електронно-променевого зварювання, який є перспективним при виконанні в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур ремонтних, ремонтно-відновлювальних, монтажних і будівельних робіт в космосі та на поверхні Місяця.

В роботі проведений детальний аналіз літературних джерел, в яких розглядаються питання проведення зварювальних робіт в космічних умовах з урахуванням фізичних особливостей космічного простору; проаналізована конструкція обладнання попереднього покоління, яке пройшло випробування в космічних умовах, його переваги та недоліки. Розглянуто властивості алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення. Показано, що при проведенні експериментів в умовах зниженої гравітації та низьких температур в космосі, а також імітації цих особливостей космічного простору на літаючій лабораторії в зварних швах зварюваних зразків із алюмінієвих сплавів виявилась підвищена кількість пор.

Досліджено закономірності утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несучільностей такого типу. Вперше розрахунковими методами встановлено, що найбільший вплив на стійкість парогазового каналу та кристалізацію бульбашок домішкових газів має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які не суттєво залежать від сили гравітації, а гідростатичний тиск, у свою чергу, знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, спричинених локальним зхлопуванням каналу в процесі зварювання. Показано, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко зростає розмір бульбашок газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни, і формують сферичну нещільність металу шва.

Проведені технологічні експерименти по електронно-променевому зварюванню зразків з алюмінієвих сплавів в умовах високого вакууму, які підтверджують підвищену схильність зварних швів до появи пористості. При проведенні електронно-променевого зварювання дослідних зразків був також застосований традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни, переміщенням розплавленого металу безперервним одностороннім

скануванням електронного пучка з круговою розгорткою, який не сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин.

Показано, що обладнання для зварювання в космічних умовах попереднього покоління дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм. Крім того, можливості наявного обладнання не дозволяють розробити сучасний технологічний процес, при якому за один прохід виконувати електронно-променеве зварювання та термообробку.

Для вирішення цих проблем розроблена нова конструкція електронно-променевої гармати потужністю 2,5 кВт з прискорюючою напругою 10 кВ для зварювання при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в космічних умовах та на поверхні Місяця.

В роботі вперше для електронно-променевих гармат космічного призначення запропонована тріодна емісійна система, яка формує електронний пучок високої якості, достатньої для здійснення електронно-променевого зварювання різних металів товщиною 4-6 мм.

Завдяки фокусуєчій та відхиляючій системам, гармата має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії, що було використано при створенні сучасного технологічного процесу електронно-променевого зварювання.

Для реалізації запропонованого процесу розроблена і виготовлена відхиляюча система ВС-5, яка використовувалася для керування періодичним відхиленням електронного променя по заданій траєкторії і програмованого тепловкладення з різною інтенсивністю нагрівання в процесі зварювання.

Випробувана сучасна технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів з переміщенням зварювальної ванни періодичним

відхиленням електронного променя програмованою дискретною інтенсивністю теплової дії, що дозволяє локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання(ЕПЗ), алюмінієві сплави, зварні з'єднання(ЗЗ), надвисокий вакуум, знижена гравітація, пороутворення, парогазовий канал(ПГК), довготривалі місячні бази(ДМБ), низькі температури, дефекти в швах, нещільності, пори, система періодичного відхилення електронного променя, розгортка, механічні властивості, елементний склад, макроструктура, мікроструктура.

ABSTRACT

Hlushak S.O. Development of equipment and technology for electron beam welding of aluminum alloys in space.

The thesis for the scientific degree of candidate of technical science on the specialty 05.03.06 “Welding and related processes and technologies” - (13 - Mechanical engineering). - E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the solution of a scientific and applied problem: the creation of the principle technology of electron beam welding in the conditions of space and on the surface of the Moon for its application in the performance of repair and repair and restoration works.

The task was solved by establishing the patterns of pore formation during electron beam welding of aluminum alloys in conditions of reduced gravity and analyzing the main factors that determine the increased tendency to form discontinuities of this type, as well as by using new generation equipment that allows the process to be performed in a single-pass way with preheating and subsequent heat treatment of the seam with mixing of the molten metal of the bath by reverse

circular scanning and periodic scanning of the electron beam and welding aluminum alloys up to 6 mm thick, which are mainly used in modern rocketry.

The relevance of the work is due to the need to develop new scientific approaches in the creation of a modern technological process of electron beam welding, which is promising when performing repair, repair and restoration, assembly and construction works in space and on the surface of the Moon in conditions of ultra-high vacuum, reduced gravity and low temperatures.

In the work, a detailed analysis of literary sources is carried out, in which the issue of conducting welding works in space conditions is considered, taking into account the physical features of outer space; analyzed the design of the equipment of the previous generation, which was tested in space conditions, its strengths and weaknesses. The properties of aluminum alloys, which are widely used to create space structures, are considered. It is shown that when conducting experiments in conditions of reduced gravity and low temperatures in space, as well as simulating these features of outer space on a flying laboratory, an increased number of pores was found in the welds of welded samples from aluminum alloys.

The regularities of the formation of pores in the weld metal of welded joints made of aluminum alloys during EBW in conditions of reduced gravity were studied by analyzing the main factors that determine the increased tendency to the formation of discontinuities of this type. For the first time, it was established by calculation methods that the greatest influence on the stability of the steam-gas channel(SGC) and the crystallization of impurity gas bubbles has the ratio of ablation pressure and surface tension force, which do not significantly depend on the force of gravity, and the hydrostatic pressure, in turn, decreases with a decrease in the force of gravity, which has a small positive effect on the stability of SGC and reduces the tendency to the appearance of pores caused by local collapse of the channel during the welding process. It is shown that when the acceleration of free fall is reduced below 3 m/, the size of gas bubbles, which do not have time to float before the complete

crystallization of the bath melt, increases sharply and forms a spherical leak in the weld metal.

Technological experiments were conducted on electron beam welding of aluminum alloy samples under high vacuum conditions, which confirm the increased susceptibility of welds to the appearance of porosity. When conducting electron beam welding of experimental samples, the traditional method of degassing the weld pool was also used, mixing the molten metal with continuous one-sided scanning of the electron beam with a circular sweep, which does not contribute to complete degassing of the weld pool, especially when welding aluminum alloys of medium and large thicknesses.

It is shown that the equipment for welding in space conditions of the previous generation makes it possible to weld stainless steels, titanium and aluminum alloys up to 1.5 mm thick. At the same time, the thickness of the material used in the manufacture of manned spacecraft shells reaches 4...6 mm. In addition, the capabilities of the available equipment do not allow for the development of a modern technological process in which electron beam welding and heat treatment can be performed in one pass.

To solve these problems, a new design of an electron beam gun with a power of 2.5 kW with an accelerating voltage of 10 kV has been developed for welding during repair and restoration works in space conditions and on the surface of the Moon.

In the work, for the first time, a triode emission system is proposed for electron-beam guns for space purposes, which forms an electron beam of high quality, sufficient for electron-beam welding of various metals with a thickness of 4-6 mm.

Thanks to the focusing and deflecting systems, the gun has the ability to focus the electron beam and periodically deflect the programmed intensity of heating by the electron beam along a given trajectory, which was used in the creation of a modern technological process of electron beam welding.

To implement the proposed process, the DS-5 system was developed and manufactured, which was used to control the periodic deflection of the electron beam along a given trajectory and programmable heat deposition with different heating intensities during the welding process.

The proven modern technology of electron-beam welding of aluminum alloys with mixing of the welding bath by a scanning electron beam with a programmable discrete intensity of thermal action on the welding bath allows you to localize gas inclusions, organize their directed forced movement to the outer surface of the liquid metal and removal from the melt.

Key words: electron-beam welding (EBW), aluminum alloys, welded joints (WJ), ultra-high vacuum, reduced gravity, pore formation, steam-gas channel, long-term lunar bases (LLB), low temperatures, defects in seams, leaks, pores, system of periodic deflection of an electron beam, sweep, mechanical properties, elemental composition, macrostructure, microstructure.

Основні результати дисертації відображені в наступних публікаціях:

1. Lobanov L.M., Asnis E.A., Ternovoy Ye.G., Zubchenko Yu.V., Statkevich I.I., Volkov V.S., **Glushak S.A.** Some Issues of Repairing Manned Space Vehicles in Outer Space Using Electron Beam Welding. State Phenomena Submitted:

2020-07-07 ISSN: 1662-9779. Vol. 315.P.101-105.

URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.315.101>.

2. **Глушак С.О.** Еволюція електронно-променевого обладнання для зварювання у космосі. Автоматичне зварювання. 2023 № 8. С. 1-7.

3. Лобанов Л.М., Міленін О.С., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., **Глушак С.О.**, Статкевич І.І., Радченко Л.М. Закономірності пороутворення при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації. Космічна наука технологія. 2023. Т. 29. № 3. С. 57-66.

URL: <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.057>.

4. Лобанов Л.М., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Крюков В.А., Харківська Т.М., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О. Електронно-променева гармата для ручного електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця. Косм.наука і технол. 2024. 30(1): С. 80-91.

URL: <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.080>.

5. Лобанов Л.М., Ланкін Ю.М., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Глушак С.О., Соловйов В.Г., Семікін В.Ф., Федорчук В.Є., Статкевич І.І. Елементи технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів для монтажних і ремонтно-відновлюваних робіт на поверхні Місяця. Косм.наука технол. 2024. 30(2): С. 40-53.

URL: <https://doi.org/10.15407/knit2024.02.040>.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації на конференціях:

1. Применение электронно-лучевой сварки для ремонта корпуса пилотируемой космической станции в космосе. Зварювання та споріднені технології: тези доп. на VIII міжнар. конф. молодих вчених та спеціалістів, смт. Ворзель, Київська обл., Україна, 20-22 трав., 2015 р. С. 43.

2. Піскун Н.В., Вржижевський Е.Л., Глушак С.О., Таранова Т.Г., Статкевич І.І. Електронно-променеве зварювання інтерметаліду на основі алюмініду титану. Зварювання та споріднені технології – сьогодення і майбутнє: тези доп. на міжнар. конф., м. Київ, Україна, 5-6 грудня. 2018 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна. С. 25-26.

3. Лобанов Л.М., Терновий Є.Г., Піскун Н.В., Квасницький В.Ф., Глушак С.О., Статкевич І.І., Булацев О.Р., Шулим В.Ф., Крюков В.А. Нове покоління ручного електронно-променевого інструменту для технологічних робіт у відкритому космосі. Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах: тези доп. на міжнар. конф. PolyWeld 2021, м. Київ, Україна, 27-28 трав. 2021 р. С. 69-71. <https://polyweld.kpi.ua/PolyWeld2019>

4. Технології та конструкції в космосі. Досягнення молодих вчених України в розвитку ракетно-космічної галузі в умовах війни: круглий стіл, м. Київ, 12 квіт. 2023 р.

<https://mon.gov.ua/ua/news/rozvitok-raketno-kosmichnoyi-galuzi-vidbuvsya-kruglij-stil-molodih-uchenih>

5. L.M. Lobanov, **S.O. Hlushak**, Y.H. Ternovyi, N.V. Piskun, V.A. Kriukov, T.M. Kharkivska, I.I. Statkevych. Hand-held electron beam tool for technological work in outer space.

76-а Щорічна асамблея Міжнародного Інституту Зварювання та Міжнародна конференція зі зварювання та з'єднання, 16 липня 2023 р., Сінгапур.

<https://iiw2023.com/commissions-agenda/>

6. Піскун Н.В., Терновий Є.Г., **Глушак С.О.**, Крюков В.А., Статкевич І.І., Шулим В.Ф., Закорко В.О. Розробка обладнання для електронно-променевої багатосарової наплавки 3D при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в умовах космічного вакууму. Сучасні напрями розвитку адитивних технологій: тези доп. конф., 27 лист. 2023 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна. С. 34.

7. Піскун Н.В., Терновий Є.Г., **Глушак С.О.**, Міленін О.С., Статкевич І.І., Крюков В.А., Харківська Т.М. Особливості обладнання і технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів в космічних умовах. Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах: тези доп. на міжнар. конф. PolyWeld 2023, м. Київ, 23-24 лист. 2023 р., С.12- 15.

<https://polyweld.kpi.ua/PolyWeld2023>

8. **S.O. Hlushak**, L.M. Lobanov, Y.H. Ternovyi, N.V. Piskun, V.F. Shulym, V.A. Kriukov, I.I. Statkevych. Modern methods of combating pore formation during electron beam welding of aluminum alloys in conditions of reduced gravity: тези доп. на міжнар. конф.

«Young Welding Professionals International Conference» 8-9 February 2024.

9. Піскун Н.В., Терновий Є.Г., **Глушак С.О.** Обладнання для ручного та автоматичного електронно-променевого зварювання при проведенні

монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця: тези доп. на XXVI Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і Космос», м. Дніпро, Україна, 17-19 квіт. 2024 р.

Заявки на патент:

1. Спосіб забезпечення високого робочого вакууму в електронно-променевої гарматі та пристрій для здійснення зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі: пат.121773 Україна: В23К 15/00, В64G 4/00. № а 2017 12348; заяв. 13.12.2017; опубл. 27.07.2020, Бюл. № 14.

2. Спосіб формування електронного пучка електронно-променевої гармати для зварювання та споріднених технологій в умовах відкритого космосу: пат. 117397 Україна: В23К 15/00, В64G 4/00. № а 2016 10294; заяв. 10.10.2016; опубл. 25.07.2018, Бюл. №14.

3. Спосіб одержання кільцевих стикових з'єднань зварних конструкцій в умовах відкритого космосу: пат. 127958 Україна: В23К 15/00, 15/04/ №а 2021 03759; заяв. 01.07.2021; опубл. 21.02.2024, Бюл. №8.

4. Спосіб визначення температурних полів при зварюванні: заявка на винахід № а 2022 00087, заяв. 10.01.2022; опубл. 12.07.2023, Бюл.28 (на кваліфікаційній експертизі).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ УМОВ ВІДКРИТОГО КОСМОСУ НА ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ.....	24
1.1 Особливості фізичних умов відкритого простору.....	24
1.1.1. Космос, як навколишнє середовище.....	24
1.1.2. Невагомість.....	25
1.1.3 Космічний вакуум.....	27
1.1.4 Наявність різких світлотіньових границь.....	27
1.1.5 Інші фактори космічного середовища.....	29
1.2 Досвід використання зварювальних процесів та технологій в космосі.....	31
1.2.1 Обладнання для проведення електронно-променевого зварювання в космосі.....	31
1.2.2 Технологічні експерименти по зварюванню та спорідненим технологіям в космічних умовах.....	33
1.2.2.1 Експеримент «Вулкан».....	33
1.2.2.2 Технологічні експерименти ручними електронно-променевими інструментами.....	35
1.2.2.2.1 Експеримент «УРІ».....	35
1.2.2.2.2 Комплексні випробування і технологічні експерименти в НАСА на літаючій лабораторії КС-135 створеного обладнання «Універсал».....	41
1.2.3 Зварювання і споріднені технології в умовах поверхні Місяця.....	45
1.3 Конструкційні сплави космічного призначення.....	46
1.3.1 Особливості з'єднання алюмінієвих сплавів.....	47
1.3.2 Електронно-променеве зварювання є найбільш оптимальним технологічним процесом для використання в космічних умовах.....	49
1.3.3 Отримання нероз'ємного з'єднання деталей в умовах космосу.....	51
1.3.4. Вплив зниженої гравітації на виникнення підвищеної пористості в зварних швах алюмінієвих сплавів.....	53
1.4 Вплив електронного променя на фізичні процеси при формуванні пароголового каналу алюмінієвих сплавів.....	57
1.4.1 Вплив динамічної дії на електронний промінь процеси при електронно-променевому зварюванні.....	57

1.4.2 Аналіз способів дегазації розплавленого металу зварювальної ванни....	60
1.5 Узагальнення літературних даних та завдання дослідження.....	64
РОЗДІЛ 2. МЕХАНІЗМ ПОРОУТВОРЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ЗНИЖЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ.....	67
2.1 Математична модель процесу пороутворення при зварюванні алюмінієвих сплавів 5456 в невагомості.....	68
2.1.1 Математична модель балансу сил в ПГК.....	69
2.2 Вплив зниженої гравітації на розплавлену ванну при ЕПЗ.....	72
2.3 Технологічні експерименти по відпрацюванню технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів.....	76
2.4 Висновки до розділу 2.....	82
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В КОСМІЧНИХ УМОВАХ.....	84
3.1 Розробка обладнання нового покоління для електронно-променевого зварювання у відкритому космосі.....	84
3.1.1 Дослідження теплових полів зварювальної гармати в залежності від тривалості її роботи.....	85
3.1.2 Схема, матеріали та умови експлуатації електронно-променевої гармати.....	85
3.1.3 Розподіл теплових полів в електронно-променевій гарматі при зварюванні у відкритому космосі.....	88
3.1.4 Математичний опис теплопередачі в електронно-променевій гарматі у процесі її експлуатації.....	89
3.1.5 Верифікація розроблених моделей кінетики температурного поля у перерізі електронно-променевої гармати.....	96
3.2 Прогнозування кінетики температурного поля в процесі експлуатації електронно-променевої гармати.....	99
3.2.1 Аналіз температури нагрівання критичних елементів електронно-променевої гармати.....	99
3.2.2 Вплив положення світлотіньової межі на температуру корпусу електронно-променевої гармати.....	103
3.3 Розробка конструкції електронно – променевої гармати.....	105

3.3.1 Умови проходження електронного пучка в гарматі.....	107
3.3.2 Пошуки факторів, сприяючих погіршенню вакууму в просторі дрейфу.....	110
3.4 Розробка електронно-оптичної системи гармати.....	113
3.5 Висновки до розділу 3.....	123
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ЯКІСНИХ З'ЄДНАНЬ В КОСМІЧНИХ УМОВАХ.....	125
4.1 Розробка елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з програмованою інтенсивністю нагріву зварного з'єднання і періодичним відхиленням електронного пучка.....	126
4.2 Металографічні дослідження зварних з'єднань, які одержані з використанням запропонованої технології.....	131
4.3. Випробування механічних властивостей зварних з'єднань, одержаних за запропонованою технологією.....	139
4.3.1 Випробування на тимчасовий опір розриву.....	139
4.4 Дослідження механічних властивостей основного металу та зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 при кімнатній, підвищеній та криогенній температурах.....	141
4.4.1 Випробування на статичний розтяг при кімнатній температурі +20 °С.....	141
4.4.2 Випробування на статичний розтяг при підвищеній температурі +120 °С.....	145
4.4.3 Випробування на статичний розтяг при криогенній температурі -180 °С.....	147
4.5 Розподіл повздовжніх напружень у поперечному перерізі зварних зразків проводився із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з висвердлюванням отвору.....	154
4.6 Висновки до розділу 4.....	157
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	158
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	161

ВСТУП

Актуальність роботи. Створення фізичних основ космічних технологій потребує розробки відповідної апаратури, постановки та проведення численних експериментів. Крім вивчення фундаментальних закономірностей поведінки та формування матеріалів у космічних умовах, є також важливе прикладне завдання: забезпечити можливість відновлення та ремонту численних конструктивних, функціональних космічних літальних апаратів та інших крупногабаритних конструкцій, розрахованих на експлуатацію в космічному просторі та на поверхні Місяця протягом тривалого часу. Це завдання залишається актуальним, а роботи дослідників останніх років, пов'язані з більш ефективним використанням такого фактору, як космічний вакуум, додали до цього нові можливості та перспективи промислового використання космосу, як технологічного середовища.

Використання зварювальних процесів в космосі необхідно насамперед для виготовлення, монтажу та ремонту великогабаритних конструкцій космічних станцій, як на навколосемній орбіті, так і при освоєнні Місяця, де планується створювати довготривалі місячні бази (ДМБ), а також інші об'єкти, що забезпечують життєдіяльність і роботу експедицій.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є оптимальним і більш технологічним процесом для виконання цих робіт, порівняно з іншими способами зварювання. Глибокий вакуум та низькі температури, які є природним середовищем в космічних умовах, сприяють використанню електронно-променевих технологій, у тому числі й зварювальних. При цьому процесі ефективний ККД становить 85-90 %, що є максимальним проти інших способів зварювання. Процес ЕПЗ в умовах земної гравітації дозволяє забезпечити механічні та хімічні властивості, а також вакуумну щільність зварних з'єднань на рівні основного металу конструкції.

Особливості фізичних умов: високий вакуум, різке коливання температури на освітленій та затемненій сторонах, знижена гравітація

потребують створення спеціалізованого обладнання і, відповідно, технологій при виконанні зварювальних робіт.

Узагальнення накопиченого досвіду та результати проведених у відкритому космосі експериментів із ручного електронно-променевого зварювання, які наведені вище, свідчать про те, що апаратура, яка була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів.

Тому є необхідним створення обладнання нового покоління з підвищеною потужністю, що дозволить вирішити проблему зварювання матеріалів завтовшки до 6 мм та дасть можливість розробити сучасний технологічний процес, при якому за один прохід можна виконувати електронно-променеве зварювання та термообробку.

В даний час зварні конструкції з алюмінію та його сплавів отримали широке застосування в промисловості, особливо конструкції, що працюють в умовах складних навантажень, підвищених та низьких температур, тобто, у космічному апаратобудуванні. Завдяки малій масі, досить високої питомої міцності та корозійної стійкості алюмінієвих сплавів стало можливим створення конструкцій, здатних працювати тривалий час в умовах космосу.

При виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, і, відповідно, якість зварних з'єднань може знизитися. Отримані результати проведених експериментів в умовах зниженої гравітації та низьких температур в космосі, а також на літаючій лабораторії, показали підвищену кількість пор в зварних швах із алюмінієвих сплавів. Для одержання якісних зварних з'єднань і виключення в ЗШ таких дефектів як пори, тріщини та не сплавлення крайків в корені шва, що зварюються, розробка технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів, яка дозволить одержувати якісні зварні з'єднання є вельми актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась у відділі «Космічні технології» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в рамках науково-дослідних тем, в яких автор брав участь в якості виконавця: по темам 6.1.1.35.74.31(35,74/31) «Дослідження і вдосконалення електронно-променевих технологічних процесів для космічних умов і розробка нового покоління апаратури для їх реалізації» (0117U001263 (30.12.16)); 35/69 1.6.1.1.35.69 (35/69) «Розробка обладнання та технології електронно-променевого зварювання для виконання монтажних і ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця при будівництві та експлуатації довготривалих місячних баз» (№0118U004072 (19.03.18)); 35/1 1.6.3.1.35.1 (35/1) «Розробка обладнання і принципової технології 3D принтингу титанових, алюмінієвих та інтерметалідних сплавів в умовах космічного вакууму, а також процесу спрямованої кристалізації інтерметаліду системи TiAl для використання в аерокосмічній галузі» (№0122U001598 (15.02.2022)).

Мета та задачі дослідження: метою роботи є створення принципового технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який дозволяє в умовах зниженої гравітації одержувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення з використанням обладнання нового покоління.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1. Дослідження закономірностей утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом якісного аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несучільностей.
2. Розробити нову конструкцію електронно-променевої гармати, яка використовує тріодну емісійну систему, що дозволяє працювати в умовах високого космічного вакууму, потужністю 2,5 кВт з прискорюючою напругою 10 кВ для здійснення електронно-променевого зварювання алюмінієвих

сплавів товщиною 6-8 мм, які в основному використовуються в сучасному ракетобудівництві.

3. Створене нове обладнання повинно бути укомплектовано фокусуючо-відхиляючою системою для гострого фокусування і можливості періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.

4. Розробити принциповий технологічний процес ЕПЗ алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни періодичним відхиленням електронного пучка з програмованою тепловою інтенсивністю.

5. Дослідити вплив параметрів зварювання при виконанні однопрохідного процесу з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка з програмованою дією теплової інтенсивності на формування структури та механічних властивостей зварних з'єднань алюмінієвих сплавів.

Об'єкт дослідження: зварні з'єднання алюмінієвих сплавів 5456 та 2219, які отримані ЕПЗ за допомогою обладнання нового покоління при виконанні процесу з перемішуванням розплавленого металу ванни програмованою дією теплової інтенсивності.

Предмет дослідження: вплив параметрів режимів зварювання і можливостей обладнання, яке створене, на закономірності формування структурного стану та механічні властивості зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 і верифікація результатів з експериментальними даними попередніх експериментів в умовах відкритого космосу.

Методи дослідження:

Технологічні роботи виконували у вакуумному стенді ОБ1469м, в якому були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104. Живлення електронно-променевої гармати здійснювалося від лабораторного джерела ИУН-5 з прискореною напругою 10 кВ. Рентгенівський контроль зварних з'єднань (ЗЗ) здійснювався з метою виявлення прихованих дефектів у з'єднаннях по всій довжині (пори, раковини, тріщини, непровари тощо) і

виконувався на рентгенівському апараті РАП-150/300 (фокус 1.2 мм, $F = 1.0$ м, $U = 100$ кВ, $I = 8.0$ мА, плівка РТ-5). Визначення локального елементного складу ЗЗ із алюмінієвих сплавів, отриманих ЕПЗ, провадилися за допомогою растрового електронного мікроскопа Tescan Mira3 LMU. Оцінка локального елементного складу виконувалась детектором ЕДС Oxford X-max 80 mm, встановленим на растровому електронному мікроскопі. Дослідження особливостей мікроструктури здійснювали на поперечних підготовлених зразках ЗЗ, що включали ділянки основного металу, ЗТВ і металу шва, за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В з цифровою камерою Webbers MYscore 300M. Скануюча електронна мікроскопія виконувалась на базі DRON-3М спектрометра. Розподіл повздовжніх напружень у поперечному перерізі зварних зразків проводився із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з висвердлюванням отвору. Механічні випробування основного металу та металу шва зварних зразків проводились на сервогідравлічній машині [MTS 318.25 \(USA\)](#).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. **Вперше** для електронно-променевих гармат космічного призначення запропонована тріодна електронно-оптична система з довготривалим ресурсом роботи катодного блоку за рахунок комбінованого охолодження.

2. З використанням запропонованої математичної моделі **вперше встановлено**, що найбільший вплив на стійкість парогазового каналу та кристалізацію бульбашок домішкових газів має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які не суттєво залежать від сили гравітації, а гідростатичний тиск, у свою чергу, знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, спричинених локальним зхлопуванням каналу в процесі зварювання.

3. **Визначено вплив сили гравітації** та розміру бульбашок газу на швидкість їх випливання з розплаву. Розрахунковими методами встановлено, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко зростає розмір бульбашок газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни, і формують сферичну нещільність металу шва.

4. **Вперше** для виконання електронно-променевого зварювання запропоновані варіанти розподілу потужностей теплової дії електронного пучка, які дозволяють синтезувати керування електронним променем для створення заданого температурного поля при виконанні процесу зварювання з одночасними попереднім підігрівом і подальшою термообробкою.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Запропоновано якісну математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор в металі зварного шва, за допомогою якої проведений аналіз факторів, що сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

2. Розроблена електронно-променева гармата, яка використовує тріодну емісійну систему, що дозволяє працювати в умовах високого космічного вакууму при прискорювальній напрузі 10 кВ потужністю 2,5 кВт, при цьому, завдяки формуванню електронного пучка високої якості в синтезованій емісійній системі та, як результат, підвищенню щільності струму пучка в місці зварювання (до 9 кВт/мм^2) гармата спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4...6 мм які, в основному, застосовують в сучасному космічному апаратобудуванні.

3. Завдяки електронно-оптичній системі гармата має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення

програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії.

4. Запропонована принципова технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни періодичним відхиленням електронного променя з програмованою дискретною інтенсивністю теплової дії, яка завдяки дозованому впливу променя на зварювальну ванну дозволяє локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів, отриманих автором самостійно та у співавторстві. Постановка задач досліджень, обговорення результатів та формулювання основних висновків проведено спільно з науковим керівником. За безпосередньою участю автора проведений аналіз та узагальнення літературних даних про сучасний стан вимог до алюмінієвих сплавів. Детально вивчено галузь застосування цих матеріалів. За результатами аналізу були розроблені наукові та технологічні напрямки проведення роботи. В ході її виконання були детально вивчені закономірності пороутворення при електронно-променевому зварюванню алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

Особисто автор приймав участь у виконанні процесу електронно-променевого зварювання, проведенні досліджень та аналізі отриманих результатів. Автор приймав активну участь в розробці, складанні та випробуваннях електронно-променевої гармати нового покоління. Автором виконувались дослідження отриманих зварних з'єднань. Визначені кореляційні залежності результатів, які отримані при зварюванні зразків традиційними методами та по запропонованому технологічному процесу між структурними характеристиками та механічними властивостями зварних швів.

Планування та безпосередня участь у проведенні експериментів із електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів. Дослідження

структури зварних з'єднань методами електронної та оптичної мікроскопії. Аналіз результатів для встановлення механізмів формування фазового складу, структурних характеристик та взаємозв'язок цих процесів з механічними властивостями зварних з'єднань.

Апробація результатів дисертації. За результатами дисертаційної роботи були представлені 9 доповідей, які доповідались і обговорювались на 9-ти міжнародних наукових конференціях, в тому числі: VIII-й міжнародній конференції молодих учених та спеціалістів «Зварювання та спорідненні технології», 20-22 травня 2015 року, смт. Ворзель, Київська обл., Україна; Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогоднішня і майбутнє», 5-6 грудня 2018 року, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна; Міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2021», 27-28 травня 2021 року, м. Київ, Україна; 76-й Щорічній асамблеї Міжнародного Інституту Зварювання та Міжнародна конференція зі зварювання та з'єднання», 16 липня 2023 року, Сінгапур; Міжнародній конференції «СУЧАСНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ», 27 листопада 2023 року, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, м. Київ, Україна; Міжнародній конференції «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2023», 23-24 листопада 2023 року, м. Київ, Україна; «Young Welding Professionals International Conference» 8-9 February 2024; XXVI Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», 17-19 квітня 2024 року, м. Дніпро, Україна.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, з них 4 – в періодичних виданнях, які реферуються в наукометричній базі Scopus; 1 – в виданнях, що входять до Переліку наукових фахових видань України; 9 – в збірниках праць науково-технічних конференцій, 4 – в інших галузевих виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 174 сторінках і складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків за розділами та загальних висновків, переліку використаних літературних джерел. Обсяг основного тексту складає 144 сторінки машинописного тексту, містить 99 рисунки, таблиць, список літератури із 145 найменувань на 13 сторінках.

РОЗДІЛ 1. ВПЛИВ ФІЗИЧНИХ УМОВ ВІДКРИТОГО КОСМОСУ НА ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

1.1 Особливості фізичних умов відкритого простору

1.1.1 Космос, як навколишнє середовище

Величезні досягнення людства в освоєнні космічного простору стали можливими завдяки бурхливому розвитку науки та техніки. Дослідження космічного середовища сприяло створенню нових напрямків наукових досліджень, які мали суттєвий вплив на розвиток світової промисловості [1-3].

Проблемам освоєння космосу приділяв велику увагу в своїх роботах один із перших українських теоретиків космонавтики В.В. Кондратюк [4]. Американський вчений Краффт А. Еріке в своїй книзі «Майбутнє космічної індустрії» [5] виклав концепцію по практичному освоєнню космосу у інтересах людства. Він також вказує на необхідність створення довготривалих функціонуючих баз. А це потребує їх монтаж в космічному просторі, розробку нових технологій з'єднання матеріалів, технологій ремонту космічних об'єктів та споруд, які будуть створені на поверхні інших планет.

В подальшому ці ідеї і концепції були розвинуті С.П. Корольовим, який разом з Б.Є. Патоном стали основоположниками такого напрямку, як зварювання в умовах відкритого космосу. С.П. Корольов на початку 60-х років розробив проекти створення орбітальних баз, які були розраховані на тривалу роботу фахівців у космосі. Все це вимагало розробку технологій монтажу і з'єднання елементів споруд у відкритому космосі, та на поверхні космічних об'єктів, а також розробку технологій їх ремонту.

Зварювання є найважливішим технологічним процесом, без якого неможливо буде виготовляти великі конструкції в космосі та проводити необхідні ремонтно-відновлювальні роботи, що неминуче виникатимуть при тривалій експлуатації пілотованих космічних об'єктів.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України протягом багатьох десятиліть працює над вирішенням проблем зварювання та споріднених технологій обробки матеріалів (паяння, різання, нанесенням покриттів), а також створенням та монтажем у космосі великогабаритних конструкцій. За минулі роки було здійснено широку програму наукових досліджень, створено кілька поколінь обладнання, яке неодноразово працювало на навколосемній орбіті та показало свою надійність і ефективність. Розроблено унікальні методики, проведені сотні експериментів по зварюванню, різанню, паянню і нанесенню покриттів [6, 7], які в майбутньому будуть використані, як для з'єднання конструкцій, так і для виконання ремонтних робіт у відкритому космосі.

Успішне здійснення у відкритому космосі таких складних технологічних процесів як зварювання, різання, паяння, нанесення покриттів та ін. стали основою нового наукового напрямку – космічної технології.

Навколишнє космічне середовище має дуже важливе значення для виконання технологічних процесів і, особливо, для отримання нероз'ємного з'єднання матеріалів. Тому, при розробці методів з'єднання необхідно враховувати основні фактори, що пов'язані з можливостями їх реалізації в умовах космосу.

Як вказують автори робіт [8-12] можна виділити три основні особливості космічного середовища, які в тій чи іншій мірі позначаються, як на технології процесів з'єднання матеріалів, так і на умовах функціонування апаратури та умовах праці космонавтів-операторів: невагомість, космічний вакуум та наявність різких температурних змін і світло-тіньових границь.

1.1.2 Невагомість

Як вказують автори багатьох відомих видань, на космічних апаратах ніколи не реалізується стан, при якому сили, що діють на об'єкт, дорівнюють нулю [12]. Це пов'язано з впливом багатьох факторів: градієнту гравітаційного поля Землі, функціонуванням різних агрегатів, роботою космонавтів. Крім

того, з нерівномірним розподілом маси космічного апарату, обертанням його навколо центру мас і т. д.

Б.Є. Патон і В.Ф. Лапчинський у своїй книзі «Зварювання та споріднені технології у космосі» [6] дають дуже детальну характеристику космічному середовищу та факторам, які там діють і яким чином вони впливають на процеси зварювання та інші споріднені технології. Автори вказують, що частіше вживається термін "мікрогравітація", який характеризує стан, коли сума діючих на об'єкт сил набагато менша, ніж на поверхні Землі. Як впливає стан мікрогравітації на виконання зварювальних робіт на думку авторів цієї монографії можна виділити два аспекти. Перший аспект пов'язаний з тим, що істотно змінюється характер протікання ряду фізичних процесів в рідких і газоподібних середовищах або багатофазних системах, що містять рідку, тверду і газову фази. В цих системах повністю або частково пригнічується гравітаційна конвекція, різко зростає роль термокапілярної і хімічної конвекції, практично повністю відсутній поділ фаз за рахунок різниці густин, збільшується вплив сил поверхневого натягу і адгезії. Змінюється також характер тепломасообміну, який в стані мікрогравітації в основному визначається процесами теплопровідності і дифузії [6, 13, 14]. Все це може викликати суттєві зміни в процесах, які відбуваються в розплавлених матеріалах, що утворюються при проведенні зварювання і споріднених технологій в космосі.

Другий аспект пов'язаний з тим, що дії оператора-зварника в умовах мікрогравітації значно відрізняються від звичайних. У багатьох випадках втрачається координатна прив'язка, порушуються звичні зворотні зв'язки між рухами людини і їх результатами, дуже ускладнюється оцінка прикладених зусиль. Це стає особливо помітним при виконанні операцій, що вимагають концентрованої уваги і координації дій і рухів, до яких повною мірою можна віднести процеси з'єднання матеріалів. Вплив мікрогравітації позначається в найбільшій мірі, якщо дії проводяться тільки в ручному режимі, однак цей

вплив необхідно враховувати і при частково механізованих роботах. Досвід показує, що людина також поступово адаптується і в умовах мікрогравітації.

1.1.3 Космічний вакуум

Б.Є. Патон і В.Ф. Лапчинський вказують, що Космічний простір – це повністю відкритий безкінцевий об'єм, тому всі молекули, які виходять (дегазують) з поверхні апарату миттєво видаляються у відкритий простір. У зв'язку з цим у космосі не можна використовувати речовини з великою пружністю пари та застосовувати методи зварювання, які потребують захисних газів.

Тому, при роботі космонавтів за бортом космічних апаратів, потрібно враховувати наявність космічного вакууму. Для цього, виходячи за борт космічного апарату, космонавти вдягаються в спеціальні космічні костюми - скафандри. Завдяки надмірного тиску в скафандрі, робота космонавта є надзвичайно трудомісткою. При цьому різко ускладнюється виконання координації рухів, зменшується потік інформації, що, в свою чергу, різко впливає на результат роботи оператора-зварника. Для врахування впливу космічного середовища на роботу космонавта-зварника потрібно майбутнім фахівцям освоїти спеціальну підготовку і практичний досвід в умовах, імітуючих космічне середовище [10].

1.1.4 Наявність різких світлотіньових границь

При виконанні технологічних робіт в космічних умовах крім надглибокого вакууму необхідно враховувати й інші фізичні особливості - це різка зміна температур від $+130^{\circ}\text{C}$ вдень і -170°C у нічний час, знижена гравітація порівняно з земною, а на поверхні Місяця - місячний пил (реголіти).

Різке коливання температури - особливість космосу, яка тісно пов'язана з відсутністю атмосфери. Наявність світлотіньових границь на поверхні космічного об'єкту виникає тому, що космічний апарат двічі за оберт

перетинає лінію день-ніч, переходячи з освітленої Сонцем зони в тіньову і назад.

На сонячній ділянці орбіти освітлена поверхня космічного апарату може нагріватися до температури $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище, а на тіньових ділянках йде інтенсивне охолодження, тому вони можуть мати температуру ($-110 \dots -170\text{ }^{\circ}\text{C}$) [6].

Оскільки процеси теплообміну в космосі через відсутність атмосфери послаблені, то діють лише випромінювання та процеси теплопровідності. Це дозволяє розташовувати близько один від одного зони зварюваних матеріалів з великою різницею температури. На світлотіньових границях в цьому випадку спостерігаються великі градієнти температури, а це ускладнює технологію процесів нероз'ємного з'єднання.

Всі перераховані вище особливості космосу необхідно враховувати при створенні конструкцій космічного призначення та розробці технології зварювання в космічних умовах.

При цьому треба враховувати, що ресурс роботи конструкцій у космосі складає декілька десятиріч.

В роботі [15] Б.Є. Патон характеризує зварну конструкцію, яка рухається за навколоземною орбітою та двічі перетинає кордони між сонячною та тіньовою сторонами. При цьому сонячне випромінювання змінюється від максимуму (приблизно 1400 Вт/м^2 [16]) майже до 0. Див. рисунок 2 (крива 2). Оскільки вся конструкція та її окремі елементи схильні до температурних коливань (крива 3), що, в свою чергу, призводить до деформацій великих розмірів. Однак, завдяки тому, що конструкція занадто жорстка, виникають термічні напруги (крива 3). Такі циклічні термічні напруги у поєднанні з іншими факторами космічного простору можуть погіршувати характеристики матеріалів та приводити до повільного руйнування.

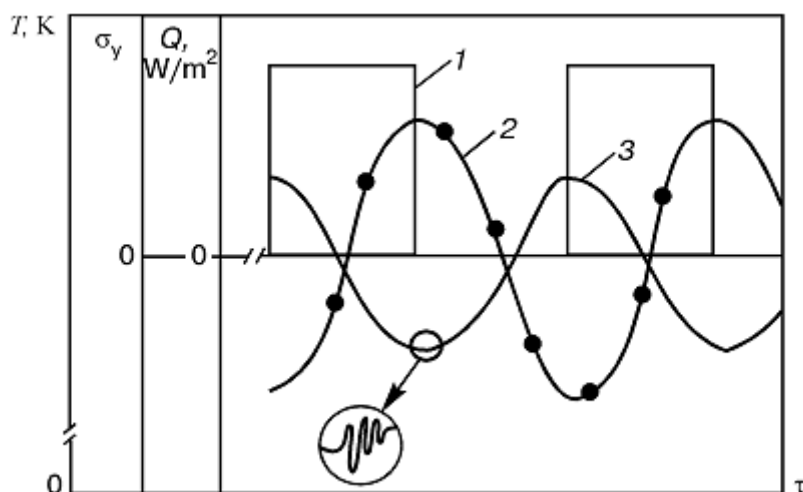


Рис. 1.1 - Схема впливу сонячного випромінювання (1) на характер деформування (2, 3) елементів космічної конструкції

Б.Є. Патон також звертає увагу на суттєвий вплив характеру протікання процесів зварювання та якість зварних з'єднань, що можуть надавати коливання температури на навколосемних орбітах у межах $-100...+120$ °С і на поверхні Місяця в межах приблизно $-190...+130$ °С. Цей фактор обов'язково потрібно враховувати при виборі способу та при розробці технології зварювання [16].

Якщо апарат або окремі його вузли довгий час однаково орієнтовані відносно Землі або Сонця (як, наприклад, сонячні батареї), то ділянки поверхні, які тривалий час перебувають в тіні, можуть мати і більш низьку температуру.

Зварні конструкції, що експлуатуються в космосі та їх окремі вузли зазнають значних термодформацій, термічних напружень, циклічних змін кінетики дифузійних процесів і т. д. Весь цей комплекс явищ може викликати значне зниження експлуатаційних характеристик конструкцій. Особливо це важливо при тривалій експлуатації космічних апаратів [17].

1.1.5 Інші фактори космічного середовища

Крім перерахованих вище, також існує ще ряд факторів космічного середовища, які впливають на технологічні процеси з'єднання матеріалів та

експлуатаційні характеристики конструкційних матеріалів і їх з'єднань в космосі.

А саме:

- агресивність космічного середовища, за рахунок вмісту в ньому атомарного та іонізованого кисню;
- ультрафіолетове випромінювання Сонця, що інтенсифікує окислювальні процеси на опромінюваній поверхні;
- вплив на матеріали і їх з'єднання радіаційних поясів Землі;
- дія на матеріали і їх з'єднання мікрометеоритних частинок [18].

Ці чинники можуть впливати на розплавлені матеріали, сприяючи протіканню окислювальних процесів.

Мікрометеоритні частинки, які рухаються з високою швидкістю і мають велику кінетичну енергію, яка при зіткненні з поверхнею матеріалу виділяється у вигляді теплової та механічної. Зіткнення носить характер мікроривбуху і призводить до виникнення місцевих дефектів типу мікротріщин. При подальшій експлуатації ці дефекти будуть поширюватися по поверхні і по товщині матеріалу.

Для отримання якісних нероз'ємних з'єднань при проведенні в космічних умовах технологічних робіт по зварюванню та ремонту конструкцій із алюмінієвих сплавів необхідно враховувати цілу низку факторів, таких, які вказані вище, - мікрогравітація, наявність світлових границь, температурні перепади, а також необхідність мінімізації ваги і габаритів обладнання, мінімальний час проведення технологічної операції, кваліфікація оператора та інші.

1.2. Досвід використання зварювальних процесів та технологій в космосі

1.2.1 Обладнання для проведення електронно-променевого зварювання в космосі

Можливість використання тих чи інших способів зварювання в космосі на початкових етапах досліджень широко дискутувалася [19-25]. Початкові погляди зводилися до того, що найбільші переваги в космосі матимуть такі способи зварювання, що не пов'язані з розплавленням зварювальних або присадкових матеріалів, що з'єднуються, і дозволяють ефективно використовувати космічний вакуум і інфрачервоне сонячне випромінювання. Це холодне, дифузійне, магнітно-імпульсне зварювання, а також зварювання вибухом і тертям. Однак, у міру накопичення досліджень і експериментальних даних, уточнення передбачуваних видів робіт і матеріалів, що з'єднуються, ці початкові погляди були поступово переглянуті [26]. Стало зрозуміло, що сама по собі зручність використання зварювання в космосі не може бути достатньою підставою для оптимального вибору способу з'єднання.

Якщо оцінювати існуючі способи зварювання за цими критеріями, то можна зробити наступні висновки: дифузійне зварювання, зварювання вибухом, магнітно-імпульсне і контактне зварювання, зварювання тертям не пов'язані з наявністю великої кількості газів, парів і розплавленого металу в робочій зоні, дійсно не матимуть істотних труднощів при застосуванні в космосі. Це було підтверджено і експериментами на спеціальних стендах, що дозволяють імітувати умови космосу [27-29]. Однак область застосування цих способів в космосі обмежена їх малою універсальністю і необхідністю ретельної підгонки і підготовки поверхонь, що з'єднуються. Контактне і магнітно-імпульсне зварювання, крім того, пов'язані з наявністю потужних магнітних полів і громіздкої апаратури. Ускладнений також і контроль якості отриманих з'єднань. Тому можна вважати, що ці способи знайдуть в космосі обмежене застосування на більш пізніх етапах, коли буде потрібно серійне

виробництво однотипних конструкцій. Мабуть, не надто перспективне для космосу зварювання тертям, так як воно вимагає громіздкого обладнання і пов'язане з необхідністю прикладання до з'єднувальних деталей великих обертаючих моментів, небажаних в безопорному просторі. Однак цей метод зварювання має і ряд переваг – наприклад, мала енергоємність. Що стосується ультразвукового та високочастотного зварювання, які відрізняються високою енергоємністю, малою універсальністю і, головне, високим рівнем акустичних і електромагнітних шумів, неприйнятних за умовами експлуатації космічних апаратів, то перспектива їх використання в космосі малоімовірна.

За комплексом згаданих критеріїв, найперспективнішими для космосу є поширені в наземній промисловості методи зварювання плавленням, у яких для нагрівання деталей, що з'єднуються, використовуються традиційні джерела нагріву - електрична дуга, плазма, електронний промінь, лазер. Лазер є дуже перспективним методом з'єднання матеріалів, проте через низький ККД і громіздкість обладнання він нині не знаходить застосування в космосі. Подальше вдосконалення апаратури для лазерного зварювання може зробити цей метод також перспективним для космічних умов.

Дослідження, які проводилися в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона, починаючи з 1964 р, показали, що ефективність застосовуваних способів зварювання повинна оцінюватися по цілому комплексу параметрів. При цьому необхідно керуватися, як специфікою зварювальних критеріях (висока якість з'єднань, простота і технологічність процесу, універсальність), так і критеріями, прийнятими для космічної техніки (найвища надійність, безпека, мала енергоємність, мінімальна маса і об'єм апаратури і т. п.).

Електронно-променево зварювання є найбільш оптимальним способом для виконання робіт у відкритому космосі. Вакуумне середовище навколоземної орбіти і поверхні Місяця є природнім для здійснення цього процесу.

Тому, із всіх проаналізованих методів зварювання, на сьогодні найбільш перспективним для виконання технологічних робіт в космосі вважається електронно-променевиий спосіб.

Основними перевагами цього способу при використанні його в космосі є:

- раціональне використання космічного вакууму;
- можливість з'єднання практично всіх, що застосовуються в космічних апаратах матеріалів, іноді і різнорідних;
- високий термічний ККД, що досягає в ряді випадків більше 80%;
- можливість гнучкого регулювання щільності енергії в плямі нагрівання за рахунок фокусування електронного пучка, завдяки чому цей спосіб універсальний і за допомогою того ж самого обладнання може бути використаний в космосі не тільки для процесу зварювання, але і для інших технологічних операцій споріднених процесів, які згадувані вище: різання, паяння, випаровування або просто нагрівання матеріалів та виробів;
- малі габарити і маса устаткування.

1.2.2 Технологічні експерименти по зварюванню та спорідненим технологіям в космічних умовах

1.2.2.1 Експеримент «Вулкан»

Завдяки багаторічним дослідженням в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено та випробувано в 1969 р. на космічному кораблі «Союз-6» першу автоматизовану установку «Вулкан» [30, 31]. Вона передбачала випробування в космосі наступних способів зварювання: електричною дугою низького тиску з плавким електродом, плазмовою дугою низького тиску, електронним променем та контактне зварювання.

Установка «Вулкан» (рис. 1.2) складається з двох відсіків. В одному (негерметичному) розміщуються пристрої для виконання кожного з перерахованих способів зварювання та обертальний стіл із зварюваними зразками для трьох способів зварювання. Під час роботи у цьому відсіку

підтримується низький тиск. В другому відсіку (герметичному) встановлені автономне акумуляторне джерело живлення, вторинне джерело живлення (ВДЖ), блоки керування, засоби вимірювання. Установа обладнана дистанційним пультом керування [32].

Вага «Вулкана» наближена до 50 кг. Тривалість безперервної роботи невелика та обмежена ємністю акумуляторної батареї.



Рис. 1.2 - Автоматизована зварювальна установка «Вулкан»

Технічні характеристики електронно-променевого обладнання «Вулкан» [6]:

- енергія електронів 10 кеВ;
- потужність пучка 0,6 кВт;
- питома потужність променю 1 кВт/мм² на відстані 40 мм від зрізу гармати;
- катод прямонакальний танталовий;
- діодний прожектор;
- вага гармати 450 г;
- вага високовольтного блоку живлення з гарматою 6,5 кг.

Під час проведення експериментів «Вулкан» було розміщено в шлюзовому відсіку космічного корабля «Союз-6», який був

розгерметизований. У ньому підтримувався тиск $< 1,33 \cdot 10^{-2}$ Па. Екіпаж з дистанційним пультом керування під час проведення експериментів знаходився в герметичному відсіку корабля, який був відділений закритим люком від шлюзового [33].

При виконанні експериментів були проведені дослідження для вивчення зварюваності алюмінієвих сплавів при швидкості зварювання 28...36 м/год. Отримані в результаті експериментів з'єднання зі сплаву АМг6 мали пористість значно більшу в порівнянні з тими, що були отримані в наземних умовах.

Результатом проведених експериментів, виконаних електронно-променевим зварюванням, є стикові з'єднання з відбортовкою та без відбортовки крайків, а також з'єднання внапуск.

Використовувались наступні зварювані матеріали: нержавіюча сталь 08X18H10T, технічний титан ВТ1-0 та алюмінієві сплави АМг6 і Д20 завтовшки 1,5...2,0 мм. Разом з тим виконувалось різання алюмінієвих і титанових сплавів, а також сталі 08X18H10T завтовшки 1,0 мм [34, 35].

У результаті виконаних робіт зі зварювання було встановлено, що при довготривалій мікрогравітації та космічному вакуумі процеси зварювання та різання електронним променем протікають стабільно. Забезпечуються необхідні умови для нормального формування зварних з'єднань та розрізів.

Незважаючи на окремі недоліки, експерименти на установці «Вулкан» дали змогу отримати унікальну практичну інформацію, яку було враховано при створенні нових зразків космічного обладнання для зварювання в космосі.

1.2.2.2 Технологічні експерименти ручними електронно-променевими інструментами

1.2.2.2.1 Експеримент «УРІ»

Обладнання «Вулкан», яке описано вище, має дистанційне або автоматичне програмне керування. Тому найбільше використання вони

можуть отримати в тих випадках, коли технологія виконання кожної з операцій повністю відпрацьована та може бути завчасно запланована.

Це в основному монтажно-складальні операції для вузлів та деталей, з'єднання яких підготовлені ще на Землі, а також нанесення завчасно відомих покриттів. Однак при роботі у відкритому космосі є велика кількість операцій (у першу чергу ремонтно-відновлюваних робіт або фіксація фрагментів великогабаритних конструкцій), до яких попередньо підготуватися складно або неможливо.

Крім того, вірогідним є виникнення надзвичайних ситуацій, які потребують термінових технологічних операцій, як різання, зварювання або паяння, при яких процес і об'єм операцій будуть визначатися космонавтом безпосередньо на місці виконання необхідних робіт [36].

Проведені технологічні експерименти на установці «Вулкан» дозволили розробити та виготовити дослідний зразок першого ручного електронно-променевого інструменту [37].

Експерименти з дослідним зразком для ручного електронно-променевого зварювання в умовах земної гравітації були проведені спеціалістами ІЕЗ ім. Є.О. Патона у 1974 р. у барокамері з використанням випробувального стенду ОБ.1469 (рис. 1.3, а).

Під час виконання експерименту у камері стенду ОБ.1469 досягався вакуум, необхідний для роботи електронного променя ($10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па). Для цих експериментів було створено діодну електронно-променеву гармату У-729, номінальна потужність якої складала 1,5 кВт з прискореною напругою до 15 кВ. Оператор, який виконував електронно-променеве зварювання, був одягнений у фрагмент скафандру і знаходився по пояс у глибокому вакуумі (рис. 1.3, б).

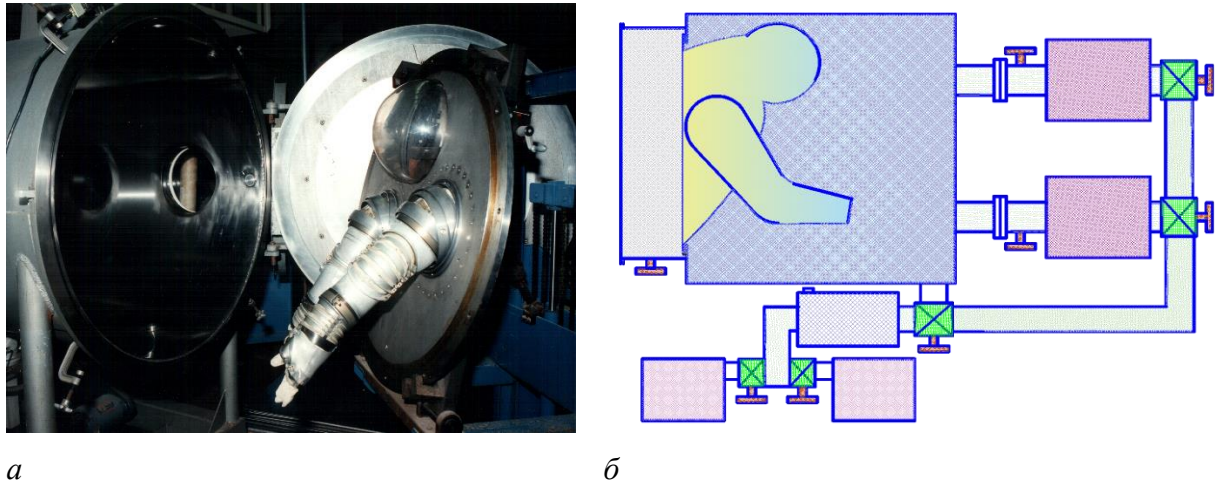


Рис.1.3 - Обладнання для проведення наземного експерименту з ручного електронно-променевого зварювання та різання:
a — випробувальний стенд ОБ.1469,
б — оператор, одягнутий в скафандр, знаходиться по пояс у глибокому вакуумі

Перед виконанням експериментів у відкритому космосі першим дослідним зразком ручного електронно-променевого інструменту було проведено численні дослідження в барокамері та в літаючій лабораторії в умовах мікрогравітації та низьких температур.

По результатах випробувань були зроблені наступні висновки:

- ручний електронно-променевий інструмент може використовуватися у відкритому космосі для проведення монтажних та ремонтних операцій, які пов'язані зі зварювальними технологіями;
- для безпечного користування інструментом потрібна професійна підготовка космонавта-оператора;
- для підвищення рівня безпеки космонавта-оператора та захисту космічного корабля доцільно використовувати у робочому інструменті короткофокусну гармату;
- пульт керування необхідно передати в руки оператора, який виконує технологічний процес;

- для виключення додаткових засобів захисту оператора від шкідливого впливу жорсткого рентгенівського випромінювання збудженого дією прискорюючої напруги необхідно встановити граничне значення високовольтного джерела живлення гармати не більш 10 кВ.;
- для захисту робочої руки оператора від теплового випромінювання рідкого металу та його парів потрібно забезпечити рукоятку захисним щитком.

За результатами проведених експериментів було створено льотний зразок універсального ручного електронно-променевого інструменту УРІ (рис. 1.4). Ураховуючи недоліки, які було виявлено при випробуванні першого дослідного зразка, в УРІ прискорену напругу було знижено до 5 кВ, що дозволило уникнути жорсткого рентгенівського випромінювання. Така прискорена напруга і потужність 0,35 кВт дозволяють виконувати технологічні процеси зварювання, різання, паяння зразків завтовшки 1,0...1,5 мм, а також нанесення покриттів у відкритому космосі.

Усі технологічні процеси інструментом УРІ виконуються електронно-променевим способом, який є оптимальним, технологічнішим і універсальнішим для виконання цих робіт. Вакуумне середовище на навколоремній орбіті є природним і зручним для здійснення цього способу зварювання. При цьому ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу електронно-променевого зварювання становить 85...90 %. Це дозволяє забезпечити надійну якість зварних з'єднань, а також необхідну щільність швів.

Інструмент УРІ являє собою моноблок, базовим елементом якого є коробчастий корпус зі спеціальною рукояткою, яка виготовлена з урахуванням антропометрії рукавички скафандра. На передній стінці корпусу встановлено дві малогабаритні електронно-променеві гармати, кожна з яких може формувати електронний промінь і виконувати процеси зварювання, різання, паяння, а також бомбардувати тигель, виконуючи процес нанесення покриттів.

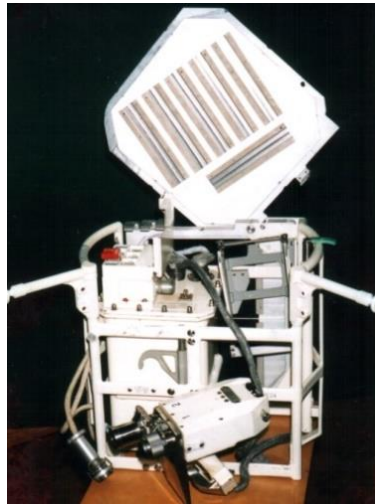


Рис. 1.4 - Ручний електронно-променевий інструмент УРІ

Технічні характеристики УРІ [6]:

- напруга живлення 23...34 В;
- потужність до 350 Вт;
- прискорююча напруга 5 кВ;
- струм електронного пучка до 70 мА;
- тип катоду прямонакальний танталовий 2×2 мм, $\delta = 0,06$ мм;
- вага УРІ без касети 30 кг;
- повна вага касети 10 кг;
- вага власне інструменту 3,5 кг.

25 червня 1984 р. вперше в світі у відкритому космосі на борту орбітальної станції «Салют-7» за допомогою зварювального інструменту УРІ відбувся експеримент з виконання технологічних процесів різання, зварювання, паяння та нанесення покриттів [38].

Для різання були підготовлені зразки із нержавіючої сталі та титанового сплаву завтовшки 0,5 мм. Зварювання і паяння відбувалось на зразках із тих самих матеріалів завтовшки 1 мм. Срібні покриття наносились на зачорнені алюмінієві пластини завтовшки 2 мм і загальною площею 0,06 м² [39, 40].

Першим виконувалось різання титанової пластини, як найменш складна операція. Потім було проведено операції зварювання, паяння та нанесення покриттів [41] Перші зразки, які були одержані у відкритому космосі ручним

електронно-променевим інструментом, показано на (рис. 1.5). Результати експериментів були достатньо інформативними. По-перше, було показано саму можливість виконання у відкритому космосі за допомогою зварювального інструменту операцій зварювання та споріднених технологічних процесів, по-друге те, що оператор, вдягнений у скафандр, може безпечно виконувати ці технологічні операції та отримувати якісні результати.

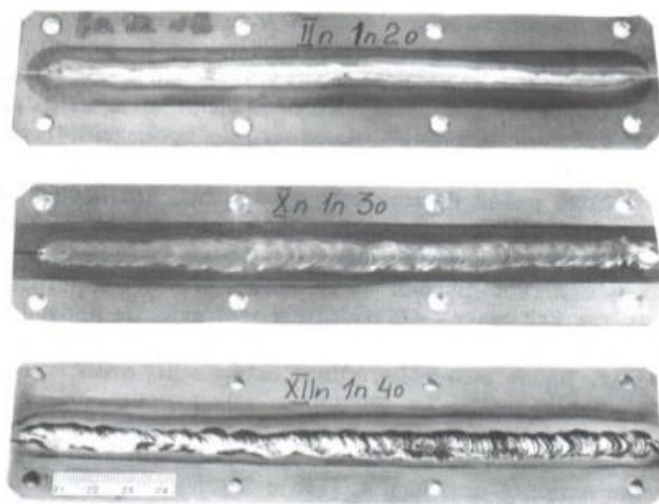


Рис. 1. 5 - Зразки стикових з'єднань, виготовлених у космосі на обладнанні УРІ

Після аналізу результатів досліджень було розроблено рекомендації щодо вдосконалення методики наземної підготовки космонавтів-операторів. Повторні експерименти було проведено в 1986 р., які виконувалися знову у відкритому космосі та проходили значно складніше. Космонавтами проведено зварювання та паяння у відкритому космосі окремих вузлів фермових конструкцій, які розміщувалися у спеціальних касетах-маніпуляторах (рис. 1.6). Після завершення робіт з розкриття та складання шарнірно-важільних ферм космонавти провели зварювання окремих її вузлів. Усього було зварено десять окремих шарнірних вузлів з титанового сплаву ВТ-4. Після цього було виконано комплексну операцію зварювання-паяння вузлів трубчасто-тросової ферми. Кожен вузол являв собою фрагмент незамкненої труби зі сталі 36НХТЮ, на яку було насаджено заповнене припоєм кільце зі сталі Ст 30.

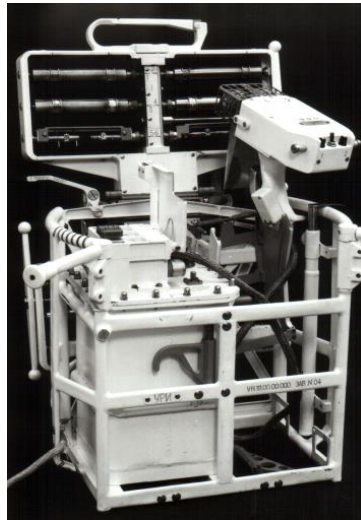


Рис. 1.6 - УРІ та касета-маніпулятор із встановленими зразками вузлів фермових конструкцій

Узагальнення результатів експериментів та аналіз накопиченого досвіду дозволили сформулювати основні принципи виконання зварювальних робіт у космосі, підтвердили необхідність модифікації інструменту, впровадження нових технічних рішень з урахуванням деяких істотних коригувань технологічних параметрів.

Перед розробниками стояли такі основні завдання:

- довести вихідну потужність до 1 кВт для роботи з алюмінієм і його сплавами;
- оснастити інструмент механізмом подачі дроту;
- ввести до складу зварювальної апаратури систему оперативної інформації та контролю технологічних і технічних параметрів з метою передачі її на записуючі пристрої стації.

1.2.2.2 Комплексні випробування і технологічні експерименти в НАСА на літаючій лабораторії КС-135 створеного обладнання «Універсал»

Узагальнення накопиченого досвіду дозволило розробити універсальний комплект електронно-променевого інструменту «Універсал», призначений для експлуатації у складі перспективних великогабаритних довгострокових космічних орбітальних станцій.

Порівняно з попереднім обладнанням УРІ в «Універсал» були внесені такі зміни:

- значно (у 2...2,5 рази) збільшено вихідну потужність апаратури;
- власне інструмент виконаний функціонально цільовим, однокатодним, з катодним резервуванням, що дозволяє переходити від однієї технологічної операції до іншої простою заміною необхідного блоку або оснащення;
- «Універсал» укомплектовано базовим інструментом для зварювання, паяння і різання, механізмом подачі присадного матеріалу для зварювання та паяння, інструментом з турельною насадкою, яка має чотири тиглі з матеріалами, що випаровуються, для нанесення спеціальних покриттів.

Під час розробки цього комплексу було успішно вирішено завдання уніфікації основних функціонально важливих вузлів. При цьому було досягнуто максимально можливе корисне використання бортового живлення при мінімальних масогабаритних характеристиках апаратури «Універсал» (рис. 1.7). Комплект обладнання складався з окремих блоків, які можуть, при необхідності, компонуватися в спеціалізовані установки різного призначення та необхідної потужності. Для електроживлення такої установки в комплексі передбачено відповідні високовольтні блоки та вторинне джерело електроживлення з примусовим тепловідведенням [42-44].



Рис.1.7 - Апаратура «Універсал»

Базовий інструмент може самостійно виконувати зварювання, паяння та різання, а також за допомогою малогабаритного механізму подачі присадного дроту виконувати зварювання і паяння з присадним матеріалом. Інструмент має спеціальний механізм, призначений для нанесення покриттів термічним випаровування металів, а також барабанну насадку з чотирма тиглями, що дозволяє наносити покриття з різних матеріалів. Цей інструмент може також використовуватися для нагріву поверхні, що обробляється, розфокусованим електронним променем.

Якщо для проведення монтажних-складальних і ремонтних робіт існує необхідність у застосуванні роботів або маніпуляторів, то може бути скомплектовано автоматичну зварювальну установку, у склад якої буде входити один або декілька (до чотирьох) електронно-променевих інструментів потужністю до 1,1 кВт.

Технічні характеристики «Універсал»:

- напруга живлення 23...34 В;
- потужність до 1110 Вт;
- прискорююча напруга 8...10 кВ;
- струм електронного пучка до 110 мА;
- тип катоду прямонакальний танталовий 2×2 мм, $\delta = 0,06$ мм.

У 1991–1992 рр. за допомогою виготовленого обладнання «Універсал» було відпрацьовано серію технологічних випробувань по зварюванню зразків із алюмінієвих та титанових сплавів а також нержавіючих сталей в наземних умовах і в умовах мікрогравітації на літаючій лабораторії КС-135 (Центр ім. Л. Джонсона, NASA, м. Х'юстон), шість занурень у басейні (у Центрі ім. Дж. Маршалла, NASA, м. Хантсвіл) та п'ять підйомів до 6 км у барокамері.

Аналіз проведених досліджень зварних зразків в лабораторіях НАСА і в ІЕЗ ім. Є.О. Патона на якість з'єднань, одержаних в наземних умовах і в умовах мікрогравітації, підтвердив наявність збільшеної пористості в швах із алюмінієвих сплавів системи легування Al – Mg.

Після цього були проведені кваліфікаційні передпольотні випробування виготовленого обладнання з метою подальшого його використання в експерименті на навколосемній орбіті [45]:

- випробування на електромагнітну сумісність із системами корабля;
- оцінка працездатності обладнання при тривалому зберіганні в неробочому стані при температурах $-113\dots+80$ °С;
- термоциклічні випробування ($-40\dots+60$ °С) при 8-и циклах випробування;
- випробування на токсичність (на шкідливі виділення від апаратури корабля);
- теплові випробування;
- кількісна оцінка бризкоутворення;
- випробування на вібростійкість;
- заміри рентгенівського випромінювання;
- оціночні випробування на прямий вплив електронного променя на матеріали.

Після проведення всебічних наземних випробувань комплекс «Універсал» було рекомендовано для використання у складі перспективних орбітальних станцій. Протягом шестигодинного запланованого виходу астронавтів у відкритий космос повинні були проводитися експерименти зі зварювання, різання, паяння та нанесення покриттів, у тому числі імітація ремонту пошкодженої оболонки модуля космічного корабля, а також експерименти по зварюванню трубчатих елементів, які імітували різноманітні трубопроводи.

Виконання цього експерименту було намічено на кінець 1997 р., але у зв'язку з проблемами на кораблі «Коламбія» польоти на цих кораблях було припинено і програму міжнародного експерименту з інструментом «Універсал» було закрито.

1.2.3 Зварювання і споріднені технології в умовах поверхні Місяця

В останні роки в космічній тематиці все більший акцент робиться на питаннях освоєння Місяця. В них не останню увагу приділяють вирішенню проблем, пов'язаних із забезпеченням необхідних життєвих умов для астронавтів, із побудуванням та збиранням на місці великої кількості технічних приладів та споруд. Експлуатація та розвиток орбітальних комплексів, а також перспективні завдання створення споруд на місячній і марсіанській поверхні, передбачають впровадження технологій монтажу та ремонту космічних об'єктів [46].

Перспективи відновлення різних конструкцій в умовах космосу і на поверхні Місяця зумовлюють потребу в розробці ефективного та компактного зварювального інструменту, за допомогою якого можна здійснювати операції по електронно-променевому зварюванню та спорідненим технологіям.

Результати проведених у відкритому космосі експериментів із ручного електронно-променевого зварювання, які наведені вище, свідчать про те, що апаратура, яка була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів.

Тому однією з цілей цієї роботи є розробка сучасних технологій та створення космічного обладнання нового покоління. Створене обладнання повинно бути з підвищеною потужністю і мати систему гострого фокусування, а також систему для дискретного відхилення по заданій програмі електронного пучка. Це дозволить вирішити проблему підвищеного утворення пор в зварних швах із алюмінієвих сплавів і одержати якісні з'єднання завтовшки до 6...8 мм.

1.3 Конструкційні сплави космічного призначення

У космічному апаратобудуванні традиційно використовується спеціальний для цієї галузі набір конструкційних матеріалів. Щоб забезпечити основні вимоги до виробів, що експлуатуються в космосі, - максимальну міцність, жорсткість і довговічність при мінімальній масі, - для їх виготовлення використовуються в основному легкі матеріали з високою питомою міцністю. Йдеться про алюмінієві, титанові та магнієві сплави. У космічному апаратобудуванні також широко використовуються високолеговані та жароміцні сталі та сплави, а також тугоплавкі матеріали. Головну роль при виготовленні виробів космічного призначення грають алюмінієві сплави. Все ширше починають використовувати композиційні матеріали на металевій або полімерній основі.

Сплави на основі алюмінію – одні з найбільш затребуваних матеріалів у ракетно-космічній техніці через поєднання високих фізико-механічних властивостей та питомих характеристик міцності, жорсткості та ін. У цій галузі для вирішення поточних та перспективних завдань використовується широка номенклатура сплавів (від технічного алюмінію до високоміцних) та напівфабрикатів (пресованих, катаних, кованих, штампованих).

Сплави на основі алюмінію є і залишаться в перспективі основним матеріалом для корпусних вузлів і силових елементів космічних апаратів (КА), баків ракет-носіїв (РН), приладів та ін. Наступні напрямки: підвищення якості та розширення номенклатури серійних конструкційних сплавів; розробка та освоєння виробництва нових конструкційних сплавів; розробка та освоєння функціональних сплавів та алюмоматричних композиційних матеріалів (КА); розробка металургійних технологій, що забезпечують підвищені та спеціальні властивості сплавів.

У космонавтиці поєднання мінімальної маси з максимальною міцністю відіграє важливу роль. Наприклад, перший штучний супутник Землі, виведений на орбіту в жовтні 1957 року, складався з двох силових

напівсферичних оболонок діаметром 58 см з алюмінієво-магнієвого сплаву АМг6 товщиною 2 мм зі стикувальними шпангоутами.

Загальна вага цього супутника 83,6 кг, з яких близько 20 кг припадало на корпус із алюмінієво-магнієвого сплаву. Сьогодні попит на алюмінієві напівфабрикати у світовій аерокосмічній галузі становить 33,5 тисячі тонн. До 2030 року очікується, що ця цифра зросте до 59 тисяч тонн.

У сучасній ракеті близько половини її ваги посідає алюмінієві конструкції. У ракетах-носіях традиційно використовуються алюмінієві сплави з додаванням магнію, які у світовій практиці останніх років все частіше покращуються легуванням рідкісноземельними елементами, насамперед скандієм.

Сплави на основі алюмінію використовувалися для виготовлення корпусів космічних човників «Спейсшатл» (човники приблизно на 90% складаються з алюмінієвих сплавів), телескопічної балки антени космічного телескопа «Хаббл», з них виготовляються водневі ракетні баки, носові корпуси орбітальних космічних станцій та кріплень для сонячних батарей на них.

Найбільш перспективними напрямками розвитку є: освоєння виробництва конструкційних сплавів системи Al-Mg-Sc; освоєння нових конструкційних сплавів з урахуванням системи Al-Li; розробка та освоєння виробництва функціональних алюмінієвих сплавів та алюмоматричних композиційних матеріалів (КМ) різного призначення, у тому числі і для захисту космічних апаратів від впливу метеоритно-техногенних тіл, зі зниженим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР) тощо. Застосування адитивних технологій для виробництва виробів із алюмінієвих сплавів також є перспективним напрямом.

1.3.1 Особливості з'єднання алюмінієвих сплавів

Відомо, що чистий алюміній має обмежене застосування через свою низьку міцність і високу пластичність. Однак сплави на основі алюмінію,

зберігаючи такі його переваги, як низьку густину та корозійну стійкість, мають набагато кращі механічні властивості, а тому знайшли широке застосування в авіаційній (обшивка літаків, паливні баки), суднобудівній (корпуси суден), автомобільній (блоки циліндрів, поршні двигунів внутрішнього згоряння), приладобудівній та інших галузях промисловості [47-49].

В роботах [50, 51] наведена система класифікації алюмінієвих сплавів. Автори робіт поділять алюмінієві сплави на групи в залежності від використання та області застосування.

Для створення легких конструкцій для різних галузей промисловості широко використовуються алюмінієві сплави леговані магнієм.

Поєднання низької питомої ваги, високої міцності, високого рівня твердості та межі плинності [52, 53], а також відносно простої технології виготовлення алюмінієвих сплавів легованих магнієм створює умови для їх широкого використання, зокрема для створення конструкцій оболонкового типу великого розміру. Для отримання якісного з'єднання алюмінієвих сплавів легованих магнієм необхідно використовувати спеціальні методи зварювання, які враховують легування сплаву та умови проведення цих процесів. В зв'язку з цим, дослідженню методів отримання нероз'ємних з'єднань алюмінієвих сплавів присвячена велика кількість робіт, у яких з'ясовано основні фактори, які впливають на властивості з'єднань [54].

Результату отримання якісних з'єднань сприяє те, що алюмінієві сплави мають гранецентровану кубічну структуру при всіх температурах аж до температури плавлення, а тому, під час зварювання не зазнають алотропних фазових перетворень, і їх твердість зазвичай залишається постійною в зоні термічного впливу.

До факторів, що ускладнюють умови отримання з'єднань методом зварювання алюмінієвих сплавів, відносять наступні:

- наявність на поверхні алюмінієвого сплаву міцної оксидної плівки, що швидко формується за звичайних умов;

- відносно великий коефіцієнт лінійного теплового розширення алюмінієвого сплаву;
- відносно низька температура плавлення алюмінієвого сплаву.

З цих факторів, які необхідно врахувати при отриманні з'єднань методом зварювання є наявність на поверхні, що з'єднується оксидної плівки.

Для забезпечення контакту з'єднувальних поверхонь металів при паянні алюмінію та його сплавів оксидну плівку необхідно зруйнувати. У випадку зварювання, як показано, наприклад, в роботах [55, 56], якщо оксидну плівку не видалити, її частинки проникають у зварний шов, в наслідок чого спостерігається зниження пластичності та міцності зони з'єднання.

Отже, однією з необхідних умов для отримання нероз'ємного з'єднання алюмінію та його сплавів є видалення оксидної плівки.

1.3.2 Електронно-променеве зварювання є найбільш оптимальним технологічним процесом для використання в космічних умовах

Традиційно, нероз'ємні з'єднання алюмінієвих сплавів отримують методами зварювання та паяння. З цією метою використовують концентровані джерела нагріву (плазмова дуга, електронний та лазерний промені), що запобігають значного підвищення температури в зоні з'єднання та їх окислення шляхом проведення процесу з'єднання з великою швидкістю в атмосфері інертного газу або у вакуумі. Серед методів зварювання алюмінію та його сплавів виділяють електронно-променеве зварювання, дифузійне зварювання, зварювання вибухом, контактне зварювання та ін. [57].

Оскільки алюмінієві сплави є перспективним матеріалом для широкого застосування його в конструкціях аерокосмічного призначення, то вони потребують методів з'єднання, які дозволяють зварювати вироби різних геометричних форм, виконувати шви різної протяжності, а також перервані шви. Найбільш придатним способом отримання таких з'єднання з алюмінієвих сплавів є електронно-променеве зварювання, яке у порівнянні з іншими

видами зварювання плавленням має переваги: по-перше, оскільки воно проводиться у високому вакуумі, то повністю забезпечує захист такого активного матеріалу, яким є алюміній; по-друге, при електронно-променевому зварюванні формується вузький шов і дуже незначна зона термічного впливу, що, в свою чергу, повинно приводити до мінімальних деформацій зварного з'єднання [58].

Автори робіт [59, 60] вказують, що електронно-променеве зварювання алюмінієвих сплавів використовують у авіа- та ракетобудуванні, ядерній енергетиці, радіоелектроніці, машинобудуванні та приладобудуванні. Попередніми дослідженнями, які описані в роботі [61] було виявлено, що цей спосіб також має перспективу при використанні у зварюванні металоконструкцій в умовах космічного простору: спорудах орбітальних станцій, усуненні їх пошкоджень та інших подібних роботах.

При цьому використовується природний вакуум та живлення апаратури від сонячної енергії. Воно забезпечує високу швидкість зварювання (можливість досягнення високих швидкостей кристалізації рідкого металу), вузькі й глибокі шви, малу зону біля шва, низькі деформації.

Протягом понад 60 років вчені Інституту електрозварювання займаються розробкою і створенням обладнання та технології електронно-променевого зварювання, а також дослідженнями закономірностей, механізмів утворення парогозового каналу та супутніми процесами при електронно-променевому зварюванні, без знання яких важко використання електронного променя при з'єднанні матеріалів.

Великий внесок у вивчення процесів, що протікають при електронно-променевому зварюванні, внесли такі вчені-дослідники нашого Інституту як Б.Є. Патон, О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, А.А. Бондарев, Ю.М. Ланкін, В. Д. Шелягін, Ю.В. Зубченко та ін..

1.3.3 Отримання нероз'ємного з'єднання деталей в умовах космосу

У випадку проведення ремонтних робіт на алюмінієвих оболонках при відсутності потужних джерел енергії (космічний простір) або обмеженні, щодо їх використання, ускладнює можливість застосування традиційних методів зварювання та паяння. Крім того, при проведенні ремонтних робіт у вакуумі використання концентрованих джерел нагріву буде приводити до випаровування алюмінієвого сплаву та появи крапель рідкого металу.

Аналізу впливу цих факторів на процеси, що супроводжують отримання з'єднань алюмінієвих сплавів традиційними методами, присвячено цей розділ.

О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, А.А. Бондаревта інші в своїй книзі [62] доводять, що електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) – спосіб зварювання, який все більше розповсюджується на Землі, у том числі і при виробництві ракет, ракетних двигунів і космічних кораблів. Але, якщо на Землі для проведення ЕПЗ зварювані конструкції необхідно розміщати у вакуумних камерах, то в космосі існує природний глибокий вакуум, що спрощує застосування цього способу.

Висока концентрація енергії, що притаманна ЕПЗ, також є дуже корисною в космосі, тому що забезпечує мінімальне тепловкладення в зварюваний метал і мінімальну потужністьусієї установки. Крім того, таку установку можна використовувати і для різання, тобто вона має дуже важливий для космосу універсалізм.

Дослідження показують, що для виконання робіт зі зварювання та різання в космосі достатньою є потужність 1...3 кВт при напрузі 15...20 кВт, що прискорюється. Така установка може живитися електроенергією від бортової мережі космічного корабля. Блок-схему установки для ЕПЗ у космосі наведено на рис. 1.8.

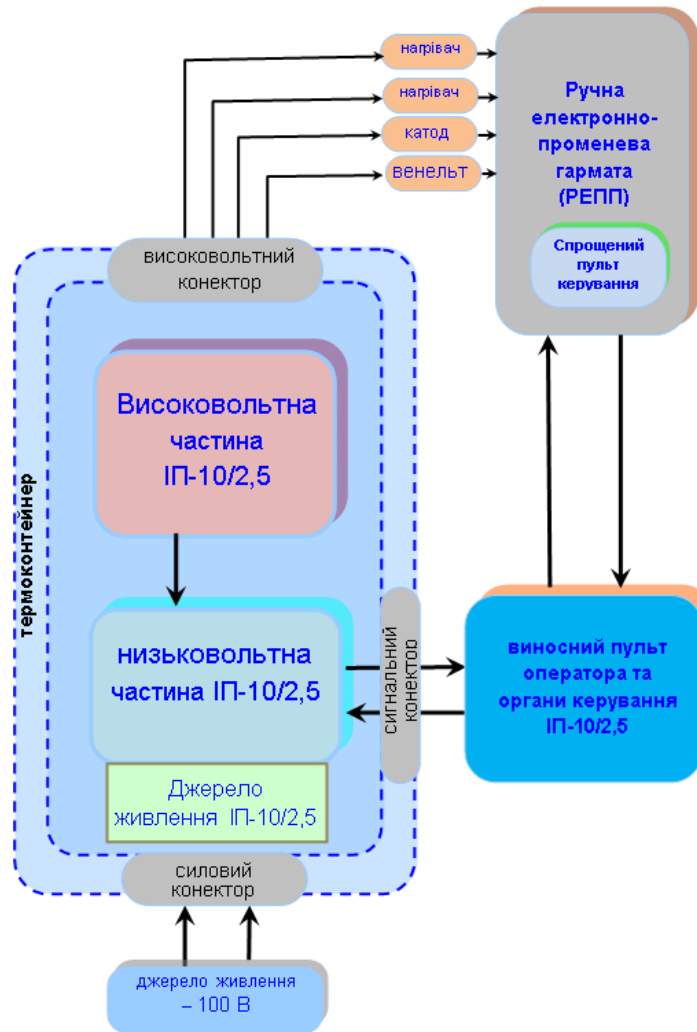


Рис. 1.8 - Блок-схема установки для электронно-променевого зварювання у космосі

Загальний вигляд установки наведено на рис.1.9. Апаратура для ЕПЗ та різання в космосі є досить простою та надійною в експлуатації і має цілком задовільні вагові характеристики. ЕПЗ є придатним для з'єднання широкого діапазону металів, включаючи всі, які використовуються на даний час у космічних конструкціях.

Невагомість практично не позначається на процесі ЕПЗ, тому що ванночка рідкого металу має дуже малий об'єм.



Рис. 1.9 - Загальний вигляд установки для відпрацювання електронно-променевого зварювання в умовах високого вакууму

Проте невагомість може призвести до випадкового відриву крапель розплавленого металу під час зварювання і особливо різання. Бризки розплавленого металу здатні руйнувати окремі поверхні. Вони становлять велику небезпеку для скафандра космонавта та для деяких синтетичних матеріалів.

1.3.4 Вплив зниженої гравітації на виникнення підвищеної пористості в зварних швах алюмінієвих сплавів

Особливі фізичні умови на поверхні Місяця та у відкритому космосі ускладнюють проведення технологічних процесів і вимагають створення спеціалізованого обладнання та надійних технологій для виконання зварювальних робіт [63]. Але, такі фактори, як знижена гравітація, надвисокий вакуум та низька температура, ускладнюють одержання якісних зварних з'єднань. Так, знижена гравітація сприяє виникненню підвищеної пористості,

яка пов'язана з тим, що в низьких гравітаційних полях не відбувається природного спливання пухирців пару чи газу зі зварювальної ванни у зв'язку з відсутністю дії сили Архімеда [6]. Це особливо проявляється при зварюванні алюмінієвих, титанових та інших матеріалів з підвищеним вмістом розчинених газів (в основному водню) або елементів з високою пружністю пари [63-66].

В той же час алюмінієві сплави мають декілька характерних особливостей, що зумовлюють складність процесу їх зварювання, до яких відносяться високий рівень спорідненості до кисню і наявність на поверхні окисної плівки Al_2O_3 . Можна вважати, що в умовах зниженої гравітації ці особливості ще більше ускладнять процес зварювання. Це пояснюється такими факторами. Окисна плівка Al_2O_3 має високу температуру плавлення ($2050\text{ }^\circ\text{C}$), не розплавляється в процесі зварювання та покриває рідкий метал, перешкоджаючи утворенню зварювальної ванни при розплавленні крайків металу, що зварюються. Внаслідок високої адсорбційної здатності до газів і парів води, окисна плівка є джерелом газів і вологи, що розчиняються в металі, тобто є непрямою причиною виникнення несучільностей у металі шва [67]. Для отримання бездефектних з'єднань повинні бути вжиті заходи щодо руйнування та видалення окисної плівки [68].

При електронно-променевому зварюванні механізм руйнування та видалення плівки зазвичай є таким. Електрони, що імітуються з високою швидкістю, гальмуються в поверхневому шарі металу, який зварюється. Таким чином перетворення кінетичної енергії на теплову відбувається на деякій глибині під окисним шаром. Плавлення та миттєве випаровування металу на цій глибині викликають значне збільшення тиску, що сприяє механічному руйнуванню окисної плівки. Крім того, за наявності вакууму порядку $1 \cdot 10^{-2}$ Па та температурі $1450\text{ }^\circ\text{C}$ окисна плівка Al_2O_3 в контакті з рідким алюмінієм розкладається за реакцією $Al_2O_{3\text{тв.}} + 4Al_{\text{рідк.}} \leftrightarrow 3Al_2O$, а пружність парів для субокисла Al_2O при високих температурах у багато разів вища за таку для алюмінію [69]. В результаті постійного підтримування

вакууму в процесі зварювання та безперервного видалення субокисла Al_2O реакція буде односторонньою: $Al_2O_3_{\text{тв.}} + 4Al_{\text{рідк.}} \rightarrow 3Al_2O$,

Надійне видалення окисної плівки, скоріше всього, обумовлено обома вказаними процесами, характер яких може суттєво змінюватися при низькій гравітації.

Аналогічні побоювання виникають щодо видалення газоподібних або пароподібних включень із зварювальної ванни. Якщо в умовах земної гравітації розчинені в рідкому металі гази (головним чином, водень) встигають або вийти зі зварювальної ванни, або зв'язуватися у вигляді твердих розчинів, то при низькій гравітації поділ цих фаз ускладнений. У зв'язку з цим, очікується підвищена пористість зварних з'єднань, яка, в кінцевому підсумку, призводить до втрати герметичності та міцності зварних з'єднань (рис. 1.10).



Рис. 1.10 – Рентгенограма стикового з'єднання сплаву АМгб, одержаного електронно-променевим зварюванням на літаючій лабораторії в режимі зниженої гравітації 1/6g (поверхня Місяця)

Важливе значення для забезпечення необхідної якості зварних з'єднань має також товщина матеріалів, що зварюються [70]. Як було сказано вище, основними матеріалами конструкцій космічного призначення є алюмінієві сплави. Для забезпечення необхідних вимог до зварних з'єднань, в тому числі, виключення внутрішніх дефектів в зварних з'єднаннях цих матеріалів заданої товщини, потужність комплексу електронно-променевого обладнання має бути достатньою для зварювання цих товщин і мати можливість налаштування гострого фокусування електронного пучка для одержання його максимальної щільності [71].

Враховуючи вплив факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів, одержаних ЕПЗ в космічних умовах, і для якісної оцінки фізичної суті утворення пор, повинна бути створена математична модель процесу з метою подальшого створення технології, яка дасть можливість запобіганню надлишкової пористості в зварних з'єднаннях.

Ця проблема певною мірою посилюється при реалізації режиму зварювання, який супроводжується формуванням парогазового каналу (ПГК). При цьому прийнято виділяти два основні механізми формування пористості металу шва, а саме [72]:

– пухирці домішкових газів (насамперед, водню), які сформувалися в розплаві, але не встигли вийти на поверхню зварювальної ванни і закристалізувалися в ній у вигляді пор, у цьому випадку основною газовою фазою у порах буде газоподібна домішка (атомарний водень);

– нерівномірне по висоті схлопування ПГК, яке призводить до захоплення навколишньої атмосфери та формування нещільностей металу шва, в якому основою газової фази в порах в даному випадку є захисний або робочий газ, а також пари легуючих елементів в основному металі, що зварюється, і які швидко випаровуються.

Фізичні процеси, що визначають схильність металу зварного з'єднання до проявів такого роду дефектності, є взаємозалежними і, суттєво, нелінійними, для їх аналізу прийнято використовувати методи математичного моделювання та багатовимірної комп'ютерної імітації [73, 74]. Це дозволяє виділити конкретне фізичне явище та оцінити ступінь його впливу на пороутворення у металі шва.

Наступною задачею роботи було за допомогою математичної моделі провести аналіз факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

1.4 Вплив електронного променя на фізичні процеси при формуванні парогозового каналу алюмінієвих сплавах

Електронно-променеве зварювання має ряд відмінностей у порівнянні з традиційними способами зварювання плавленням. Як вказувалося раніше, при електронно-променевому зварюванні можливе отримання глибоких та вузьких зварних швів з мінімальною зоною термічного впливу, що дозволяє зварювати великі товщини за один прохід. Також значна перевага електронно-променевого зварювання полягає в тому, що процес зварювання ведеться у вакуумі, який забезпечує захист зону зварювання від впливу різних газів.

1.4.1 Вплив динамічної дії на електронний промінь процеси при електронно-променевому зварюванні

Електронно-променеве зварювання має ряд відмінностей у порівнянні з традиційними способами зварювання плавленням. Як вказувалося раніше, при електронно-променевому зварюванні можливе отримання глибоких та вузьких зварних швів з мінімальною зоною термічного впливу, що дозволяє зварювати великі товщини за один прохід. Також значна перевага електронно-променевого зварювання полягає в тому, що процес зварювання ведеться у вакуумі, який забезпечує захист зону зварювання від впливу різних газів.

Електронний промінь є практично безінерційним джерелом теплової енергії. Можливість тонкого регулювання потужності, фокусування та положення променя на поверхні виробу дозволяє широко використовувати системи управління променем та програмування режимів зварювання, необхідних для формування зварного шва [75].

Системний підхід при електронно-променевому зварюванні дозволяє змінювати певні параметри коливальної дії, зокрема, амплітуду, частоту коливань та можливість розщеплення електронного променя на декілька теплових джерел, одночасно аналізуючи їх вплив на геометрію зварного шва.

Використовуючи системи керування променем та програмування режимів зварювання, можливе створення нових технологічних рішень, в основі яких лежить розщеплення променя, що дозволяє електронному променю одночасно впливати в декількох оброблюваних зонах, або поєднувати такі процеси, як зварювання та термообробка [76].

На сьогоднішній день ведеться велика кількість робіт, які розглядають можливість динамічного впливу на електронний промінь та вплив параметрів цього на геометрію зварного шва. Виділяють три основних технологічних прийому:

- осциляція електронного променя;
- сканування фокусу електронного променя;
- розщеплення електронного променя.

Коливальні переміщення променя надають додаткову можливість проводити процес зварювання, отже, і утворення зварного шва.

При цьому промінь, що має незмінну питому потужність, послідовно впливає на ряд точок у безпосередній околиці центру зварювання [77].

Характер коливань променя може бути різним, найбільш застосовуваними є кругові, синусоїдальні, прямокутні та Х-образні. Ефект від розгортки проявляється у зміні миттєвого та усередненого за періодом розподілу густини потужності електронного променя.

Авторами ряду робіт [78, 79] описано, як відповідно змінюються характер гідродинамічних процесів та конфігурація зварювальної ванни.

Т.В. Ольшанська та В.М. Язовских [80, 81], в своїх чисельних роботах, які присвячені дослідженням впливу траєкторії осциляції на формування зварних швів, відзначають утворення більш заокругленої форми кореня шва при відсутності дефектів та вирівнювання структури металу по глибині шва.

Електронно-променево зварювання з обертанням електронного променя по круговій траєкторії дозволяє досягти суттєвого зменшення утворення корневих дефектів, однак через те, що щільність потужності в центральній частині зони нагріву мала, використання кругових коливань призводить до

значного зменшення глибини проплавлення [82] порівняно з зварюванням статичним променем.

Zenker R. [83] при порівнянні якості зварних швів, виконаних одним електронним променем з однією зварювальною ванною та технологією з трьома парогазовими каналами, видно, що при зварюванні першим способом є великі скупчення пор (рис.1.11.а), а за технології з кількома парогазовими каналами спостерігається однорідний зварний шов з незначною ізольованою порою (рис.1.11 б).

Технологія розщеплення променя на концентровані теплові джерела відкриває широкий діапазон використання, і, зокрема, для суміщення таких процесів як зварювання та термообробка [84].

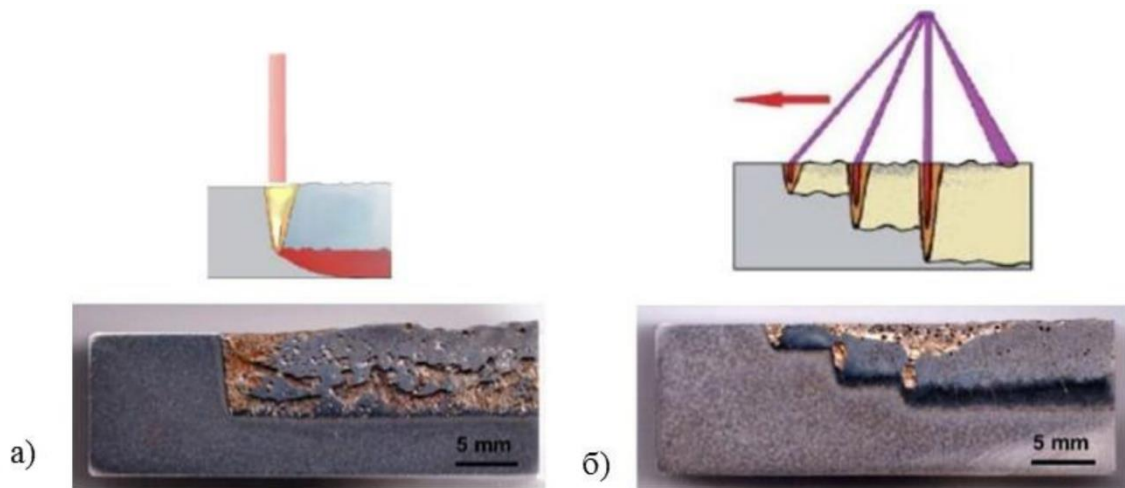


Рисунок 1.11 (а, б). Порівняння варіантів електронно-променевого зварювання та якості зварного шва:

- а) одна зварювальна ванна;
- б) використання розщеплення електронного променя [85].

Електронний промінь може використовуватися для попереднього та супутнього нагрівання при зварюванні, а також для косметичної обробки наплавленого валика. Наприклад, частина електронного променя для попереднього підігріву може рухатися попереду зварювального променя з

метою підвищення температури, потім основний зварювальний промінь проплавляє стик, виконуючи зварний шов (рис.1.12) [83]

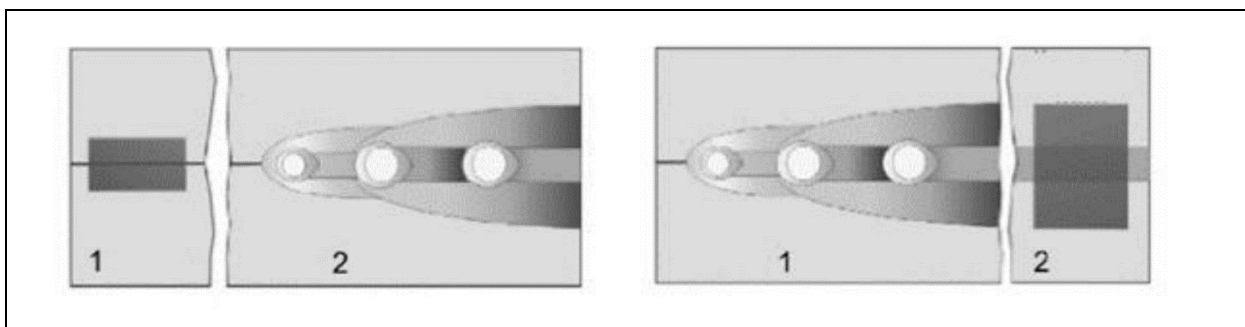


Рис. 1.12 - Технологія електронно-променевого зварювання з розщепленням променя на концентровані теплові джерела тепла [83]

Умовами отримання однорідної зварювальної ванни є її інтенсивне перемішування та збільшення часу перебування її в рідкому стані. Подібний вплив на зварювальну ванну можливий при використанні таких технологічних прийомів, як осциляція електронного пучка, супутній підігрів, використання поділу електронного пучка на кілька теплових джерел [86].

1.4.2 Аналіз способів дегазації розплавленого металу зварювальної ванни

Особливі умови на поверхні Місяця ускладнюють проведенню технологічних процесів і вимагають створення спеціалізованого обладнання та сучасних і надійних технологій для виконання зварювальних робіт [87, 88]. Автори робіт [89] вказують, що такі фактори, як знижена гравітація, низька температура та надвисокий вакуум, які є основними фізичними умовами місячної поверхні, сприяють утворенню дефектів в зварних з'єднаннях (33)

Знижена гравітація може сприяти виникненню нещільностей в вигляді пористості в швах, яка пов'язана з тим, що в низьких гравітаційних полях не відбувається природного спливання пухирців пару чи газу зі зварювальної

ванни [6]. Це особливо проявляється при зварюванні алюмінієвих, та інших матеріалів з підвищеним вмістом розчинених газів (в основному водню), а також в наявності елементів з високою пружністю пари в металі конструкції, що зварюється [90].

Зокрема, для зварювання в умовах низької гравітації (аж до невагомості) зміна сили тяжіння впливає як на динаміку спливання пухирців, що утворилися в результаті дифузії домішок впровадження, так і на стійкість ПГК.

Д. М. Рабкін [91], спираючись на чисельні дослідження встановив, що однією із причин утворення пор при зварюванні алюмінію та його сплавів є водень, що міститься в окисній плівці на крайках зварювального металу.

Відомо, що одним із методів боротьби з підвищеним утворенням пор при виконанні електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів є використання модульованої потужності [92]. Але в роботі [93] доведено, що при цьому методі утворюються виплески із зварювальної ванни в вигляді бризок розплавленого металу, що неприпустимо при проведенні технологічних робіт в космічних умовах.

Також відомо, що для зменшення підвищеного утворення пор та уникнення створення тріщин, перед зварюванням алюмінієвих сплавів, проводять попередню термообробку безпосередньо електронним пучком всього виробу, або, в залежності від габаритів виробу, тільки зону зварювання до температури $T_1=180\dots200$ °С.

Це дозволяє виключити утворення тріщин, несплавлення крайків, порожнин в ЗТВ, МШ та корені шва за рахунок часткової дегазації розчиненого водню на поверхні крайків основного металу (ОМ), а також підвищити пластичність металу перед зварюванням (рис. 1.13).

Операція попередньої термообробки металів проводиться несфокусованим електронним пучком малої щільності, що сканується, а потім проводиться зварювання з гострим сфокусованим пучком.

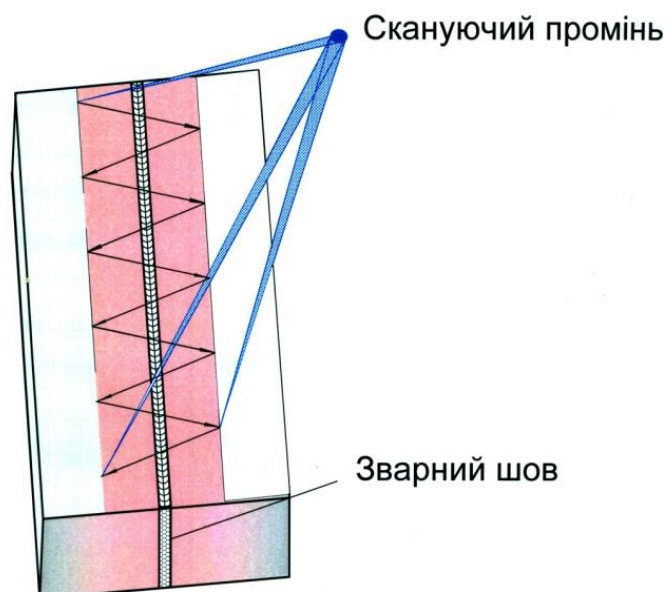


Рис. 1.13 – Схема сканування електронним променем виробу при попередній термообробці

Але, як показали результати досліджень, для керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу, необхідно також проводити термообробку і після зварювання.

В зв'язку з цим, актуальним залишається розробка і випробування елементів технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт на поверхні Місяця дозволить одержувати якісні ЗЗ, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

Автори роботи [93] пропонують метод зварювання з розщепленням електронного пучка на кілька теплових джерел при скануванні його по заданій траєкторії. Цей метод заснований на динамічному позиціонуванні пучка, який здійснюється за рахунок високочастотного керування переміщенням та відхиленням променя щодо стику і його фокусуванням таким чином, що пучок діє одночасно в кількох місцях (рис. 1.14) [94].

При цьому відбувається формування декількох теплових джерел, які забезпечують одночасне введення тепла у різні ділянки заготовки, що зварюються. Причому, зварювальні ванни розташовані на ділянках одна від одної на деякій відстані.

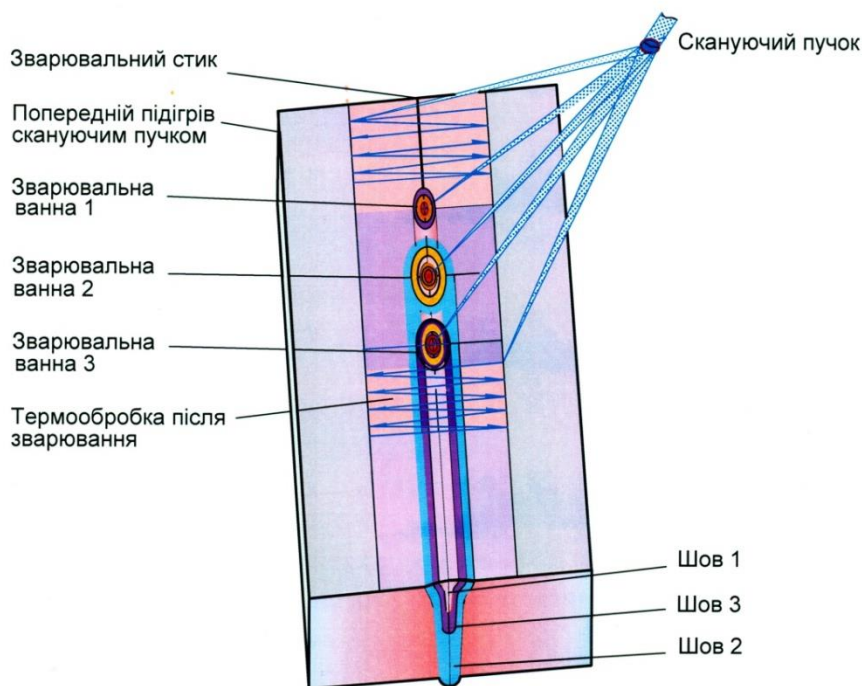


Рис. 1.14 – Схема процесу електронно-променевого зварювання з попереднім підігрівом та підігрівом після зварювання

Таке розщеплення пучка дозволяє проводити ЕПЗ в різних варіаціях: зварювання відразу в кількох оброблюваних зонах з утворенням декількох зварювальних ванн, що йдуть одна за одною, поєднання зварювання та термообробки. Але при такій схемі процесу ЕПЗ з утворенням декількох зварювальних ванн, що переміщуються послідовно одна за другою, є велика вірогідність утворенню інтерметалідів в металі шва і в зоні термічного впливу, які негативно впливають на службові характеристики ЗЗ [95, 96].

1.5 Узагальнення літературних даних та завдання дослідження

Зварювання є необхідним технологічним процесом, без якого неможливо виготовляти великогабаритні конструкції в космосі, та проводити необхідні ремонтно-відновлювальні роботи, які неминуче виникатимуть при тривалій експлуатації пілотованих космічних об'єктів. За минулі роки було здійснено широку програму наукових досліджень, створено кілька поколінь обладнання, яке неодноразово працювало на навколоземній орбіті у відкритому космосі та підтвердило свою надійність та ефективність. Розроблено унікальні методики виготовлення зварних конструкцій та проведення ремонтних робіт.

Електронно-променеве зварювання (ЕПЗ) є оптимальним технологічним процесом для виконання цих робіт, порівняно з іншими способами зварювання. Глибокий вакуум та низькі температури, які є природним середовищем в космічних умовах, сприяють використанню електронно-променевих технологій, у тому числі й зварювальних. При цьому процесі ефективний ККД становить 85-90 %, що є максимальним проти інших способів зварювання.

При виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, і, відповідно, якість зварних з'єднань може знизитися. Отримані результати проведених експериментів в умовах зниженої гравітації та низьких температур в космосі, а також на літаючій лабораторії, показали підвищену кількість пор в зварних швах. Це, у першу чергу, виявилось при зварюванні зразків із алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення.

Протягом багатьох років ведуться інтенсивні експериментальні та теоретичні дослідження процесів, що протікають при електронно-променевій зварюванні з глибоким проплавленням. Доведено існування парогазового каналу у металі. Запропоновано велику кількість моделей, що описують явища

в каналі. У всіх роботах вказується характер та складність цих процесів, а також велика кількість факторів, що впливають на їх перебіг.

Тому **першим завданням даної роботи** є дослідження процесу закономірностей утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом якісного аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несутцільностей такого типу.

Результати проведених у відкритому космосі експериментів із автоматичного та ручного електронно-променевого зварювання, які наведені вище, свідчать про те, що апаратура, яка була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок і інших елементів конструкцій пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів.

Тому **другим завданням** є створення обладнання нового покоління з підвищеною потужністю, яке дозволить вирішити проблему зварювання матеріалів завтовшки до 6 мм.

У літературі містяться дані про вплив статичного електронного променя на процеси випаровування та хімічний склад зварних сполук, отриманих при електронно-променевому зварюванні.

Аналіз літературних джерел показав, що знижена гравітація, низькі температури та надвисокий вакуум, які є природним середовищем на Місячній поверхні, сприяють утворенню внутрішніх нещільностей у вигляді пор в зварних швах (ЗШ). Це, у першу чергу, проявляється при зварюванні алюмінієвих сплавів, які використовуються як основний матеріал в конструкціях космічних апаратів.

Для одержання якісних зварних з'єднань і виключення в ЗШ таких дефектів як пори, тріщини та не сплавлення крайків в корені шва, що

зварюються, необхідно розробити технологію ЕПЗ алюмінієвих сплавів, яка дозволить одержувати якісні зварні з'єднання.

Третім завданням цієї роботи є після проведення аналізу способів дегазації розплавленого металу зварювальної ванни, розробити і випробувати технологічний процес ЕПЗ алюмінієвих сплавів, за допомогою системи періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.

Для цього необхідно виготовити систему апаратури періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії та розробити сучасний технологічний процес електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів в умовах високого вакууму, який при виконанні монтажних та ремонтно-відновлювальних робіт у відкритому космосі та на поверхні Місяця дозволить одержувати якісні ЗЗ, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

Провести дослідження структури та механічних властивостей зварних з'єднань. Провести порівняльний аналіз властивостей з'єднань, які отримані за звичайною технологією та з використанням апаратури періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії.

РОЗДІЛ 2. МЕХАНІЗМ ПОРОУТВОРЕННЯ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОМУ ЗВАРЮВАННІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ЗНИЖЕНОЇ ГРАВІТАЦІЇ

Аналіз результатів експериментів, які були проведені у відкритому космосі, показав, що електронно-променевий спосіб виявився найбільш технологічним і оптимальним. Але при виконанні ЕПЗ в умовах надвисокого вакууму, зниженої гравітації та низьких температур цей процес ускладнюється, і, відповідно, якість зварних з'єднань може знизитися.

Дослідження зварних з'єднань, які отримані в результаті проведених експериментів в умовах зниженої гравітації та низьких температур в космосі, а також на літаючій лабораторії, показали підвищену кількість пор в зварних швах.

Це, у першу чергу, виявилось при зварюванні зразків із алюмінієвих сплавів, які широко використовуються для створення конструкцій космічного призначення, що також не виключає можливості їх використання при виготовленні зварних конструкцій на поверхні Місяця.

Тому першим завданням даної роботи є дослідження закономірностей утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом якісного аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несучільностей такого типу.

Був проведений аналіз факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації на основі припущень умов гідростатичного балансу ПГК. Для цього запропонована якісна математична модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, одержаного кинджальним проплавленням за допомогою високо концентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор в металі зварного шва.

2.1 Математична модель процесу пороутворення при зварюванні алюмінієвих сплавів 5456 в невагомості

Враховуючи вплив факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних з'єднаннях алюмінієвих сплавів, одержаних ЕПЗ в космічних умовах, і для якісної оцінки фізичної суті утворення пор, була створена спрощена математична модель процесу з метою запобігання надлишкової пористості в зварних з'єднаннях.

Ця проблема певною мірою посилюється при реалізації режиму зварювання, який супроводжується формуванням парогазового каналу (ПГК). При цьому прийнято виділяти два основні механізми формування пористості металу шва, а саме [97]:

- пухирці домішкових газів (насамперед, водню), які сформувалися в розплаві, але не встигли вийти на поверхню зварювальної ванни і закристалізувалися в ній у вигляді пор, у цьому випадку основною газовою фазою у порах буде газоподібна домішка (атомарний водень);

- нерівномірне по висоті схлопування ПГК, яке призводить до захоплення навколишньої атмосфери та формування нещільностей металу шва, в якому основою газової фази в порах в даному випадку є захисний або робочий газ, а також пари легуючих елементів в основному металі, що зварюється, і які швидко випаровуються.

Фізичні процеси, що визначають схильність металу зварного з'єднання до проявів такого роду дефектності, є взаємозалежними і, суттєво, нелінійними, для їх аналізу прийнято використовувати методи математичного моделювання та багатовимірної комп'ютерної імітації [98, 99]. Це дозволяє виділити конкретне фізичне явище та оцінити ступінь його впливу на пороутворення у металі шва.

Зокрема, для зварювання в умовах низької гравітації (аж до невагомості) зміна сили тяжіння впливає як на динаміку спливання пухирців, що утворилися в результаті дифузії домішок впровадження, так і на стійкість ПГК. У цій роботі для отримання якісної картини впливу сили гравітації на

схильність зварних з'єднань до утворення дефектів у вигляді пор в металі зварного шва запропоновано комплекс спрощених математичних моделей.

2.1.1 Математична модель балансу сил в ПГК

Оскільки метою даної роботи є якісна оцінка впливу сили гравітації на схильність металу зварного шва до зародження дефектів типу газових пор, які характерні при зварюванні висококонцентрованими джерелами нагрівання, тому для побудови математичних моделей було прийнято низку припущень, а саме:

- висока концентрація джерела зварювального нагрівання, що є необхідною умовою формування ПГК, яка при цьому забезпечує відносно невелику ванну рідкого металу;
- режим стаціонарного ПГК (який характеризується невеликими значеннями числа Пекле), коли форма каналу може бути прийнята циліндричною або конічною (див. рис.2.1);
- гідродинаміка зварювальної ванни характеризується невеликими числами Рейнольдса.



Рис. 2.1 -Умовна схема зварювання зі стаціонарним парогазовим каналом [100]

Виходячи з викладених припущень, умова рівноваги ПГК може бути описана виходячи з наступного співвідношення гідростатичного балансу [100]:

$$p_a + p_g = p_d + p_h + p_\gamma, \quad (2.1)$$

де p_a – абляційний тиск, викликаний речовиною в процесі її випаровування з поверхні поділу фаз; p_g – тиск пари в ПГК; p_d – гідростатичний тиск; p_h – гідродинамічний тиск; p_γ – поверхневий натяг.

Таким чином, умова (2.1) встановлює рівновагу між сумарною дією абляційного тиску та тиску пари, які розширюють ПГК, та гідростатичного, гідродинамічного тиску, а також поверхневого натягу, спрямованих на схлопування ПГК.

Абляційний тиск може бути кількісно оцінений, виходячи з наступного співвідношення [101]:

$$p_a = m_g \cdot n_g \cdot u_g^2, \quad (2.2)$$

де m_g , n_g , u_g – маса, питома кількість і швидкість частинок кнудсенівського шару, відповідно.

Тиск газу в ПГК розраховується так [102]:

$$p_v = \frac{1}{3} \cdot m_g \cdot n_g \cdot u_g^2 \cdot \left(\frac{t}{R_c} \right)^2, \quad (2.3)$$

де t – товщина виробу, що зварюється, R_c – радіус ПГК.

Для консервативної оцінки абляційного тиску газу в залежності від температури газової фази може бути використана наближена формула [103]:

$$\log p_a = -\frac{A}{T_M} - B \cdot \log T_M + C, \quad (2.4)$$

де T_M – температура кипіння компонентів металу, що зварюється, для деяких елементів значення констант наведено в Табл. 2.1.

Гідродинамічний тиск розплаву визначається відповідно до наступного співвідношення [102]:

$$p_h = p_b - \frac{\rho_m}{2} \cdot V^2 \cdot \frac{8}{\text{Re}} \cdot R_{km} \cdot \cos \Theta, \quad (2.5)$$

де p_b – константа, яка залежить від граничної умови між ванною розплаву і твердою частиною основного металу, що зварюється; ρ_m – щільність розплавленого металу; R_{km} – безрозмірна функція радіусу ПГК та радіусу навколишньої ванни розплаву; V – швидкість зварювання; Θ – кут у полярній системі координат по відношенню до напрямку зварювання.

Таблиця 2.1 - Значення констант A , B , C рівнянь (4) співвідношення між тиском пари та температурою [99]

	Al	Mg	Fe	Cu
A	16380	7550	19710	17520
B	1,0	1,41	1,27	1,21
C	12,32	12,79	13,27	13,21
T_M, K	2730	1363	3300	2850

Гідростатичний тиск визначається висотою розплаву z та кількісно розраховується наступним чином:

$$p_g = \rho_m \cdot g \cdot z, \quad (2.6)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Питоме зусилля від сили поверхневого натягу залежить від радіусів кривизни поверхні розплаву R_1 , R_2 у взаємно перпендикулярних напрямках та коефіцієнта поверхневого натягу γ [104]:

$$p_\gamma = \gamma \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (2.7)$$

Розрахунок зусиль на одиницю площі поверхні рідкої ванни в ПГК дозволяє оцінити відхилення від рівноважного стану та визначити вплив конкретного фізичного параметра (в даному випадку, сили гравітації, тобто прискорення вільного падіння) на виконання умови схлопування каналу та підвищення схильності до появи пористості металу шва.

Як зазначалося вище, іншим механізмом пороутворення в металі зварного з'єднання є кристалізація металу разом із пухирцями домішкових газів, які не досягли поверхні розплаву за час існування рідкої зварювальної ванни. Таким чином, характеристикою схильності до появи несущільностей в залежності від сили гравітації може служити швидкість спливання пухирців певного радіусу, яка може бути оцінена рівнянням Гадамарда-Рибчинського, що є частинним розв'язком рівняння Нав'є-Стокса за умови невеликих значень числа Рейнольдса розплаву, що розглядається [105]:

$$V_b = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \cdot (\rho_f - \rho_g)}{\mu_f} \cdot \frac{\mu_f + \mu_g}{2 \cdot \mu_f + 3 \cdot \mu_g}, \quad (2.8)$$

де r – радіус пухирця газу; ρ_f, ρ_g – щільність рідини та газу, відповідно; μ_f, μ_g – динамічна в'язкість рідини та газу, відповідно.

2.2 Вплив зниженої гравітації на розплавлену ванну при ЕПЗ

Для якісної оцінки впливу зниженої гравітації на розплавлену ванну в процесі зварювання з кинджальним проплавленням з точки зору схильності до утворення пористості різного типу було розглянуто конкретний приклад з характерними параметрами стану металу. Так як об'єктом дослідження було обрано технологічний процес стикового електронно-променевого зварювання пластин з алюмінієвого сплаву 5456 завтовшки $t = 5$ мм, приймалася можливість зміни прискорення вільного падіння від 0 до 9.81 м/с^2 . Параметри наведеної моделі наступні: $\gamma = 0.52 \text{ Н/м}$; $p_b = 98 \text{ Па}$; $\rho_f = \rho_m = 2457 \text{ кг/м}^3$; $V = 1\text{-}10 \text{ мм/с}$; $\Theta = 0$; $R_c = R_1 = 0.75 \text{ мм}$, $1/R_2 = 0$; $\mu_f = 1.3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $r = 0.1 \text{ мм}$. Як показав розрахунок тиску, дані, які визначають баланс ПГК, мають такі значення: $p_a = 765 \text{ Па}$, $p_g = 50 \text{ Па}$, $p_g = 0\text{-}123 \text{ Па}$, $p_\gamma = 693 \text{ Па}$, $p_h = 49 \text{ Па}$.

Таким чином, з точки зору гідростатичного балансу (2.1) вплив гравітації на стабільність ПГК проявляється у досить вузькому діапазоні технологічних параметрів, що обумовлено невеликим вкладом гідростатичного тиску в сумарний баланс тисків: найбільший вплив на даний процес має співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу.

Це означає, що якщо в умовах земної гравітації ($g = 9.81 \text{ м/с}^2$) були отримані оптимальні режими зварювання, то вони можуть бути використані і при меншому гравітаційному впливі. Більш того, зниження сили гравітації та відповідне зменшення гідростатичного тиску має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, викликаних локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання. Навпаки, збільшення прискорення вільного падіння може призвести до погіршення стабільності ПГК та появи пор в області кореня зварного шва.

Як приклад, на рис. 2.2 показано вплив величини прискорення вільного падіння на величину сумарного тиску $p_a + p_v$ (зусилля на розширення каналу) та $p_h + p_g + p_\gamma$ (зусилля на стиснення каналу) при різних значеннях радіусу ПГК. Точки перетину наведених залежностей відповідають рівноважному стану ПГК, який зміщується в область меншої гравітації при зменшенні радіусу каналу (збільшення сили поверхневого натягу).

У разі альтернативного механізму зародження несучільностей, а саме закристалізування пухирців домішкових газів, слід очікувати протилежного впливу сили гравітації на схильність металу шва до пороутворення. Як видно з формули (2.8), швидкість спливання пропорційна прискоренню вільного падіння, тому зниження гравітації буде призводити до зменшення швидкості спливання пухирців газу і підвищення схильності пороутворення в металі зварного з'єднання. Також, суттєвим показником є радіус пухирця газу, що зародився, квадрат значення якого входить в формулу (2.8). Це означає, що при зниженні гравітації, з одного боку, збільшуватиметься концентрація пор у металі шва, з іншого – зростатимуть розміри окремих пор, і навпаки, при збільшенні прискорення вільного падіння пори будуть відсутні (рис. 2.3). Слід зазначити, що використане наближення не враховує процесів гідродинаміки зварювальної ванни, які, за певних обставин, зокрема, при великих значеннях числа Рейнольдса, можуть мати суттєвий вплив на стабільність ПГК в умовах зниженої гравітації.

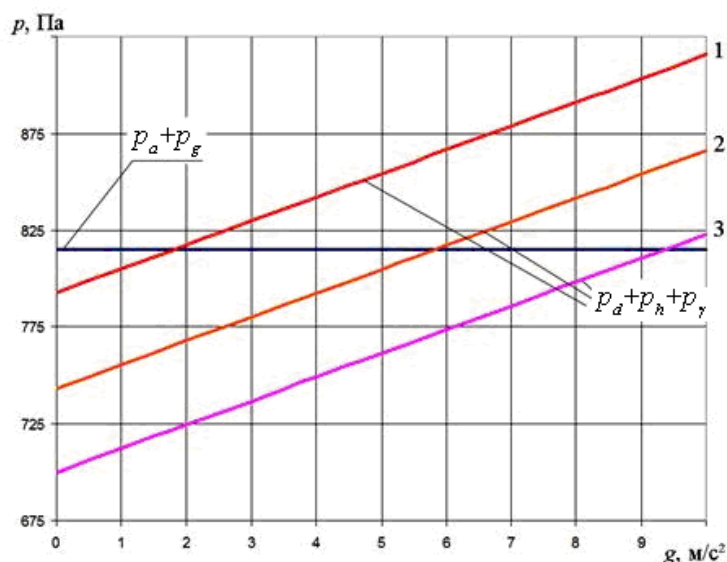


Рис. 2.2 – Співвідношення між зусиллями, що розширюють (p_a+p_g) та звужують ПГК ($p_d+p_h+p_\gamma$) залежно від значення прискорення вільного падіння

Якщо припустити, що оптимальний режим зварювання відповідає часу стаціонарного спливання газового пухирця, який менше, ніж час існування зварювальної ванни, можна якісно оцінити вплив умов гравітації на схильність до появи таких дефектів. На рис. 2.4 наведено залежності мінімального радіусу пухирця r_{min} , який встигне спливати за час існування зварювальної ванни, наведеної джерелом нагрівання при різній швидкості зварювання від прискорення вільного падіння g . З наведених даних видно, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко зростає розмір пухирців газу, які не встигнуть спливати до повної кристалізації розплаву ванни і сформують сферичну несучільність металу шва, що якісно підтверджується результатами натурних експериментів.



Рис. 2.3 – Макрошліф поверхневого зрізу зразка стикового з'єднання зі сплаву 5456, одержаного за один прохід електронно-променевим зварюванням на літаючій лабораторії в режимі перевантаження з прискоренням $2g$ і в режимі зниженого прискорення $1/6g$ (поверхня Місяця) [6]

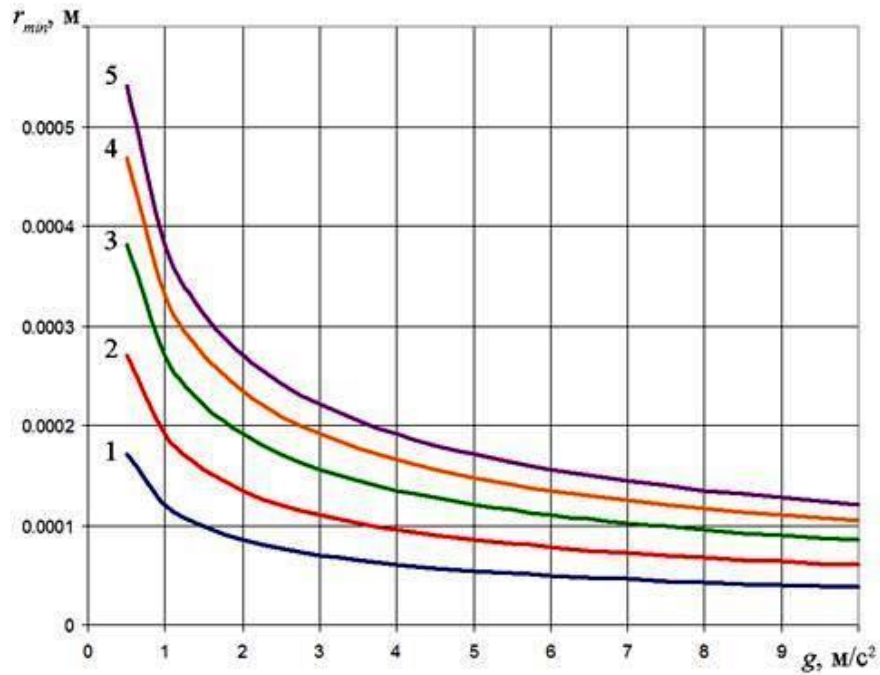


Рис. 2.4 – Залежність значення мінімального радіусу пухирця r_{min} , який встигне спливати за час існування зварювальної ванни від прискорення вільного падіння g при різних швидкостях зварювання: 1 – 1,0 мм/с; 2 – 2,5 мм/с; 3 – 5,0 мм/с; 4 – 7,5 мм/с; 5 – 10,0 мм/с.

Крім того, моделювання руху газових пухирців у зварювальній ванні показує (рис. 2.5,а), що при певних параметрах зварювання вони не встигають спливати, і можуть захоплюватися зубчастим фронтом кристалізації, викликаючи утворення пор у зварних швах [106].

Однак, параметрами процесу зварювання можна створювати такі умови, при яких газовий пухирець виходить на вільну поверхню рідкої ванни і залишає її. Пори при цьому в металі шва не утворюються (рис. 2.5 б).

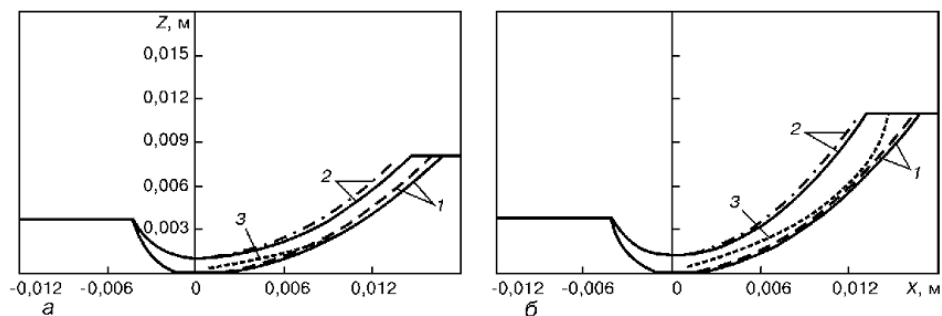


Рис. 2.5 (а, б) - Результати розрахунку траєкторії газового пухирця ($r_0=0,3\text{мм}$): 1 – фронт кристалізації у вихідному положенні (суцільна крива) та після переміщення за час t (штрихова); 2- границя ванни (суцільна і штрихова ті самі, що й в кривій 1); 3 – траєкторія пухирця [105].

Таким чином, розрахунки за запропонованою математичною моделлю показали, що траєкторія газового пухирця може перетинатися з рухомим зубчастим фронтом кристалізації ванни або виходити на вільну поверхню. У першому випадку пори виникають в середній частині шва, а в другому - не утворюються.

Така модель дозволяє оцінити вплив різних параметрів процесу електронно-променевого зварювання на ймовірність утворення пор і намітити заходи боротьби з ними.

2.3 Технологічні експерименти по відпрацюванню технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів

На існуючому у відділі обладнанні були проведені технологічні експерименти по електронно-променевому зварюванні. Для технологічних випробувань використовувалися зразки стикових з'єднань з відборткуванням крайків із алюмінієвих сплавів 5456 і 2219, які застосовуються як основний конструкційний матеріал космічної техніки [107, 108].

Технологічні роботи проводили в вакуумному стенді ОБ1469м, в якому були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104 [12], зварювальний мідний стіл з зразками і охолоджувана мідна мішень для оптимізації режимів зварювання. Живлення електронно-променевої гармати здійснювалося від лабораторного джерела ИУН – 5 з прискореною напругою 10 кВ.

Для одержання якісних зварних з'єднань, визначення геометрії та глибини проплавлення стикових з'єднань, на першому етапі проводили ненаскрізні проплави (наплавки) на зразках із сплавів 5456 та 2219.

Експерименти виконувались без розгортки, і з безперервним скануванням з круговою односторонньою розгорткою.

В результаті проведених експериментів було одержано більше 40 зразків із алюмінієвих сплавів, з наскрізними і ненаскрізними проплавами

(наплавками), а також стикових з'єднань. Внаслідок ретельного візуального огляду зварених зразків із алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 була виконана їх оцінка на провар, а також на якість зовнішнього вигляду швів з лицевого та зворотного боків. Декілька відібраних зразків були перевірені на виявлення дефектів рентгенівською дефектоскопією. Потім на цих зразках були розмічені та вирізані ділянки для виготовлення макро- та мікрошліфів, а після їх вивчення були вирізані темплети зразків для механічних випробувань і визначення хімічного складу основного металу та зварних швів.

Зварні з'єднання, які отримані електронним пучком без сканування в процесі зварювання (рис. 2.6а) і безперервним скануванням з круговою односторонньою розгорткою (рис. 2.6б), показали наявність пор розміром від 0,3 до 1,0 мм.

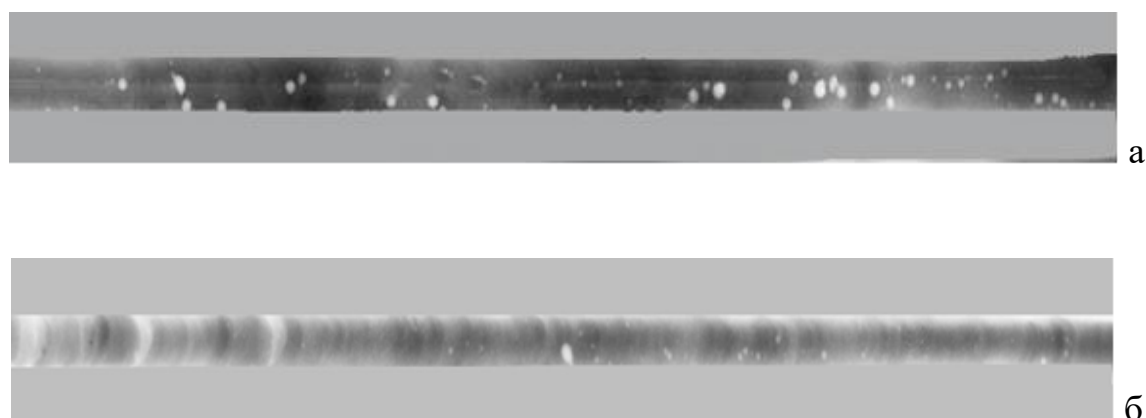


Рис. 2.6 (а, б) - Рентгенівські зображення стикових зварних з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням:

- а - сплав 5456 товщиною 6,0мм (без сканування);
- б – сплав 5456 товщиною 6,0 мм (з неперервним скануванням круговою розгорткою).

Режими зварювання та макроструктури зварних з'єднань показані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими зварювання зразків із алюмінієвого сплаву 5456

№ зраз.	Сплав	Тов., мм	Режими зварювання		Макро-шліфи
			Струм, мА	Струм фокус., мА	
1	5456 без/скан.	6,0	135	262	
2	5456 безперев. скануван.	6,0	145	268	

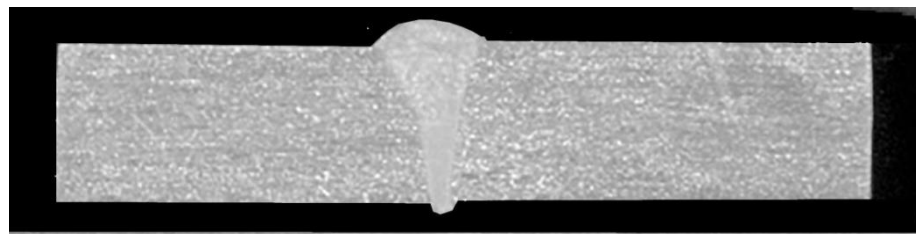
Зразки зварних з'єднань і макрошліфи алюмінієвих сплавів показані на рисунках 2.7 та 2.8.



а



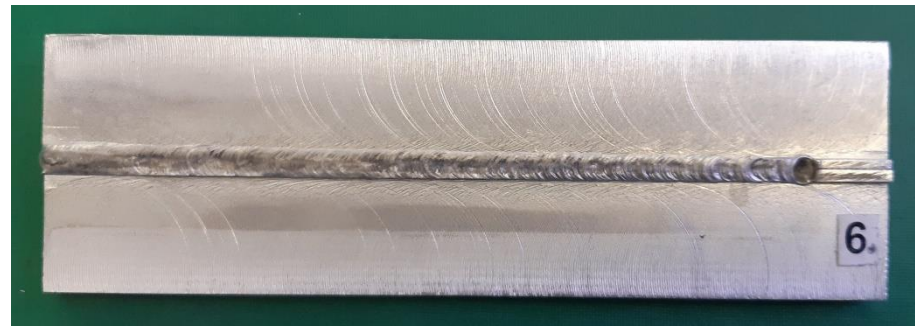
б



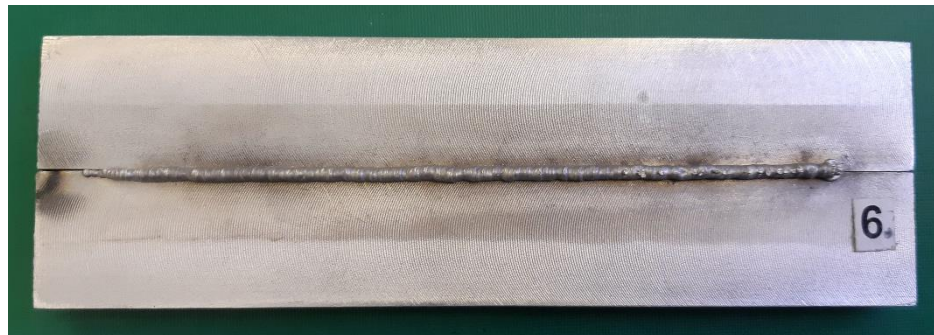
в

Рис. 2.7 - Зовнішній вигляд зразка із алюмінієвого сплаву 5456, товщиною 6,0 мм - стикове з'єднання з відбуртуванням:

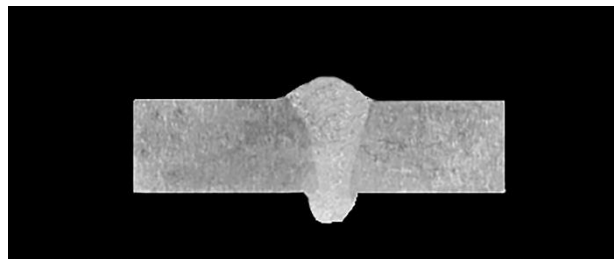
а - лицевий бік; б - зворотній бік; в - макрошліф з'єднання.



а



б



в

Рис. 2.8 - Зовнішній вигляд зразка із алюмінієвого сплаву 2219, товщиною 6,0 мм з - стикове з'єднання з відбуртуванням:
а - лицевий бік; б - зворотній бік; в - макрошліф з'єднання.

Металографічні дослідження макро та мікроструктур вивчали на поперечних шліфах. Для виявлення макроструктури зварних з'єднань Al - Mg систем легування застосовували хімічне травлення в розчині кислот: $0,5 \text{ см}^3 \text{ HF} + 1,5 \text{ см}^3 \text{ HCl} + 2,5 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3 + 95,5 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$. Для системи Al - Cu використовували послідовне травлення спочатку в 10% водному розчині NaOH, потім у 30% водному розчині HNO_3 . Дослідження виконували візуально при збільшенні до X5 для виявлення великих дефектів.

Мікроструктури ділянок зварних стикових з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням без сканування електронним пучком стикових зразків із сплавів А1570 (а, б, в) і 5456 (г) представлені на рис. 2.9. На окремих ділянках зварних з'єднань, одержаних цим способом, спостерігаються пори. Підвищена пористість в швах може бути викликана тим, що в глибокому парогазовому каналі бульбашки не встигають вийти на поверхню розплавленого металу, а масообмін розплавленого металу сприяє переміщенню їх в хвостову частину ванни, яка вже кристалізується, де і відбувається їх фіксація у вигляді пор в металі шва (МШ), в зоні часткового оплавлення на кордоні з лінією сплавлення, а також в корені шва.

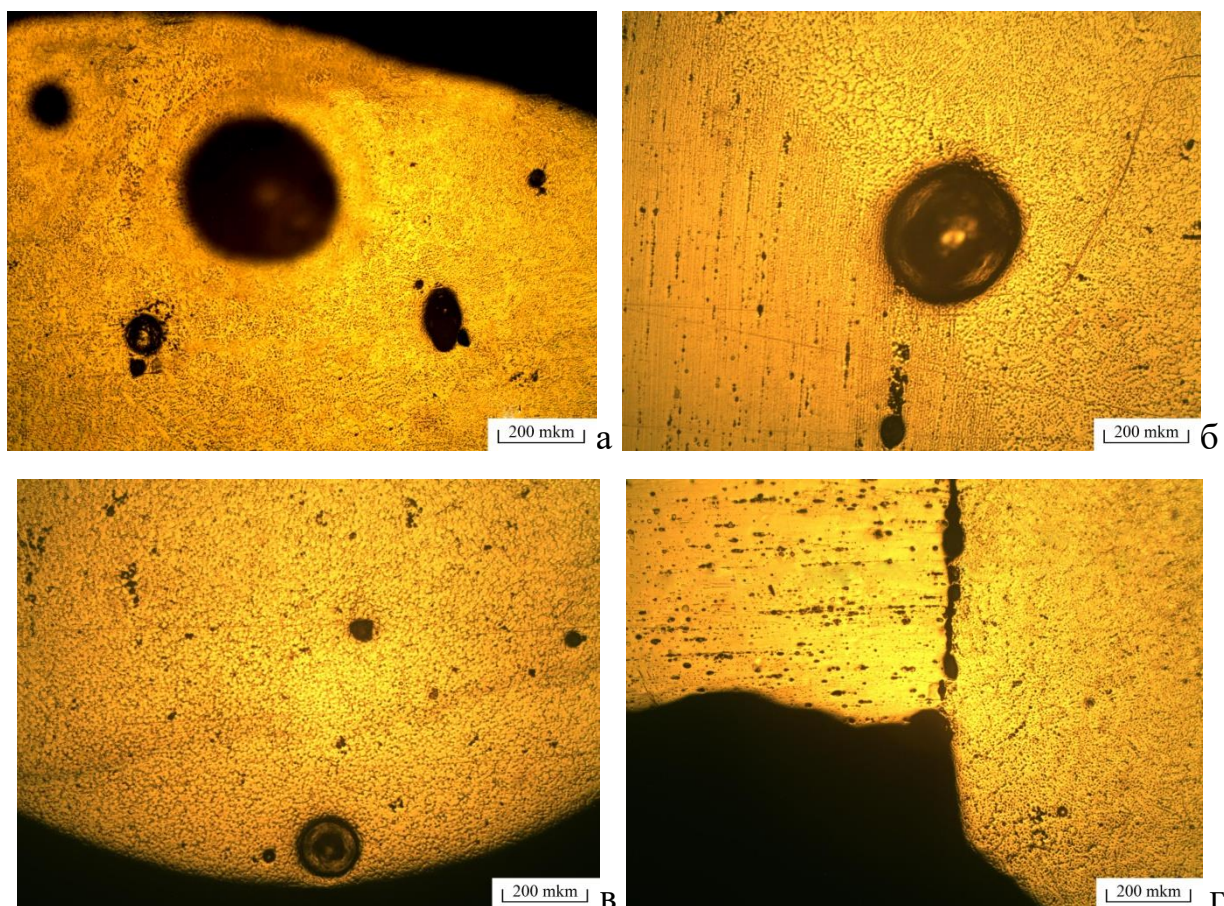


Рис. 2.9 – Мікроструктури ділянок зварних стикових з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням без сканування електронним пучком стикових зразків із сплавів А1570 (а, б, в) і 5456 (г) товщиною відповідно 8 і 6 мм: а – права верхня частина металу шва; б – кордон лінії сплавлення з основним металом; в – корінь шва; г – несплавлення крайків в лівій частині кореня шва.

З аналізу літературних джерел різних дослідників відомо, що при зварюванні алюмінієвих термозміцнених сплавів в шві та в зоні термічного впливу утворюються різного роду макро- та мікродфекти, які сприяють виникненню мікротріщин, крихкості металу і, як наслідок цих факторів, до зниження міцності, пластичності, втрати щільності та ін. Завдяки розпаду твердого розчину міді в алюмінії виникають фазові виділення, які при їх оплавленні сприяють виникненню евтектичних прошарків і, вірогідніше за все, являються центрами несучільностей зварного з'єднання. При зварюванні алюмінієво-магнієвих сплавів основними дефектами є наявність несучільностей в вигляді пор та наявність оксидних плівок в металі шва, які знижують міцність і щільність швів, що підтверджується результатами досліджень, які проведені в даній роботі [109, 110].

Для боротьби з цим явищем в процесі подальшого виконання технологічних робіт був застосований традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни перемішуванням розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою діаметром 2, 0 мм і частотою 180 Гц. Але, як показали результати (рис. 2.6 б), цей спосіб також не завжди сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин [111].

З аналізу результатів літературного та патентного пошуку відомо, що для зменшення інтенсивності утворення пор та уникнення створення тріщин, перед зварюванням алюмінієвих сплавів, проводять попередню термообробку безпосередньо несфокусованим електронним пучком малої щільності, що сканується, а потім проводиться зварювання з гострим сфокусованим пучком. (Розділ 1.4.2). Це дозволяє за рахунок часткової дегазації розчиненого водню на поверхні крайків основного металу (ОМ) виключити утворення тріщин, а також підвищити пластичність металу перед зварюванням (рис. 1.13).

Крім того, для керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу, необхідно також проводити і після зварювальну термообробку.

Враховуючи ці обставини, було прийнято рішення розробляти технологічний процес електронно-променевого зварювання, який дозволяє проводити процес зварювання з попередньою та наступною термообробкою шва, з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою з програмованою тепловою інтенсивністю в кожній зоні технологічного процесу [112].

Для створення нового технологічного процесу, який дозволить виконувати за один прохід електронно-променеве зварювання та термообробку, а також вирішити проблеми зварювання матеріалів завтовшки 4...6 мм, які в основному застосовуються в сучасному ракетобудуванні, необхідно розробити електронно-променеве обладнання, яке включає в себе тріодну електронно-променеву гармату з фокусуванням електронного променя і дискретним відхиленням програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії.

Рішення цієї проблеми вплине на вибір технологічних параметрів процесу зварювання (зокрема, швидкості та потужності джерела нагрівання та програмоване керування інтенсивністю нагрівання скануючим електронним пучком) і дозволить отримувати бездефектні зварні з'єднання.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Запропоновано якісну математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор в металі зварного шва.
2. За допомогою створеної математичної моделі проведений аналіз факторів, які сприяють підвищеному утворенню пор в зварних швах при

електронно-променевому зварюванні алюмінієвих сплавів в умовах зниженої гравітації.

3. Розглянуто два основних механізми зародження дефектності, а саме локальне схлопування ПГК і кристалізація пухирців домішкових газів, які не встигають спливати на поверхню розплаву за час існування зварювальної ванни.
4. Показано, що найбільший вплив на стійкість ПГК надає співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які несуттєво залежать від сили гравітації. В свою чергу, гідростатичний тиск знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, зумовлених локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання.
5. Показано суттєвий вплив сили гравітації та розмірів пухирців газу на швидкість їх спливання з розплаву. При цьому, при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко збільшується розмір пухирців газу, які не встигають спливати до повної кристалізації ванни розплаву, і формують сферичну несучільність металу шва.
6. Проведені технологічні експерименти, які підтверджують підвищену схильність зварних швів до появи пористості за низької гравітації.
7. Застосований традиційний спосіб дегазації зварювальної ванни перемішуванням розплавленого металу безперервним одностороннім скануванням електронного пучка з круговою розгорткою не завжди сприяє повній дегазації зварювальної ванни, особливо при зварюванні алюмінієвих сплавів середніх і великих товщин.

РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ ДОСЛІДНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В КОСМІЧНИХ УМОВАХ

3.1 Розробка обладнання нового покоління для електронно-променевого зварювання у відкритому космосі

Узагальнення накопиченого досвіду та результати проведених у відкритому космосі експериментів із ручного електронно-променевого зварювання, які наведені вище, свідчать про те, що апаратура, яка була створена раніше, дає можливість виконувати зварювання нержавіючих сталей, титанових та алюмінієвих сплавів завтовшки до 1,5 мм. В той же час товщина матеріалу, який використовується при виготовленні оболонок пілотованих космічних апаратів, досягає 4...6 мм, а довжина зварювальних швів може сягати декількох метрів.

Крім того, створені і виготовлені гармати попереднього покоління були призначені для роботи в складі ручного інструменту з терміном роботи (ПВ) не більше 5 хвилин (ПВ = 10%), в зв'язку з тим, що в них відсутнє охолодження катодного блоку. До інших недоліків також можна віднести складність конструкцій, низька надійність і низька технологічність виготовлення.

Тому однією з цілей цієї роботи було створення обладнання нового покоління з підвищеною потужністю, яке дозволить вирішити проблему зварювання матеріалів завтовшки до 6 мм та дасть можливість розробити сучасний технологічний процес, при якому за один прохід виконувати електронно-променеве зварювання та термообробку. Для цього обладнання створена тріодна електронно-променева гармата, яку доукомплектували фокусуєчо-відхиляючою системою для гострого фокусування і можливістю періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагріву по заданій траєкторії. Тріодна електронно-променева гармата включає в своєму складі швидкоз'ємний катодний вузол, який має особливість, окрім швидкої його заміни, за рахунок кондуктивного відтоку тепла передавати

нагріті теплові поля катодного тримача на основний ізолятор і на корпус катодного вузла. Це було підтверджено дослідями теплових полів в зоні паяного з'єднання кераміки з металевим електродним елементом із сплаву 22НК (ковар), який знаходяться безпосередньо в зоні катодного тримача.

3.1.1 Дослідження теплових полів зварювальної гармати в залежності від тривалості її роботи

В роботі проведені теоретичні розрахунки температури поверхні корпусу гармати, які були покладені в основу створення спеціалізованої зварювальної апаратури і розробки робочого проекту обладнання. Розрахунковими методами досліджені теплові поля зварювальної гармати в залежності від тривалості її роботи. У зв'язку з особливостями фізичних умов на поверхні Місяця - різкою зміною температурних умов удень та вночі, з урахуванням тривалості дня та ночі - проведені теоретичні розрахунки та експериментальні дослідження впливу цих особливостей на напружений стан зварних з'єднань.

Для того, щоб правильно вибрати матеріали, з яких будуть виготовлятися елементи гармати необхідно визначити температурні умови і розподілення теплового поля під час експлуатації гармати. Тому перед початком проектування гармати нового покоління була створена математична модель, за допомогою якої розрахунковими методами досліджені теплові умови експлуатації електронно-променевої гармати.

3.1.2 Схема, матеріали та умови експлуатації електронно-променевої гармати

Попередня схема електронно-променевої зварювальної гармати для роботи у відкритому космосі представлена на рис. 3.1. Вона являє собою різнорідну складову циліндричну конструкцію, усередині якої знаходиться джерело нагрівання (катод), з якого емітується електронний промінь. Таким чином, обмеження часу експлуатації приладу у процесі безперервного

зварювання визначаються можливим перегріванням (плавленням) його внутрішніх вузлів, а також зовнішньої оболонки корпусу. Тому метою чисельного аналізу кінетики температурного поля в процесі зварювання є визначення максимальних поточних температур в області найбільшого нагріву, а також легкоплавких частин конструкції гармати.

Основні матеріали, що використовуються в конструкції гармати, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Перелік основних матеріалів необхідних для виготовлення електронно-променевої гармати

сплав 29НК (ковар);	алюмінієвий сплав АМГ6;	гума;
нержавіюча сталь X18Н10Т;	молібден;	вольфрам;
титановий сплав ВТ6;	кераміка;	капролон

Залежність теплофізичних властивостей (теплопровідності та теплоємності) матеріалів, що використовуються в конструкції гармати, з урахуванням температур їх робочих діапазонів від температури наведено в роботах [113, 114].

Умови навколишнього середовища під час експлуатації гармати у відкритому космосі залежать від характеру освітленості корпусу, тому можливі три варіанти, а саме:

- експлуатація на сонячній стороні під прямою дією сонячних променів, що еквівалентно температурі +100 °С;
- експлуатація в умовах тіні, що еквівалентно температурі -120 °С;
- проміжний варіант із розташуванням світлотіньової межі безпосередньо на корпусі гармати.

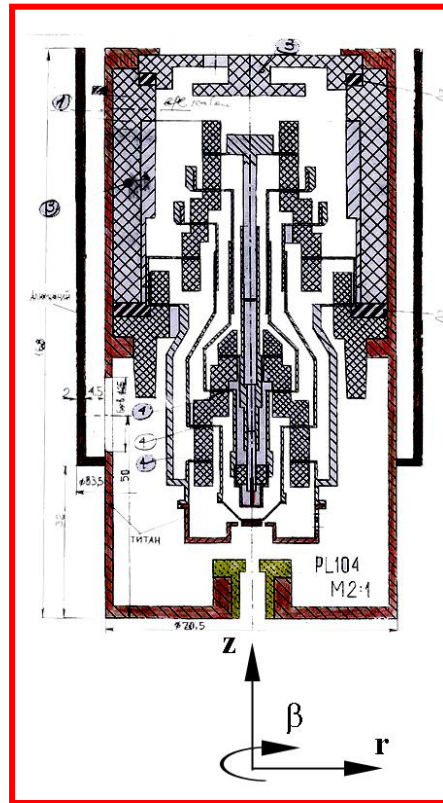


Рис. 3.1 – Попередня схема електронно-променевої зварювальної гармати

В умовах глибокого вакууму основним механізмом поверхневого нагрівання/охолодження є інфрачервоне випромінювання, інтенсивність якого пропорційна ступеню чорноти поверхні конкретної деталі. Для матеріалів ступінь чорноти поверхні приведена в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Ступінь чорноти поверхні та критична температура нагрівання елементів конструкції гармати в залежності від типу матеріалу

Матеріал	Ступінь чорноти поверхні	Критична температура нагрівання, °С
ковар	0,7	1460
X18H10T	0,4	1500
BT6	0,19	1640
АМг6	0,1	200
молібден	0,1	2620
кераміка	0,3	1600
гума	1,0	65
вольфрам	0,04	3400
капролон	0,5	80

3.1.3 Розподіл теплових полів в електронно-променевої гарматі при зварюванні у відкритому космосі

Кінетика температурного поля в даному випадку обумовлюється комплексом фізичних явищ, що включають кондуктивне перенесення тепла в твердому суцільному матеріалі, а також об'ємні та поверхневі джерела та стоки тепла [115-117]. Основними джерелами тепла є катоди ЕПГ, які нагріваються до фіксованих температур відповідно до режимів експлуатації. Подальше нагрівання відбувається за законами кондуктивного перенесення, причому властивості нерівномірно нагрітого матеріалу є просторово неоднорідними через їхню залежність від температури. Додатковим джерелом нагрівання є поверхня виробу, що зварюється, яка розігріта електронним променем до температур плавлення.

Основним механізмом поверхневого стоку тепла є випромінювання згідно із законом Стефана-Больцмана [118]. Цей механізм впливає на кінетику загальної гомогенізації температури всередині гармати в результаті перевипромінювання між її частинами, нагрітими до різної температури. У разі наявності досить щільної газової фази камери гармати може відбуватися конвективний відтік тепла з поверхні нагрітих елементів конструкції. Оскільки більшість гармат має осесиметричну конструкцію, то для зниження трудомісткості розрахунків можна використовувати двомірні моделі кінетики температурного поля, із припущенням про максимальну консервативність аналізу, тобто максимально можливої температури у процесі експлуатації зварювальної апаратури. Ця умова передбачає невеликі градієнти температури у напрямку конструкції, тобто нульові градієнти поля температур за кутовою координатою.

Оскільки основним завданням моделювання температурних полів в ЕПГ при зварюванні є виявлення небезпечно нагрітих ділянок, то для додаткового спрощення розрахунків найбільш детально розглядалася робоча частина гармати (у сфері розташування катода і анода, і навіть прилеглих до них елементів конструкції). Розрахункова схема представлена рис. 3.2.

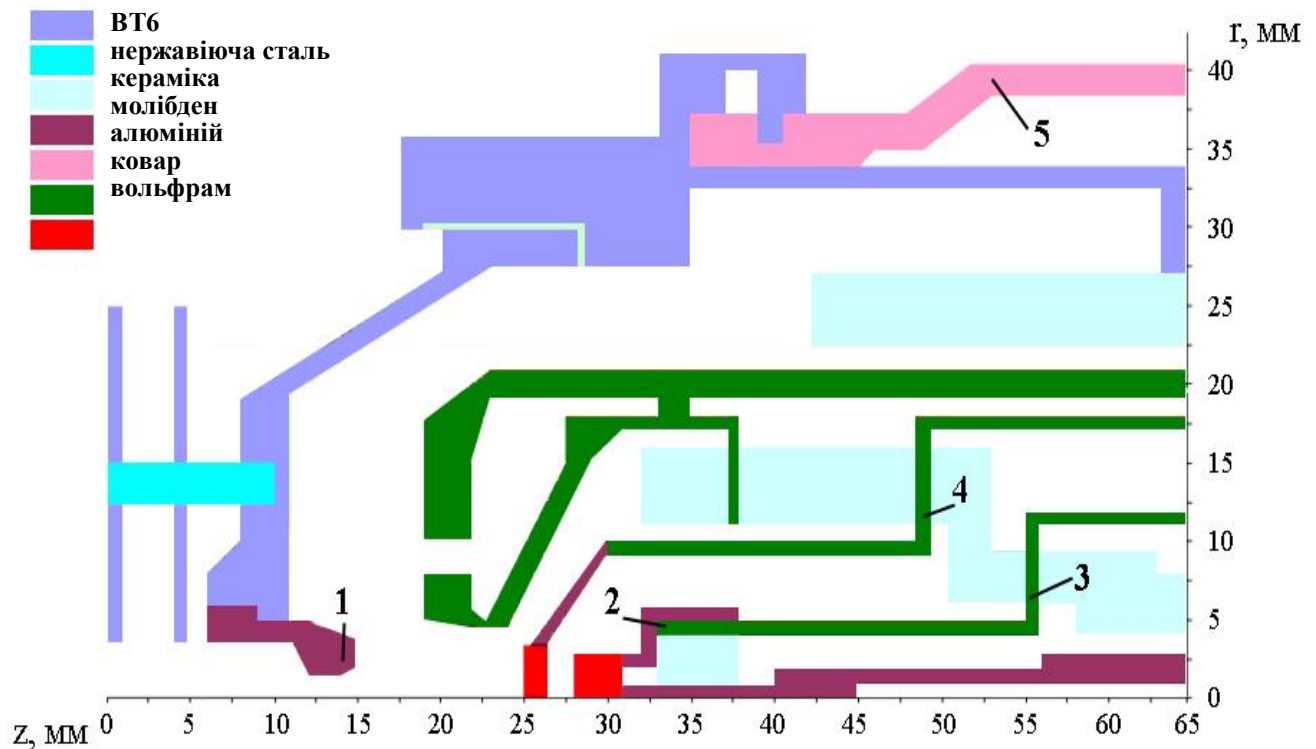


Рис. 3.2 - Розрахункова схема перерізу передньої частини електронно-променевої гармати

3.1.4 Математичний опис теплопередачі в електронно-променевій гарматі у процесі її експлуатації

Оскільки теплопровідність є основним механізмом поширення тепла у твердому тілі, то кінетика теплового поля може бути описана рівнянням теплопровідності зі змінними термодинамічними характеристиками матеріалу (тепломісткістю та теплопровідністю), яке у цьому випадку має вигляд [119]:

$$C\rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla[\lambda(T) \cdot \nabla T], \quad (3.1)$$

Де T – температура, °С; $\lambda(T)$ – теплопровідність, Дж/(мм·с·°С); $C\rho(T)$ – об'ємна теплоємність, Дж/(мм³·°С).

При моделюванні процесів нестационарної теплопровідності в циліндричній конструкції чисельне рішення (3.1) раціонально шукати в

циліндричній системі координат (r, β, z) , для якої рівняння теплопровідності має такий вигляд:

$$\begin{aligned} C\rho(r,\beta,z,T) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial r} \cdot \left\{ \lambda(r,\beta,z) \cdot \frac{\partial [r \cdot T(r,\beta,z)]}{\partial r} \right\} + \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial \beta} \cdot \left[\lambda(r,\beta,z) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial \beta} \right] + \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial z} \cdot \left[\lambda(r,\beta,z) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial z} \right]. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Для коректної постановки задачі (3.1) потрібен облік початкових та граничних умов. Так, початковими умовами є вихідні розподілу температур у даному виробі, а саме рівномірний розподіл кімнатної температури:

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (3.3)$$

де T_0 – температура навколишнього середовища, °С.

Вибір конкретного значення T_0 залежить від умов на різних поверхнях досліджуваної конструкції. Кондуктивне стікання тепла з поверхні може бути описане законом Ньютона [118]:

$$q_L = \alpha \cdot (T - T_C), \quad (3.4)$$

де q_L – питомий потік тепла з поверхні металу, Вт/(мм²); α – коефіцієнт теплоперенесення, Вт/(мм²·°С); T_C - температура навколишнього середовища, °С.

Слід зазначити, що значення залежить від роду контакту на поверхні виробу, що зварюється. Так, у разі зіткнення з силовим оснащенням (наприклад, з механічними закріпленнями або опорним столом) значення коефіцієнта перенесення в цьому місці будуть у кілька разів вище, ніж у випадку контакту з атмосферою.

Альтернативним механізмом дисипації теплової енергії з поверхні нерівномірно розігрітої конструкції є випромінювання, яке описується згідно із законом Стефана-Больцмана:

$$q_l = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4), \quad (3.5)$$

де q_l – питомий потік інфрачервоного випромінювання із поверхні металу, Вт/(мм²); ε – ступінь чорноти поверхні досліджуваної конструкції; σ – коефіцієнт Стефана-Больцмана, Вт/(мм²·К⁴); розмірність температури, що фігурує в (3.5), приймається за шкалою Кельвіна.

Відповідно до закону Фур'є питомий потік тепла до поверхні теплопровідного тіла має такий математичний вираз:

$$q_r = -\lambda(T) \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial n}, \quad (3.6)$$

де n – нормаль до поверхні.

Граничні умови, таким чином, можуть бути визначені з умови рівності потоків енергії, що надходить до поверхні та відводиться від неї:

$$q_r = q_l + q_l, \quad (3.7)$$

Підстановка (3.7) функціональних значень (3.5)–(3.6) дозволяє сформулювати граничні умови в наступному вигляді:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(t)}{\partial n} = \alpha(T - T_c) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_c^4). \quad (3.8)$$

Для чисельного розв'язання задачі теплопровідності достатньо скористатися кінцево-різницевою схемою розщеплення Пімена-Рекфорда [120]. У цьому випадку диференціальне співвідношення (3.1) на деякому просторовому розбитті $\{j,i,k\}$: $j \in (0,N)$, $i \in (0,M)$, $k \in (0,P)$ має вигляд:

$$\begin{aligned}
C\rho_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik}^*}{t - t^*} = & \\
= \frac{1}{r_j} \cdot \frac{2}{(r_{j+1} - r_{j-1})} & \left[\lambda_{j+1ik} \cdot \frac{r_{j+1} \cdot T_{j+1ik} - r_j \cdot T_{jik}}{(r_{j+1} - r_j)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{r_j \cdot T_{jik} - r_{j-1} \cdot T_{j-1ik}}{(r_j - r_{j-1})} \right] + \\
+ \frac{1}{r_j^2} \cdot \frac{2}{(\beta_{i+1} - \beta_{i-1})} & \left[\lambda_{ji+1k} \cdot \frac{T_{ji+1k} - T_{jik}}{(\beta_{i+1} - \beta_i)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{ji-1k}}{(\beta_i - \beta_{i-1})} \right] \\
+ \frac{2}{(z_{k+1} - z_{k-1})} & \left[\lambda_{jik+1} \cdot \frac{T_{jik+1} - T_{jik}}{(z_{k+1} - z_k)} - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik-1}}{(z_k - z_{k-1})} \right], \\
j \in (1, N-1), i \in (1, M-1), k \in (1, P-1) & \tag{3.9}
\end{aligned}$$

де T_{jik} – температура у вузлі (j, i, k) у поточний (попередній) час t (t^*);

Якщо позначити кроки за простором як $h_r^j = (r_{j+1} - r_j)/2$, $h_\beta^i = (\beta_{i+1} - \beta_i)/2$, $h_z^k = (z_{k+1} - z_k)/2$, а за часом $\Delta t = t - t^*$, тоді (3.9) набуває вигляду:

$$\begin{aligned}
C\rho_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik}^*}{\Delta t} = & \lambda_{j+1ik} \cdot \frac{r_{j+1} \cdot T_{j+1ik}^* - r_j \cdot T_{jik}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^j} - \lambda_{jik} \cdot \frac{r_j \cdot T_{jik} - r_{j-1} \cdot T_{j-1ik}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^{j-1}} + \\
+ \lambda_{ji+1k} \cdot \frac{T_{ji+1k} - T_{jik}}{r_j^2 \cdot \bar{h}_\beta^i \cdot h_\beta^i} & - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{ji-1k}}{r_j^2 \cdot \bar{h}_\beta^i \cdot h_\beta^{i-1}} + \\
+ \lambda_{jik+1} \cdot \frac{T_{jik+1} - T_{jik}}{\bar{h}_z^k \cdot h_z^k} & - \lambda_{jik} \cdot \frac{T_{jik} - T_{jik-1}}{\bar{h}_z^k \cdot h_z^{k-1}}, \\
j \in (1, N-1), i \in (1, M-1), k \in (1, P-1) & \tag{3.10}
\end{aligned}$$

де $\bar{h}_r^j = (h_r^{j+1} + h_r^j)/2$, $\bar{h}_\beta^i = (h_\beta^{i+1} + h_\beta^i)/2$, $\bar{h}_z^k = (h_z^{k+1} + h_z^k)/2$.

У багатьох практично важливих випадках градієнт температури в деякому напрямку зневажливо малий, що дозволяє розглядати рівняння теплопровідності (3.2) у двовимірній постановці. Без обмеження спільності можна вважати, що тоді (3.2) набуває спрощеного вигляду:

$$\begin{aligned}
& C\rho(r,\beta,z,T) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial t} = \\
& = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial r} \cdot \left\{ \lambda(r,\beta,z) \cdot \frac{\partial [r \cdot T(r,\beta,z)]}{\partial r} \right\} + \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial z} \cdot \left[\lambda(r,\beta,z) \cdot \frac{\partial T(r,\beta,z)}{\partial z} \right]. \quad (3.11)
\end{aligned}$$

Аналогічно, спрощується кінцево-різницева постановка задачі (3.11) у порівнянні з (3.2):

$$\begin{aligned}
C\rho_{jik} \cdot \frac{T_{ji} - T_{ji}^*}{\Delta t} &= \lambda_{j+1i} \cdot \frac{r_{j+1} \cdot T_{j+1i}^* - r_j \cdot T_{ji}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^j} - \lambda_{ji} \cdot \frac{r_j \cdot T_{ji} - r_{j-1} \cdot T_{j-1i}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^{j-1}} + \\
&+ \lambda_{ji+1} \cdot \frac{T_{ji+1} - T_{ji}}{\bar{h}_z^i \cdot h_z^i} - \lambda_{ji} \cdot \frac{T_{ji} - T_{ji-1}}{\bar{h}_z^i \cdot h_z^{i-1}}, \quad j \in (1, N-1), \quad i \in (1, P-1) \quad (3.12)
\end{aligned}$$

де T_{ji} (T_{ji}^*) – температура у вузлі (j,i) у поточний (попередній) час t (t^*);
 $C\rho_{ji} = C\rho(r_j, z_i, T_{ji}^*)$; $\lambda_{ji} = \lambda(r_j, z_i, T_{ji}^*)$.

Ця схема передбачає шаблон пошуку рішення типу хрест, що складається з п'яти вузлів сітки розбиття, що визначає, зокрема, вибір способу розбиття (див. рис. 3.3). Для вирішення цього різницевого завдання необхідна постановка граничних та початкових умов. Що стосується початкових умов, то виходячи з (3.3) початковий стан може бути заданий як

$$T_{ji} = T_0. \quad (3.13)$$

Що стосується граничних умов, то без обмеження спільності можна вважати, що нормаль до поверхні паралельна осі Or (Oz) і в різницевій формі вони набувають вигляду: – якщо зовнішня нормаль до розглянутої поверхні спрямована таким же чином, що і вісь Or (Oz)

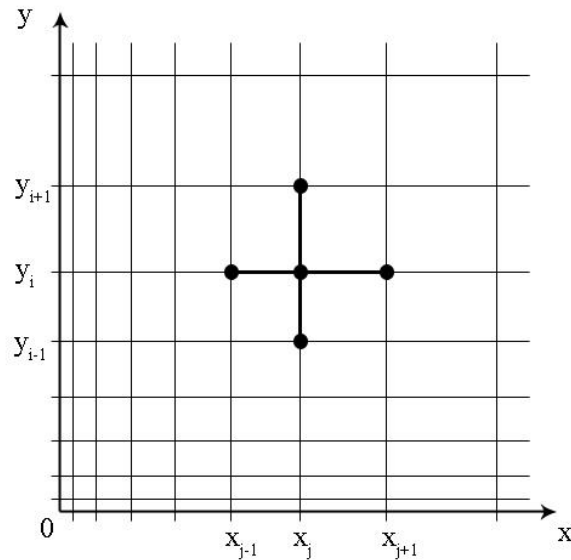


Рис. 3.3 - Схема нерівномірної просторової сітки у двовимірному випадку та шаблон типу хрест

$$-\lambda_{ji} \frac{T_{ji} - T_{ji-1}}{h_r^i} \Big|_{(j,i) \in G'} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[(T_{ji}^*)^4 - T_C^4 \right]; \quad (3.14)$$

– якщо зовнішня нормаль до розглянутої поверхні протилежно спрямована осі Ox

$$-\lambda_{ji} \frac{T_{ji} - T_{ji+1}}{h_r^{i+1}} \Big|_{(j,i) \in G'} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left[(T_{ji}^*)^4 - T_C^4 \right], \quad (3.15)$$

де G' – масив вузлів, які розглядаються як такі, що належать границі.

Вирішення крайової задачі (3.13) може бути отримане методом прогонки [116]. Для класичного уявлення розглянутого диференціального рівняння другого порядку різницеве завдання (2.10) можна переписати у вигляді

$$A_{ji} \cdot T_{ji+1} + B_{ji} \cdot T_{ji} + C_{ji} \cdot T_{ji-1} = F_{ji}, \quad j \in (0, N), i \in (0, M), \quad (3.16)$$

де коефіцієнти рівняння відповідно рівні

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{ji} = \frac{\lambda_{j+1}}{\bar{h}_z^i h_z^i}; \\ B_{ji} = -\frac{C\rho_{ji}}{\Delta t} - \frac{r_j \cdot \lambda_{j+1i}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^j} - \frac{r_j \cdot \lambda_{ji}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^{j-1}} - \frac{\lambda_{j+1}}{\bar{h}_z^i \cdot h_z^i} - \frac{\lambda_{jik}}{\bar{h}_z^i \cdot h_z^{i-1}}; \\ C_{ji} = \frac{\lambda_{ji}}{\bar{h}_z^i \cdot h_z^{i-1}}; \\ F_{ji} = -\frac{C\rho_{ji}T_{ji}^*}{\Delta t} + \lambda_{j+1i} \cdot \frac{r_{j+1} \cdot T_{j+1i}^*}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^j} + \lambda_{ji} \cdot \frac{r_{j-1} \cdot T_{j-1i}}{r_j \cdot \bar{h}_r^j \cdot h_r^{j-1}}. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

В основу методу прогонки покладено припущення лінійного зв'язку між значеннями змінної, що шукається, на сусідніх вузлах з невизначеними коефіцієнтами:

$$T_{ji} = \tilde{\alpha}_{j+1} T_{j+1} + \tilde{\beta}_{j+1}. \quad (3.18)$$

Підстановка (3.18) в (3.16) дозволяє отримати рекурентні співвідношення для коефіцієнтів прогонки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\alpha}_{j+1} = \frac{B_{ji}}{C_{ji} - \tilde{\alpha}_{ji} A_{ji}}, \\ \tilde{\beta}_{j+1} = \frac{A_{ji} \tilde{\beta}_{ji} + F_{ji}}{C_{ji} - \tilde{\alpha}_{ji} A_{ji}}, \\ j \in (1, N), i \in (0, M). \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Якщо граничні умови можуть бути представлені у вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{j0} = \mu_1 T_{j1} + \mathcal{G}_1; \\ T_{jM} = \mu_2 T_{jM-1} + \mathcal{G}_2, \end{array} \right. \quad (3.20)$$

$$\text{тоді} \begin{cases} \tilde{\alpha}_{j1} = \mu_1; \\ \tilde{\beta}_{j1} = \vartheta_1; \\ T_{jM} = \frac{\mu_2 - \vartheta_2 \tilde{\beta}_{jM}}{1 - \tilde{\alpha}_{jM} \vartheta_2}. \end{cases} \quad (3.21)$$

Відповідно, для розрахунку значень T_{ji} для кожного конкретного $j \in (1, N)$ необхідно присвоїти значення коефіцієнтам прогонки згідно (3.19) та (3.20), а потім отримати ряд значень T_{ji} з (3.18). Що стосується прогонки при $j=1$, то значення коефіцієнтів (3.17) у цьому випадку не застосовні, тому що фігурують у цих співвідношеннях значення $T_{j-1i} = T_{0i}$, що пов'язані зі значенням шуканого поля в інших вузлах сітки розбиття не умовами теплопровідності, а граничними умовами. Тому ці коефіцієнти визначаються, виходячи з умов конкретного завдання. Значення T_{jN} можуть бути отримані безпосередньо із граничних умов на основі отриманих значень T_{jN-1} .

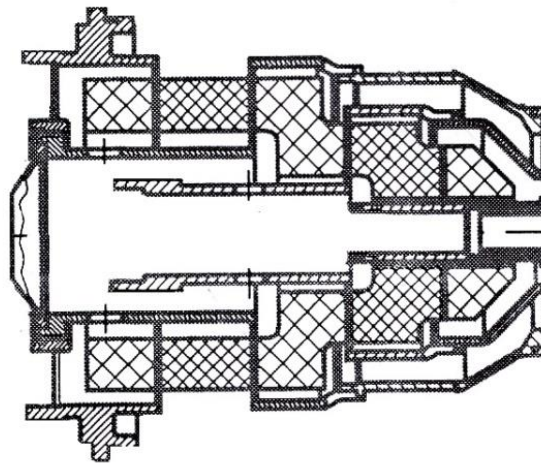
Важливим параметром розрахунку з погляду коректності одержуваних результатів та мінімізації часу рахунку є вибір розбиття за часом, що має бути досить дрібним, щоб забезпечувалася мінімальна похибка розв'язання різницевої задачі. Для визначення тимчасового розбиття може бути використане правило Панова, яке полягає в тому, що якщо в міру зменшення кроку часу вирішення різницевої задачі стало в певний момент стійким, то подальше подрібнення розбиття не зможе збільшити похибку розрахунку. Це правило можна переформулювати наступним чином: оптимальним розбиттям за часом є таке, що збільшення кроку за часом призводить до похибки отриманого чисельного рішення, яке перевищує певне максимальне значення.

3.1.5 Верифікація розроблених моделей кінетики температурного поля у перерізі електронно-променевої гармати

Для підтвердження коректності розрахунків кінетики температурного поля в різнохідній конструкції ЕПГ у рамках викладеного вище кінцево-різницевого опису було проведено комплекс лабораторних випробувань. Для

цього використовувалася фактична частина конструкції гармати (рисунок 3.1), яка при експлуатації найбільш нагрівається (рис. 3.4 а). Як джерело нагрівання використовувався електронний промінь, спрямований на танталовий перехідник різної довжини (рис. 3.4 б), що кондуктивно передає потік тепла в область розташування катода. При цьому проводилося контрольне вимірювання температур в області нагрівання електронним пучком, а також на корпусі досліджуваної деталі в процесі нагрівання та охолодження.

На рис. 3.5, 3.6 показано порівняння результатів двох вимірювань (на різних режимах) кінетики температурного поля при нагріванні зазначеного елемента з розрахунковими температурними кривими (таблиці 3.1...3.10). З наведених даних можна зробити загальний висновок, що стосовно розглянутої задачі оптимізації конструкції ЕПГ та підтвердження максимального допустимого часу її безперервної роботи в умовах космосу запропоновані алгоритми та програмні засоби дозволяють отримати хорошу адекватність розрахункових результатів. При цьому кореляція розрахункових та експериментальних результатів спостерігається як на стадії охолодження (коли переважаючими властивостями матеріалу, що визначають кінетику поширення тепла, є теплопровідність і теплоємність), так і на стадії нагріву (де додатково помітну роль надає ступінь чорноти поверхні сильно нагрітих елементів).



а

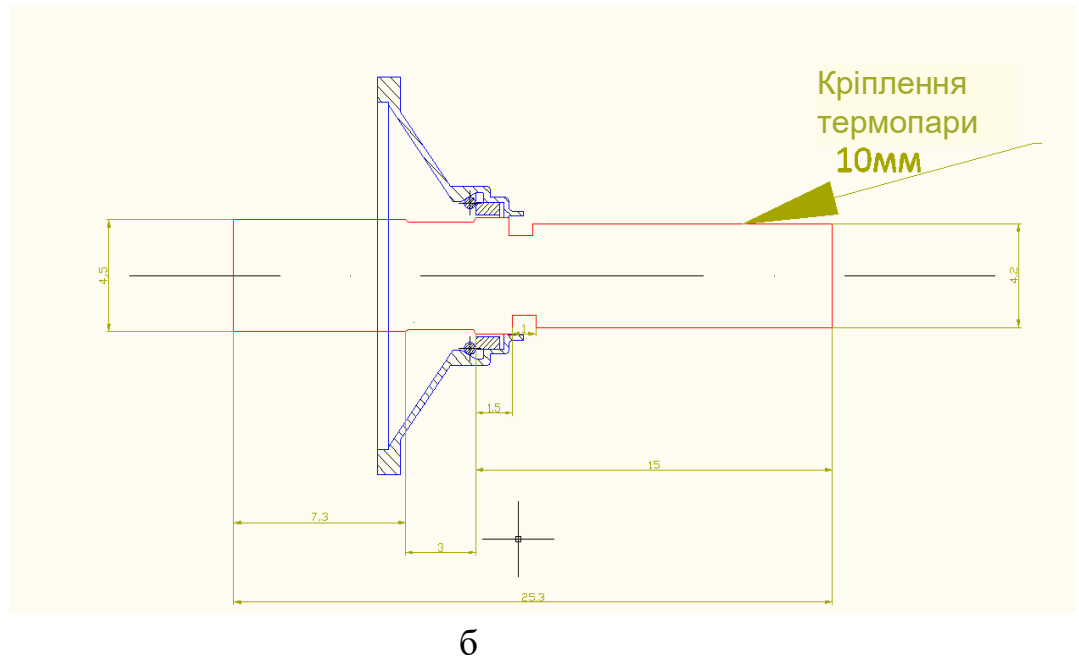


Рис. 3.4 - Схема елемента електронно-променевої гармати, що використовується для лабораторних досліджень кінетики температурного поля при зварюванні (а), та модуль нагрівання гармати (б)

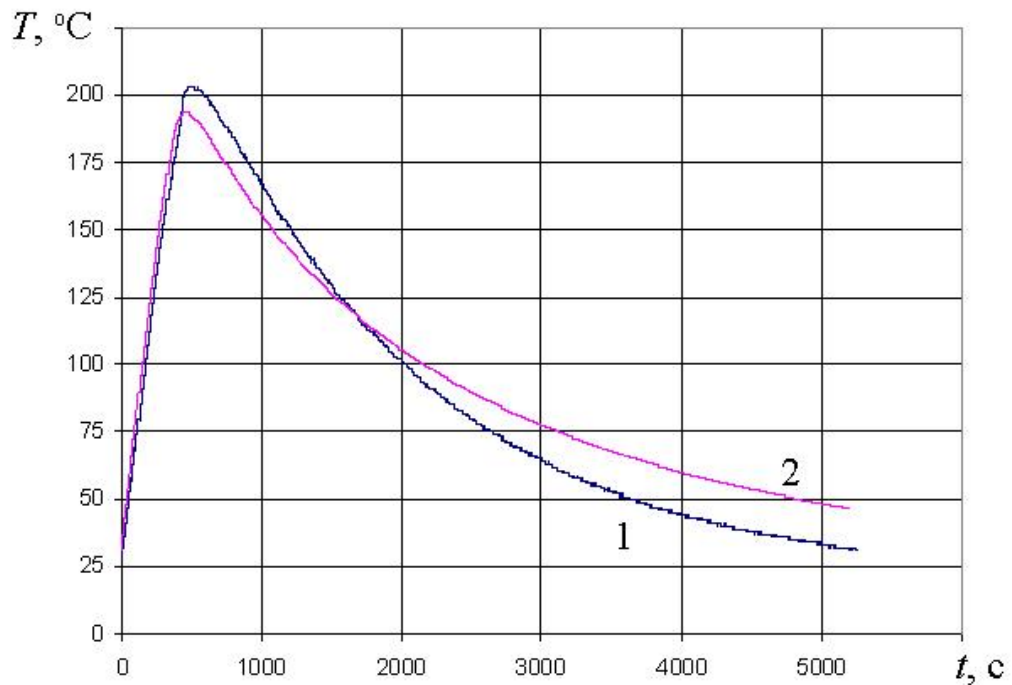


Рис. 3.5 - Порівняння даних вимірювань кінетики температурного поля при нагріванні випробувальної конструкції за режимом А (1) з розрахунковими результатами (2)

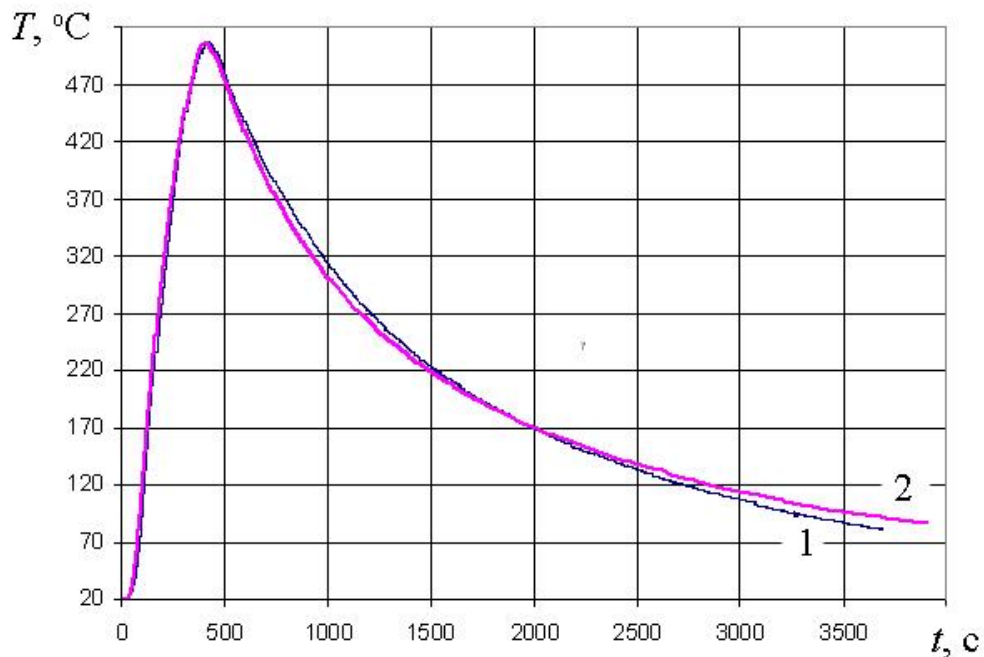


Рис. 3.6 - Порівняння даних вимірювань кінетики температурного поля при нагріванні випробувальної конструкції за режимом Б (1) з розрахунковими результатами (2)

3.2 Прогнозування кінетики температурного поля в процесі експлуатації електронно-променевої гармати

3.2.1 Аналіз температури нагрівання критичних елементів електронно-променевої гармати

Різні елементи конструкції ЕПГ мають свої критичні значення температури нагрівання, що обмежують час ефективної експлуатації приладу. Ці температури пов'язані, насамперед, з плавленням матеріалу або зі зниженням експлуатаційної здатності (перегрів корпусу в області можливого контакту з рукою зварювальника, зменшення ізоляційної здатності матеріалів, неприпустиме термічне розширення). Основні характерні критичні температури різних вузлів гармати вказані в таблиці 3.10.

Для оцінки кінетики температурного поля у процесі зварювання було проведено комплекс чисельних експериментів з урахуванням методології, представлені вище. Вважалося, що катод розігрівається до температури 1800°C , що достатньо для стабільної емісії електронного пучка. При цьому

супутній підігрів катода здійснюється за допомогою спіралі нагрітої до температури 1800 °С. Температура доквілля консервативно прийнята рівною 100 °С, що еквівалентно характерній потужності сонячного випромінювання. Додатково враховувався вплив нагрітої конструкції, що зварюється, яка нагріває передню частину гармати. Для цього приймався наступний характерний розподіл температурного поля при зварюванні (рис. 3.7).

Як показали попередні розрахунки (рис. 3.8), до найбільш небезпечних з точки зору можливого перегріву елементам гармати даної конструкції слід відносити такі ділянки (рис. 3.2):

1. Молибденовий анод – можливе розплавлення анода внаслідок падіння недостатньо сфокусованого електронного пучка, а також від локального нагрівання теплом від зварювальної ванни;
2. Коварово-молибденовий контакт у сфері катода – можливе розплавлення менш тугоплавкої коварової частини;
3. Місце паяння 1 - можливе розплавлення легкоплавкого припою;
4. Місце паяння 2 - можливе розплавлення легкоплавкого припою;
5. Корпус – можливий перегрів у результаті внутрішнього нагрівання приладу або під дією сонячного випромінювання.

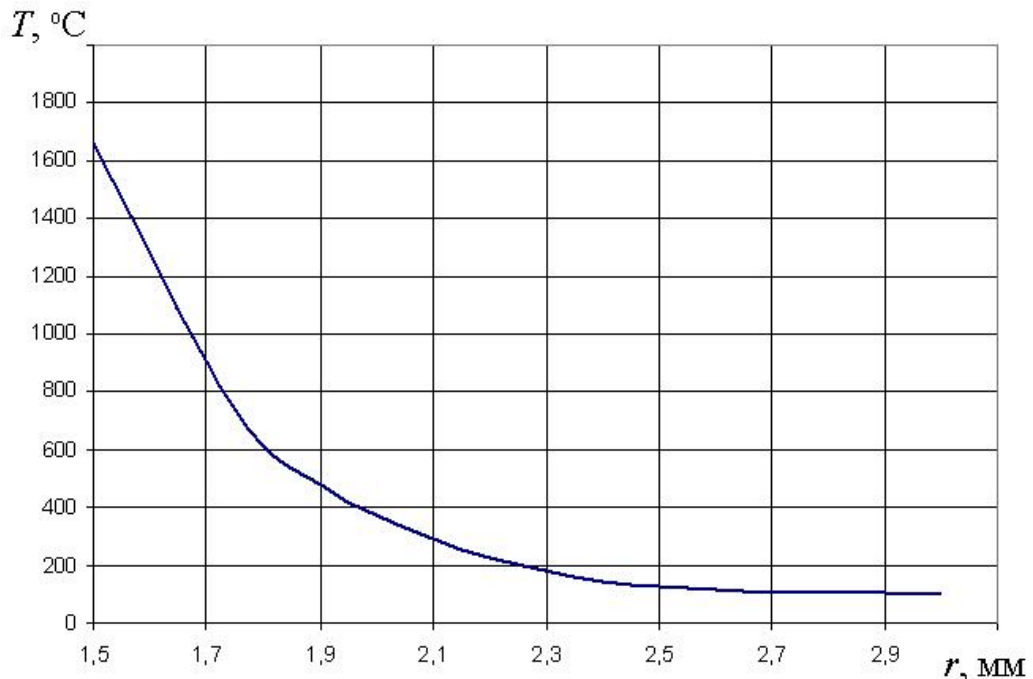


Рис. 3.7 - Характерний розподіл температури поверхні конструкції, що зварюється біля місця впливу електронного променя

На рис. 3.9 показано зміну часу температури в контрольних точках протягом 15 хв (900 с) експлуатації ЕПГ. Так, температура нагрівання корпусу в алюмінієвій частині (області можливого контакту з рукою зварювальника) за вказаний проміжок часу не перевищує температури навколишнього середовища (+100 °С). Це зумовлено тим, що полірована поверхня алюмінію має високу відбивну здатність, тому нагрівання від зовнішнього випромінювання на сонячній стороні відбувається досить повільно. Нагрів корпусу (5) від внутрішнього джерела тепла (катода та інших сильно нагрітих елементів гармати) суттєвий тільки на торцевій стороні гармати, де переважно впливає високоенергетичний електронний пучок, а також область зварювання. Але низька теплопровідність титану запобігає швидкому поширенню тепла по корпусу приладу.

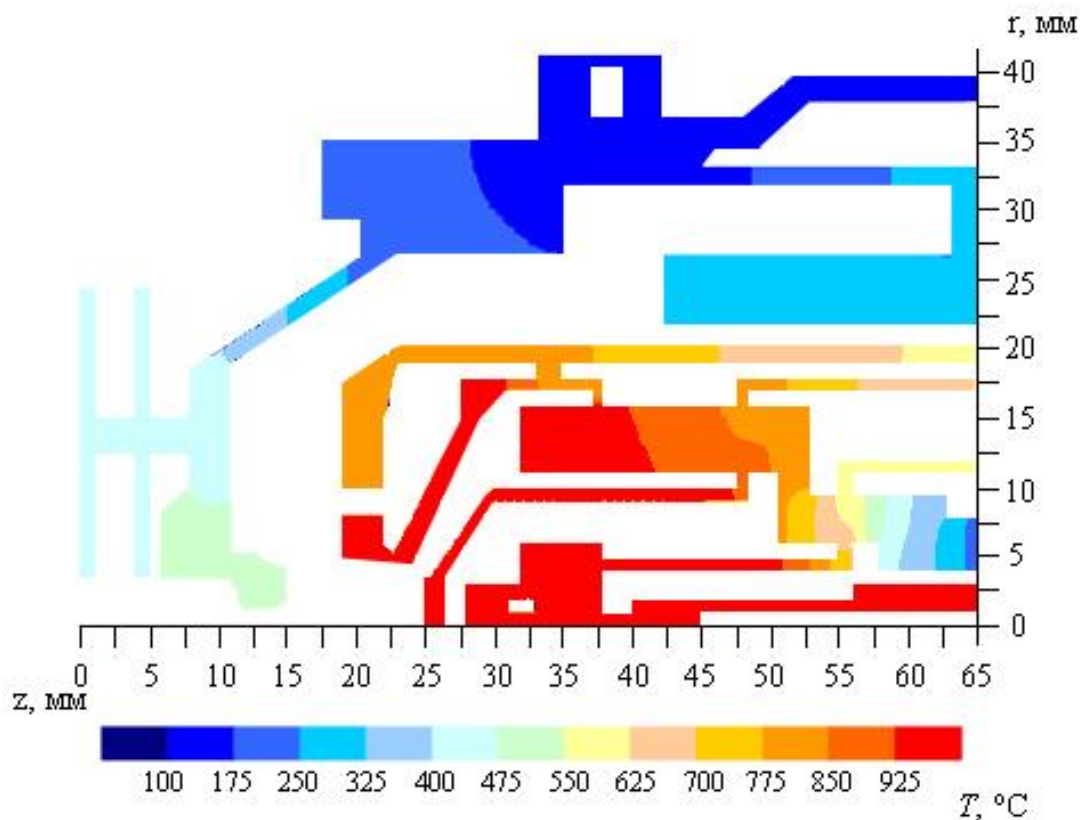


Рис. 3.8 - Поле поточних температур у передній частині гармати після 15 хв (900 с) експлуатації у проектному режимі

Критичними місцями конструкції гармати є місця пайки (3, 4), які розташовані близько до катода і характеризуються низькою температурою

плавлення. Тепло від катода проходить по коваровому елементу конструкції до місця пайки без істотної дисипації тепла (оскільки оточуючі елементи також нагріті, втрати тепла випромінювання незначні). Це пояснює відсутність теплового насичення для місць пайки за період експлуатації гармати, що розглядається. При цьому перегрів цих областей є фактором, що обмежує час експлуатації гармати у робочих режимах. Таким чином, продовження часу безперервної експлуатації приладу можливе за умови більш тугоплавких припоїв.

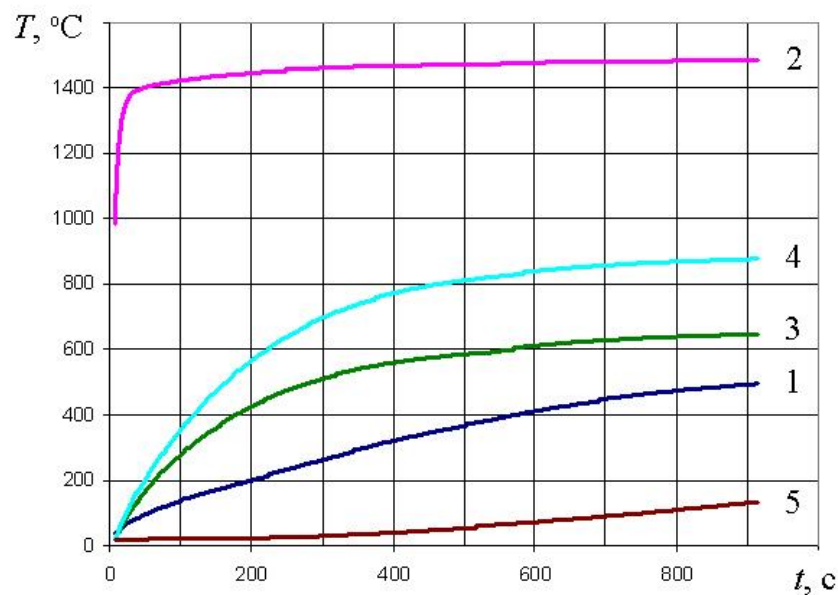


Рис. 3.9 - Кінетика температурного поля в контрольних точках конструкції гармати (рисунок 3.2) при експлуатації в проектному режимі

Нагрів молібденового анода (1) визначається ступенем фокусування та потужністю променя, що проходить через нього, нагріванням із зовнішнього боку (область зварювання), а також інфрачервоним випромінюванням з нагрітих елементів конструкції гармати. Як видно з наведених даних, максимальне нагрівання досліджуваного елемента має місце на внутрішній поверхні молібденової частини, де спільна дія електронного пучка і випромінювання з поверхні катода викликає суттєве нагрівання. При цьому тугоплавкість молібдену дозволяє уникнути плавлення, але цей факт визначає

жорсткі вимоги до фокусування променя, а також його центрування: надмірна теплова дія на поверхню молібдену спричинить перегрів як анода, так і всього корпусу гармати.

Коварово-молібденовий контакт (2) у ділянці катода безпосередньо примикає до максимально нагрітої області гармати, саме до вольфрамового катода. І якщо тугоплавка молібденова частина при проектних режимах експлуатації приладу не плавиться, то підступ має меншу температуру плавлення і може оплавлятися. Як показали результати розрахунків, температурний режим області катода досить швидко виходить на стаціонарний режим, тобто. температурне поле не змінюється у часі. При цьому коварова частина коварово-молібденового контакту істотно нагрівається, але максимальні температури не досягають температур плавлення. Тому слід брати до уваги, що порушення проектних температурних режимів може призвести до часткового оплавлення ковара в катодній області та порушення функціональності ЕПГ.

3.2.2 Вплив положення світлотіньової межі на температуру корпусу електронно-променевої гармати

Проведені розрахунки кінетики температурного поля у перерізі ЕПГ засновані на консервативному припущенні про максимально можливу температуру навколишнього середовища, що відповідає постійній роботі приладу на сонячному боці. Але в процесі тривалої експлуатації умови зовнішнього нагріву можуть змінюватися, зокрема, поверхнею корпусу може пройти світлотінева границя (СТГ). При цьому умови зовнішнього нагріву корпусу суттєво змінюються: однорідна по всій довжині температура, яка відповідає сонячній стороні, спочатку змінюється на неоднорідну щодо поточного положення СТГ (часткове затінення) аж до повного затінення, коли температура на поверхні корпусу однорідна, але відповідає умовам тіні. Цей ефект досліджувався для різних швидкостей переміщення СТГ з точки зору впливу на температуру корпусу гармати.

Так, було проведено моделювання температурного поля на алюмінієвій частині корпусу гармати у припущенні, що СТГ з'являється на передній стороні гармати через 900 с після початку роботи. Подальше просування кордону вздовж гармати збільшує область тіні та умови тепловіддачі; у своїй вважається, що сумарний час роботи гармати становить 1000 с. Так, для різних швидкостей переміщення СТГ уздовж корпусу, а саме: 15 мм/с, 1,5 мм/с, 3,0 мм/с, було отримано розподіл температури вздовж корпусу гармати після 1000с експлуатації (рис. 3.10). Наявність та рух СТГ несуттєво впливає на температурний режим роботи гармати: відмінність між температурними полями за різних швидкостей СТГ не перевищує 1%. Це зумовлено високою відбивною здатністю алюмінію і відносно невисокою температурою корпусу гармати, внаслідок чого потік інфрачервоного випромінювання з поверхні невеликий. Тому незалежно від зміни ступеня освітленості конструкції основним механізмом нагрівання її корпусу є внутрішній перерозподіл тепла від катода. Крім того, переміщення гармати в тінь для поточного охолодження є неефективним способом продовження часу її безперервної експлуатації.

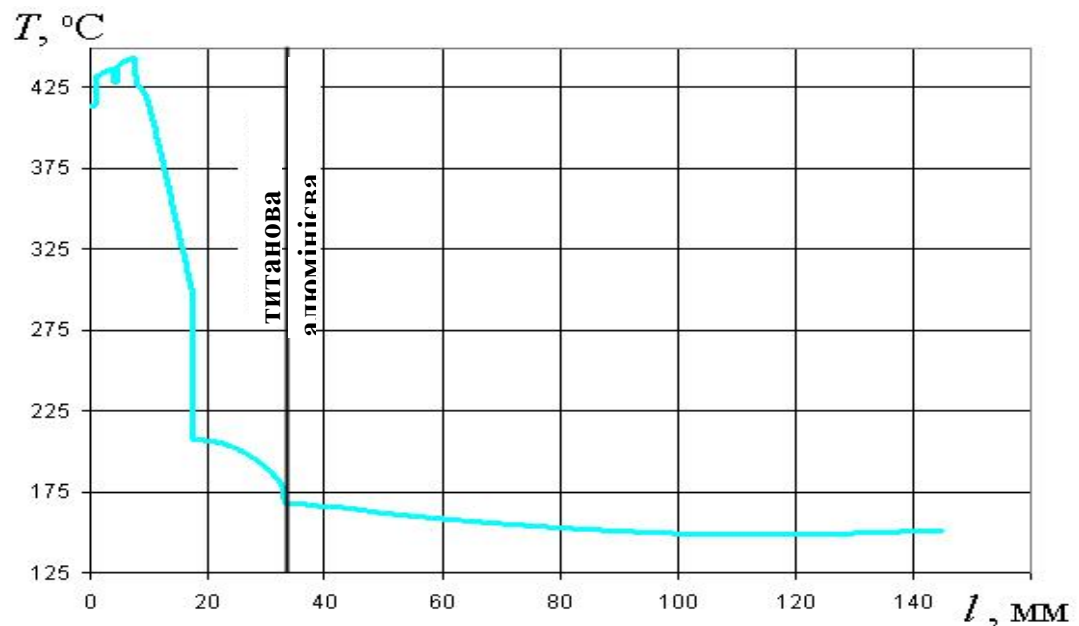


Рис. 3.10 - Розподіл температури вздовж корпусу гармати після 1000 с експлуатації з урахуванням переміщення світлотіньової границі

3.3 Розробка конструкції електронно – променевої гармати

На основі проведених теплових досліджень була запропонована концепція створити новий ручний електронно-променевий інструмент, який містить електронно-променеву гармату, що з'єднується з джерелом живлення за допомогою високовольного гнучкого кабелю з роз'ємом і матиме можливість формувати гострофокусний пучок діаметром не більше 1 мм в фокальній площині на відстані до 80 мм без застосування фокуруючої електромагнітної лінзи, що дасть змогу оператору виконувати технологічні процеси без надмірних зусиль і забезпечить зручне спостереження за ними при достатній відстані від місця об'єкту.

На відміну від раніше використовуваних гармат з діодними емісійними системами та прямонакальними катодами нова гармата оснащена тріодною емісійною системою з катодом типу таблетки (із гексабориду лантану або танталу), який підігривається електронним бомбардуванням, а безінерційне керування струмом пучка відбувається зміною керуючої напруги на фокушуючому електроді. Для використання у складі комплексу апаратури, призначеної для електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця, розроблений інструмент з електронно-променевою гарматою (ЕПГ) нового покоління, що відрізняється від застосовуваних у відкритому космосі. В якості прототипів для створення нового інструменту взяті діючі технологічні макети електронно-променевих гармат У-729 та ПЛ-101, які пройшли випробування в наземних умовах, в термобарокамері і на літаючій лабораторії ТУ-104А. На відміну від діодних прямонакальних гармат, які використовувались в інструментах «УРІ» та «Універсал» у складі моноблоку з джерелом живлення, а також від діодної гармати з непрямим підігрівом лантан-боридного катода У-729, нова гармата має тріодну емісійну систему, підключену до високовольного джерела живлення гнучким високовольним кабелем з роз'ємом. Космонавт-оператор у такому випадку буде працювати в ручному режимі тільки з малогабаритною гарматою невеликої ваги, яка оснащена

швидкозмінним катодним вузлом, що спрощує заміну витратних комплектуючих без додаткового юстирування їх. Така гармата дозволяє споживати менший струм (5...10 А) у нагрівальній мережі для підігріву лантанборидного катода порівняно з діодними прямонакальними гарматами, які неможливо підключити до джерела живлення гнучким кабелем з малим перетином з причини великого струму (18...20 А) для безпосереднього нагрівання катода.

Вихідні дані нової ручної гармати для використання в умовах Місяця мають наступні значення:

1. Прискорювальна напругадо 10 кВ;
2. Струм пучка.....0...250 мА;
3. Тип емісійної системитріодна;
4. Напруга запирання.....0....2,0 кВ;
5. Конструкція катодного вузлашвидкозмінний;
6. Спосіб підігріву катодаелектронне бомбардування;
7. Напруга електронного бомбардування800...1200 В;
8. Струм електронного бомбардування0...100 мА;
9. Напруга розжарення підігрівача2...5 В;
10. Струм розжарення підігрівача.....до 10 А;
11. Матеріал катодаLaV₆, Та, W;
12. Фокусуванняелектростатичне, довгофокусне;
13. Діаметр фокусадо 1,0 мм;
14. Робоча відстаньдо 85 мм;
15. Матеріал ізоляторів.....Al₂O₃;
16. Габарити гарматидовжина: не більше – 250 мм;
діаметр: не більше – 80 мм;
17. Маса2,5 кг;
18. Ресурс роботи катода.....до 40 годин;
19. Час заміни швидкозмінного катодного вузладо 3,5 хвилин;

20. Час безперервної роботи гармати (при включеному накали катоду)
до 10 хвилин;
21. Час охолодження гармати між включеннями накалу катоду
до 30 хвилин.

Електронно-променева гармата для ручного зварювання укомплектована пристроєм – «гардою» для захисту руки оператора від м'якого рентгенівського опромінювання та захисною решіткою, яка монтується на анодному блоці гармати і захищає оператора від торкання розпечених поверхонь цього блоку.

Гармата має можливість виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 6 мм, титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4 мм.

3.3.1 Умови проходження електронного пучка в гарматі

Формування електронного пучка в емісійній системі гармати відбувається під дією електричного поля в прискорювальному проміжку цієї системи, а саме між катодом, фокусуєчим електродом та анодом з урахуванням відштовхуючої дії на електронні траєкторії просторового заряду пучка. При цьому у прискорювальному проміжку емісійної системи гармати, як і на всьому шляху електронів від катоду до зварювального виробу, відбувається іонізація залишкового газу електронами пучка, яка характеризується часом іонізації τ_i [121]:

$$\tau_i = \frac{0.169}{P \cdot \varepsilon_i \cdot (U_{np.}) \sqrt{U_{np.}}} \quad (3.29)$$

де: P - тиск у просторі прольоту електронного пучка; $\varepsilon_i \cdot (U_{np.})$ - відносна іонізація; $U_{np.}$ - прискорювальна напруга.

При звичайному робочому тиску у прискорювальному проміжку порядку $5 \cdot 10^{-3}$ Па утворені тут позитивні іони швидко покидають його, тобто під дією прискорювальної напруги летять на катод, не встигаючи вплинути на

негативний просторовий заряд пучка. Як результат – компенсації цього заряду іонами тут не відбувається.

Після виходу з анодного каналу електронний пучок далі проходить у напрямку до зварюваного виробу у, так званому просторі дрейфу, у якому немає будь-якого зовнішнього електричного поля. У цьому проміжку електрони летять за інерцією із швидкістю V_e , яку придбали у прискорювальному полі емісійної системи гармати. При малих швидкостях (тобто далеких від швидкості світла) маємо [122]:

$$V_e = 5,95 \cdot 10^7 \cdot \sqrt{U_{np.}} \quad (2) \quad (3.30)$$

де: V_e – швидкість електронів, см/сек; $U_{np.}$ – прискорювальна напруга, В.

При проходженні пучка електронів в середовищі залишкових газів та пари матеріалу зварюваного виробу мають місце як парні, так і колективні взаємодії. В цих умовах визначаючим фактором стає знак потенціалу на осі пучка, який залежить від співвідношення $\tau_{i.dp}/\tau_i$ ($\tau_{i.dp}$ – час присутності створених іонів на вісі пучка у просторі дрейфу). При $\tau_{i.dp}/\tau_i > 1$, коли іони швидко видаляються та повільно створюються, просторовий заряд пучка має залишатися не скомпенсованим. При $\tau_{i.dp}/\tau_i < 1$, іони швидше народжуються, ніж видаляються і пучок стає повністю скомпенсованим, тобто його власний негативний просторовий заряд повністю нейтралізований. Той чи інший механізм компенсації цього заряду при рівних інших умовах в першу чергу залежить від ступеня вакууму у просторі дрейфу.

Так, наприклад у звичайних наземних промислових електронно-променевих зварювальних установках ступінь вакууму у робочих вакуумних камерах не перевищує $6 \dots 8 \cdot 10^{-7}$ Па. В цих умовах у просторі дрейфу пучка настає повна компенсація його просторового заряду і пов'язана з цим можливість досягнення значної питомої потужності пучка в місці зварювання, що

обумовлене тим, що просторовий заряд при цьому не обмежує мінімальний перетин пучка в фокальній площині.

Однак, як показали численні дослідження, при тиску у просторі дрейфу гармати нижче $(2...5) \cdot 10^{-7}$ Па (що можливо практично в умовах на поверхні Місяця) просторовий заряд електронного пучка може бути значно недокомпенсованим. В результаті цього матиме місце значне розширення пучка в просторі дрейфу, що приведе до зменшення питомої потужності пучка, а відповідно і його проплавляючої здатності в місці зварювання. Так, наприклад, $5,6 \cdot 10^{-7}$ Па до $2,7 \cdot 10^{-7}$ Па викликає збільшення ефективного радіусу пучка більше ніж у тричі (рис.3.11) [121, 122].

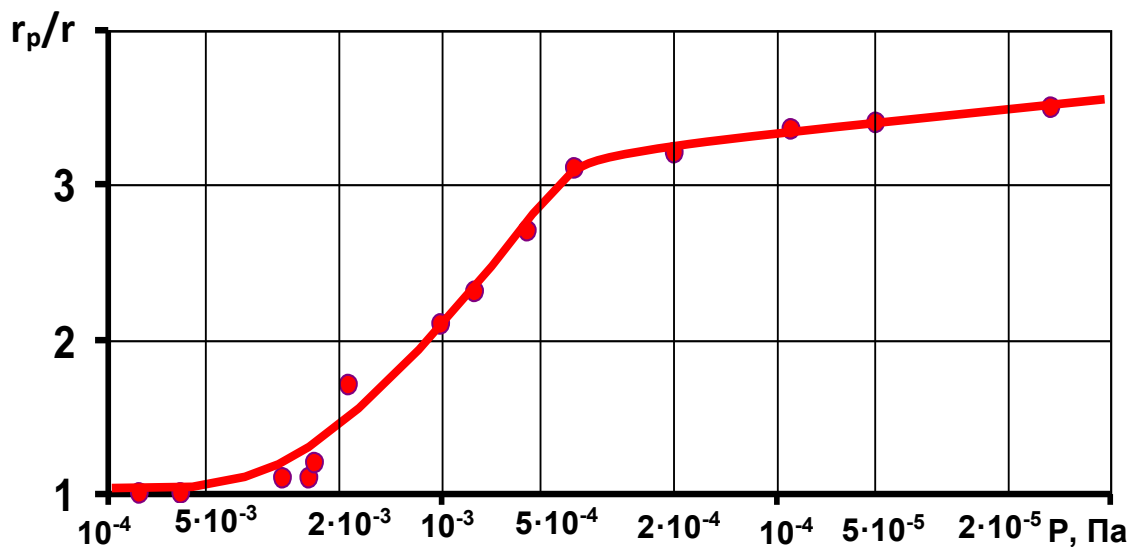


Рис. 3.11 - Залежність перетину променя від вакууму:

$U_{np} = 15$ кВ; $I_n = 80$ мА; r_e (мін) – ефективний радіус пучка на вході в простір із тиском “ P ”; $r_e(P)$ - ефективний радіус пучка після проходження ним відстані 200 мм у просторі з тиском “ P ”.

Таким чином, в умовах Місяця надвисокий вакуум в $(10^{-9}...10^{-11}$ Па) в просторі дрейфу пучка стає визначальним і є основною перепорою для досягнення високої проплавляючої здатності гармати. Для компенсації просторового заряду пучка на поверхні Місяця в просторі його дрейфу в гарматі застосований пристрій, де навколишній вакуум досягає 10^{-13} Па.

3.3.2 Пошуки факторів, сприяючих погіршенню вакууму в просторі дрейфу

Був поставлений експеримент по оцінці погіршення вакууму в цій зоні за рахунок зустрічного парогазового потоку з розплавленої ванни під час операції зварювання. Експеримент проводився в наземних умовах у вакуумній камері.

Суть експерименту (рис. 3.12) полягає в наступному: у вакуумній камері на маніпуляторі була вертикально закріплена електронно-променева гармата ПЛ 101. На робочій відстані гармати $L_{роб} = 100\text{мм}$ на робочому столі встановили водоохолоджувальну мідну мішень, у центральне заглиблення якої був вкладений штифт з алюмінієвого сплаву 5456.

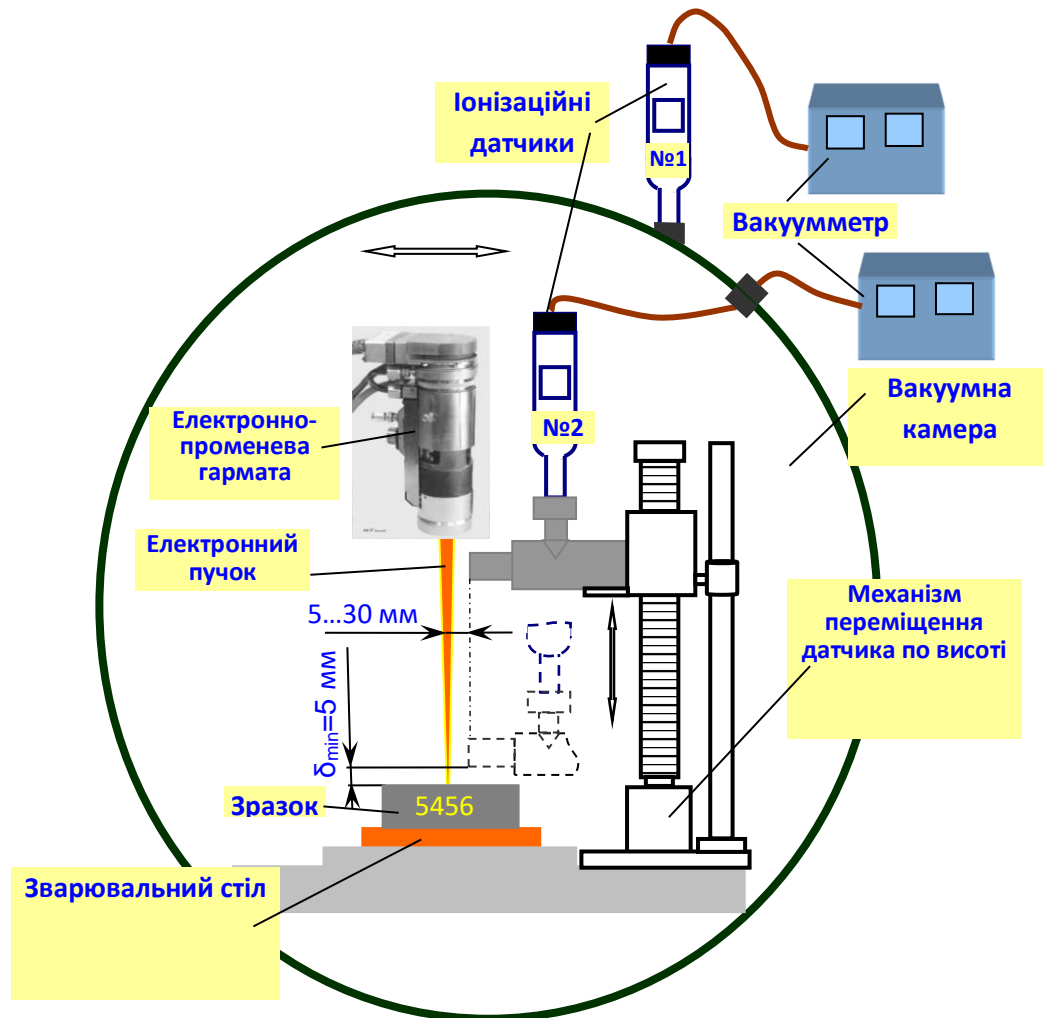


Рис. 3.12 - Схема експерименту з оцінювання погіршення вакууму в просторі дрейфу пучка при зварюванні зразка

На спеціальному механізмі вертикального переміщення був закріплений горизонтально вакуумний іонізаційний датчик №1 (ПМИ-2), зорієнтований своїм вхідним отвором до спільної вертикальної осі гармата – штифт. Такий же датчик №2 (ПМИ-2) був встановлений для замірювання загального вакууму всередині камери.

Експеримент починався з того, що в процесі відкачування камери досягали однакових показань ступеню вакуумів обох датчиках (№1 та №2). Після цього включали електронний пучок з малим струмом, переміщали гармату до поєднання пучка з центром штифта.

Датчик №1 вертикальним його переміщенням підводили максимально впритул до поверхні штифта. Включали струм пучка 80мА, фокусували його на штифті і починали переміщення датчика №1 знизу до верху, фіксуючи показання цього датчика в залежності від вертикальної координати його розміщення.

При цьому наближали вхідний отвір датчика №1 максимально близько до периферії пучка. Заміри показань датчика №1 робили вздовж усього його вертикального переміщення від мішені до нижнього торця гармати. При цьому слідкували за тим, щоб датчик №2 не змінював своїх показань в сторону підвищення загального тиску в камері.

Експеримент повторювали декілька разів в діапазоні струмів пучка від 40 мА до 120 мА.

В процесі експерименту було визначено, що просторовий розподіл щільності парогазового потоку з місця взаємодії пучка з матеріалом штифта наближається до функції косинуса вищого порядку $\Phi(\alpha) = \Phi_0 \cdot \cos^n(\alpha)$, (де $n=2,5\dots3,0$) оскільки під реактивним тиском парогазового потоку з поверхні розплавленої ванни ця поверхня прогинається і перестає бути плоскою, що призводить до зменшення кута розкриття парогазового факелу.

Головний результат проведеного експерименту полягає в тому, що вздовж осі електронного пучка в напрямку від місця зварювання до нижнього торця гармати (тобто на протязі робочої відстані гармати) вакуум

погіршується не більше, ніж на порядок порівняно з вакуумом у навколишньому середовищі вакуумної камери (в умовах проведеного експерименту з $4 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ торр). Якщо застосувати ці результати до умов Місяця, то стає зрозумілим, що таке погіршення вакууму є неефективним, щоб запобігти розширенню пучка у просторі дрейфу. Звідси виникає висновок, що треба застосовувати додатковий, набагато ефективніший спосіб погіршення вакууму у просторі дрейфу гармати.

З цією метою було запропоновано, з нашого погляду, набагато ефективніший і одночасно простіший спосіб погіршення вакууму в просторі дрейфу, а саме, регульована подача газу безпосередньо в простір дрейфу, при тому, що сам простір дрейфу має бути обмежений на всій його довжині стінками променепроводу.

Подача газу може відбуватися від невеликого балону, який може бути розташований на корпусі гармати або на робочому місці оператора-зварника в затемненій зоні і приєднаний до променепроводу гармати за допомогою тонкого і легкого шлангу паралельно з низьковольтними кабелями. Управління подачею газу з балона може здійснюватися за допомогою інжектора (наприклад, типу автомобільного) самим оператором-зварником, використовуючи додаткову кнопку на рукоятці зварювального інструменту або кнопку на виносному пульті управління інструментом, закріпленому поблизу зони проведення робіт.

Запропоноване обладнання може стати також корисним у ролі ефективного охолоджувача зварювальної гармати у часи, коли після завершення зварювальної операції, або її частини треба скоріше охолодити гармату перед наступним етапом зварювальних робіт.

Для цього між зварювальними сеансами закривають вихідний отвір променепроводу та вихідний канал диференційного відкачування і вмикають подачу газу у променепровід.

При цьому охолоджений газ через отвір у аноді вдувається у внутрішню порожнину гармати і безпосередньо і швидко охолоджує найбільш тепло

навантажені деталі та вузли гармати, а саме анод, катод, підігрівач, деталі високовольтного ізолятора і швидкозмінного катодного вузлу.

У такій функції газ, який подається у гармату для проміжного охолодження, може забезпечити охолодження гармати за 10-15 хвилин після попередньої безперервної роботи протягом 5-10 хвилин.

Одним із способів охолодження гармати як під час її роботи, так і під час перерви між робочими етапами може бути використання в її конструкції так званих теплових труб. З допомогою останніх можливо відтягування зайвого тепла від тепло навантажених вузлів гармати до елементів її власної конструкції або допоміжних пристроїв, які в цей час знаходяться в тіні, або завдяки спеціальним покриттям та механічній обробці мають високі випромінюючі або віддзеркалюючі властивості.

Треба зауважити, що одержання газу для закачування його компресором у згадані балони можна буде одержувати безпосередньо в умовах Місяця при розкладі гірських порід з допомогою електронного пучка, використовуючи розроблену гармату.

3.4 Розробка електронно-оптичної системи гармати

Однією з головних складових частин створеного інструменту для електронно-променевого є малогабаритна гармата із загальною потужністю електронного променя до 2,5 кВт, тобто в 2,5 рази більшою, ніж попередня конструкція.

При цьому необхідно застосовувати в якості надійних і ефективних катодів масивні шайби з гексабориду лантану та економічним їх підігрівом електронним бомбардуванням.

В цьому випадку потужність підігріву катода знижується до 30...40 Вт (порівняно з 100...120 Вт для прямонакальних катодів), збільшується ресурс

роботи катоду до 40...50 годин порівняно з 30...60 хвилинами для прямонакальних катодів.

З метою максимального підвищення ефективності апаратури при одночасному забезпеченні її мінімально можливих масо-габаритних характеристик одним з етапів розробки апаратури була розроблена нова електронно-оптична система гармати.

Для цього був проведений аналіз шляхів підвищення щільності струму в фокальній площині пучка

Електронно-оптична система ручної гармати повинна мати тільки одну складову – тріодну емісійну систему, яка складається з катоду, фокуруючого електроду та аноду.

При розробці нової тріодної емісійної системи була використана добре апробована методика оптимізації таких систем на основі траекторного аналізу, яка базується на одночасному рішенні задач аналізу і синтезу [123, 124].

Оптимізована тріодна емісійна система розробляється в двох модифікаціях – довгофокусна і короткофокусна. На рис. 3.13 зображена схематично довгофокусна емісійна система, яка призначена для використання переважно у гарматі, що є складовою частиною малогабаритного ручного електронно-променевого інструменту [125].

В цьому випадку емісійна система формує промінь, який фокусується безпосередньо в зоні зварювання. Враховуючи, що при зварюванні металів малих товщин в більшості випадків фокальну площину променя розташовують на поверхні зразка.

Питома потужність променя в зоні зварювання, і, як результат, його здатність провару цілком залежать від площі перетину променя в його фокальній площині, тобто від діаметра променя в кросвері [126, 127].

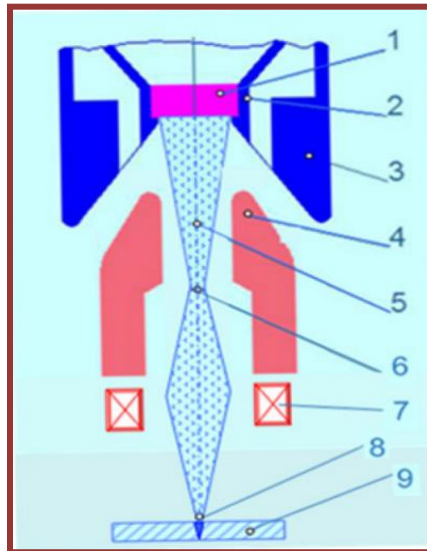


Рис. 3.13 – Нова довгофокусна тріодна емісійна система електронно-променевої гармати [125], $U_{np.} = 10$ кВ, $I_w = 250$ мА:

- 1 – катод LaB6; 2 – катодотримач; 3 – керуючий електрод; 4 – анод;
 5 – електронний пучок; 6 – кроссовер; 7 – електромагнітна лінза;
 8 – сфокусований пучок; 9 – зварювальний зразок.

Оскільки прискорена напруга гармати не повинна перевищувати 10 кВ, що пов'язано з технікою безпеки при роботі оператора-космонавта, більш висока здатність глибини провару з'єднань була досягнута, крім підвищення загальної потужності променя, також за рахунок підвищення якості його формування емісійною системою. В електронній оптиці головним критерієм якості сформованого електронного променя є його фазова характеристика, яка являє собою побудовану для будь-якого перетину променя залежність кута нахилу γ_i електронних траєкторій від їх радіальної координати r_i [123]. У випадку ідеально ламінарного променя, який збігається, мінімальний його перетин (кроссовер) перетворюється в точку, а кожна траєкторія променя має тим більший нахил, чим далі вона розташована від осі променя. При цьому фазова характеристика променя являє собою пряму лінію, яка проходить через початок координат у фазовій площині α_r . Мірилом якості реального електронного променя є відхилення його фазової характеристики від прямої лінії, яке є наслідком прояву, головним чином, сферичної аберації емісійної системи.

З метою одержання високої якості променя при розробці нової тріодної емісійної системи була використана методика оптимізації таких систем на основі траекторного аналізу з подальшим експериментальним корегуванням розрахунків [124, 125]. В підсумку, побудована таким чином тріодна емісійна система із заданими енергетичними та геометричними параметрами (прискорена напруга 10 кВ, максимальний струм променя 250 мА, кут збігання для його фокусування на заданій відстані) формує практично ламінарний промінь (з близькою до лінійної фазовою характеристикою) і з максимально можливою питомою потужністю в кросовері.

Довгофокусна емісійна система, завдяки досягненню в ній високої ламінарності променя, формує кросовер на заданій робочій відстані $L_{\text{роб.}} = 100$ мм діаметром 0,6 мм при максимальному струмі променя 250 мА, при цьому максимальна питома потужність променя в кросовері досягає 9 кВт/мм².

Емісійна система другої модифікації (короткофокусної) (рис.3.14) розроблена для електронно-оптичної системи із комбінованим фокусуванням, в якій промінь при максимальному його струмі фокусується емісійною системою в первинному кросовері на малій відстані від катоду (приблизно на виході з анодного каналу). При цьому, завдяки збільшенню кута збігання променя в первинному кросовері його діаметр не перебільшує 0,2...0,3 мм при струмі променя 250 мА.

Завершальне фокусування променя відбувається в цьому випадку за допомогою додаткової електромагнітної лінзи, якою первинний кросовер, як предмет, відображається в зоні зварювання в фокальній площині (другий кросовер) зі збільшенням, чи зменшенням, в залежності від розташування цієї лінзи відносно первинного та вторинного кросоверів. Робочу відстань $L_{\text{роб.}}$ (від гармати до зварюваного зразка) в цій системі можливо змінювати від 50 мм до 150 мм. На робочій відстані $L_{\text{роб.}} = 100$ мм при струмі променя 250 мА діаметр кросовера в фокальній площині не перевищує 0,4 мм, при цьому питома потужність променя досягає приблизно 16 кВт/мм².

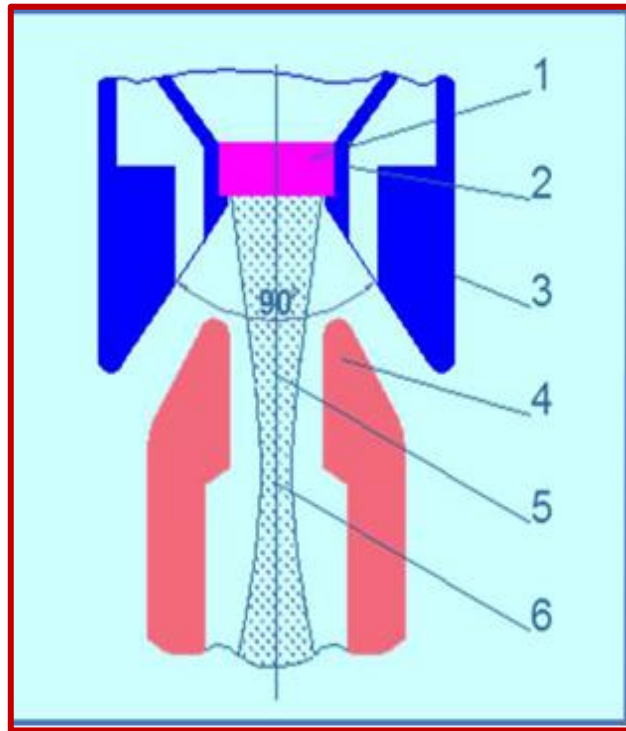


Рис. 3.14 – Короткофокусна тріодна емісійна система електронно-променевої гармати: 1 – катод; 2 – тримач катоду; 3 – фокусуєчий електрод; 4 – анод; 5 – контур електронного променя; 6 – кросовер.

Короткофокусна тріодна емісійна система може бути використована в гарматах у складі як ручного електронно-променевого інструменту, так і у автоматизованих електронно-променевих технологічних комплексів.

Згідно з методикою, емісійна система будується з початковим використанням її необхідних геометричних та електричних параметрів, таких як прискорююча напруга, кут α збігання променя перед кросовером, діаметр катоду типу «таблетка» з плоскою емісуючою поверхнею, наявність реальних конструктивних елементів фіксації катоду в його утримувачі, конфігурація кільцевого проміжку між катодом і фокусуєчим електродом та приблизна проста форма аноду.

Одержані в результаті розрахунків контури фокусуєчого електроду та розташування аноду в апроксимуюмо комплексом простих для виготовлення поверхонь (конічних, циліндричних) (рис. 3.15). В завершення виконуємо траєкторний аналіз апроксимованої емісійної системи і одержуємо шуканий

струм пучка $I_w = 250$ мА при напрузі запирання $U_m = -70$ В на фокусуючому електроді.

Слід зазначити, що в будь-якій тріодній емісійній системі з зменшенням струму пучка від його максимуму до нуля первинний кросовер наближений до катода. У ручному інструменті в подібному випадку (наприклад, зменшення струму пучка в процесі виведення зварного кратера) для підтримки положення фокусу (кросовера) пучка на поверхні виробу, що зварюється оператору необхідно вручну наближати гармату до виробу. У електронно-оптичній системі інструменту ця операція спрощується завдяки тому, що струм пучка може бути функціонально пов'язаний зі струмом електромагнітної лінзи, і в усьому діапазоні струмів пучка його вторинний кросовер не змінюватиме свого положення [126].

Інформацію про розміри і розташування кросовера одержуємо шляхом розбудови фазового паралелограма по результатах розрахунків згідно з методикою (рисунок 3.15) [127].

З аналізу фазового паралелограму одержуємо робочу відстань гармати $l_{роб} = 90$ мм (від виходу пучка з аноду до кросовера, тобто до місця зварювання).

Задані та одержані результати за параметрами емісійної системи викладені в таблиці 3.3.

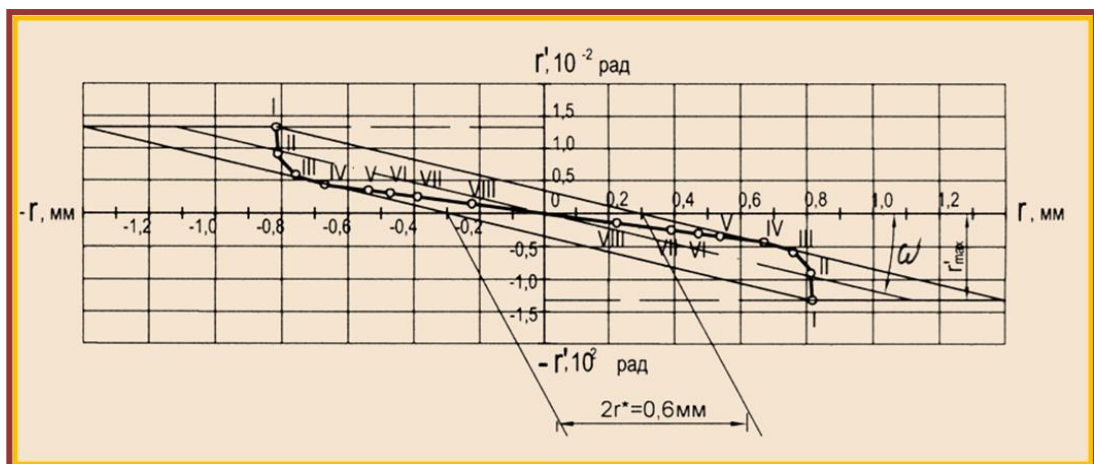


Рис. 3.15 - Фазовий паралелограм, побудований за результатами траєкторного аналізу апроксимованої емісійної системи [127]

Таблиця 3.3 - Результати за параметрами емісійної системи

Параметр	Задане значення	Одержане значення
Первеанс, $A/V^{3/2}$	$\leq 0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Потужність пучка, кВт	$\geq 2,0$	2,5
Щільність потужності в кросовері, кВт/мм ²	$\geq 6,0$	6,5
Половинний кут збігання пучка в кросовері, рад	$\leq 2 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-2}$

При цьому в завданні були прийняті такі обмеження:

- плоский катод типу таблетки із гексобориду лантану діаметром емітуючої поверхні 4,2 мм;
- кільцевий опорний бурт в утримувачі катода висотою 0,15 мм
- кільцевий проміжок між у тримачем катода та фокусуєчим електродом шириною 0,65 мм;
- плоский анод з центральним отвором діаметром 3,5 мм.

З використанням одержаних експериментальних та розрахункових результатів був розроблений спочатку ескізний, а за ним і робочий проект електронно-променевої гармати, призначеної для зварювання та споріднених технологій в умовах Місяця [128].

При цьому гармата не повинна мати рідинної охолоджувальної системи, як це робиться у звичайних промислових зварювальних гарматах, при тому, що як і в згаданих звичайних гарматах, катод і підігрівач в робочих умовах розжарені до тієї ж температури 1800°C (катод з гексобориду лантану) і 2000°C (вольфрамова спіраль накаливання).

У зв'язку з високими робочими температурами згаданих вище теплонавантажених деталей та вузлів на стадії ескізного проектування було запропоновано високовольтний ізолятор та ізолятор швидкозмінного катодного вузлу зробити з суцільних заготовок з корунду, які після відливання їх в прес-формах і доробки шліфуванням головних посадкових місць були б

конструктивно готові для сполучення з відповідними деталями гармати (корпусом, деталями швидкозмінного катодного вузлу). При цьому в конструкції ізолюючих вузлів не застосовувались будь-які температурно-нестійкі матеріали, а тільки корунд і метал (переважно ковар та нержавіюча сталь або титан).

На етапі розробки робочого проекту було запропоновано збирати головні ізолюючі вузли гармати з найпростіших по формі корундових деталей, таких як кільця та труби.

Гармата в цілому скомпонована з окремих функціональних блоків (рисуно 3.16) [129].

Розроблена електронно-променевої гармата з'єднана з джерелом живлення із допомогою гнучкого високовольтного кабелю та передбачена автономна швидка зміна катодного вузлу із терміном його заміни не більше 5 хв.

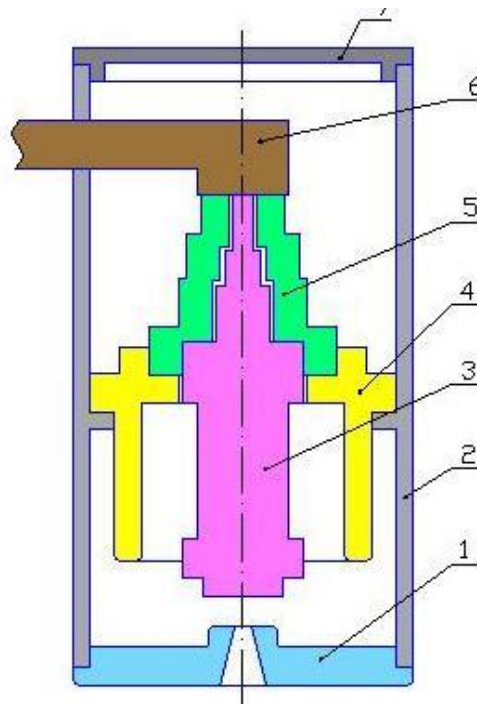


Рис. 3.16 - Загальна компоновка нової електронно-променевої зварювальної гармати [129]:

- 1 – анодний блок; 2 – корпус; 3 – з'ємний катодний вузол; 4 – високовольтний ізолятор; 5 – головний ізолятор катодного вузла; 6 – високовольтний ввід; 7 – кришка.

Відповідно до прийнятої концепції була створена технічна документація на електронно-променеву гармату для ручного зварювання на поверхні Місяця.

На рис. 3.17 показаний повздовжній перетин (А - А) тріодної електронно-променевої гармати з електростатичним фокусуванням для технологічних робіт в космосі в складі маніпулятора або робота.

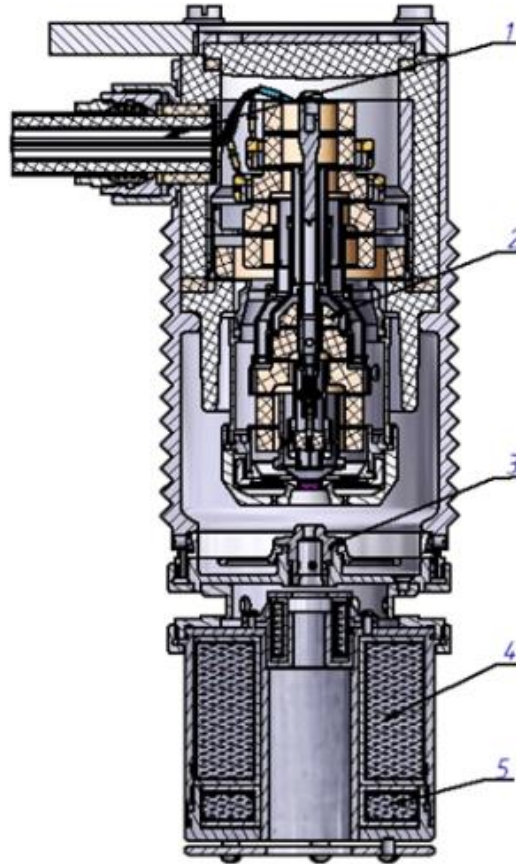


Рис. 3.17 – Повздовжній перетин (А - А) тріодної електронно-променевої гармати з електромагнітним фокусуванням і системою періодичного відхилення пучка:

1 – високовольтний ввід; 2 – катодний блок; 3 – анодний блок;
4 – електромагнітна фокусуєча система; 5 – відхиляюча система;

На рис. 3.18 показаний загальний вигляд створеного ручного електронно-променевого інструменту для виконання технологічних робіт в космічних умовах [130].



Рис. 3.18 Загальний вигляд розробленого ручного електронно-променевого інструменту [131]

Досягнуті значення питомої потужності пучка дозволяють виконувати зварювання в космосі алюмінієвих сплавів товщиною до 6 мм, титанових сплавів, а також неіржавіючих сталей товщиною до 4 мм, що практично охоплює всі матеріали та їх товщини, які застосовуються в космічному апаратобудуванні.

При розробці конструкції нової гармати були враховані потреби забезпечення мінімальної маси гармати та високої надійності її роботи в умовах, коли температура окремих теплонавантажених вузлів конструкції, зокрема катода та електронного підігрівача, досягають 1800 °С, а електрична ізоляція цих вузлів від корпусу гармати повинна витримувати прикладену робочу прискорену напругу 10 кВ. Крім того, в тріодній емісійній системі між катодом і фокусуєчим електродом також прикладається керуюча напруга до 4 кВ. При цьому гармата при роботі у космічному вакуумі повинна надійно функціонувати без застосування традиційної рідинної системи охолодження. До того ж, в умовах роботи у відкритому космосі зовнішня поверхня гармати може додатково підігріватися інтенсивним сонячним випромінюванням.

Тому при розробці конструкції нової гармати велику увагу було приділено створенню термостійких та герметичних вузлів високовольтної ізоляції з мінімальними габаритами та масою, а також проблемам з'єднання цих вузлів між собою та корпусними деталями гармати.

3.5 Висновки до розділу 3

1. Проведені теоретичні розрахунки температури поверхні корпусу гармати та досліджені теплові поля зварювальної гармати в залежності від тривалості її роботи.

2. Розроблена нова конструкція електронно-променевої гармати потужністю 2,5 кВт з прискорюючою напругою 10 кВ для зварювання при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт в космічних умовах та на поверхні Місяця.

3. Розраховані та спроектовані тріодні емісійні системи, які формують електронний пучок високої якості, достатньої для здійснення електронно-променевого зварювання різних металів товщиною 4-6 мм.

4. Оптимізована тріодна емісійна система електронно-променевої гармати розроблена в двох модифікаціях – довгофокусна і короткофокусна. Довгофокусна емісійна система призначена для використання переважно у гарматі ручного електронно-променевого інструменту. Короткофокусна тріодна емісійна система може бути використована в гарматах у складі автоматизованих електронно-променевих технологічних комплексів та роботів зі штучним інтелектом.

5. Проведені експериментальні дослідження зміни вакууму у просторі дрейфу гармати, згідно з якими у межах зварювальних параметрів гармати (до 1,5 кВт) при прискорюючій напрузі (10 кВ) розподіл парогазового потоку із зварювальної ванни уздовж осі пучка при переплаві сплаву 5456 підкорюється закону косинуса вищого порядку, а погіршення вакууму на вісі пучка на робочій відстані 100 мм не перевищує одного порядку при

загальному вакуумі у вакуумній камері $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ торр. Це підтверджує необхідність застосування допоміжних засобів погіршення вакууму у просторі дрейфу пучка для обмеження його розширення в умовах навколишнього вакууму вище 10^{-5} торр.

6. Запропонований та розроблений варіант конструкції гармати, в яких розширення електронного пучка при навколишньому вакуумі вище 10^{-5} торр обмежується завдяки локальному погіршенню вакууму на шляху пучка у просторі дрейфу гармати та на її робочій відстані.

7. Завдяки високій якості формування пучка в синтезованій емісійній системі та, як результат, підвищеній щільності струму пучка в місці зварювання (до 9 кВт/мм^2) гармата спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, титанових сплавів та нержавіючих сталей товщиною до 4...6 мм.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ЯКІСНИХ З'ЄДНАНЬ В КОСМІЧНИХ УМОВАХ

Для розробки технології електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів і одержання якісних зварних з'єднань, створений універсального комплекс обладнання, який може працювати як в ручному, так і в автоматичному варіантах. Для цього була створена електронно-променева гармата (Розділ 3), яка відокремлена від джерела живлення і з'єднується з ним за допомогою високовольтного гнучкого кабелю з високовольтним роз'ємом. Гармата має можливість формувати гострий електронний пучок (діаметром не більше 1,0мм) на відстані 50...150 мм за допомогою електромагнітної фокусуєчої системи.

Як показали результати досліджень, для керування процесом кристалізації металу і більш інтенсивного спливання бульбашок з газом або з парами металу, необхідно також проводити термообробку до, і після зварювання.

Створена електронно-променева гармата укомплектована відхиляючою системою електронного променя з програмованим періодичним відхиленням електронного пучка і заданою інтенсивністю нагріву по траєкторії скануючого пучка, що дозволяє виконувати інтенсивне перемішування розплавленого металу зварювальної ванни і одержувати якісні, бездефектні зварні з'єднання.

Враховуючи результати попередніх теоретичних (Розділ 1) та проведених технологічних експериментів (Розділ 2), а також при наявності обладнання нового покоління був запропонований однопрохідний процес з однією зварювальною ванною і попередньою та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою електронного пучка і програмованою тепловою інтенсивністю в кожній зоні технологічного процесу [132].

4.1 Розробка елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з програмованою інтенсивністю нагріву зварного з'єднання і періодичним відхиленням електронного пучка

Для виконання технологічного процесу стенд ОБ1469м був оснащений: системою періодичного відхилення електронного пучка з програмованою інтенсивністю нагрівання і варіантами видів розгорток; маніпулятором для переміщення електронно-променевої гармати; столом для кріплення зварювальних зразків та водоохолоджувальною мідною мішенню для перевірки і встановлення струму пучка і струму фокусування.

Живлення електронно-променевої гармати, здійснювали лабораторним джерелом ІУН - 5 з прискореною напругою 10 кВ.

Для керування відхиленням електронного променя по заданій траєкторії і програмованого тепловкладення з різною інтенсивністю нагрівання в процесі зварювання або різання, використовували систему ВС-5, розроблену і виготовлену для виконання цих робіт.

Для розробки цього пристрою була використана система проектування "SVscan", завдяки якій можна створити рисунок траєкторії (апроксимувати) розгортки з використанням різної кількості точок (з можливістю їх розширення), що дозволяє системі періодичного відхилення електронного пучка реалізувати частоту сканування від 100 Гц до 1000 Гц. У цієї системи є можливість оцінювати інтенсивність нагріву в будь-якій точці поверхні та переглядати в 3D зображенні результуючий розподіл щільності потужності електронного пучка в зоні нагріву в динаміці при зміні частоти сканування. Це значно спрощує проектування розгорток електронного пучка.

Виконання цього процесу можливо за допомогою сучасних цифрових мікроконтролерних систем програмного керування інтенсивністю теплової дії при періодичному розгортанні і з керованим часом затримки пучка в місцях його зупинок в межах вибраної траєкторії.

Загальний вигляд цієї системи показаний на рис. 4.1, 4.2.



Рис. 4.1 – Блок розгорток на експериментальній установці: зліва – підсилювач з блоком живлення, в центрі – генератор розгорток з мікроконтролером PIC18F87J50 та кольоровим графічним дисплеєм 5,7”



Рис. 4.2 – Генератор розгорток (переносний варіант) з мікроконтролером PIC18F67K40 та кольоровим графічним дисплеєм 2,83”

Для дослідження запропонованого способу було проведено моделювання з використанням процесів термообробки зі зварюванням за один прохід, який проводиться розщепленням електронного пучка на необхідну кількість зон впливу (дві або три) при великій частоті сканування, що дозволяє електронному пучку впливати на різні зони, та проводити інтенсивне перемішування у шві (рис. 4.3). Це буде сприяти спливанню бульбашок із середини металу шву на його поверхню, та залишати її зовсім.

Також, було запропоновано періодичний розподіл інтенсивності підігріву перед зварювальним швом і за електронним пучком побудувати так, щоб зменшити швидкість охолодження.

Процес зварювання, схема якого показана на рис. 4.3, де відбувається зміна фокусу пучка синхронно з відхиленням.

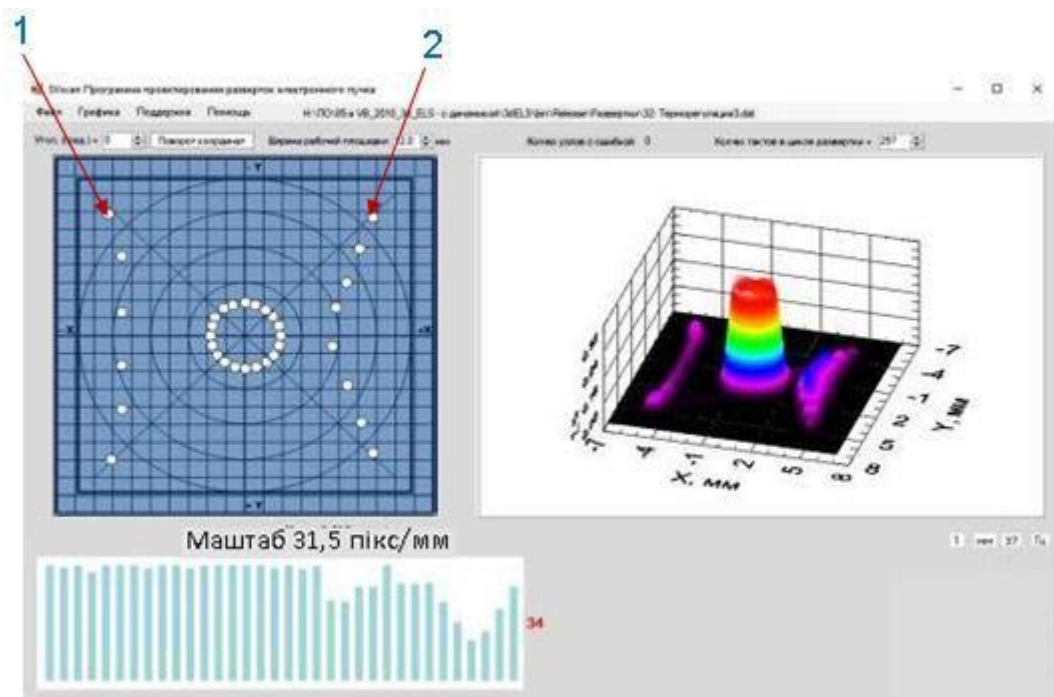


Рис. 4.3 - Варіант розгортки з попередньою та подальшою термічною обробкою шва:

1 - попередня термічна обробка; 2 - подальша термічна обробка.

Як показали результати моделювання і попередні експерименти, найбільш оптимальним є варіанти розгортки з попереднім і подальшим

підігрівом та різним тепловим впливом по траєкторії розгортки. Було випробувано 47 «вузлів» з частотою розгортки 180 Гц. При цьому діаметр реверсної кругової розгортки, що зварює, становить 2 мм, а діаметр сфокусованої плями електронного пучка 0,8 мм. Відносна швидкість переміщення зони нагріву складе $\sim 0,4$ м/хв. Цей варіант розгортки з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими впливами відносно дії амплітуди зварювального пучка представлений на рисунку 4.4.

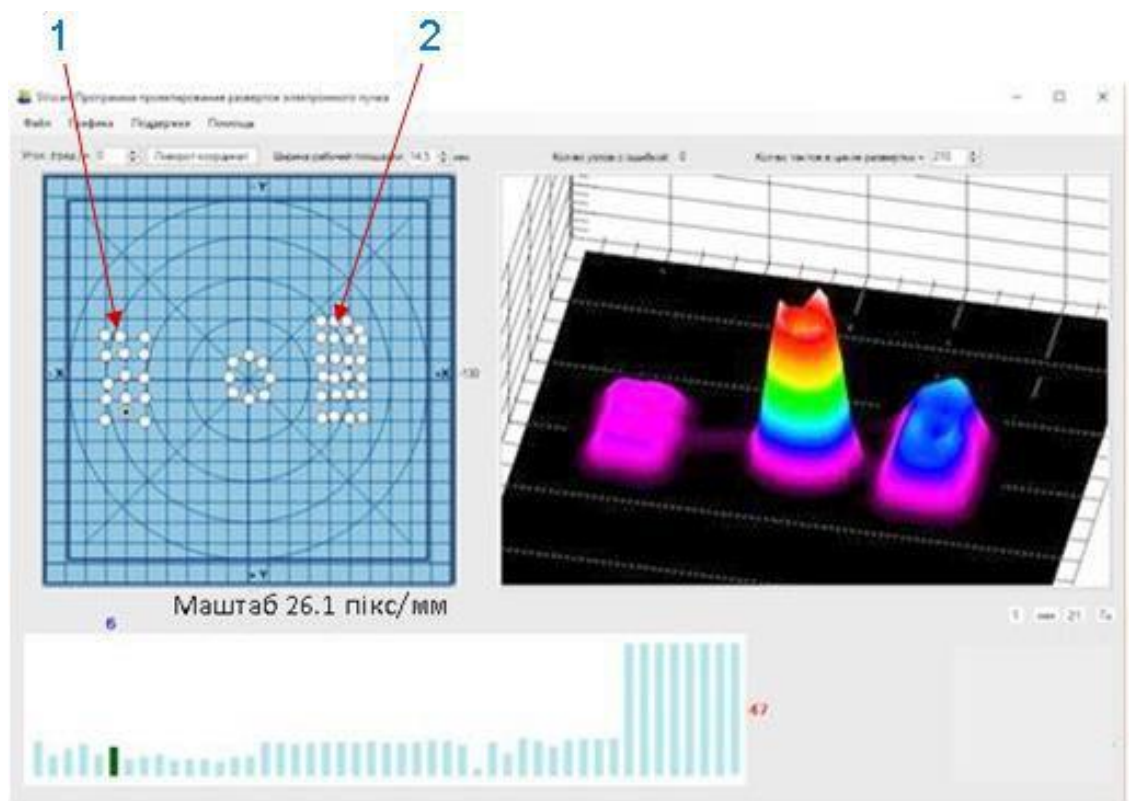


Рис. 4.4 - Варіант розгортки з попереднім підігрівом та наступною термообробкою з різними тепловими впливами щодо дії амплітуди:

1 - попередній підігрів; 2 - наступна термообробка.

Таким чином були розроблені варіанти розгортки для відпрацювання елементів технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни пучком, що сканує, і програмованою періодичною інтенсивністю теплової дії, яка дозволяє керувати електронним пучком з

різною інтенсивністю нагріву. За допомогою електронного променя заданої потужності проводився попередній і подальший підігрів зразка. В процесі зварювання за спеціальною програмою промінь розгортався до необхідної конфігурації в одному та другому напрямку. Він сканував вздовж всього шва і виконував зварювання з перемішуванням розплавленої ванни реверсною круговою розгорткою діаметром 2,0 мм. Хвостова частина ванни при цьому підігрівалась впродовж всього процесу зварювання. Бульбашки, які утворювалися у хвостовій частині, встигали вийти на поверхню і залишити її. Особливо важливо, що при цьому значення струму фокусування залишалось незмінним при відхиленні пучка в режимах попередньої і наступної термообробки.

Поєднання зварювального процесу, попередньої та наступної термообробки призводить до збільшення часу циклу роботи розгортки та зменшенню частоти сканування електронного пучка, що необхідно враховувати при проектуванні розгортки.

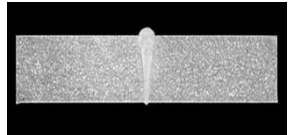
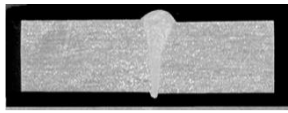

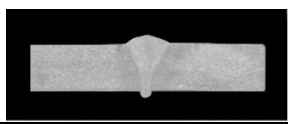
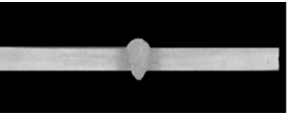
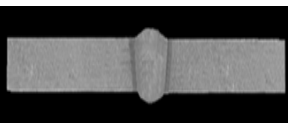
Для технологічних випробувань використовувалися зразки стикових з'єднань з відборткуванням крайків із алюмінієвих сплавів 5456 і 2219, які застосовуються як основний конструкційний матеріал космічної техніки [4].

Для проведення технологічних робіт в вакуумному стенді ОБ1469м були змонтовані маніпулятор з електронно-променевою гарматою ПЛ104 [12], зварювальний мідний стіл з зразками і охолоджувана мідна мішень для оптимізації режимів зварювання. Зварювання зразків виконувалося з скануванням електронного пучка по реверсній круговій траєкторії, а також з відхиленнями пучка для попередньої і подальшої термообробок при швидкості 25 м/год. Режими зварювання, розподіл інтенсивності нагріву і одержані макрошліфи приведені в таблиці 4.1.

Зварювання виконувалося пучком, без сканування (зразок 1), за допомогою традиційного, безперервного сканування (зразок 2), а також за допомогою дискретного сканування пучка з попереднім та наступним підігрівом неспікованим пучком і з гострим сфокусованим зварювальним

пучком, який сканував по реверсній круговій траєкторії діаметром 2,0 мм. з частотою 180 Гц. (таблиця 4.1, зразки 3 – 7). Зовнішній вигляд одержаних зварних з'єднань показаний на рис. 4.5– 4.7.

Таблиця 4.1 – Режими зварювання зразків із алюмінієвих сплавів 5456 та 2219

№ зраз.	Сплав	Тов., мм	Режими зварювання			Ампл., мм	Част, Гц	Макро-шліфи
			Струм, мА	Струм фокус., мА	Розпод. потужн. ел. пуч., %			
1	5456 без/скан.	6,0	135	262	–	–	–	
2	5456 безперев. скануван.	6,0	145	268	–	2,0	180	
3	5456 з період. відхилен.	6,0	170	278	$P_{\text{поп.}}=25$ $P_{\text{звар.}}=65$ $P_{\text{наст.}}=10$	2,0	180	
4	-//-	4,0	155	252	$P_{\text{поп.}}=15$ $P_{\text{звар.}}=70$ $P_{\text{наст.}}=15$	2,0	180	
5	-//-	2,0	125	248	$P_{\text{поп.}}=15$ $P_{\text{звар.}}=75$ $P_{\text{наст.}}=10$	2,0	180	
6	2219	5	185	282	$P_{\text{поп.}}=25$ $P_{\text{звар.}}=70$ $P_{\text{наст.}}=5$	1,5	160	

4.2 Металографічні дослідження зварних з'єднань, які одержані з використанням запропонованої технології

Верифікацію якості одержаних з'єднань проводили візуальним і рентгенівським контролем, механічними випробуваннями, визначенням елементного складу основного металу та металу шва, а також

металографічними дослідженнями зварних з'єднань, одержаних запропонованим способом.

Внаслідок ретельного візуального огляду зварених зразків була виконана їх оцінка на проплавлення, а також на якість зовнішнього вигляду швів з лицевого та зворотного боків.

Аналіз огляду зварних зразків показав, що найбільш якісними є стикові з'єднання, одержані з використанням періодичного відхилення пучка з реверсною круговою розгорткою і попередньою та повторною термообробкою (рис. 4.5, 4.6).

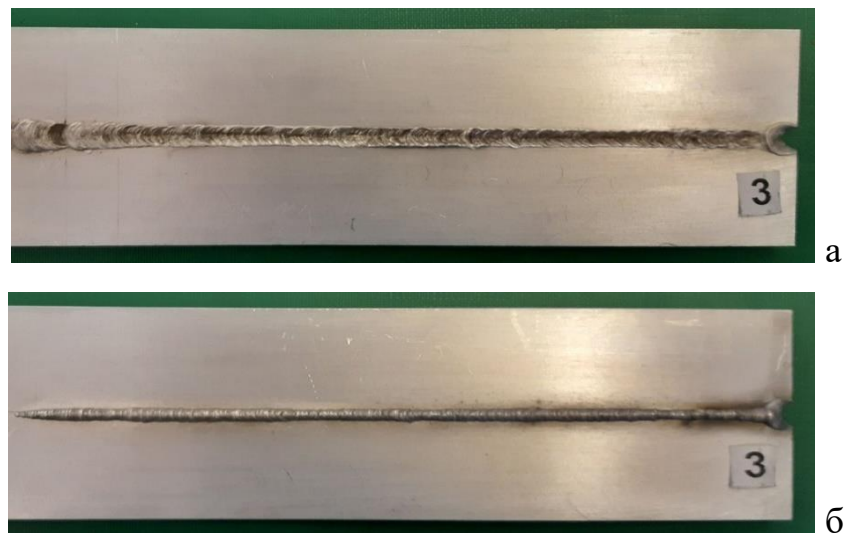


Рис. 4.5 – Зовнішній вигляд зразка із алюмінієвого сплаву 5456 товщиною 6,0 мм з відбуртуванням і наскрізним проплавленням:
а - лицевий бік; б - зворотній бік.

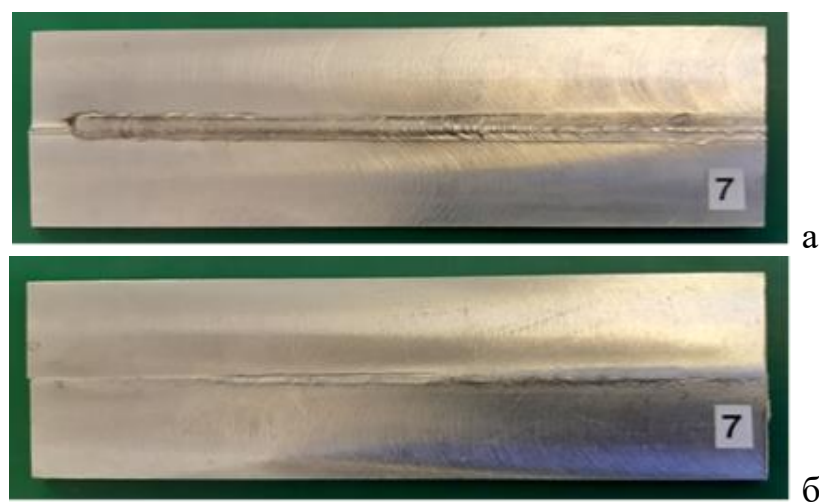


Рис. 4.6 – Зовнішній вигляд зразка із алюмінієвого сплаву 2219 товщиною 5,0 мм і відбуртуванням, з наскрізним проплавленням:
а - лицевий бік; б - зворотній бік.

Для вивчення геометрії проплавлень, одержаних цим способом зварювання, були виготовлені макрошліфи, які показані в таблиці 4.1.

Рентгенівський контроль зварних з'єднань проводився на з'єднаннях із сплавів 5456 та 2219, які показані на рисунках 4.7 (а – д). Для порівняння приведені також рентгенівські зображення стикових зварних з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням без сканування (а) та з неперервним скануванням круговою розгорткою (б) які вже були описані у (Розділі 2).

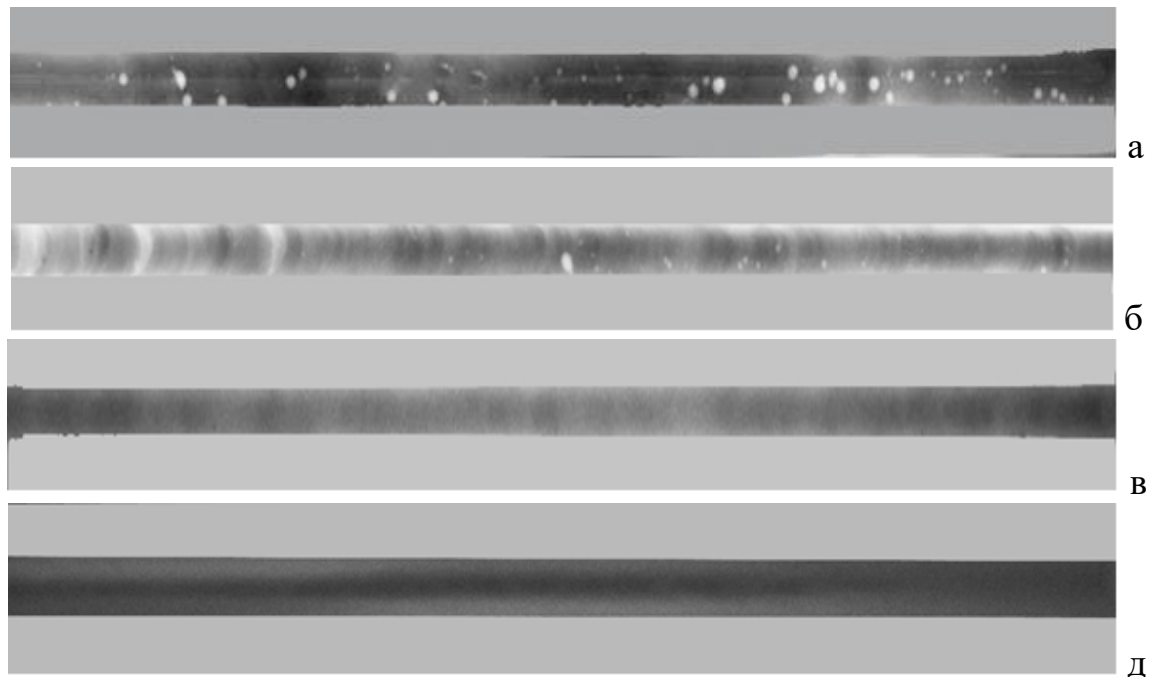


Рис. 4.7 - Рентгенівські зображення стикових зварних з'єднань, одержаних електронно-променевим зварюванням: а - сплав 5456 товщиною 6,0 мм (без сканування); б – сплав 5456 товщиною 6,0 мм (з неперервним скануванням круговою розгорткою); в - сплав 5456 товщиною 6,0 мм (з періодичним відхиленням); д - сплав 2219 товщиною 5,0 мм (з періодичним відхиленням).

Визначення локального елементного складу зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, одержаних ЕПЗ, проводилися за допомогою растрового електронного мікроскопу Tescan Mira3 LMU. Оцінка локального елементного складу виконувалась детектором ЕДС Oxford X-max 80mm, що встановлено на растровому електронному мікроскопі. Точки локального визначення

елементного складу показані на рис. 4.8, а їх чисельні значення приведені в таблицях 4.2 –4.3.

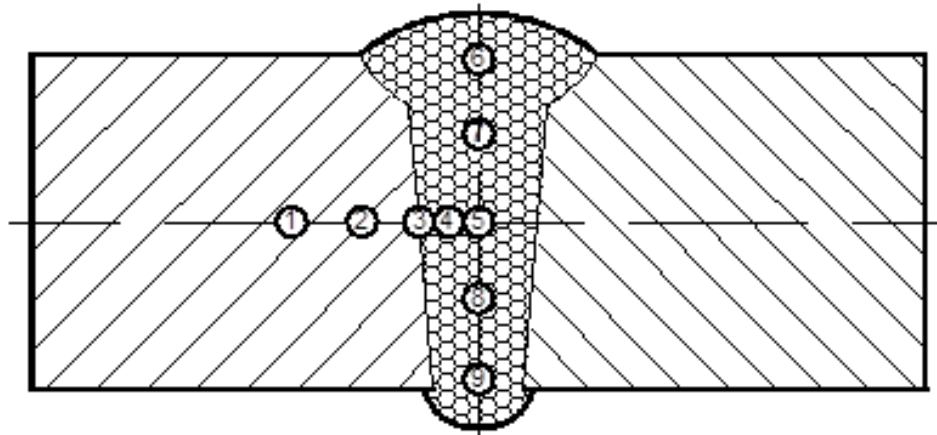


Рис. 4.8 – Точкові визначення елементного складу зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів, одержаних ЕПЗ з періодичним скануванням електронного пучка, де: 1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – лінія сплавлення; 4 – метал шва в середній частині на кордоні з лінією сплавлення; 5 – метал шва в центральній частині; 6 – метал шва в середній верхній частині шва; 7 – метал шва по вісі шва між точками 5 і 6; 8 – метал шва по вісі шва між точками 5 і 9; 9 – метал в кореневій частині шва.

Таблиця 4.2 – Елементний склад зварного з'єднання із сплаву 5456 товщиною 6,0 мм, одержаного ЕПЗ з періодичним скануванням

№ спектра	Елементний склад, %				
	Mg	Al	Si	Mn	Fe
S1	6.79	92.25	0.22	0.52	0.22
S2	6.88	92.35	0.09	0.48	0.20
S3	6.84	92.08	0.19	0.68	0.21
S4	6.89	92.77	0.10	0.00	0.24
S5	6.64	92.53	0.23	0.60	0.00
S6	6.78	93.09	0.13	0.00	0.00
S7	6.73	93.08	0.18	0.01	0.00
S8	6.72	92.41	0.19	0.68	0.00
S9	6.68	92.34	0.13	0.65	0.20

Таблиця 4.3 – Елементний склад зварного з'єднання із сплаву 2219 товщиною 6,0 мм, одержаного ЕПЗ з дискретним скануванням

№ спектра	Елементний склад, %				
	Cu	Al	Si	Mn	Fe
S1	7.59	91.99	0.13	0.29	0.00
S3	7.95	91.36	0.20	0.32	0.16
S4	7.14	92.18	0.05	0.35	0.27
S5	6.79	92.59	0.11	0.38	0.13
S6	7.05	92.36	0.10	0.29	0.20
S9	6.75	92.51	0.14	0.37	0.22

Дослідження особливостей мікроструктури проводили на поперечних макрошліфах, підготовлених із зразків зварних з'єднань, що включали ділянки основного металу, ЗТВ і металу шва за допомогою оптичного мікроскопа ММТ-1600В з цифровою камерою Webbers MYscope 300M. Виявлення мікроструктури ЗЗ відбувалося в процесі електролітичного полірування в реактиві наступного складу: 930 см³ CH₃COOH, 70 см³ HClO₄. Час полірування становив 5...10с при напрузі 100В. Виявлені мікроструктури ЗЗ показані на рисунках 4.9 – 4.11.

На рис. 4.9 представлені виявлені мікроструктури ЗЗ сплаву 5456, одержані ЕПЗ з періодичним скануванням. Як видно з рисунка, в основному металі спостерігається явно виражена стрічкова текстура прокатування. Зварювання відбувалося поперек напрямку прокатування. Структура литого металу шва дендритна. В цілому, метал шва щільний, але в корені шва спостерігається невелика кількість евтектичних включень. Пористість в металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються в металі шва не перевищують, в діаметрі, 30 мкм. Також спостерігаються окремі пори розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Відповідно до стандартів – це допустимі дефекти.

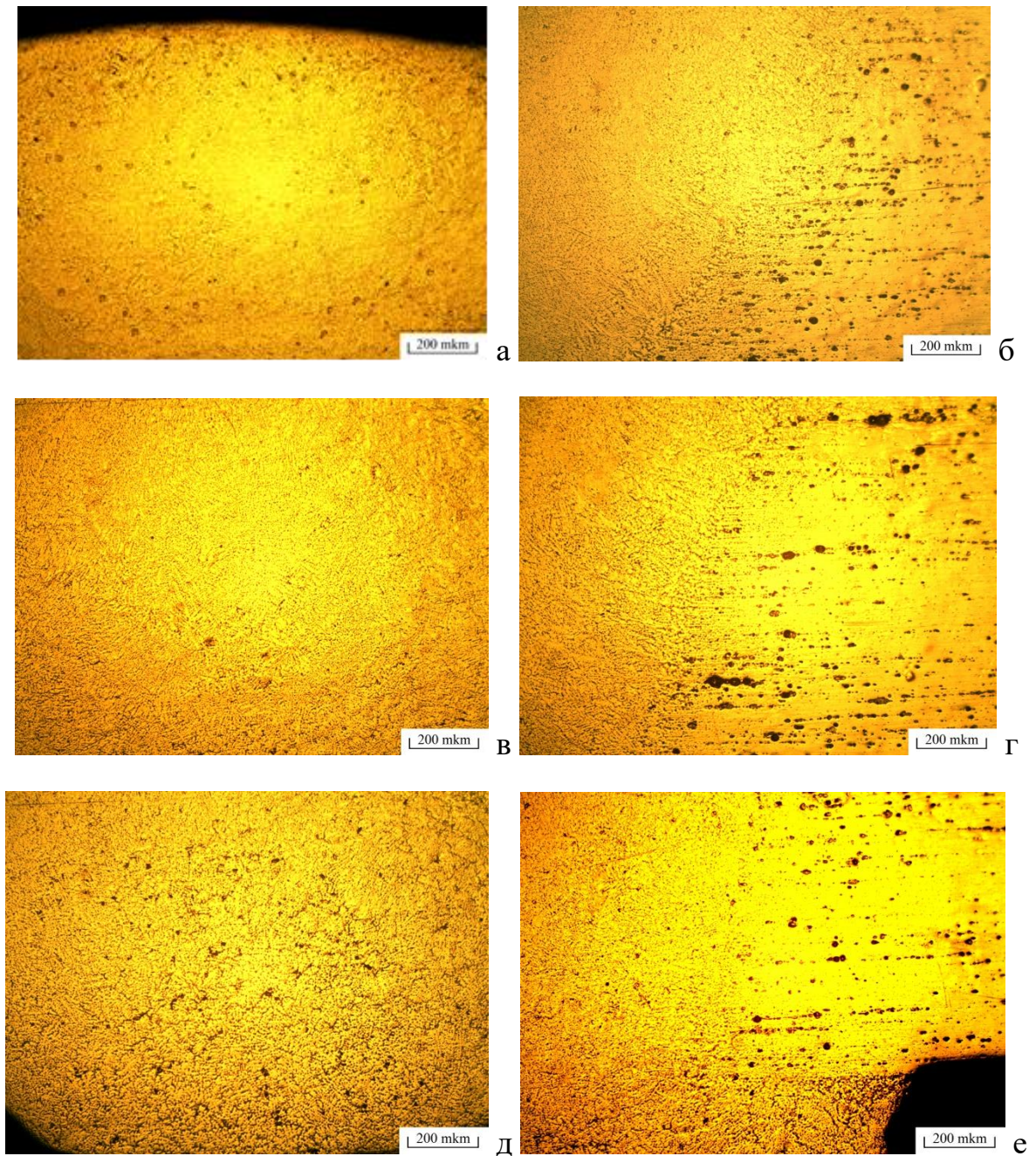


Рис. 4.9 - Мікроструктура зварного з'єднання сплаву 5456 товщиною 6,0 мм, одержаного електронно-променевим зварюванням з періодичним скануванням: а - метал шва в верхній частині; б - зона сплавлення металу шва з основним металом в верхній частині; в - метал шва в центральній частині; г - зона сплавлення металу шва з основним металом в середній частині; д - метал шва в кореневій частині; е - зона сплавлення металу шва в кореневій частині з основним металом.

Металографічні дослідження мікроструктури зварних з'єднань сплаву 2219 (рис. 4.10) товщиною 5,0 мм, яке отримано електронно-променевим зварюванням з періодичним скануванням показали, що щільна структура металу шва спостерігається в основному об'ємі. Структура шва дендритна, дендритний параметр по висоті шва суттєво не змінюється. Тобто структура металу шва стабільна по об'єму. Спостерігаються одиничні пори в корені шва розміром до 100 мкм.

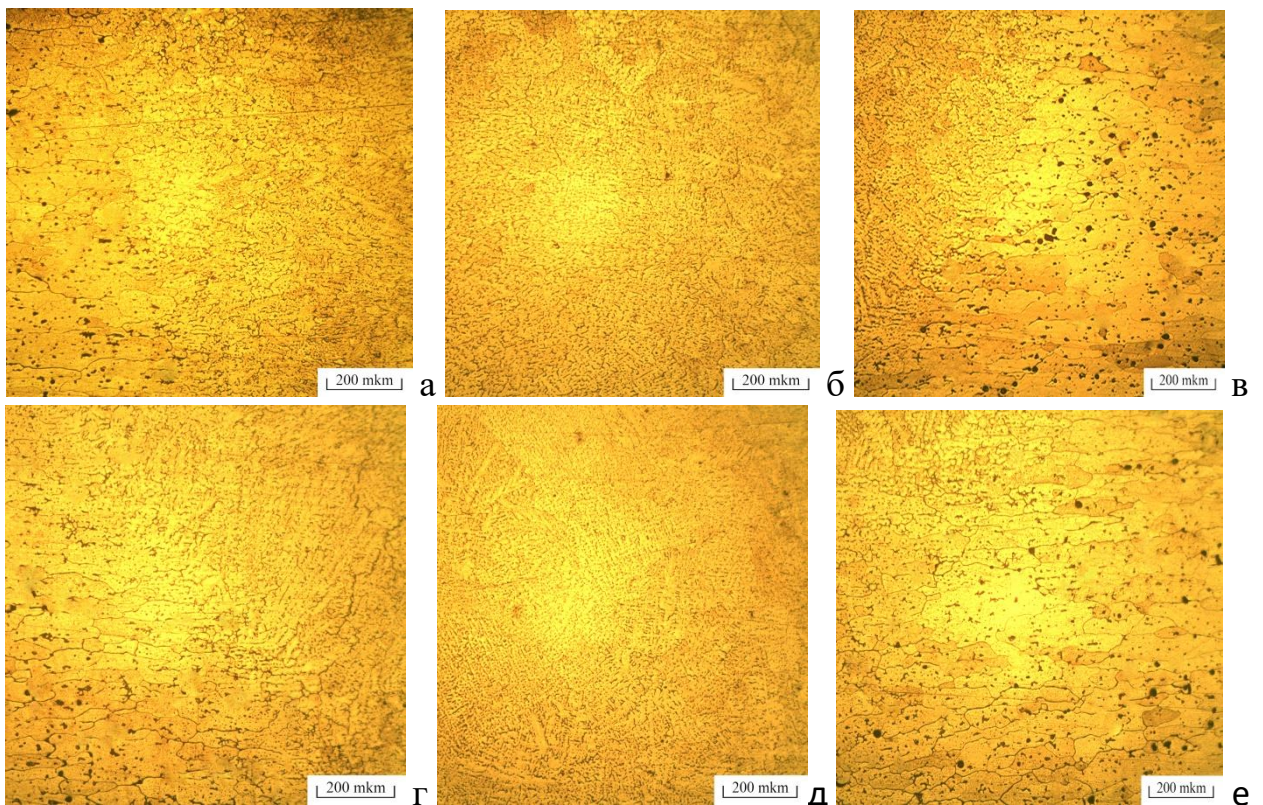


Рис. 4.10 – Мікроструктура зварного з'єднання сплаву 2219 товщиною 5,0 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним скануванням:

- а – зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина зліва);
- б – основний метал (верхня частина посередині);
- в – зона сплавлення металу шва з основним металом (верхня частина справа);
- г – зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина зліва);
- д – основний метал (нижня частина посередині);
- е – зона сплавлення металу шва з основним металом (нижня частина справа).

На рис. 4.11 наведені мікроструктури сплаву 2219 товщиною 5,0 мм, отриманого електронно-променевим зварюванням з періодичним скануванням зони сплавлення та термічного впливу (а), які складаються з дендритів, розташованих під кутом приблизно 45° один до одного та основного металу (б)

В зоні сплавлення та термічного впливу наявні дрібні пори розміром до 40 мкм. Причому пори спостерігаються на глибину до 1000 мкм від лінії сплавлення в зварюваний метал. Така картина характерна для всіх ЗЗ сплаву 2219, отриманих зварюванням плавленням, незалежно від способу. Крім того, в ЗТВ, безпосередньо біля лінії сплавлення спостерігається часткове оплавлення металу з характерним ростом міжзеренних прошарків (рис. 4.11 а). Ближче до основного металу спостерігається наявна рекристалізація металу (рис. 4.11 б). Дефектів у вигляді тріщин не виявлено.

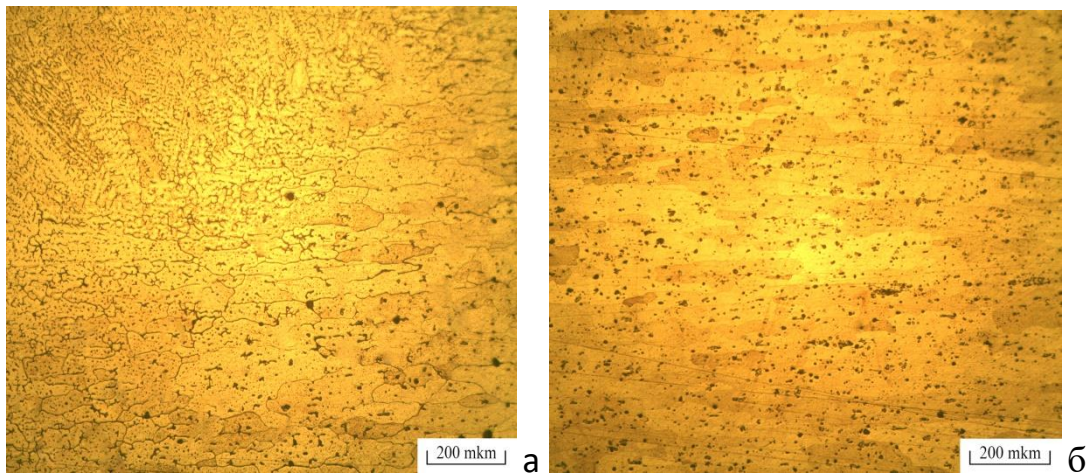


Рис. 4.11 – Мікроструктура зони сплавлення та термічного впливу (а) і основного металу (б)

Результати проведених металографічних досліджень ЗЗ сплавів 5456 і 2219, одержаних періодичним способом відхилення, показали, що структура металу всіх швів дендритна. В цілому, метал шва ЗЗ щільний, пористість в металі шва практично відсутня. Поодинокі пори, що спостерігаються в металі шва не перевищують, в діаметрі, 30 мкм. Також спостерігаються окремі пори

розміром до 100 мкм в зоні лінії сплавлення. Відповідно до стандартів – це допустимі дефекти.

4.3 Випробування механічних властивостей зварних з'єднань, одержаних за пропонованою технологією

4.3.1 Випробування на тимчасовий опір розриву

Зразки для проведення механічних випробувань на тимчасовий опір розриву були вирізані на вибраних ділянках зварних швів, в яких були відсутні наявні дефекти, виявлені рентгенівською дефектоскопією.

Зразки для випробувань на тимчасовий опір розриву показані на рис. 4.12. Було підготовлено по 3 зразків стикових з'єднань із матеріалів 5456, 2219, і 6 зразків із основного металу. Механічні випробування проводилися на розривній машині Р – 50 з використанням датчика підсилення 50 кН. Було випробувано 6 зразків (по три зварених зразки із кожного матеріалу) і по три зразки із основного матеріалу. Результати проведених випробувань показали, що більшість зразків зруйнувалися по металу шва, а два зразки сплаву 2219 зруйнувалися в зоні термічного впливу на кордоні з лінією сплавлення.

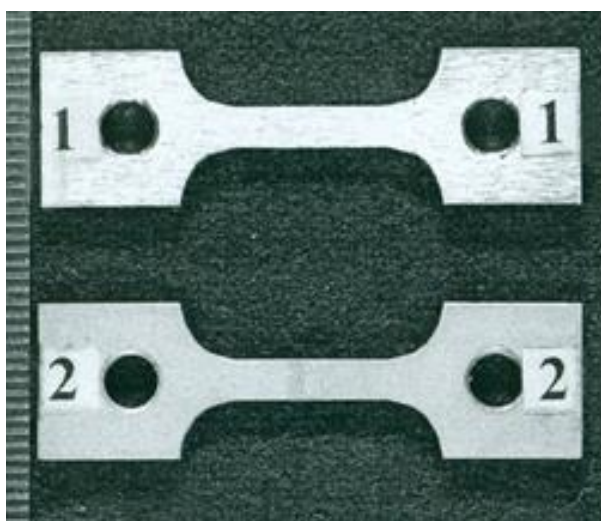


Рис. 4.12 – Зразки для випробувань на тимчасовий опір розриву:

1 – сплав 5456; 2 – сплав 2219.

Результати механічних випробувань зварних з'єднань, які отримані періодичним скануванням з періодичним відхиленням для всіх сплавів свідчать про те, що всі вони мають високу стабільність показників тимчасового опору та високі показники коефіцієнтів міцності (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Значення міцності розриву і коефіцієнта міцності зварних зразків із алюмінієвих сплавів 5456 та 2219, отриманих ЕПЗ з періодичним скануванням

Номер п.п.	Тип сплаву	Товщина, мм	$\sigma_{\text{в}}$ зварних з'єднань, МПа	$\sigma_{\text{в}}$ основного металу, МПа	Коефіцієнт міцності	Примітка
1	5456	<u>6,0</u>	$\frac{304...310}{306}$	$\frac{335...340}{338}$	0,9	
3	2219	<u>5,0</u>	$\frac{368...377}{370}$	$\frac{413...424}{417}$	0,89	

Таблиця 4.5 – Результати випробувань на тимчасовий опір розриву стикових з'єднань із алюмінієвих сплавів

№ пп.	№ зразка	Матеріал зразка	Результати випробувань, $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Коефіцієнт міцності, $\frac{\sigma_{\text{в.зв.шва}}}{\sigma_{\text{в.ос.мет.}}}$
1	46; 62*	5456	295, 6; 318, 6*	0, 85
3	48; 72*	2219	318, 2; 356, 4*	0, 82

Аналізуючи дані, одержані при проведенні механічних випробувань, треба відзначити наступне:

1. Спостерігається значне зниження міцності зразків із термозміцненого сплаву 2219 порівняно з основним металом на 32 та 35% відповідно, що можливо пов'язано з відносно невеликою швидкістю зварювання і невтриманою технологією підготовки зразків для зварювання (було відсутнє шабрування крайків зразків).

2. Зниження міцності зразків із сплавів 5456 склало 12 і 15% відповідно. Для цих сплавів така міцність допустима як нижній рівень міцності при електронно-променевому зварюванні. Одержані значення міцності можна пояснити також низькою швидкістю зварювання і відсутністю шабрування крайків зразків.

3. Для з'єднань, одержаних з періодичним відхиленням і програмованим тепловкладенням, спостерігається підвищення міцності.

4.4 Дослідження механічних властивостей основного металу та зварних з'єднань алюмінієвих сплавів 5456 та 2219 при кімнатній, підвищеній та криогенній температурах

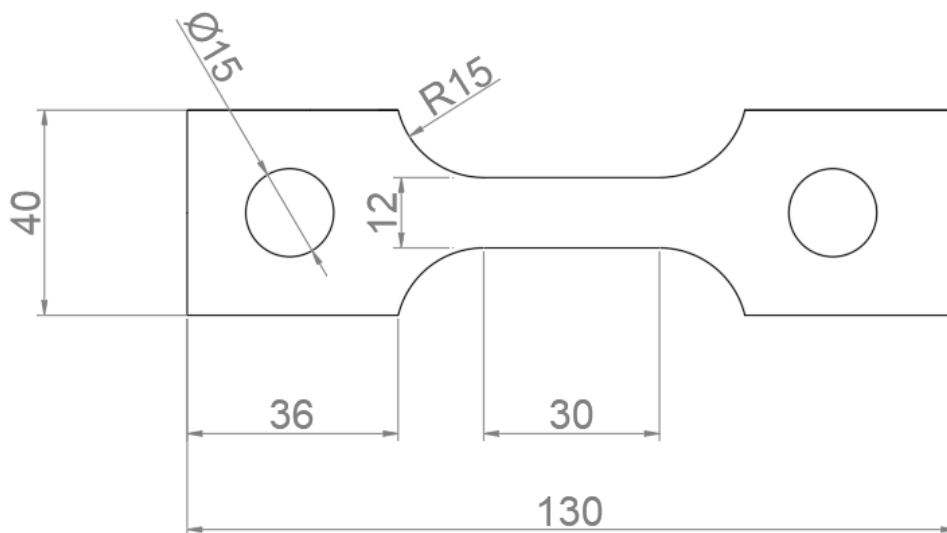


Рис. 4.13 – Ескіз зразка для проведення випробувань на розтяг

4.4.1 Випробування на статичний розтяг при кімнатній температурі +20°C

Випробування проводили на універсальному сервогідролічному випробувальному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН (рис. 4.14). Даний комплекс забезпечує жорстке навантаження зразка, що особливо актуально при визначенні модуля пружності та границі плинності.

Контроль параметрів при випробуваннях здійснювався за допомогою стандартного програмного забезпечення TestWorks 4 системи MTS 318.25. Дане спеціалізоване ліцензійне програмне забезпечення дає можливість відслідковувати в реальному часі обрані параметри експерименту і отримувати в електронному форматі значення стандартних характеристик, що описують поведіння матеріалу в процесі деформування.



Рис. 1.14 – Універсальний сервогідравлічний випробувальний комплекс MTS 318.25 (США, Material Test System)

Випробування проводили у жорсткому режимі зі швидкістю навантаження відповідно до ДСТУ ISO 6892-1:2019. Швидкість навантаження контролювали за переміщенням активного захвату випробувальної машини. Для більш точного визначення умовної границі плинності основного металу

швидкість руху захвату на лінійній ділянці діаграми «напруження-деформація» і в зоні пружно-пластичної деформації становила 2 мм/хв. На цьому етапі використовувався екстензометричний датчик MTS 632.27F-20 з базою вимірювання деформації 30 мм (рис. 4.15). Точність вимірювання становила 0,001 мм, база вимірювань 30 мм. В подальшому швидкість навантаження до руйнування зразка становила 10 мм/хв.



Рис. 4.15 – Екстензометричний датчик MTS 632.27F-20

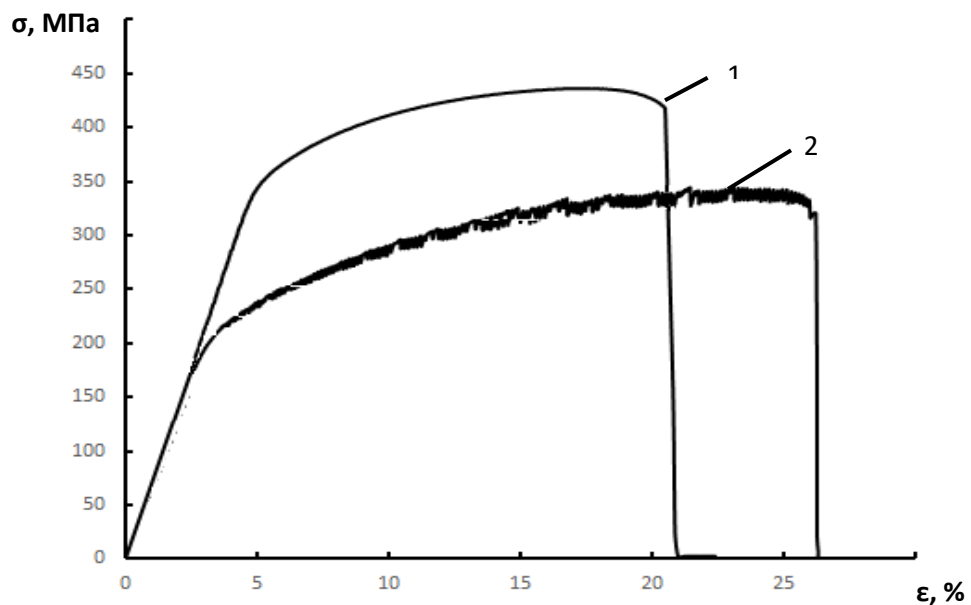


Рис. 4.16 – Діаграми деформування плоских зразків із алюмінієвих сплавів 2219 та 5456 за кімнатної температури на одновісний розтяг на сервогідравлічному випробувальному комплексі MTS 318.25:

1 – сплав 2219, 2 – сплав 5456

Таблиця 1.6 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456, за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків за кімнатної температури

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
A.1.1	173	378	25.7
A.1.2	191	355	27.2
A.1.3	174	338	25.7
Сер. знач.	177.0	357.0	26.2
зварні з'єднання			
A.2.1	185	337	14.1
A.2.2	185	339	15.5
A.2.3	184	312.5	15.1
Сер. знач.	184.7	329.5	14.9

Таблиця 4.7 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків за кімнатної температури

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
B.0.1	342	436	22.0
B.0.2	334	430	14.3
B.0.3	340	436	18.8
Сер. знач.	339.7	434.0	18.4

зварні з'єднання			
Б..2.1	295	389	8.6
Б.4.1	295	410	11.5
Сер. знач.	295	399,5	10,05

4.4.2 Випробування на статичний розтяг при підвищеній температурі + 120 °С

Для проведення досліджень на розтяг при підвищених температур +120°С використовували високотемпературну систему нагріву SEO 001/12/18 (рис. 4.17). Дана система нагріву конструктивно виконана у вигляді окремого блоку управління та електропечі, як приставки до основного комплексу випробувального обладнання.



Рис. 4.17 – Високотемпературна система нагріву SEO 001/12/18 зразків для випробувань на одновісний розтяг за підвищеної температури

Електропіч призначена для нагріву та витримки зразків при заданій температурі випробувань температури зразка в діапазоні від 100 °С до 1100 °С.

Нагрівач виконано з ніхромового дроту, який зафіксовано по внутрішньому діаметру електропечі і захищено теплоізоляцією, покритою захисною оболонкою. Для забезпечення рівномірності нагріву зразків і зменшення тепловтрат отвори електропечі закрито термостійкими накладками.

Для нагрівання та підтримки під час випробувань заданої температури зразка застосовують блок управління, у якому використано широтно-імпульсний метод регулювання температури. Похибка підтримання температури не перевищує 0,1 % від діапазону регулювання. Вимірювання температури зразка проводять контактним методом за допомогою первинного перетворювача — хромель-алюмелівої термопари. Контакт між зразком та термопарою забезпечують кріпленням спаю термопари у центрі основи зразка за допомогою зварювання.

Таблиця 4.8 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456, за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків при підвищеній температурі + 120 °С

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
A.1.4	176	316	40.3
A.1.5	175	289	47.7
A.1.6	181	290	45.7
Сер. знач.	177.3	298.3	44.6
зварні з'єднання			
A.4.1	177.5	291.5	36.3
A.4.2	180.2	-	-
Сер. знач.	178.9	291.5	36.3

Таблиця 4.9 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, за результатами випробувань на одинісний розтяг зразків при підвищеній температурі + 120 °С

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
Б.0.4	294	365	19.1
Б.0.5	297	367	18.1
Б.0.6	306	375	19.4
Сер. знач.	299.0	369.0	18.7
зварні з'єднання			
Б.2.2	290	358	6.5
Б.4.3	285	372	8.9
Сер. знач.	287.5	365.0	7.7

4.4.3 Випробування на статичний розтяг при кріогенній температурі

- 180 °С

Для реалізації випробувань на одинісний розтяг зразків із алюмінієвих сплавів та їх зварних з'єднань за пониженої температури – 180 °С також було використано універсальний сервогідролічний випробувальний комплекс MTS 318.25 (рис. 4.14) після необхідної модернізації.

Сконструйовано та виготовлено кріостат із силовим ланцюгом. Розроблене устаткування дало можливість забезпечити надійне кріплення і

симетричне позиціонування зразка відносно силової осі в охолодженому об'ємі.

Конструктивно силовий ланцюг складається з нижньої та верхньої тяг, що кріпляться в гідравлічних захватах за допомогою перехідних елементів. Для кріплення зразка в силовому ланцюзі служать верхній і нижній вилючні захвати.

Охолодження зразка забезпечується рідким азотом, який заливається в кріостат, що кріпиться за допомогою різьбового кріплення до верхньої частини нижньої тяги. Кріостат виконано у вигляді труби з завареним дном з центральним отвором діаметром рівним діаметру нижньої тяги.

При виборі кріостату необхідно враховувати геометричні розміри зразків, а саме рівень рідкого азоту при заповненні кріостату має бути вищим від торця верхньої головки зразка більше ніж 15 мм.

Для захисту гідравлічних захватів від протікання рідкого азоту з кріостату, на нижній частині цієї тяги, змонтовано захисний екран. Нижня тяга виконана з двома упорами, до яких за допомогою гайки монтується кріостат та захисний екран.

Виготовлений кріостат забезпечує охолодження зразка до температури – 180 °С та надає можливість підтримання сталої заданої температури під час випробування. Як охолоджувач використовується рідкий азот.

Виготовлене устаткування забезпечує рівномірне охолодження робочої частини зразка з градієнтом температури не більше ± 2 °С, що відслідковується встановленими на робочій частині зразка двома термоелектричними перетворювачами (термопарами).

Тривалість витримування зразка в охолоджувачі складає не менше 10 хв після закінчення бурхливого кипіння рідкого азоту. Швидкісний режим випробування відповідає вимогам стандарту ДСТУ 7305:2013.



Рис. 4.18 – Універсальний сервогідролічний випробувальний комплекс MTS 318.25 (США, Material Test System) обладнаний криостатом для проведення випробувань на одновісний розтяг зразків за пониженої температури $-180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ згідно ДСТУ 7305:2013

Таблиця 4.10 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456, за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків при криогенній температурі $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
A.1.8	184.5	418.8	28.3
A.1.9	182.6	397.3	27.0
Сер. знач.	196.5	425.4	30.8

зварні з'єднання			
A.4.4	199.0	356.0	19.7
A.4.5	208.0	354.0	10.7
Сер. знач.	207.7	364.7	14.5

Таблиця 4.11 – Значення механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219, за результатами випробувань на одновісний розтяг зразків при криогенній температурі -180 °С

№ зразка	Характеристики механічних властивостей		
	Границя плинності $\sigma_{0.2}$. МПа	Границі міцності σ_b . МПа	Відносне видовження зразка δ . %
основний метал			
Б.0.7	477	517	-
Б.0.8	430	478	25.6
Сер. знач.	453.5	497.5	19.7
зварні з'єднання			
Б.4.5	302	431	13
Б,4.4	314	437	13.9
Сер. знач.	308	434	13.45

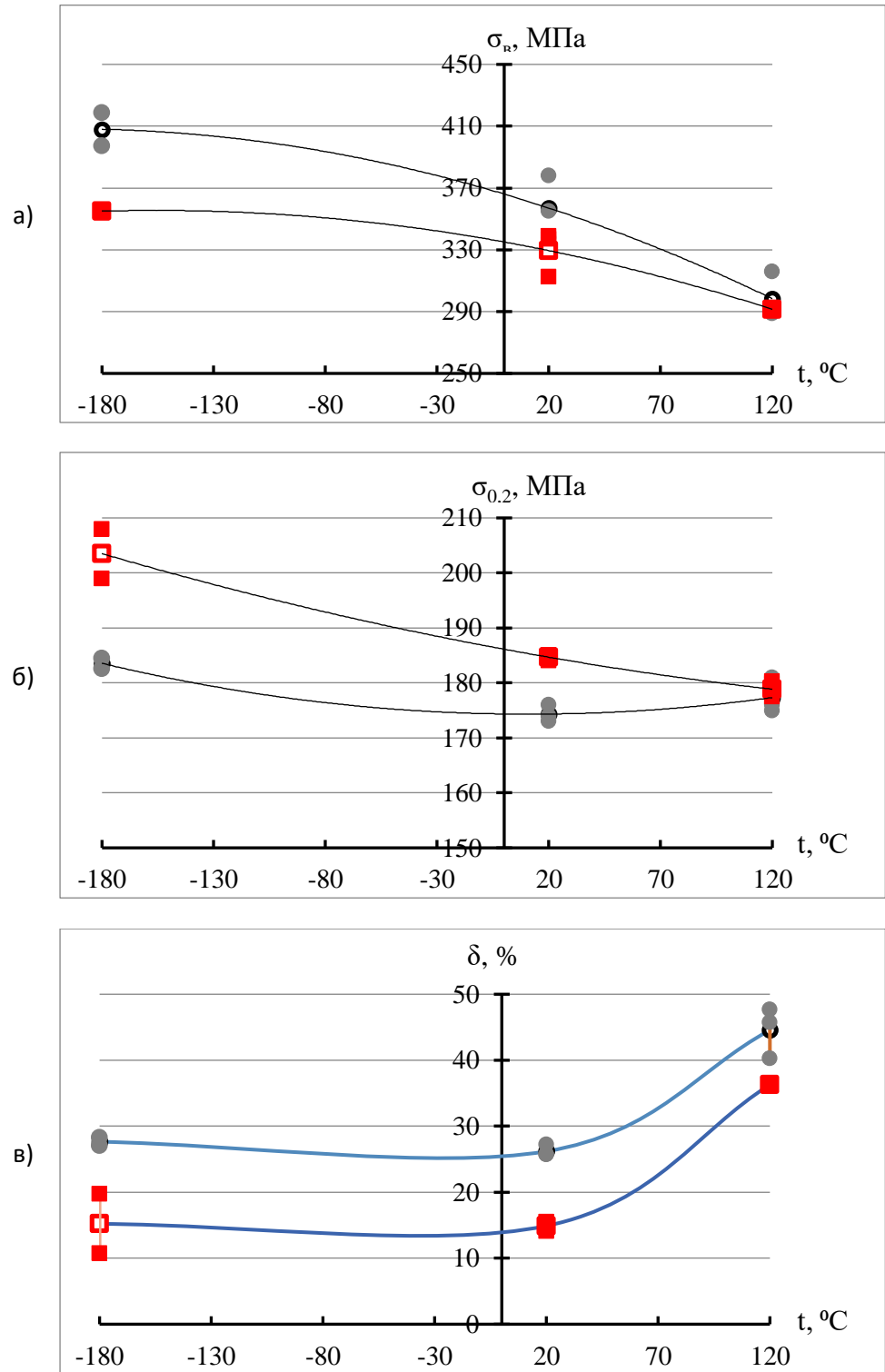
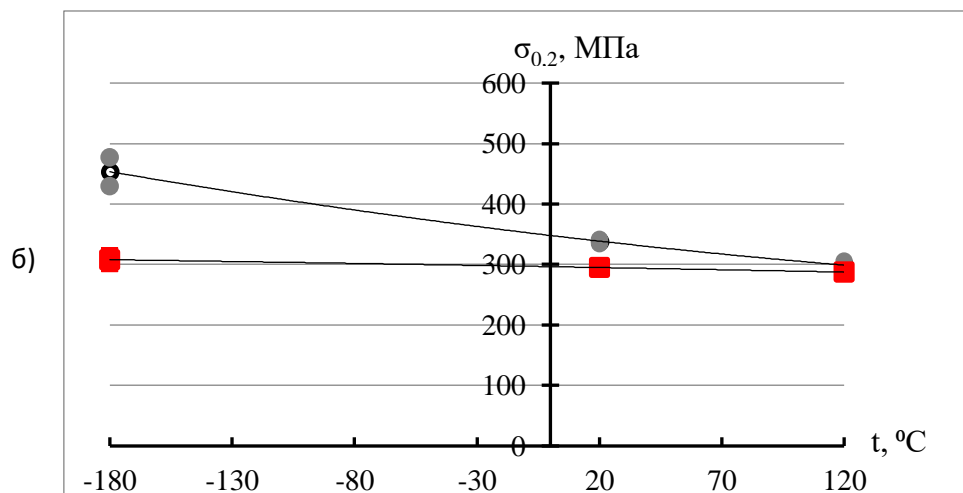
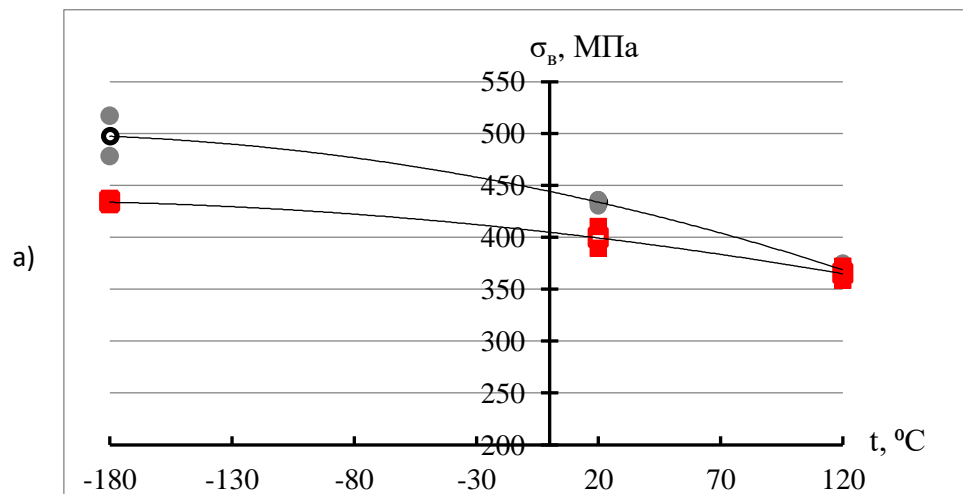


Рис. 4.19 – Порівняння механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456

З графіків приведених на рис. 4.19 можна спостерігати що значення межі міцності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 5456 лише на 3- 13% нижчі відповідних показників основного металу при цьому при збільшенні температури випробувань різниця зменшується.

Показники умовної границя плинності для зварних з'єднань перевищують на 1-10% відповідні показники основного металу це може пояснюватися тим що база визначення умовної границі плинності для зварних з'єднань включала як основний метал так і зони термічного впливу та метал шва, що мають відмінну мікроструктуру металу від основного металу.

Показники відносного видовження після розриву для зварних з'єднань складають близько 50% в діапазоні температур $-180^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$ та підвищуються до 80% для температури $+120^{\circ}\text{C}$.



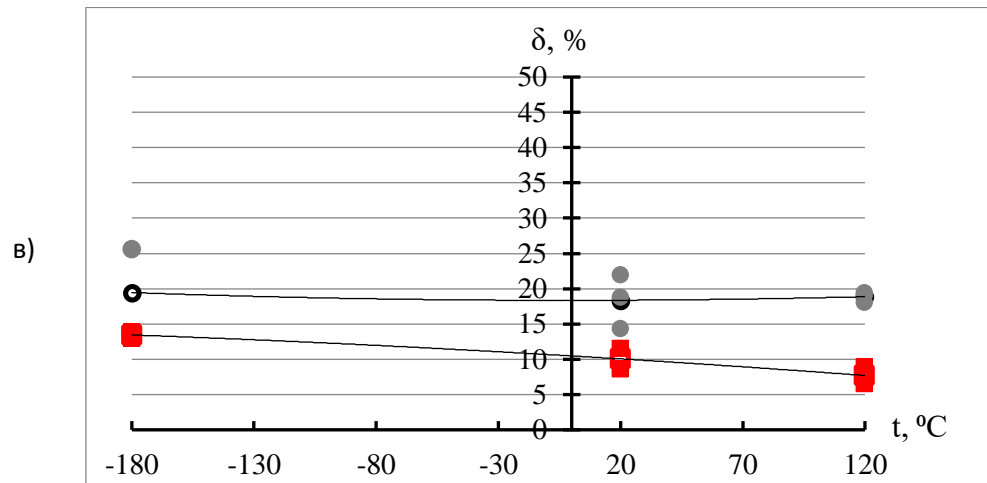


Рис. 4.20 – Порівняння механічних характеристик основного металу та зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219

З графіків приведених на рис. 4.20 можна спостерігати що значення межі міцності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219 лише на 2 - 13% нижчі відповідних показників основного металу при цьому при збільшенні температури випробувань різниця зменшується.

Показники умовної границя плинності для зварних з'єднань лише на 4-13% відповідні показники основного металу в діапазоні температур +20°C...+120°C, проти при криогенній температурі -180 °C різниця досягає 33%.

Показники відносного видовження після розриву для зварних з'єднань складають близько 40...69% в діапазоні температур -180°C ...+120 °C, з характерним збільшення розбіжності при підвищенні температури випробувань.

4.5 Розподіл повздовжніх напружень у поперечному перерізі зварних зразків проводився із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії в поєднанні з висвердлюванням отвору

Суттєвий вплив на роботоздатність зварних конструкцій, стійкість їх до циклічних навантажень мають залишкові напруження. Для нових технологій зварювання важливо отримати експериментальні дані про розподіл напружень, вплив технологічних параметрів на їх максимальні значення.

Один з найбільш поширених методів визначення залишкових напружень – це метод свердління отворів [143].

Процедура включає створення нескрізного отвору у матеріалі, що викликає локальну релаксацію напружень, й, відповідно, деформацію поверхні, яка вимірюються за допомогою спеціальної розетки електротензорезисторів, що прикріплена навколо місця свердління отвору.

Застосування оптичних методів лазерної інтерферометрії, таких як спекл-інтерферометрія (ESPI), для визначення залишкових напружень дозволяє отримати більше інформації про напружений стан досліджуваних об'єктів порівняно з тензометрією.

Така перевага досягається шляхом обчислення значно більшої кількості значень переміщень, викликаних свердлінням отвору [141, 142, 144]. Метод ESPI-HD також не вимагає підготовки поверхні і може використовуватись для визначення залишкових напружень в умовах їх високого градієнта.

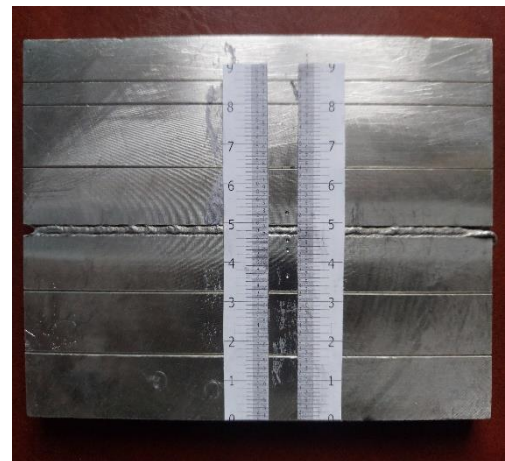
Визначення залишкових напружень у зразках, що отримані за допомогою електронно-променевого зварювання, проводились за допомогою розробленого в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона приладу на основі методу ESPI-HD (рис. 4.21,а). Цей метод продемонстрував відповідність з іншими традиційними методами [145] під час raund-robin тесту Міжнародного інституту зварювання.



а)



б)



в)

Рис. 4.21 - Вимірювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях:

а) – ESPI-HD прилад, встановлений над зразком, б) та в) – лицьова та зворотна сторона досліджуваного зразка

Залишкові напруження визначалися у поперечному до зварного шва перерізах в середній частині обох сторін зразка (рис. 4.21 б, в). Вимірювання проводяться в наступній послідовності [142]: пристрій ESPI розміщується на поверхні об'єкта і записуються спекл-зображення, які характеризують початковий стан перед свердлінням отвору. Після релаксації напружень, викликаній свердлінням нескрізного отвору діаметром 1,0 мм та глибиною 0,5 мм, записується інший набір спекл-зображень, що відповідають

деформованому стану, і обчислюється отримана фазова карта. Комп'ютерна обробка інтерференційних зображень дозволяє отримати дані про переміщення в площині зразка навколо отвору за якими обчислюються залишкові напруження.

В результаті проведених вимірювань встановлено, що для зразків, які отримані без термічної обробки, напруження на лицьовій та зворотній стороні практично ідентичні.

Це підтверджує, що розроблена зварювальна установка забезпечує кінжальне проплавлення, яке створює однорідний напружений стан по всій товщині зварного з'єднання (рис. 4.22). Важливо відмітити, що запропонований попередній підігрів та термічна обробка практично до нуля знижує рівень залишкових напружень як з лицьової так і з кореневої сторони зварного шва.

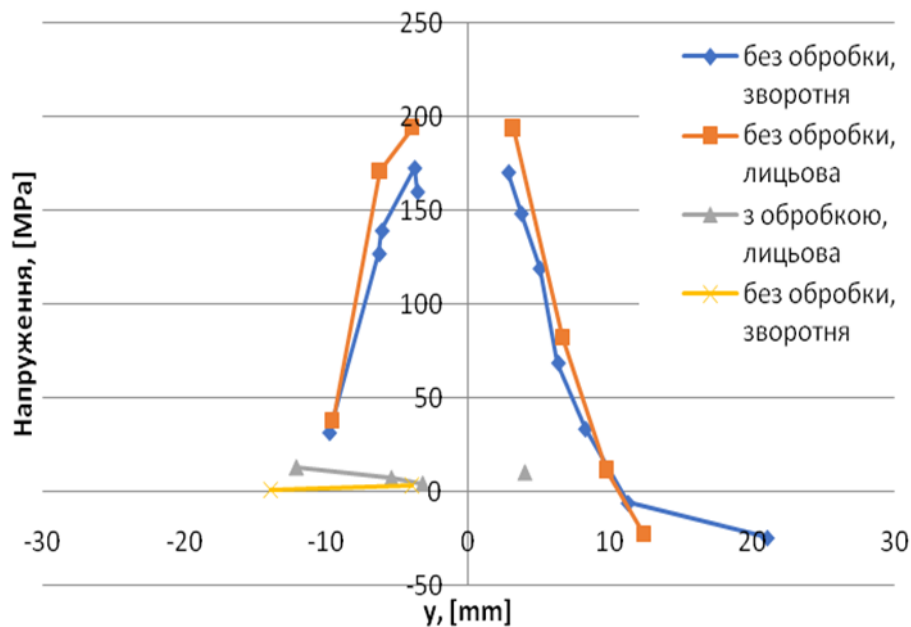


Рис. 4.22 - Розподіл повздовжніх залишкових напружень у поперечному перерізі зварних з'єднань, що отримані з термічною обробкою та без неї

4.6 Висновки до розділу 4

1. Розроблені елементи технології ЕПЗ алюмінієвих сплавів однопрохідним способом з попереднім підігрівом та наступною термообробкою шва з перемішуванням розплавленого металу ванни реверсною круговою розгорткою і періодичним відхиленням електронного пучка.

2. Розроблена і виготовлена система ВС-5, яка використовувалася для керування періодичним відхиленням електронного променя по заданій траєкторії і програмованого тепловкладення з різною інтенсивністю нагрівання в процесі зварювання.

3. Запропоновані варіанти розподілу потужностей теплової дії електронного пучка дозволяють синтезувати керування електронним променем для створення заданого температурного поля при ЕПЗ з одночасними попереднім підігрівом і подальшою термообробкою.

3. Проведені технологічні експерименти по однопрохідному електронно-променевому зварюванню зразків із алюмінієвих сплавів з періодичним відхиленням електронного пучка по заданій траєкторії.

4. Проведені механічні випробування на міцність, визначений хімічний склад та виконані металографічні дослідження з'єднань із алюмінієвих сплавів, одержаних електронно-променевим зварюванням з періодичним відхиленням електронного пучка по заданій траєкторії, які показали високу якість з'єднань, одержаних способом періодичного відхилення пучка при зварюванні з попереднім підігрівом та подальшою термообробкою.

6. Проведені експерименти показали, що створене обладнання та запропонована технологія дають можливість зварювати алюмінієві сплави товщиною до 6 мм, які в основному застосовуються в сучасному ракетобудуванні.

7. З графіків приведених на рис. 4.20 можна спостерігати що значення межі міцності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 2219 лише на 2- 13%

нижчі відповідних показників основного металу при цьому при збільшенні температури випробувань різниця зменшується.

8. Показники умовної границя плинності для зварних з'єднань перевищують на 1-10% відповідні показники основного металу це може пояснюватися тим що база визначення умовної границі плинності для зварних з'єднань включала як основний метал так і зони термічного впливу та метал шва, що мають відмінну мікроструктуру металу від основного металу.

Показники відносного видовження після розриву для зварних з'єднань складають близько 50% в діапазоні температур $-180\text{ }^{\circ}\text{C}\dots+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ та підвищуються до 80% для температури $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

9. В результаті проведених вимірювань встановлено, що для зразків, які отримані без термічної обробки, напруження на лицьовій та зворотній стороні практично ідентичні. Це підтверджує, що розроблена зварювальна установка забезпечує кінжальне проплавлення, яке створює однорідний напружений стан по всій товщині зварного з'єднання. Важливо відмітити, що запропонований попередній підігрів та термічна обробка практично до нуля знижує рівень залишкових напружень як з лицьової так і з кореневої сторони зварного шва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сукупність теоретичних положень та практичних розробок, викладених у цій роботі, може бути кваліфікована, як вирішення важливого науково-технічного завдання створення принципового технологічного процесу електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів, який дозволяє з використанням обладнання нового покоління в умовах зниженої гравітації одержувати якісні зварні з'єднання, що відповідають вимогам до конструкцій космічного призначення.

1. За допомогою обчислювального експерименту було встановлено закономірності утворення пор в металі шва зварних з'єднань із алюмінієвих сплавів при ЕПЗ в умовах зниженої гравітації шляхом аналізу основних факторів, які визначають підвищену схильність до утворення несучільностей такого типу.
2. Запропоновано якісну математичну модель для оцінки схильності металу зварного з'єднання, отриманого кинджальним проплавленням за допомогою висококонцентрованого джерела зварювального нагрівання, до зародження пор в металі зварного шва.
3. Встановлено, що найбільший вплив на стійкість ПГК надає співвідношення абляційного тиску та сили поверхневого натягу, які несуттєво залежать від сили гравітації. В свою чергу, гідростатичний тиск знижується при зменшенні сили гравітації, що має невеликий позитивний ефект на стабільність ПГК і знижує схильність до появи пор, зумовлених локальним схлопуванням каналу в процесі зварювання.
4. Вперше встановлено суттєвий вплив сили гравітації та розмірів пухирців газу на швидкість їх спливання з розплавом. Показано, що при зниженні прискорення вільного падіння нижче 3 м/с^2 різко збільшується розмір пухирців газу, які не встигають спливати до повної кристалізації ванни розплаву і формують сферичну несучільність металу шва.
5. Вперше створена електронно-променева гармата, яка для робіт в умовах високого космічного вакууму використовує тріодну емісійну систему, що при прискорювальній напрузі 10 кВ потужністю 2,5 кВт, спроможна виконувати зварювання та різання алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм, які в основному застосовують в сучасному космічному апаратобудуванні.
6. Вперше створена електронно-променева гармата, яка має можливість фокусування електронного променя та періодичного відхилення програмованої інтенсивності нагріву електронним променем по заданій траєкторії, а її оптична система формує гострий електронний пучок (діаметром

не більше 1,0 мм) на відстані 50...150 мм, що дозволяє одержувати якісні, бездефектні зварні з'єднання.

7. Запропонована принципова технологія електронно-променевого зварювання алюмінієвих сплавів з перемішуванням зварювальної ванни скануючим електронним пучком з програмованою дискретною інтенсивністю теплової дії, яка завдяки дозованому впливу променя на зварювальну ванну дозволяє локалізувати газові включення, організувати їх спрямоване примусове переміщення до зовнішньої поверхні рідкого металу і видалення з розплаву.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Патон Б.Є. Перспективи застосування зварювання у космосі. *СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ*. 2023. № 1. С. 1-15.
2. Космос: технологии, материаловедение, конструкции / под ред. Патон Б.Е. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 2000.
3. Терновой Е.Г. Особенности электронно-лучевой сварки в космосе. *Первый китайско-украинский форум по науке и технологиям*: сб. тезисов, 22–26 июня 2015г., Харбин, КНР.
4. Пионеры ракетной техники. Кибальчич, Циолковский, Цандер, Кондратюк. Москва: Наука, 1964. С.539, 590-594.
5. Эрике, Краффт А. Будущее космической индустрии: пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1979. 200 с.
6. Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. Киев: Наукова думка, 1998.
7. Device for manual electron beam processing of materials in Space: pat.5, 869,801 United States: B23K 15/00, B64G 4/00
8. Исследование влияния гравитации на состав покрытий из двойных сплавов. Проблемы космической технологии металлов / Е.С. Лукаш и др. Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 1986. С. 22—28.
9. Изучение особенностей кристаллизации расплавов в невесомости на оптически прозрачных моделях/ А.А. Загребельный и др. Космические исследования на Украине. Киев: Наукова думка, 1984. Вып. 18. С. 14—17.
10. Лапчинский В. Ф. Некоторые проблемы сварки тонколистового металла в космосе. Космические исследования на Украине. Киев: Наукова думка, 1984. Вып. 18. С. 9 —13.
11. Масубуши К. (Masubuchi). Космические технологии соединений, разработанные в США. Техника сборки и соединения. Токио: 1989. N 8. С. 103—108.
12. Лапчинский В.Ф. Сварка в космосе. Сварка в СССР. Москва: Машиностроение, 1988. С. 487— 494.

13. Пристрій для ручного електронно-променевого зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі: пат. № 118896: В23К 15/00, В64G 4/00. №а201203795; заявл. 18.04.2017; опубл. 25.03.2019. Бюл. № 6/2019.
14. Спосіб забезпечення високого робочого вакууму в електронно-променевій гарматі та пристрій для здійснення зварювання і споріднених технологій у відкритому космосі: пат.121773 Україна: В23К 15/00, В64G 4/00. № а2017 12348; заявл. 13.12.2017; опубл.27.07.2020. Бюл. №14/2020.
15. Space: technologies, materials, structures. Edited by В.Е. Paton. E.O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine, Kiev. 2000.
16. Влияние гравитационных сил, растворенного водорода и исходной температуры на свойства и плотность соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных сплавов. *Проблемы космической технологии металлов*/ Е. Г. Терновой и др. Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 1986. С. 56—59.
17. Исследование свойств и структуры сварных соединений сплава 1201, выполненных электронным лучом при различных уровнях гравитации и низких температурах. *Проблемы космической технологии металлов*/ Д. М Рабкин и др. Киев: Наукова. думка, 1985. С. 94—96.
18. Bakushin S. V, Morozov Yu., Lapchinskii V. F, Demidov D. L. Prediction of Structural Materials Performance at Long-Term Service in Space Conditions. *Ibid.* P. 299—307.
19. Electron Beam Welding in Space. *Engineer.* 1968. 225, N 5866. P. 1024—1025.
20. Gold-cathode Space Welder is developed. *Aerospace Technology.* 1968. 21, N 25. P. 21.
21. Irving R. R. All Systems Are Go for EB Welding. *Iron age.* 1966. N 17. P. 59-61.
22. Lienan H. G., Lowry J. F., Hassan C. B. Electron Beam Welder for Use in Space. *Weistinghouse Engineer.* 1968. P. 41-45.
23. Roderick D. Hidden. USAF Studying Space Tool Development. *Aviation Week and Space Technology.* September. 1965, N 13. P. 58-65.
24. Schollhammer F. R. Electron Beam Welder for Space. *Nat. Sympos. Mater. Vehicles Use.* 1963. Vol. 1, P.1, Seattle. P. 1-23.

25. Space Gun for Welding. *American Machinist*. 1968. 112, N 12. P. 145.
26. Patent No.: US 6,324,491 B1/ Method for determining a heat source model for a weld / J. Zhang, Y. Dong. Date of Patent: Nov. 27, 2001.
27. Патон Б. Е., Назаренко О. К., Чалов В. И. и др. Особенности аппаратуры и процессов электронно-лучевой сварки и резки в условиях космоса. *Автоматическая сварка*. 1971. № 3. С.3—8.
28. Патон Б. Е., Патон В. Е., Лапчинский В. Ф. и др. Стенд для исследования технологических процессов в условиях, имитирующих космос. *Космические исследования на Украине*. 1973. Вып.1. С.5—9.
29. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф., Загребельный А. А. Стенд-тренажер для имитации сварочных работ в космосе. *Космические исследования на Украине*. 1975. Вып. 6. С. 18—21.
30. Кубасов В. Н., Никитский В. П., Лапчинский В. Ф. Первому эксперименту по сварке в космосе 25 лет. *Автоматическая сварка*. 1994. № 11. С.3—6.
31. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе. *Автоматическая сварка*. 1970. №5. С. 7—12
32. Paton B. E., Pokhodnya I. K., Lapchinskii V.F. et al. A Study of Electrode Welding and Metal Transfer in Welding under Conditions of Variable Gravitational Forces. *Arc Physics and Weld Pool Behaviour: Int. Conf. Vortrag. 37*. London: G. B. 1979. P. 117-122.
33. Оборудование для электронно-лучевой сварки/ А. И. Чвертко и др. Киев: Наукова думка, 1973. 408 с.
34. Терновой Е. Г., Бондарев А. А., Лапчинский В. Ф. и др. Исследования некоторых вопросов свариваемости алюминиевых сплавов электронным лучом в невесомости. *Космические исследования на Украине*. 1976. Вып. 9. С. 5—11.
35. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Сварочные процессы в космосе. Сварка и спецэлектрометаллургия. Киев: Наукова думка, 1984. С. 121—129.
36. Патон Б. Е., Дудко Д. А., Лапчинский В. Ф. Перспективы прикладных проблем космической технологии металлов. *Проблема космической технологии металлов*. Киев: Наукова думка, 1985. С. 3—6.

37. Анализ результатов экспериментов, выполненных с универсальным ручным инструментом в космосе. Проблемы космической технологии металлов/ Б. Е. Патон и др. Киев: Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, 1986. С. 5—13.
38. Патон Б. Е., Джанибеков В. А., Савицкая С. Е. Испытано на орбите. *Наука и жизнь*. 1986. № 2. С. 76—86.
39. Paton B. E., Djanibekov V.A. et al. The Test of the Versatile Hand Electron Beam Tool in Space. *Welding under Extreme Conditions: Proceedings of the International Conference under the auspices of the International Institute of Welding*. Helsinki: PergamonPress, 1989. P. 189-196.
40. Лапчинский В. Ф., Никитский В. П., Загребельный А. А. Испытание ручного электронно-лучевого инструмента в открытом космосе. Проблемы космической технологии металлов. Киев: Наукова думка, 1985. С. 7—15.
41. Некоторые результаты анализа образцов покрытий, полученных в космосе. Проблемы космической технологии металлов/ Е.С. Лукаш и др. Киев: Наукова думка, 1985. С. 81—87.
42. Anderson R.N. EVA Telerobotic Fluid Line Repair Tool Development. *Welding in Space and the Construction of Space. Vehicles by Welding*. Miami. 1991. P. 144—150.
43. Dzhanibekov V.A., Zagrebelny A. A, Stesin V. V. et al. Welding Equipment for Space Operation. *Welding in Space and the Construction of Space. Vehicles by Welding*. Miami. 1991. P. 49—59.
44. Paton B. E., Lapchinskii V.F. et al. Peculiarities of Using Welding Processes for Fabrication and Repair of Large-Sized Structures in Space. *Welding under Extreme Conditions. Proceedings of the International Conference under the auspices of the International Institute of Welding*. Helsinki: Pergamon Press, 1989. P. 181-188.
45. Paton B. E. Technologische Gesichtspunkte des Schweißens im Weltraum. *Schweißen und Schneiden*. 1990. 3. N 42. P. 117-120.
46. Кислюк В.С. Космічні дослідження Місяця. Сучасний стан та перспективи *Космічна наука і технологія*. 2013, т.19, №3, с.5-20.
47. Анализ возможности применения алюминиево–литиевых сплавов в ракетно-космической технике /А.Л. Лимаренко, Е.Г. Бобошко // 2-га Всеукр.

молодіж. наук.-практ. конф. з міжнар. Участю “Людина і космос”: зб. тез. Дніпро, 2000. С. 203.

48. Авіаційно-космічні матеріали та технології / В.О. Богуслаєв та ін. Запоріжжя: Вид-во ВАТ “Мотор Січ”, 2009. 383 с.

49. Алюминиевые сплавы на основе систем Al–Mg–Sc і Al–Zn–Mg–Sc и перспективы их применения в аэрокосмической технике/ Ю.А.Филатов // 5-й Междунар. аэрокосм. конгр.: тез. докл. 2006. С.151.

50. Використання алюмінієвих сплавів в авіаційній та ракетно-космічній техніці: навч. посіб. /Н.Є. Калініна, О.В. Бондаренко. Дніпро: РВВ ДНУ, 2011. 64 с.

51. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. Киев: Наукова думка, 2013.

52. Анализ несущей способности прессованных профилей из быстро закристаллизованного алюминиево-литиевого сплава для применения в изделиях для аэрокосмической техники. /В.Н. Бутрим, В.Н. Мироненко, А.С. Кирилянчик, О.П. Баженова // 5-й Междунар. аэрокосм. конгр.: тез. докл., 2006. С. 142.

53. Свойства и структура высокопрочного свариваемого алюминиево-литиевого сплава 1460 / А.Л. Лимаренко, В.Г. Ситало, Т.Н. Литвишко // Матеріали 3-ї Міжнар. молодіж. наук.-практ. конф. “Людина і Космос”. Дод. до журн. *Космічна наука і технологія*. Київ: 2002. Т.8. №1. С. 123–126.

54. Мазерс Г. Сварка алюминия и его сплавов., *Woodhead Publishing Limited* / Г. Мазерс. Абингтон. Кембридж. Англия. 2002. С. 155-160.

55. Analysis of Tubular Element Permanent Joints of Braze-Welding and Brazing Type, Made Using the VHT /A.A. Zagrebelny et al. Problem of space technology of metals. Kiev: 1986. PWI. P.13–22.

56. Technology of Vacuum Soldering of Connections in Truss Structures of Aluminium Alloys / V.F. Khorunov, V.F. Lapchinsky, V.I. Shvetsand, V.F. Shylum. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1992. No. 2. P. 52–53.

57. Глушак С.О. Еволюція електронно-променевого обладнання для зварювання у космосі. *Автоматичне зварювання*. 2023. № 8. С. 1-7.

58. Электронно-лучевая сварка. / Под ред. академика Б.Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987.

59. Лапчинский В.Ф. Сварка в космосе. Сварка в СССР. Москва: Машиностроение, 1988. С. 487—494.
60. Kurrin Brad F. Welding in Space, Questions Remain. *Welding Design and Fabrication*. 1990. N 5. P. 22-24.
61. Твердопаливні ракетні двигуни. Матеріали і технології: Підручник / Ф. П. Санін та ін. Дніпро: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 1999. 320 с.
62. Назаренко О. К., Бондарев А. А., Кайдалов А. А. и др. Электронно-лучевая сварка / под ред. Б. Е. Патона. Киев: Наукова думка, 1987. С. 255.
63. Патон Б. Е., Кубасов В. Н. Эксперимент по сварке металлов в космосе. *Автоматическая сварка*. 1970. № 5. С. 7–12.
64. Исследование свойств и структуры сварных соединений из сплава 1201, выполненных электронным лучом при различных уровнях гравитации и низких температурах. Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции. / Д.М. Рабкин и др. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 2000. С. 528.
65. Терновой Е. Г., Бондарев А. А., Лапчинский В. Ф. Гавриш С. С., Афанасьев И. В., Филимонов В. И. Исследование некоторых вопросов свариваемости алюминиевых сплавов в невесомости. *Космические исследования на Украине*. 1976. Вып. 9. С. 5–11.
66. Влияние гравитационных сил, растворенного водорода и исходной температуры на свойства и плотность сварных соединений при электронно-лучевой сварке легких конструкционных сплавов. Космос: Технологии, Материаловедение, Конструкции. / Е. Г. Терновой и др. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. С.528.
67. Антонова М. М. Свойства гидридов металлов. Справочник. Киев: издавництво 1975. С.128.
68. Бондарев А. А. Влияние технологических факторов на свойства и плотность сварных швов алюминиевых сплавов, выполненных электронно-лучевой сваркой. *Автоматическая сварка*. 1972. № 5. С. 24–26.
69. Исследование структуры и распределения элементов в сварных соединениях, выполненных электронным лучом на сплавах 1201 и АМг6 в условиях невесомости. Космос: Технологии, Материаловедение,

Конструкции. / А.А. Бондарев и др. Сб. науч. тр. под. ред. акад. Б. Е. Патона. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2000. С. 528.

70. Терновой Е. Г., Лобанов Л. М. Особенности электронно-лучевой сварки толстостенных оболочек из алюминиевых сплавов. 7 - я Международная конференция "Космические технологии: настоящее и будущее". Тезисы докладов. Днепр: 2019. С. 93.

71. Paton, B.E., Lobanov L.M., Asnis Yu.A., Ternovoj E.G., Zubchenko Yu.V. Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*. 2017. 23(4). 27-32

72. Biao H., Xin C., Shengyong P., Hu R. A three-dimensional model of coupling dynamics of keyhole and weld pool during electron beam welding. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. 15, Part B. P. 159–173.

73. Blackburn J. E. Understanding porosity formation and prevention when welding titanium alloys with 1 μm wave length laser beams. A thesis for the degree of Doctor of Engineering. Faculty of Engineering and Physical Sciences. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. The University of Manchester. 2011.

74. Clift R., Grace J. R., Weber M. E. Bubbles, drops and particles. New York: Academic Press. 1978.

75. Koleva E.G. Signal emitted from plasma during electron-beam welding with deflection oscillation of the beam / E.G. Koleva, G.M. Mladenov, D.N. Trushnikov, V.Y. Belenkiy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Т. 214. № 9. С. 1812-1819.

76. Masny H. Multi-Beam Technology in Electron Beam Welding / H. Masny. *ISFF Welding and Joining Institute*. 2006. Vol. 34. P. 1-4.

77. Libor Dupak. Electron beam micromachining of non-metallic materials / Libor Dupak // *BRNO: University of Technology*. 2012. P.10-45

78. Peng-Fei Fua Temperature field modeling and microstructure analysis of EBW with multi-beam for near a titanium alloy/ Peng-Fei Fua, Zhi-Yong Mao // *Huazhong University of Science and Technology*. 2013. Vol.102. P. 54-62.

79. Thiemer S. Elektronen strahl technologien als Dienstleistung Verzugsarm, preiswert und mit exzellentem Innovations potential / S. Thiemer. Pro-beam AG & Co. KGaA, Neukirchen, Germany. 2008

80. Yong Du. Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation / Yong Du et al. // *Materials Science and Engineering*. A363 2003 P. 140–151.
81. Денбновецкий С.В., Кубрак А.И., Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Моделирование системы автоматического управления током газоразрядной электронной пушки. – *Электроника и связь*, №11 (2001). – С. 51-54.
82. Rüttrich K. Investigations Relating to Electron Beam Multipool Welding of Metal Welds Based on Cast Iron / K. Rüttrich, R. Zenker, M. Mangler. *64th Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding*. Chennai, Indian. 2011.
83. Zenker R. Electron beam multipool welding with thermal fields of metal welds based on cast iron/ R. Zenker, M. Mangler. *Institute of Materials Engineering*, Freiberg, Germany.
84. Fujii H. Bubble formation in Aluminum alloys during electron beam welding / H. Fujii, H. Umakoshi, Y. Aoki, K. Nogi. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004. P.1252-1255.
85. Mathers G. The welding of Aluminium and its alloys. Published by Woodhead Publishing Limited / G. Mathers. Abington, Cambridge, England. 2002. P. 155-160.
86. Ambriz R.R. Mechanical Behavior of Precipitation Hardened Aluminum Alloys Welds / R.R. Ambriz, D. Jaramillo. In Tech. 2014. P.35-58.
87. Терновий Є. Г., Патон Б. Є., Лобанов Л. М., Асніс Ю. А., Зубченко Ю. В., Статкевич І. І. Комплекс апаратури для електронно-променевого зварювання в умовах поверхні Місяця. 7 - ма Міжнародна конференція "Космічні технології: сучасне і майбутнє". Тези доп., Дніпро, 2019. С. 113.
88. Paton V.E., Lobanov L.M., Asnis Yu.A., Ternovyi Y.H., Zubchenko Yu.V. Equipment and technology for electron-beam welding in space. *Space Materials and Technologies*. 2017. 23(4). С. 27-32.
89. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автоматическая сварка*. 2010. №11. С. 22- 27.

90. Бондарев А.А., Рабкин Д. А. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 1974. №3. С. 13 – 16.
91. Рабкин Д.М. *Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов*. Киев: Наукова думка, 1986. 256 с.
92. Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С. Обзор современных способов управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке. *Вестник ПНИИ У. Машиностроение, материаловедение*. 2016. Т. 18, № 4.
93. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Yu. V., Asnis Yu. A., Zubchenko Yu. V., Ternovyi E. G., Volkov V. S., Kostyuk B. D. & Umanskii V. New electron beam gun for welding in space. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2018. P. 1 - 7.
94. Мельник И.В. Обобщенная методика моделирования триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. / Мельник И.В. // *Электронное моделирование*. – Т. 35. – № 4. – 2013. – С. 93-107.
95. Мельник И.В. Моделирование вольт-амперных и энергетических характеристик триодных источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. / Мельник И.В. // *Успехи прикладной физики*. – Т. 1. – № 5. – 2013. – С. 592 – 600. 15.
96. Башенко В.В., Вихман В.Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки. Технологии и оборудование электроннолучевой сварки: материалы I С.-Петербур. Междунар. науч.-техн. конф., 19–22 мая 2008 г. (СПб.: ВиТ-Принт, 2008. С. 5–21).
97. Biao H., Xin C., Shengyong P., Hu R. A three-dimensional model of coupling dynamics of keyhole and weld pool during electron beam welding. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2017. 15, Part B. P. 159-173.
98. Blackburn J. E. Understanding porosity formation and prevention when welding titanium alloys with 1 μm wave length laser beams. A thesis for the degree of Doctor of Engineering. Faculty of Engineering and Physical Sciences. School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering. The University of Manchester. 2011.
99. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. *Bubbles, drops and particles*. New York: Academic Press. 1978p.

100. Duley W.W. Heat transfer and modelling in laser welding. Laser Welding. New York: Wiley & Sons, 1999 p.
101. Forsman T. Laser Welding of Aluminum Alloys. Doctoral Thesis. Department of Materials and Manufacturing Engineering Division of Manufacturing Systems Engineering. Lulea University of Technology. 2000.
102. Iida T., Guthrie R.I.L. The Physical Properties of Liquid Metals. Oxford: Clarendon Press, 1993. 288 p.
103. Klein T., Vicanek M., Kroos J., Decker I., Simon G. Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appt. Phys.* 1994. 27. P. 2023-2030.
104. Kroos J., Gratzke U., Simon G. Towards a self-consistent model of the keyhole in penetration laser beam welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1993. 26. P. 474-480.
105. Milenin E., Velikoivanenko G., Rozyuka G., Pivtorak N. Residual Strength and Reliability of Corroded Pipelines—Monte-Carlo Approach for Consideration of Spatially Non uniform Material Properties. *Structural Integrity*. 2019. 8. P. 321-326.
106. Терновой Е.Г., Бондарев А.А., Лапчинский В.Ф. Гавриш С.С., Афанасьев И.В., Филимонов В.И. Исследование некоторых вопросов свариваемости алюминиевых сплавов в невесомости. *Космические исследования на Украине*. 1976. Вып. 9. С. 5-11.
107. Бондарев А.А., Рабкин Д.М. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 1974. № 3. С. 13-16.
108. Бондарев А. А., Терновой Е. Г. Особенности формирования швов и свойства соединений алюминиевых и магниевых сплавов в условиях, имитирующих космические. *Автоматическая сварка*. 2010. №11 (691) С. 22-27.
109. Denbnovetsky S.V., Melnyk V.I., Melnyk I.V., Tugay V.A. Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications. – Proceedings of SPIE. Sixth Conference on “Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics”. – Vol. 5065 (2003). – P. 64-76.
110. Денбновецький С.В. Моделювання вольтамперних характеристик тріодних технологічних джерел електронів високовольтного тліючого розряду / Денбновецький С.В., Мельник І.В., Мельник В.Г., Тугай С.Б. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2012. – № 5. – С. 12 – 18. 14.

111. Бондарев А.А. Состояние техники и преимущества процесса электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов. Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: мат. докл. советско-американского семинара, Ташкент, 17 октября 1982 г. Киев: Наукова думка, 1984. С.10-19.
112. Терновой Е.Г., Бондарев А.А. Электронно-лучевая сварка толстостенных обечаек из алюминиевых сплавов АМгб и М40. *Автоматическая сварка*. 2012. №4. С. 8 – 13.
113. Махненко В.И., Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Взаимное влияние дефектов в зоне сварных соединений при различных силовых нагружениях. *Автоматическая Сварка*. 2012. № 7. С. 3-6.
114. Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И. Моделирование процессов зарождения и развития пор вязкого разрушения в сварных конструкциях. *Автоматическая Сварка*. 2013. № 9. С. 36-31.
115. Alexopoulou V.E., Papazoglou E.L., Karmiris-Obratański P., Markopoulos A.P. (2022). 3D finite element modeling of selective laser melting for conduction, transition and keyhole modes. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 75, P. 877-894.
116. Rai R. Heat Transfer and Fluid Flow during Electron Beam Welding of 304L Stainless Steel Alloy / R. Rai, T. A. Palmer, J. W. Elmer, T. Debroy // *Weld. J.* – 2009. – Vol. 88, No 3. – P. 54–61.
117. Pretorius T. Simulation of Thermal Bending – Acceleration of Temperature Field Calculations / T. Pretorius, J. Woitschig, F. Vollertsen // *Laser Technologies 277 in Welding and Material Processing: 2-nd Intern. Conf. 23-27 May 2005, Katsiveli, Crimea, Ukraine: Proceedings of Int. Conf.* – Kiev: E.O. Paton Electric Welding Institute, – P.100-103.
118. Shaoqing G. Finite Element Analysis of Welding Distortion Control by Trailing Intense Cooling / G. Shaoqing, X. Wenli, L. Xuesong et al. // *J. China welding.* – 2000. – Vol. 9, No 2. – P. 127–134.
119. Schaumann P. Numerische Eigenspannungsermittlung an einer einlagig geschweißten Stumpfnaht mit anschließender UIT-Behandlung / P. Schaumann, C. Keindorf, S. Zacke // *Schweißen und Schneiden.* –2007.–Vol.59.–No11. S.590–599

120. Лопатин Н. И. Расчет общих и местных сварочных деформаций при сварке тонколистовых конструкций из алюминиевых сплавов / Н. И. Лопатин // Вопросы материаловедения – 1998. – № 4 (17). – С. 47–52. 145.
121. Ремонт фрагментов корпуса международной космической станции с применением электронно-лучевой сварки [Текст]. Е.Г. Терновой, В.Ф. Шулым, Ю.Н. Ланкин. Сварка и родственные технологии - настоящее и будущее: тезисы стенд. докл. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Киев, 2013. 222 с.
122. Патон Б. Є., Лобанов Л. М., Асніс Ю. А., Терновий Є. Г., Зубченко Ю. В. Обладнання і технологія для електронно-променевого зварювання в космосі. *Космічна наука і технологія*. 2017. 23. № 4. С. 27—32.
123. Agafonov A. V., Bogachenkov V. A., Krastelev E. G. High-current electron beam guiding by the creation of profiled plasma channel. *Вопросы атомной науки и техники*. 2004. № 1. С. 35—37.
124. Акопянц К. С., Зубченко Ю. В. Методика расчета электронно-оптической системы сварочной пушки. *Автоматическая сварка*. 1979. № 11. С. 33—36.
125. Зубченко Ю.В., Терновой Е.Г. Разработка новых эмиссионных систем электронно-лучевых пушек для технологических работ в условиях космоса. *Автоматическая сварка*. 2015. № 12. С.38-40.
126. Zubchenko Yu. V., Ternovoy E. G. Development of new emission systems of electron beam guns for process operations under space conditions. *The Paton Welding J.*, No 12, 34—38.
127. Николов Д.Г. О моделировании тепловых источников при дуговой сварке / Д. Г. Николов, М. Ц. Трифонов, А. И. Букев // Свар. пр-во. – 1987. – № 6. – С. 34–36
128. Воробьев Г. С., Барсук И. В., Дрозденко А. А. Методы формирования и анализа интенсивных пучков электронов в статических электромагнитных полях (обзор). *Журн. нано- и электронной физ.* 2011. 3(3). С. 63—77.
129. Chunxu L. I., Chengdan H. E., Qijin X. U., JIANG Caiyun. Design of Electrostatic Focusing for Space Electron Beam Welding Gun. *Chinese J. Aeronaut.* 2005. 18(3). P. 256—262. 130. Paton B. E., Lobanov L. M., Naidich Y. U., et al. New electron beam gun for welding in space. *Sci. and Technology of Welding and Joining*. 2019. 24(4). P. 320—326.

131. Lobanov L. M., Asnis E. A., Ternovoy Ye. G., et al. Some issues of repairing manned space vehicles in outer space using electron beam welding. *Solid State Phenomena*. 2021. 315. P. 101—105.
132. Система управления разверткой луча при электронно-лучевой сварке. / Ю.Н. Ланкин, А.А. Бондарев, Е.И. Довгодько, В.А. Дьяченко. *Автоматическая сварка*. 2009. №9. С.16-20.
133. Solovyov V.G., Lankin Yu.M., Romanova I.Yu. Sweep programming electronic beam for heat treatment welding. *Automatic welding*. 2022. №4. 1 – 7.
134. Zenker R. Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art. In: EBEAM 2002, International Conference on High-Power Electron Beam Technology: 27-29.10.2002, Hilton Head Island. 2002.
135. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer-Verlag. 2015. 498 p.
136. Stecker S. Electron beam layer manufacturing using scanning electron monitored loop control. US Patent 8,598,523 B2. Published December 3, 2013.
137. Taminger K.M., Hafley R.A., Martin R.E., Hofmeister W.H. Closed-loop process control for electron beam freeform fabrication and deposition processes. US Patent 8,452,073 B2, Published May 28, 2013.
138. Zalameda J.N., Burke E.R., Hafley R.A., Taminger K.M. et al. Proc. SPIE 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV, 8705OM. 2013.
139. Everton S.K., Hirscha M., Stravroulakis P., Leach R.K. et al. *Mater Design*. 2016. 95. P. 431–445.
140. Seufzer W.J., Taminger K.M. Control of Space-Based Electron Beam Free Form Fabrication.
141. L. Lobanov, V. Pivtorak, V. Savitsky, G. Tkachuk 2014 Technology and Equipment for Determination of Residual Stresses in Welded Structures based on the Application of Electron Speckle-Interferometry, Materials Science Forum Vols 768-769 166-173
142. L.M. Lobanov, V.A. Pivtorak, V.V. Savitskii & G.I. Tkachuk 2010 Using electronic speckle interferometry for the accurate determination of the residual stresses in welded joints and structural members *Welding International* 24:6 439-443, 168, p. 148-155.

143. ASTM E837-20, Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method, in Annual Book of ASTM Standards, Am. Soc. Test. Mat, 2021 DOI: 10.1520/E0837-20.
144. Baldi, A., A new analytical approach for hole drilling residual stress analysis by full field method, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, No. 2, 2005, pp. 165–169.
145. Wohlfahrt, H., Nitschkepagel, T., Dilger, K. et al. Residual Stress Calculations and Measurements — Review and Assessment of The IIW Round Robin Results. *Weld World* 56, 120–140 (2012).