

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису  
УДК 621.791

ПЕЛЕШЕНКО СВЯТОСЛАВ ІГОРОВИЧ

### ДИСЕРТАЦІЯ

ФІЗИКО-МЕТАЛУРГІЙНІ ТА ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ПРИ  
ЗВАРЮВАННІ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ АЛЮМІНІЄВИХ  
СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Галузь знань – 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



С.І.Пелешенко

Науковий керівник:

Квасницький Віктор Вячеславович  
доктор технічних наук, професор

Київ – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Пелешенко С. І.* Фізико-металургійні та термодетформаційні процеси при зварюванні тонкостінних конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням лазерного випромінювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2024.

Дисертація присвячена дослідженню та створенню технологій зварювання виробів космічної промисловості з високоміцних алюмінієвих сплавів із використанням лазерного випромінювання шляхом розрахункового вибору параметрів режимів (щільності потужності, швидкості, розміру і часу існування зварювальної ванни) з подальшою експериментальною перевіркою, визначення впливу режимів та умов ведення процесу на формування напружено-деформованого стану та зміну геометричної форми виробів, розрахунковому прогнозуванню параметрів зварювання берилієвих сплавів. У роботі визначені характерні дефекти зварювання та шляхи їх усунення, створені методика та обладнання для визначення компонент напружено-деформованого стану та неруйнівного контролю виробів, зварених із використанням розроблених технологій, проведене конструювання дослідно-промислового комплексу для реалізації розроблених технологій.

Дисертаційна робота складається з **п'яти** розділів, у яких викладено та обґрунтовано основні результати дисертаційної роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, визначені мета та задачі дослідження, приведені методи дослідження, сформульовані наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** приведені результати аналізу особливостей зварювання легких сплавів на основі алюмінію і берилію із використанням сучасних зварювальних технологій. Розглянуто особливості використання лазерного випромінювання для зварювання тонкостінних конструкцій із легких сплавів, в тому числі актуальні проблеми при зварюванні тонкостінних

конструкцій із легких сплавів, зокрема з неповним проплавленням. На основі проведеного аналізу визначені мета та завдання досліджень.

**Другий розділ** присвячений опису застосованих стандартизованих та розроблених методик проведення дослідження, наведені опис та характеристики обраних матеріалів, технологічного обладнання для проведення експериментів та металографічних досліджень.

Для досягнення мети роботи та вирішення поставлених завдань була прийнята наступна методика досліджень: вибір зварюваних алюмінієвих сплавів і підготовка зразків; математичне модельне дослідження особливостей поглинання лазерного випромінювання при зварюванні легких високоміцних сплавів; виконання розрахункових експериментів на основі моделювання розподілу теплових полів у виробах з легких високоміцних сплавів, прогнозування параметрів режимів зварювання з використанням лазерного випромінювання; створення лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень; експериментальна перевірка точності розрахунків, металографічні дослідження зварених зразків, визначення характерних дефектів та шляхів їх усунення, корегування режимів; розробка комбінованого способу розрахунково-експериментального визначення залишкових деформацій та напружень у звареному виробі; створення методики та обладнання неруйнівного дослідження компонент напружено-деформованого стану (НДС) тонкостінних зварних виробів із високоміцних легких сплавів шляхом обробки цифрових стереозображень; створення технологічних рекомендацій щодо зварювання виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів з використанням лазерного випромінювання; проектування зварювальних головок для реалізації процесів зварювання легких високоміцних сплавів із застосуванням лазерного випромінювання в умовах камери з контрольованою атмосферою; проектування комплексу дослідно-промислового обладнання для герметизації зварюванням високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів і апаратури неруйнівного контролю НДС зварних виробів.

В третьому розділі дисертаційної роботи приведені результати моделювання з'єднання легких сплавів лазерним зварюванням та лазерно-мікроплазмовим зварюванням, описана методика вибору параметрів режимів зварювання тонкостінних виробів з легких сплавів із ненаскрізним проплавленням із застосуванням лазерного випромінювання, приведені результати експериментальної перевірки використаної методики вибору режимів зварювання та результати металографічних досліджень отриманих зварних з'єднань, а також аналіз характерних дефектів та шляхів їх усунення.

В роботі вперше досліджені особливості впливу супутнього плазмового підігріву на поглинання лазерного випромінювання поверхнею алюмінієвих сплавів і зроблений прогноз щодо особливостей поглинання випромінювання берилієвими сплавами. Визначено, що при переході легких сплавів від твердого до рідкого стану частка поглиненого лазерного випромінювання стрибкоподібно зростає до 5 разів для алюмінію і на ~20% для берилію. Встановлено, що завдяки приблизно втричі більшій теплопровідності берилію та його сплавів, порівняно із теплопровідністю алюмінієвих сплавів, погонна енергія лазерного зварювання берилієвих сплавів має приблизно вдвічі перевищувати енергію, яка необхідна для лазерного зварювання алюмінієвих сплавів. У разі застосування супутнього локального мікроплазмового підігріву зварювальної ванни таке підвищення погонної енергії зменшується до ~30%. Для такого супутнього підігріву визначений вплив дистанції між фокусом лазерного випромінювання і центром анодної плями плазмової дуги на тенденції формування шва і ступінь прояву синергетичного ефекту взаємодії цих двох енергетичних джерел.

Створені методики попереднього розрахункового визначення параметрів режимів зварювання з використанням лазерного випромінювання (лазерного і лазерно-мікроплазмового процесів) та залишкового напружено-деформованого стану виробів космічної промисловості з висококомісних алюмінієвих і берилієвих сплавів. За допомогою експериментальної перевірки розроблених методик на зразках висококомісних алюмінієвих сплавів визначена величина похибки (до 10...20%) та обґрунтована прийнятність цих методик для розв'язуваних завдань.

Встановлено, що завдяки поєднанню високої теплопровідності із низьким коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання для зварювання алюмінієвих сплавів існують певні порогові значення потужності та швидкості зварювання, а також визначені шляхи подолання недоліків, які можуть виникати через цю особливість. Розрахунковим і дослідним способами показано, що одним з найбільш ефективних шляхів покращення лазерного зварювання є застосування супутнього локального підігріву зварювальної ванни мікроплазмою прямої дії. Такий технологічний прийом забезпечує економію коштовної лазерної енергії та водночас дозволяє в 1,5-2 рази підвищити швидкість зварювання і покращити формування швів.

Проведене математичне прогнозування зварювання берилію та його сплавів за допомогою лазерного випромінювання із перевіркою отриманих результатів за літературними даними. Встановлено, що через теплопровідність, яка приблизно втричі перевищує теплопровідність алюмінієвих сплавів, для їх зварювання потрібно більше вкладення енергії. Тому погонні енергії провару берилієвих сплавів на глибину порядку 0,5-0,6 мм за умови нагрівання виробу до 100...120°C мають перевищувати енергії аналогічних проварів алюмінієвих сплавів: при лазерному зварюванні до ~4 разів, при лазерно-мікроплазмовому – на 30...50%.

Встановлено, що збільшення розміру зерен литого металу шва при лазерному зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів призводить до зниження міцності шва, зокрема в зонах сплавлення і вертикальної осі поперечного перерізу. Підвищення питомої енергії випромінювання призводить до зменшення вмісту летючих легуючих елементів сплаву (в першу чергу Mg, Zn, Li). Одним з характерних дефектів є утворення внутрішніх пор діаметром від 0,05 до 0,2 мм. Крім того, при зварюванні таких сплавів можлива поява як осьових, так і поперечних гарячих тріщин. Найбільш небезпечними зонами виникнення тріщин є кратер, де відбувається остаточна кристалізація розплаву, а також дефекти шва. Шляхами усунення схильності металу до тріщиноутворення є: попередній або супутній підігрів, мінімізація погонної

енергії зварювання, використання присадкових матеріалів, плавне зменшення потужності лазерного випромінювання при закінченні процесу зварювання, видалення з поверхні заготовок окислу  $Al_2O_3$  перед зварюванням, застосування основного металу з більш дисперсною структурою.

Дослідження показали, що одним з найкращих і найбільш універсальних способів мінімізації схильності металу до виникнення характерних дефектів при лазерному зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів є супутній підігрів металу зварювальної ванни мікроплазмою з електричною дугою прямої дії. Порівняно зі звичайним лазерним зварюванням такий підхід покращує формування підсилення верхнього валика шляхом усунення гребнів і підрізів, мінімізує пороутворення, зменшує твердість металу ЗТВ до рівня твердості основного металу, сприяє підвищенню швидкості зварювання, до 1,5-2 разів зменшує розмір зерен литого металу з'єднання.

Встановлено, що лазерне зварювання стикових з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів дозволяє отримувати шви з близьким до 1 коефіцієнтом форми при мінімальних витратах погонної енергії (5...10 Дж/мм) із часом існування ванни розплаву 0,02...0,04 с. Зернистість металу з'єднання носить регулярний характер, зерна в переплавленому металі мають рівноосну форму та подовжену форму біля лінії сплавлення (коефіцієнт форми зерна  $\alpha=2...3$ ) і в ЗТВ ( $\alpha=2,5...5$ ). Мікротвердість у швах зменшується на 15%, а ЗТВ збільшується на 8...12% відносно основного металу. Основні дефекти – утворення в ЗТВ мікротріщин довжиною 10...20 мкм та наявність у кореневій частині швів включень залишків оксидних плівок. Для підвищення якості з'єднань та усунення виявлених дефектів запропоновано використовувати лазерно-мікроплазмове зварювання. Зерна металу шва при такому зварюванні мають рівноосну будову, розмір зерен зменшується у 1,5-2 рази порівняно з лазерним зварюванням. Уздовж лінії сплавлення та у ЗТВ формуються структури з подовженими зернами ( $\alpha=3...6$  і  $\alpha=4...5$ , відповідно). Мікротвердість металу шва зменшується на 15...20% від основного метала, а ЗТВ – приблизно відповідає основному металу. При цьому використання кошовної лазерної

енергії зменшується на 40...50%, час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с) наближається до лазерного зварювання, усувається небезпека зменшення вмісту легуючих елементів при підвищенні щільності потужності випромінювання.

У четвертому розділі приведений опис розробки методики експериментально-розрахункового визначення компонент НДС зварних деталей та створення лабораторного стенду для реалізації методики. Наведені результати розрахункового визначення параметрів залишкового НДС отриманих лазерним та лазерно-мікроплазмовим зварюванням з'єднань із високоміцного алюмінієвого сплаву 7005.

Розроблений комбінований розрахунково-експериментальний метод визначення залишкових деформацій та напружень у зварному виробі за режимами зварювання із застосуванням методу кореляції стереоскопічних цифрових зображень (SDIC – Stereo Digital Image Correlation). Розроблений спосіб передбачає розбивку зварюваної конструкції на просторові примітиви із їх аналізом по мірі виконання зварювання. За його допомогою встановлено, що при лазерному зварюванні імітаторів виробів космічної галузі зі сплаву 7005 після виконання чотирьох діаметрально протилежних точкових прихваток залишкові переміщення торців виробу ( $\varnothing 41 \times 41$  мм) можуть сягати 0,02...0,05 мм, а після виконання безперервних кільцевих швів – зменшуватися до 0,01...0,02 мм. Величини залишкових напружень стиску у площині торців зварного виробу знаходяться в межах 50-60 МПа. При цьому в зоні шва напруження розтягу можуть доходити до 200 МПа, а в ЗТВ змінюватися від 70 до 150 МПа. Внесені попередньо виконаними точковими прихватами геометричні відхилення майже не впливають на рівень залишкових напружень.

У п'ятому розділі представлені результати робіт із практичної реалізації розроблених технологій, створене обладнання для отримання і неруйнівного контролю високоточних тонкостінних зварних виробів з алюмінієвих сплавів космічного призначення.

Для зварювання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з алюмінієвих сплавів із застосуванням лазерного джерела нагрівання були сконструйовані зварювальні головки. Розробка головок для лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання базувалася на виборі необхідних оптичних елементів за їх діаметрами і фокусною відстанню, а також визначення параметрів потоку плазмоутворюючого газу з урахуванням особливостей камери з контрольованою захисною атмосферою. До складу технологічного комплексу увійшов стенд для визначення компонент НДС готового виробу після зварювання. При розробці цього стенду були обрані необхідні цифрові фотокамери з високою роздільною здатністю, створена система базування закріпленого у складально-зварювальному оснащенні зварюваного виробу, а також необхідні алгоритми та програмне забезпечення для вимірювання переміщень окремих ділянок, визначення деформацій і супутніх розрахунків залишкових напружень.

Розроблений технологічний процес герметизації високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів лазерним зварюванням, що включає: підготовку поверхонь заготовок виробу до зварювання хімічним травленням лугом із подальшою нейтралізацією кислотою; складання деталей під зварювання; базування в складально-зварюваному оснащенні та зварювання виробу з одночасним контролем/керуванням температурою його нагрівання; визначення рівня переміщень, напружень, деформацій. Для реалізації даного технологічного процесу розроблений дослідно-промисловий комплекс обладнання, яке включає герметичну зварювальну камеру з системами кріплення, переміщення та зварювання заготовки, зварювальне джерело живлення з плазмовим модулем, систему управління, вакуумування, газопідготовки та очищення відпрацьованих газів, а також рукавичну камеру для ручного збирання деталей виробу під зварювання. У даному дослідно-промисловому комплексі був застосований волоконний лазер потужністю до 1,0 кВт.

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, зварювання, лазер, потужність випромінювання, мікроплазма, погонна енергія, з'єднання, розрахункова методика, моделювання, параметри режимів, мікроструктура, металографічні дослідження, електронна мікроскопія, хімічний склад, пори, мікротріщини, напруження, деформації, переміщення, мікротвердість, дефекти.

## ABSTRACT

Peleshenko S. Physico-metallurgical and thermal deformation processes during welding of thin-walled structures from aluminum alloys using laser radiation. – Manuscript.

Thesis for receiving the Doctor of Philosophy Degree (Ph.D.) in program subject area 131 Applied Mechanics. – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute» of MES of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development and creation of technologies for welding of space industry products from high-strength aluminum alloys using laser radiation through the calculated selection of mode parameters (power density, speed, size and time of existence of the welding bath) with subsequent experimental verification, determination of the effect of modes and conditions of the process on the formation of the stress-strain state (SSS) and the change of geometric shape of the products as well as calculated forecasting of the welding parameters of beryllium alloys. The typical welding defects and ways to eliminate them are identified, and methodology and equipment for determination of the components of the stress-strain state and non-destructive testing of products which are welded using the developed technologies are created, as well as research and industrial complex for the implementation of the developed technologie is constructed.

The thesis consists of **five** chapters, in which main results of the dissertation work are presented and substantiated.

In **first** chapter, the results of analysis of features of welding light alloys from aluminum and beryllium using modern welding technologies are presented. The

peculiarities of use of laser radiation for welding of thin-walled structures from light alloys are considered, including current problems in the field of welding of thin-walled structures from light alloys, in particular with incomplete penetration. Based on the analysis, the purpose and objectives of the research are defined.

**Second** chapter is devoted to the description of the applied standardized and developed research methods, the description and characteristics of the selected materials, technological equipment for conducting experiments and metallographic studies are presented.

To achieve the goals and to solve the tasks which were set in our thesis, the following research methodology was adopted: selection of welded aluminum alloys and preparation of samples; mathematical model study of the features of laser radiation absorption during welding of light high-strength alloys; performing calculation experiments on modeling the distribution of thermal fields in products made of light high-strength alloys, forecasting the parameters of welding modes using laser radiation; creation of a laboratory stand for technological research; experimental verification of the accuracy of calculations, metallographic studies of welded samples, determination of characteristic defects and ways to eliminate them, adjustment of regimes; development of a combined method of calculation and experimental determination of residual deformations and stresses in the welded product; creation of techniques and equipment for non-destructive testing of components of stress-strain state of thin-walled welded products from high-strength light alloys by processing digital stereo images; creation of technological recommendations for welding aerospace products from light high-strength alloys using laser radiation; design of welding heads for the implementation of welding processes of light high-strength alloys using laser radiation in the conditions of a chamber with a controlled atmosphere; design of a complex of research and industrial equipment for sealing by welding of high-precision thin-walled products of the space industry from light high-strength alloys and equipment for non-destructive inspection of SSS of welded products.

**Third** chapter of the dissertation presents the results of modeling of joints of light alloys using laser welding and laser-microplasma welding, describes the method

of selecting welding mode parameters for thin-walled products made of light alloys with non-through penetration using laser radiation, demonstrates the results of experimental verification of the used method of selecting welding modes and the results of metallographic studies of the obtained welded joints, as well as the analysis of characteristic defects and ways to eliminate them.

The peculiarities of the influence of the accompanying plasma heating on the absorption of laser radiation by the surface of aluminum alloys were studied for the first time, as well as forecast regarding the peculiarities of the absorption of radiation by beryllium alloys was made. It was determined that during the transition of light alloys from a solid to a liquid state, the share of absorbed laser radiation jumps up to 5 times for aluminum and ~20% for beryllium. It was established that due to the approximately three times higher thermal conductivity of beryllium and its alloys compared to the thermal conductivity of aluminum alloys, the linear energy of laser welding of beryllium alloys should be approximately twice the energy required for laser welding of aluminum alloys. In the case of application of the accompanying local microplasma heating of the welding bath, this increase in linear energy is reduced to ~30%. For such concomitant heating, the influence of the distance between the focus of laser radiation and the center of the anode spot of the plasma arc on the tendency of seam formation and the degree of manifestation of the synergistic effect of the interaction of these two energy sources have been determined.

The methods of preliminary calculated determination of parameters of welding modes using laser radiation (laser and laser-microplasma processes) and residual stress-strain state of space industry products from high-strength aluminum and beryllium alloys are created. With the help of experimental verification of the developed methods on samples of high-strength aluminum alloys, the error value was determined (up to 10...20%) and the acceptability of these methods for the solved problems was substantiated.

It is determined that due to the combination of high thermal conductivity with a low absorption coefficient of laser radiation for welding aluminum alloys, there are certain threshold values of power and welding speed, and ways to overcome the

disadvantages that may arise due to this feature are also determined. It is shown by calculation and experimental methods that one of the most effective ways to improve laser welding is the use of local heating of the welding bath with direct action microplasma, that is, the use of laser-microplasma welding. This technological technique saves precious laser energy and at the same time allows to increase the welding speed by 1.5-2 times and improve the formation of seams.

Mathematical forecasting of welding of beryllium and its alloys using laser radiation was carried out with verification of the obtained results according to literature data. It has been established that due to the thermal conductivity, which is approximately three times higher than the thermal conductivity of aluminum alloys, more energy is required to weld them. Therefore, the linear energies of welding beryllium alloys to a depth of 0.5-0.6 mm, provided the product is heated to 100...120°C, must exceed the energies of similar welding of aluminum alloys: with laser welding up to ~4 times, with laser-microplasma welding – by 30...50%.

It is determined that an increase in the grain size of the cast metal of the seam during laser welding of high-strength aluminum alloys leads to a decrease in the strength of the seam, in particular in the fusion zones and the vertical axis of the cross section. An increase in the specific energy of radiation leads to a decrease in the content of volatile alloying elements in the alloy (primarily Mg, Zn, Li). One of the characteristic defects is the formation of internal pores with a diameter of 0.05 to 0.2 mm. In addition, when welding such alloys, the appearance of both axial and transverse hot cracks is possible. The most dangerous areas of crack formation are the crater, where the final crystallization of the melt occurs, as well as seam defects. Ways to eliminate the metal's tendency to crack are: preliminary or concomitant heating, minimization of welding energy, use of additive materials, gradual reduction of laser radiation power at the end of the welding process, removal of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oxide from the surface of workpieces before welding, use of base metal with a more dispersed structure.

Studies have shown that one of the best and most universal ways to minimize the metal's tendency to the appearance of characteristic defects during laser welding of

high-strength aluminum alloys is the simultaneous heating of the metal of the welding bath by microplasma with a direct electric arc. Compared to conventional laser welding, this approach improves the formation of the upper reinforcement roller by eliminating ridges and undercuts, minimizes the formation of pores, reduces the hardness of the HAZ metal to the level of the hardness of the base metal, promotes an increase in the welding speed, and reduces the grain size of the cast metal by up to 1.5-2 times unity

It is determined that laser welding of butt joints of high-strength aluminum alloys makes it possible to obtain seams with a shape factor close to 1 with minimal running energy consumption (5...10 J/mm) with a melt bath existence time of 0.02...0.04 s. The grain size of the joint is regular, the grains in the remelted metal have an equiaxed shape and an elongated shape near the fusion line (grain shape coefficient  $\alpha=2...3$ ) and in the HAZ ( $\alpha=2.5...5$ ). The microhardness in the seams decreases by 15%, and the HAZ increases by 8...12% relative to the base metal. The main defects are the formation of microcracks 10...20 microns long in the HAZ and the presence of inclusions of remnants of oxide films in the root part of the seams. To improve the quality of joints and eliminate the detected defects, it is proposed to use laser-microplasma welding. The grains of the weld metal, with such welding, have an equiaxed structure, the grain size is reduced by 1.5-2 times compared to laser welding. Structures with elongated grains ( $\alpha=3...6$  and  $\alpha=4...5$ , respectively) are formed along the fusion line and in the HAZ. The microhardness of the remelted metal decreases by 15...20% of the base metal, and the HAZ corresponds approximately to the base metal. At the same time, the use of precious laser energy is reduced by 40...50%, the lifetime of the welding bath (0.03...0.05 s) is closer to laser welding, and the danger of reducing the content of alloying elements, which is directly proportional to the increase in the radiation power density, is eliminated.

**Fourth** chapter describes the development of the methodology for the experimental and computational determination of the components of the SSS of welded parts and the creation of a laboratory stand for the implementation of the methodology. The results of the calculated determination of the residual SSS parameters obtained by

laser and laser-microplasma welding of joints made of high-strength aluminum alloy 7005 are presented.

A combined computational and experimental method of determining residual deformations and stresses in the welded product by welding modes using the method of stereoscopic digital image correlation (SDIC – Stereo Digital Image Correlation) has been developed. The developed method involves the breakdown of the welded structure into spatial primitives with their analysis as welding is performed. With its help, it was established that during laser welding of aerospace products made of alloy 7005, after performing four diametrically opposite point tacks, the residual movements of the ends of the product ( $\varnothing 41 \times 41$  mm) can reach 0.02...0.05 mm, and after performing continuous ring seams - reduce to 0.01...0.02 mm. The values of the residual compressive stresses on the plane of the ends of the welded product are within 50-60 MPa. At the same time, tensile stresses in the seam zone can reach 200 MPa, and in the HAZ vary from 70 to 150 MPa. Geometrical deviations introduced by pre-made point tacks have almost no effect on the level of residual stresses.

**Fifth** chapter presents the results of work on the practical implementation of the developed technologies, the created equipment for obtaining and non-destructive control of high-precision thin-walled welded products from aluminum alloys which are used for space purposes.

Welding heads were designed for welding high-precision thin-walled products of space industry from aluminum alloys using laser heating source. The development of heads for laser and laser-microplasma welding was based on the selection of the necessary optical elements according to their diameters and focal length, as well as the calculation of the parameters of the plasma-forming gas flow, taking into account the characteristics of the chamber with a controlled protective atmosphere. The technological complex includes a stand for determining the components of the stress-strain state of finished product after welding. During the development of this stand, the necessary high-resolution digital cameras were selected, a system of basing the welded product fixed in the assembly and welding equipment was created, as well as the

necessary algorithms and software for measuring the movements of individual areas, determining deformations and accompanying calculations of residual stresses.

The technological process of sealing high-precision thin-walled products of the space industry from light alloys by laser welding has been developed, which includes: preparation of the surfaces of the product blanks for welding by chemical etching with alkali followed by acid neutralization; assembly of parts for welding; basing in assembly-welded equipment and welding of the product with simultaneous control/management of its heating temperature; determination of the level of movements, stresses, deformations. To implement this technological process, a research and industrial complex of equipment was developed, which includes a hermetic welding chamber with systems for fastening, moving and welding the workpiece, a welding power source with a plasma module, a control system, vacuuming, gas preparation and purification of waste gases, as well as a glove chamber for manual assembly of product parts for welding. In this research and industrial complex, a commercially available fiber laser with a power of up to 1.0 kW was used.

**Keywords:** aluminum alloys, welding, laser, radiation power, microplasma, heat input, joints, calculation method, modeling, mode parameters, microstructure, metallographic studies, electron microscopy, chemical composition, porosity, microcracks, stresses, deformations, displacement, microhardness, defects.

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Fialko N., Berdnikova O., Illiashenko Ye., Yuhui Yao (2022). Comparison of the features of the formation of joints of aluminum alloy 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) by laser, microplasma, and laser-microplasma welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, V.1/12 (115). – P. 38–47. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378> (**Scopus, Q2**).

Автору належать підготовка зразків, планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

2. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Савицький В. В., Ключков І. М., Квасницький В.В., Перепічай А. О., **Пелешенко С. І.**, Гринюк А. А., Альошин А. О., & Шуткевич О. П. (2022). Розрахунково-експериментальна методика визначення зварювальних деформацій та напружень на основі застосування методу цифрової кореляції зображень. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1(119)), P. 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265767> (**Scopus, Q2**).

Автору належать підготовка зразків, проведення дослідів, визначення деформацій та напружень у зварених зразках.

3. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskyi V., Illiashenko Y. (2023). An Approach to Calculate Features of Laser Radiation Absorption in Beryllium and Aluminum Alloys for Smart Welding Processes. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_40) (**Scopus, WoS**).

Автору належить виконання розрахунків поглинальної здатності алюмінієвих сплавів.

4. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В., **Пелешенко С.І.**, Гринюк А.А., Бабич О.А., Альошин А.О., Войтенко О.М. (2023). Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості (Огляд) // Автоматичне

зварювання, № 12. – С. 24-33. <https://doi.org/10.37434/as2023.12.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать вибір параметрів режимів зварювання, планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

5. **Пелешенко С.І.**, Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Квасницький В.В., Гринюк А.А., Клочков І.М., Чунлін Дун, Альошин А.О. (2022). Особливості зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання міцних сплавів на основі алюмінію і берилію (Огляд) // Автоматичне зварювання, № 12. – С. 9-19. <https://doi.org/10.37434/as2022.12.02> (**Фахове видання України**).

Автору належать відбір літературних джерел та їх аналіз.

6. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., **Пелешенко С.І.**, Yuhui Yao, Григоренко С.Г., Щерецький В.О., Кушнарьова О.С. (2022). Зварювання алюмінієвих сплавів серії 7xxx (Al–Zn–Mg–Cu) ненаскрізними швами випромінюванням волоконного лазера. // Автоматичне зварювання, № 4, С. 19-25. <https://doi.org/10.37434/as2022.04.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать планування і проведення дослідів, вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

7. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., **Пелешенко С.І.**, Гринюк А.А., Chunlin Dong, Ілляшенко Є.В., Yuhui Yao. (2022). Вибір параметрів лазерного зварювання тонкостінних виробів із легких сплавів з ненаскрізним проплавленням. // Автоматичне зварювання, № 5, С. 22–32. <https://doi.org/10.37434/as2022.05.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать планування і проведення дослідів, вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

8. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Бернацький А.В., **Пелешенко С.І.** (2021) Особливості лазерно-плазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера / В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, А.В. Бернацький, С.І. Пелешенко // Автоматичне зварювання, № 12, С. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

9. **Peleshenko S.** (2022). Main problems in laser welding of thin-walled structures from aluminum and beryllium alloys (review). *Sciences of Europe*, 103, P. 78–89. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7247723>

Автору належать планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

10. **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Khaskin V., Korzhyk V., Illyashenko Ye., Lepilina K., & Alosyn A. (2022). Features of physical and metallurgical processes during welding of thin-walled aluminum alloy structures using laser radiation. *Danish Scientific Journal*, 65, P. 50–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7271299>

Автору належать підготовка зразків, виконання зварювання алюмінієвих сплавів, аналіз отриманих результатів.

11. Korzhyk V., Kvasnytskyi V., **Peleshenko Sv.**, Khaskin V., Illyashenko Ye., Lepilina K., Alosyn A., & Alosyn A. (2022). Development of technological equipment for welding high-precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 95, P. 73–77. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7258962>

Автору належать підготовка зразків, виконання зварювання алюмінієвих сплавів, аналіз отриманих результатів.

12. Korzhyk V., **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Khaskin V., Illyashenko Ye., Lepilina K., Alosyn A., Alosyn A. (2022). Technological processes of welding high precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source // *International scientific journal "Internauka"*, 12, P. 47–53. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-12-8306>

Автору належать планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskyi V., Illiashenko Y. (2022). An Approach to Calculate Features of Laser Radiation Absorption in Beryllium

and Aluminum Alloys for Smart Welding Processes // International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE-2022), Kharkiv, Ukraine, June 9-11, 2022.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, виконання розрахунків, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

14. Korzhyk V., Khaskin V., Chunlin Dong, Illyashenko Y., **Peleshenko S.**, Grynyuk A., Yuhui Yao, Al'oshin A., Al'oshin A.A. (2022). Laser welding of thin-sheet stainless steel joints with variable size of gap between cracks. // [3rd ISPC «Scientific Paradigm in the Context of Technologies and Society Development» \(July 26-28, 2022; Geneva, Switzerland\)](#). No. 118, P. 292-297.

Автору належать проведення експериментальних досліджень, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

15. Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskiy V., Hos I., Illiashenko Ye., Voitenko O., Konoreva O. (2022). Estimation of influence of duration of current flow at direct and inverse polarity on quality of formation and geometrical parameters of seams // The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 705 p. – P. 185-190.

Автору належать результати щодо проведення досліджень, їх аналіз, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

16. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Grynyuk A., Hos I., Ganushchak O., Babych O., Strogonov D. (2021). Overview of some perspective technical solutions on laser brazing with filler wires // The 3rd International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (November 4-6, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 848 p. – P. 242-253.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, їх виконання та аналіз, підготовка презентації доповіді.

17. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., **Peleshenko S.**, Ganushchak O., Shevchenko V. (2021). Application of laser welding technologies in

the automotive industry (review) // The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany, 686 p. – P.175-182.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

18. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Illiashenko Ye., Shcheretskiy V., Ganushchak O. (2021). Achievements of the E.O. Paton electric welding institute in the field of welding thin sheet alloys for automotive applications // The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany, 686 p. – P.167-174.

Автору належать літературний пошук та аналіз літературних джерел, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

19. Коржик В. М., Щерецький В. О., Строгонов Д. В., Пашин М. О., **Пелешенко С. І.** (2021). Дослідження закономірностей впливу нанорозмірних та ультрадисперсних модифікаторів із металів та тугоплавких сполук на кристалізацію алюмінієвих сплавів для моделювання структури зварних з'єднань в умовах зварювання плавленням // Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку: тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції, (Краматорськ, 19–20 жовтень 2021 р.), 75с. – С. 40-42.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, виконання розрахунків, оформлення матеріалів доповіді.

20. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Babych O., Illiashenko Ye., Oleinychenko T., Ganushchak O., Popov Ye. (2021). Application of laser recovery surface // The 3rd International scientific and practical conference “Topical issues of modern science, society and education” (October 3-5, 2021) SPC “Sciconf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine, 1096 p. – P. 229-232.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень.

21. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Гринюк А. А., Ілляшенко Є. В., **Пелешенко С. І.**, Квасніцький В. В., Щерецький В. О. (2021). Дослідження процесу лазерного зварювання тонколистових високоміцних алюмінієвих сплавів // X Міжнародна конференція “Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів” (6-10 вересня 2021 р., м. Одеса). Тези доповідей, 32 с. – С. 18-19.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, їх аналіз, оформлення матеріалів доповіді.

22. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., Oleinychenko T., Babych O., **Peleshenko S.**, Ganushchak O. (2021). Hybrid laser-mig welding of aluminum alloys Al-MgMn, Al-Cu-Mg and Al-Mg-Li systems // The 3rd International scientific and practical conference “Modern directions of scientific research development” (September 1-3, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA, 491 p. – P. 125-132.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, їх аналіз.

23. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., **Peleshenko S.**, Babych O., Ganushchak O. (2021). Hybrid plasma-MIG welding of aluminum alloys AlMg system // The 6th International scientific and practical conference – Results of modern scientific research and development (August 22-24, 2021) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain, 517 p. – P. 120-125.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, оформлення доповіді.

24. Krivtsun, V. Korzhyk V., Feng Changgen, Khaskin V., **Peleshenko S.**, Ilyashenko E. (2020). Creation of scientific foundations and development of hybrid welding processes with the use of laser radiation // Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, October 20-21, Hangzhou, China. – P. 340-355.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, оформлення матеріалів доповіді.

25. Changgen Feng, Korzhyk V., Grinyuk A., **Peleshenko S.**, Klochkov I., Voitenko O. (2020). Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding structures from high-strength steels and aluminium alloys // Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, 2021, October 20-21, Hangzhou, China. – P. 355-373.

Автору належать створення концепції обладнання, результати проведення експериментальних досліджень, оформлення матеріалів доповіді.

Патенти, які відображають практичні результати дисертації:

26. Спосіб лазерно-дугового зварювання металевих деталей підвищених товщин: пат. 122817 Україна; В23К 26/348; В23К 26/046 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Ю., Бабич О. А., Войтенко О. М., **Пелешенко С. І.**, Гос І. Д. – № а 201810556; заявл. 26.10.2018; опубл. 06.01.2021, Бюл. №1. – 11 с.

Автору належать проведення досліджень, формулювання формули винаходу, виконання креслень.

27. Спосіб гібридного лазерно-плазмового різання і зварювання: пат. 121907 Україна; В23К9/067; В23К 26/348; В23К 35/02 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Бабич О. А., **Пелешенко С. І.**, Войтенко О. М., Ткачук В. І. – № а 201805898; заявл. 29.05.2018; опубл. 10.08.2020, Бюл. №15. – 12 с.

Автору належать планування та проведення досліджень, формулювання формули винаходу.

28. Спосіб багатопрхідного лазерно-дугового зварювання: пат. 139275 Україна; В23К 9/167; В23К 26/00 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., **Пелешенко С. І.**, Ілляшенко Є. В. – № u 201906901; заявл. 20.06.2019; опубл. 26.12.2019, Бюл. №24. – 7 с.

Автору належать патентний пошук, формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу, виконання креслень.

29. Method of hybrid laser-microplasma welding: Pat: ZL 201610092501.6. Chinese. / Khaskin V., Korzhyk V., Detao Cai, Krivtsun I., **Peleshenko S.**, Shanguohan, Ziyiluo, Xinxinwang. 03.08.2019.

Автору належать формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

30. Пристрій для лазерного зварювання металевих деталей підвищених товщин, що нещільно прилягають: пат. 120131 Україна; В23К 26/04; В23К 26/082; В23К 26/24; В23К 26/14 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Є., **Пелешенко С. І.**, Войтенко О. М. – № а 201713004; заявл. 28.12.2017; опубл. 10.10.2019, Бюл. №19. – 13 с.

Автору належать формулювання формули винаходу, виконання креслень.

31. Спосіб лазерного зварювання металевих деталей підвищених товщин: пат. 120122 Україна; В23К 26/04; В23К 26/24 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Є., **Пелешенко С. І.** – № а 201711377; заявл. 20.11.2017; опубл. 10.10.2019, Бюл. №19. – 9 с.

Автору належать патентний пошук, формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

32. Спосіб зварювання кореневого шва із скануванням: пат. 118455 Україна: В23К 9/022; В23К 26/082; В23К 10/02 / Кривцун І. В., Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Гринюк А. А., **Пелешенко С. І.**, Шевченко В. Є. Ткачук В. І., Бабич О. А. – № а 201604206; заявл. 18.04.2016; опубл. 15.01.2019, Бюл. №2. – 8 с.

Автору належать формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

33. Способ гибридной лазерно-микроплазменной сварки: пат. ZL201610092501.6 КНР / Khaskin V., Detao Cai, Korzhyk V, Krivtsun I., **Peleshenko S.**, Shanguo Han, Ziyi Luo, Xinxin Wang. 2018.03.08.

Автору належать патентний пошук, виконання креслень.

### 3MICT

|          |                                                                                                                                                                           |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|          | Стор.                                                                                                                                                                     |    |
| АНОТАЦІЯ | 2                                                                                                                                                                         |    |
| ВСТУП    | 27                                                                                                                                                                        |    |
| РОЗДІЛ 1 | АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗВАРЮВАННЯ<br>ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ                                                                                            | 37 |
| 1.1      | Передові зварювальні технології, що застосовуються для<br>з'єднання легких сплавів                                                                                        | 37 |
| 1.2      | Аналіз особливостей лазерного зварювання легких сплавів<br>на основі алюмінію та берилію                                                                                  | 46 |
| 1.3      | Основні проблеми, що виникають при зварюванні<br>тонкостінних конструкцій із сплавів на основі алюмінію та<br>берилію, у тому числі з неповним проплавленням              | 58 |
| 1.4      | Висновки за розділом 1                                                                                                                                                    | 64 |
| РОЗДІЛ 2 | МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ,<br>ЗАСТОСОВАНІ МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ                                                                                                    | 67 |
| 2.1      | Методика проведення технологічних досліджень<br>зварювання алюмінієвих сплавів із застосуванням лазерного<br>випромінювання                                               | 67 |
| 2.2      | Використані матеріали та їх характеристики                                                                                                                                | 69 |
| 2.3      | Лабораторний зварювальний стенд та використане<br>технологічне обладнання                                                                                                 | 71 |
| 2.4      | Методи та обладнання металографічних досліджень                                                                                                                           | 79 |
| 2.5      | Висновки за розділом 2                                                                                                                                                    | 80 |
| РОЗДІЛ 3 | ОСОБЛИВОСТІ ПРОТІКАННЯ ФІЗИКО-<br>МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ<br>ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ З АЛЮМІНІЄВИХ<br>СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЛАЗЕРНОГО<br>ВИПРОМІНЮВАННЯ | 82 |

|          |                                                                                                                                                                         |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1      | Моделювання з'єднання легких сплавів лазерним зварюванням у порівнянні з іншими концентрованими джерелами нагрівання                                                    | 82  |
| 3.2      | Вибір параметрів зварювання тонкостінних виробів з легких сплавів із ненаскрізним проплавленням зі застосуванням лазерного випромінювання                               | 92  |
| 3.3      | Експериментальна перевірка методики вибору режимів зварювання алюмінієвих сплавів                                                                                       | 100 |
| 3.4      | Металографічні дослідження результатів зварювання, визначення характерних дефектів та шляхів їх усунення                                                                | 111 |
| 3.5      | Висновки за розділом 3                                                                                                                                                  | 124 |
| РОЗДІЛ 4 | ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ОТРИМАННІ ТОНКОСТІННИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ       | 128 |
| 4.1      | Розробка методики експериментально-розрахункового визначення компонент НДС зварних примітивів                                                                           | 128 |
| 4.2      | Розрахункове визначення параметрів залишкового НДС отриманих лазерним та лазерно-мікроплазмовим зварюванням високоміцного алюмінієвого сплаву 7005 модельних прототипів | 137 |
| 4.2.1    | Аналіз розподілу нормальних окружних, поздовжніх та осьових напружень зварних з'єднань модельних прототипів                                                             | 137 |
| 4.2.2    | Аналіз розподілу еквівалентних напружень у модельних прототипах                                                                                                         | 140 |
| 4.2.3    | Аналіз розподілу еквівалентних деформацій та переміщень у модельних прототипах                                                                                          | 143 |

|          |                                                                                                                                                                                                |     |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3      | Експериментально-розрахункове визначення компонент НДС при лазерному зварюванні модельного прототипу з алюмінієвого сплаву 7005                                                                | 153 |
| 4.4      | Висновки за розділом 4                                                                                                                                                                         | 157 |
| РОЗДІЛ 5 | ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ, РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ І НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ВИСОКОТОЧНИХ ТОНКОСТІННИХ ЗВАРНИХ ВИРОБІВ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КОСМІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ | 160 |
| 5.1      | Розробка спеціалізованих головок для зварювання із застосуванням лазерного випромінювання тонкостінних виробів з алюмінієвих високоміцних сплавів                                              | 160 |
| 5.2      | Розробка дослідно-промислового обладнання для герметизації лазерним зварюванням високоточних тонкостінних виробів з алюмінієвих високоміцних сплавів                                           | 164 |
| 5.3      | Розробка технологічного процесу зварювання високоточних тонкостінних виробів з алюмінієвих сплавів із застосуванням лазерного джерела нагріву                                                  | 169 |
| 5.4      | Розробка апаратури для неруйнівного контролю НДС у високоточних тонкостінних виробках з алюмінієвих високоміцних сплавів                                                                       | 178 |
| 5.5      | Висновки за розділом 5                                                                                                                                                                         | 192 |
|          | ВИСНОВКИ                                                                                                                                                                                       | 194 |
|          | СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ                                                                                                                                                                              | 197 |
|          | ДОДАТКИ                                                                                                                                                                                        | 214 |

## ВСТУП

### Обґрунтування вибору теми дослідження та її актуальності

Сучасні дослідження в галузі зварювання виробів із високоміцних легких сплавів, зокрема алюмінієвих та берилієвих сплавів, показують наявність низки проблем, які пов'язані з їхньою високою теплопровідністю, високою термодинамічною спорідненістю до кисню, летючістю низки легуючих елементів (в першу чергу таких, як Mg, Zn, Li) тощо. Через це при зварюванні таких матеріалів можуть виникати гарячі тріщини, внутрішні пори, свищі, нестабільність формування швів, залишкові деформації, напруження тощо. Для вирішення вказаних проблем найкраще підходить застосування висококонцентрованих джерел тепла, зокрема нагрів лазерним та електронним променями, плазмою. Так, сфокусоване лазерне випромінювання значно зменшує об'єм зварювальної ванни у порівнянні з TIG зварюванням, насамперед за рахунок зменшення ширини шва. Перехід від TIG до лазерного зварювання забезпечує зменшення ширини шва, значне (в 3-4 рази) зменшення ділянки розміщення у зоні термічного впливу (ЗТВ) і у 5-6 разів зменшує рівень залишкових деформацій конструкції, що зварюється. Зазвичай при лазерному зварюванні мікротвердість шва та ЗТВ збільшується на 20-25% порівняно з TIG зварюванням. Збільшення мікротвердості обумовлене подрібненням зеренної структури на відміну від сталей, де подібний ефект обумовлений утворенням структур загартування. Аналіз літературних даних показав значну перспективність використання саме лазерного зварювання для отримання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких (в першу чергу алюмінієвих) високоміцних сплавів.

Процеси лазерного зварювання алюмінієвих сплавів можуть супроводжуватися низкою ускладнень, які пов'язані з утворенням дефектів швів, складністю зварювання конструкцій певної геометричної форми, виникненням хімічної та фізичної неоднорідності металу з'єднань. Накопичений у провідних світових наукових центрах, що займаються вивченням питань зварювання (до яких відносяться ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України і НТУУ «Київський

політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського») практичний і теоретичний досвід дозволяє застосовувати певні технологічні прийоми лазерного зварювання, які здатні допомогти вирішити задачу одержання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з високоміцних легких сплавів. У дисертаційній роботі використаний відповідний науковий доробок таких дослідників, як І.В. Кривцун, В.М. Коржик, В.В. Квасницький, В.Ю. Хаскін, А.В. Бернацький та інші.

Для отримання лазерним зварюванням тонкостінних конструкцій з високими характеристиками якості із високоміцних алюмінієвих сплавів необхідно дослідити фізико-металургійні та термодформаційні процеси, які протікають під дією лазерного випромінювання. Вивчення фізико-металургійних особливостей впливу лазерного випромінювання дозволить мінімізувати або повністю усунути характерні для лазерного зварювання дефекти з'єднань, а дослідження термодформаційних процесів – зменшити до прийняттого рівня залишкові деформації. Будуть розроблені технологічні процеси зварювання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів із застосуванням лазерного випромінювання, а також сконструйоване необхідне для реалізації таких технологій оригінальне обладнання.

### **Мета і завдання дослідження**

Дисертаційна робота представляє результати дослідження щодо встановлення основних закономірностей зварювання високоміцних легких сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Cu (серія 7xxx) і Al-Mg (серія 5xxx) з використанням лазерного випромінювання.

**Мета роботи** – встановлення закономірностей впливу параметрів режимів процесу лазерного зварювання та сумісної дії лазерного і плазмового джерел нагріву на структуру металу з'єднання, утворення характерних дефектів та особливості протікання термомеханічних процесів у зварних з'єднаннях із алюмінієво-магнієвих сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Cu і Al-Mg, розробка на цій основі технології отримання тонкостінних (до 2,5 мм) зварних

конструкцій із мінімальним рівнем залишкових напружень і деформацій, а також обладнання для їх реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- виконати аналіз сучасного стану зварювання тонкостінних конструкцій з легких сплавів, обґрунтувати вибір джерела тепла для зварювання тонкостінних конструкцій із легких сплавів, яке дозволяє формувати зварні конструкції аерокосмічного призначення із мінімальним рівнем залишкових напружень і деформацій;

- здійснити вибір необхідних матеріалів і обладнання та методів проведення досліджень;

- розробити розрахункову методику і здійснити прогнозування параметрів режимів зварювання різних типів легких сплавів із використанням лазерного випромінювання з урахуванням вимог щодо проплавлення, виконати її експериментальну верифікацію для алюмінієвих сплавів серій 7xxx (система Al-Zn-Mg-Cu) і 5xxx (система Al-Mg), встановити особливості протікання фізико-металургійних процесів при лазерному зварюванні цих сплавів у камері з контрольованою атмосферою;

- виконати математичне моделювання розподілу температур у тонкостінних виробах із легких сплавів при їх нагріванні лазерним джерелом тепла, у тому числі з урахуванням вимог щодо середньої температури конкретних виробів після локального нагріву в процесі зварювання;

- шляхом моделювання термодеоформаційних процесів при лазерному зварюванні тонкостінних виробів із легких сплавів визначити вплив параметрів режимів та умов лазерного зварювання на рівень залишкових деформацій та напружень;

- розробити базові конструктивні елементи обладнання для створення дослідно-промислового комплексу для зварювання виробів аерокосмічного призначення із легких сплавів;

- розробити методику і обладнання для неруйнівного контролю та визначення рівня залишкових деформацій та напружень високоточних

тонкостінних зварних виробів із легких сплавів аерокосмічного призначення методом кореляції стерео-цифрових 3D-зображень.

**Об'єктом дослідження** були процеси і обладнання для зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів з використанням лазерного випромінювання.

**Предметом дослідження** були структура та рівень залишкових напружень і деформацій зварних з'єднань з високоміцних алюмінієвих сплавів, що отримані з використанням лазерного випромінювання.

### **Методи дослідження**

Для вирішення поставлених завдань проводили комплексні теоретичні (методами аналітичного і числового моделювання) і експериментальні (методом зварювання із застосуванням лазерного випромінювання) дослідження особливостей нероз'ємного з'єднання тонкостінних виробів з легких сплавів, а також виникнення залишкових деформацій та напружень (неруйнівним кількісним методом кореляції стерео-цифрових 3D-зображень). Визначення характерних структур з'єднань і складу основного металу виконували металографічними методами, у тому числі оптичної (на мікроскопах Reichert Polyvar та Neophot-31) та аналітичної растрової електронної (на мікроскопі JSM-840 фірми PHILIPS, Голландія) мікроскопії, мікродюретричного аналізу (на мікротвердомірі LM-400 серії LECO).

Для проведення металографічного аналізу отриманих з'єднань вирізали поперечні темплети і виготовляли мікрошліфи. При цьому застосовували холодне хімічне (лугом із наступною нейтралізацією кислотою), електролітичне (із застосуванням хромової кислоти або сірчаноокислого амонію) або іонно-вакуумне травлення для виявлення структур.

В якості матеріалів дослідних зразків обрали високоміцні алюмінієві сплави серії 7xxx (система Al-Zn-Mg-Cu) і 5xxx (система Al-Mg), з яких виготовляли пласкі зразки і зразки-імітатори виробів із товщиною стінки  $\delta=1,5$  мм. Для проведення технологічних досліджень використовували волоконний лазер моделі MFSC 2000W (фірма Maxphotonics, Китай) потужністю до 2,0 кВт із довжиною хвилі випромінювання  $\lambda \approx 1,06$  мкм. Також використовувалося

розраховане на струм до 100 А джерело живлення дуги неплавкого електрода і плазмовий модуль власного виробництва. Експерименти проводились на лабораторному стенді зі змінними зварювальними головками власної розробки. Для переміщення головок використовувалися 3D-плоттер та антропоморфний робот. При виконанні експериментів для вимірювання температури нагріву зразків використовували інфрачервоний пірометр моделі GM320 (Benetech Shenzhen Jumaoyuan Science And Technology Co., Ltd., Шеньчжень, КНР) з діапазоном вимірювань  $-50^{\circ}\text{C} \dots +380^{\circ}\text{C}$  та похибкою до  $1,5^{\circ}\text{C}$ .

### **Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі полягає у наступному:

1. Вперше досліджені особливості впливу супутнього плазмового підігріву на поглинання лазерного випромінювання поверхнею алюмінієвих сплавів систем Al-Zn-Mg-Cu і Al-Mg, розроблена методика і здійснене прогнозування відмінностей в особливостях поглинання випромінювання алюмінієвими сплавами порівняно із іншими легкими металами і сплавами.

2. Вперше встановлено, що при зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів з неповним проплавленням збільшення погонній енергії лазерного зварювання або перехід до лазерно-мікроплазмового процесу призводять до зменшення величини максимальних еквівалентних напружень при одночасному розширенні області їх дії. Збільшення області дії максимальних еквівалентних напружень супроводжується зменшенням області локалізації їх максимальних значень і вони зосереджені по лінії сплавлення та/або у корені шва.

3. Вперше був створений комбінований розрахунково-емпіричний метод визначення компонент НДС зварених конструкцій на основі методу кореляції стерео-цифрових зображень (SDIC – Stereo Digital Image Correlation) із розділенням досліджуваної конструкції на просторові примітиви і врахуванням послідовності їх зварювання, параметрів режимів процесів лазерного зварювання алюмінієвих сплавів, глибини проплавлення та припустимої температури нагріву зварюваного виробу. Підтверджена можливість

застосування даного методу для прогнозування параметрів режимів лазерного зварювання інших легких металів і сплавів (наприклад, на основі берилію).

4. За допомогою розробленого комбінованого розрахунково-експериментального методу визначення компонент напружено-деформованого стану вперше встановлено, що при лазерному зварюванні циліндричних виробів з легких сплавів двома кільцевими швами з неповним проплавленням із попереднім виконанням чотирьох діаметрально протилежних прихваток залишкові переміщення торців виробу складають 0,02...0,05 мм, а після виконання безперервних кільцевих швів зменшуються до 0,01...0,02 мм. Рівень залишкових напружень у зоні шва досягає значень до 200 МПа, а в ЗТВ діють напруження в межах від 70 до 150 МПа, відмінність експериментальних та розрахункових значень складає 10...20%.

5. Вперше показано, що застосування при лазерному зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів супутньої дії плазмового джерела нагріву дозволяє мінімізувати пороутворення, зменшує вміст оксидних включень, порівняно із лазерним зварюванням забезпечує формування більш рівновісної та у 1,5-2 рази більш дрібнозернистої структури литого металу, зменшує мікротвердість металу зони термічного впливу до рівня основного металу.

6. Встановлено, що застосування при лазерному зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів систем Al-Zn-Mg-Cu і Al-Mg супутнього плазмового підігріву забезпечує зменшення на 40...50% використання енергії лазерного джерела нагріву, час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с) наближається до характерного при лазерному зварюванні, усувається небезпека вигорання легуючих елементів.

### **Практична цінність отриманих результатів**

1. Розроблені практичні рекомендації по вибору технологічних параметрів режимів лазерного зварювання ненаскрізних кільцевих швів для герметизації фланців тонкостінних (1,5 мм) виробів космічної галузі з алюмінієвих високоміцних сплавів 5xxx і 7xxx серій.

2. За допомогою створеної комбінованої розрахунково-емпіричної методики визначення компонент напружено-деформованого стану тонкостінної (1,5 мм) зварної корпусної конструкції високоточного виробу аерокосмічного призначення (гіроскопа) встановлено, що величини залишкових деформацій (переміщень) торця виробу після зварювання кільцевого шва становить до 0,02 мм, а рівень залишкових напружень стиснення по його площині – в межах 50-60 МПа; при цьому напруження розтягу у шві можуть доходити до 200 МПа, а в ЗТВ – від 70 до 150 МПа.

3. Сконструйовані спеціалізовані головки для зварювання із-застосуванням лазерного випромінювання тонкостінних виробів космічної галузі з алюмінієвих високоміцних сплавів в умовах контрольованої (захисної) атмосфери.

4. Розроблена апаратура для кількісного неруйнівного контролю величини переміщень елементів високоточних тонкостінних виробів космічної галузі із високоміцних легких сплавів на базі використання SDIC-методу кореляції стерео-цифрових зображень.

5. Розроблене дослідно-промислове обладнання для герметизації лазерним зварюванням високоточних тонкостінних виробів космічної галузі із високоміцних легких сплавів.

### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати та положення, які становлять суть дисертації, отримані автором самотійно. У написаних у співавторстві публікаціях (див. «Список опублікованих праць здобувача за матеріалами дисертаційної роботи»), здобувачеві належить: в роботах [1–4, 6–12] – підготовка зразків, планування та проведення дослідних зварювань, визначення деформацій та напружень, виконання попередніх розрахунків, участь у металографічних дослідженнях зварених зразків, оцінка та узагальнення отриманих результатів, написання первинного тексту статті; в роботі [5] – відбір літературних джерел та їх аналіз; в роботах [13–25] – літературний пошук та аналіз джерел літератури обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення експериментальних досліджень, їх виконання, розрахунки, створення концепції обладнання,

оформлення презентаційного матеріалу доповідей; у розробці патентів [26–33] – участь у розробці основних ідей, участь у проведенні досліджень і аналізі отриманих результатів, патентний пошук, формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу, виконання ілюстративних матеріалів.

Таким чином, особистий внесок здобувача полягає в постановці завдань дослідження дисертації, в його участі у розрахунковому прогнозуванні і експериментальному обґрунтуванні та виборі режимів зварювання з використанням лазерного випромінювання, в аналізі результатів металографічних досліджень отриманих зразків, у розрахунковому і емпіричному дослідженні залишкових переміщень, деформацій і напружень у зварених виробах космічної техніки з алюмінієвих сплавів, у розробці дослідно-промислового обладнання для герметизації лазерним зварюванням високоточних тонкостінних виробів космічної галузі із високоміцних легких сплавів, у формуванні змісту та написанні текстів статей, формулюванні положень, що захищаються. Здобувачем було реалізоване співробітництво з Гуандунським інститутом зварювання (м. Гуанчжоу, КНР) стосовно впровадження у виробництво отриманих у дисертації результатів.

### **Апробація матеріалів дисертації**

Основні положення роботи викладені та обговорені на науково-практичних конференціях різного рівня:

- The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan;
- The 3rd ISPC «Scientific Paradigm in the Context of Technologies and Society Development» (July 26-28, 2022), Geneva, Switzerland;
- The International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE-2022) (June 9-11, 2022) Kharkiv, Ukraine;
- The 3rd International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (December 5-7, 2021) SSPG Publish, Stockholm, Sweden;

- The 3rd International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (November 4-6, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada;

- The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany;

- V Міжнародна науково-технічна конференція «Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку», Краматорськ, 19–20 жовтень 2021 р.;

- The 3rd International scientific and practical conference “Topical issues of modern science, society and education” (October 3-5, 2021) SPC “Sciconf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine;

- X Міжнародна конференція “Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів”, 6-10 вересня 2021 р., м. Одеса;

- The 3rd International scientific and practical conference “Modern directions of scientific research development” (September 1-3, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA;

- The 6th International scientific and practical conference «Results of modern scientific research and development» (August 22-24, 2021) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain;

- Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, October 20-21, 2020, Hangzhou, China.

**Публікації.** Основний зміст дисертації викладений у 33 наукових працях, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 статті у віднесених до першого - третього квартилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal виданнях, 4 статті у закордонних наукових виданнях, 13 тез доповідей на наукових конференціях та 8 патентів.

### **Структура та обсяг дисертації**

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи – 221

сторінка машинописного тексту, в тому числі 77 рисунків, 26 таблиць, список використаних джерел із 146 найменувань на 17 сторінках і 1 додатку на 8 сторінках.

## Розділ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ З ЛЕГКИХ СПЛАВІВ

Такі легкі метали, як алюміній, магній, берилій, а також їх сплави широко застосовуються при виготовленні сучасної техніки, зокрема, в авіа- і ракетобудуванні. Їхнє застосування обумовлене унікальним поєднанням властивостей: низької щільності при високих значеннях питомої міцності, корозійної стійкості та теплопровідності. Різноманітність конструкцій, що виконуються з цих матеріалів, вимагає створення різних способів їх зварювання. Висока теплопровідність ускладнює розробку технологій зварювання зазначених сплавів. Одним із способів зменшення впливу високої теплопровідності на формування значних залишкових напружень та деформацій зварних конструкцій є застосування висококонцентрованих теплових джерел, зокрема лазерного випромінювання. Процеси зварювання із застосуванням лазерного випромінювання дозволяють досягати високої продуктивності зварювання, забезпечують мінімізацію величини залишкових напружень та деформацій виробів, високі показники якості отриманих з'єднань, є досить стабільними, мають хорошу повторюваність результатів.

### **1.1 Передові зварювальні технології, що застосовуються для з'єднання легких сплавів**

Сплави на основі алюмінію широко використовуються в сучасній промисловості для виготовлення полегшених конструкцій із високою міцністю та корозійною стійкістю. До таких конструкцій належать вироби приладобудування, хімічної та харчової промисловості, електроенергетичної та електронної галузей, транспорту тощо [1]. Значно рідше використовуються сплави із берилієм. Незважаючи на це, виготовлення таких виробів є актуальним для вирішення низки задач атомної енергетики, авіакосмічної галузі тощо [2]. При виготовленні конструкцій з легких (алюмінієвих та берилієвих) сплавів

часто необхідно виконувати високоякісні нероз'ємні з'єднання [3]. Для цього застосовуються різні способи зварювання [4].

В окремих випадках виникає необхідність зварювання різнорідних з'єднань з високоміцних тонкостінних алюмінієвих сплавів, наприклад серій 6xxx і 7xxx [5]. Моделювання тонкостінних конструкцій зі сплавів 6060 і 7003 за допомогою моделей на основі великих оболонок підтвердило можливість використання зварювання дугою плавкого електрода в інертному газі (MIG). Для з'єднань з технологічними валиками, які є необхідними для кріплення фланців у тонкостінних великогабаритних циліндричних та сферичних конструкціях з алюмінієвих сплавів, була запропонована технологія плазмово-дугового зварювання [6]. Заготовки з алюмінієвих сплавів, зокрема тонкостінні криволінійні деталі зі сплавів системи Al-Li (наприклад, сплав 2195), добре зварюються тертям з перемішуванням [7]. У роботі [8] обґрунтоване застосування технології автоматизованого зварювання з холодним перенесенням металу (Cold Metal Transfer) для стикових з'єднань тонкостінних конструкцій із алюмінієвого сплаву АМг6. В окремих випадках для з'єднання тонкостінних деталей, у тому числі алюмінієвих із титановими, застосовують ультразвукове точкове зварювання [9].

В останні десятиріччя для зварювання відповідальних тонкостінних конструкцій використовують лазерне зварювання. Так, у роботі [10] описується застосування лазерного зварювання для виготовлення стрингерних фюзеляжних субпанелей обшивки літаків. У роботі [11] доведена можливість заміни традиційних методів з'єднання клепаанням посилених панелей літаків із алюмінієвого сплаву методом лазерного зварювання. У роботі [12] розглянута стійкість до навантажень стиском звареної лазером двосторонньої панелі фюзеляжу літака зі сплаву Al-Li. У низці випадків лазерне зварювання вдало застосовується для зварювання прецизійних тонкостінних елементів приладів і датчиків [13]. Для виготовлення зварної конструкції корпусу високошвидкісного поїзда із складною внутрішню формою з тонкостінних профілів алюмінієвого сплаву (товщиною 2–4 мм) застосовують лазер-MIG зварювання [14].

Не дивлячись на низку пов'язаних із високою термічною локальністю лазерного нагріву переваг, процес лазерного зварювання має певні недоліки, які ускладнюють його промислове застосування. Так, при лазерному зварюванні алюмінієвих сплавів характерним дефектом є тріщини, зокрема, гарячі тріщини [15]. Особливістю зварювання лазерним випромінюванням тонкостінних алюмінієвих конструкцій є схильність до утворення пор, що пов'язане з поверхневим натягом розплаву [16]. На поведінку розплаву зварювальної ванни при лазерному зварюванні алюмінієвих сплавів мають значний вплив легуючі елементи [17]. На особливості та результати процесу зварювання впливає тип лазера, що визначає довжину хвилі лазерного випромінювання [18]. Ще одним важливим аспектом результатів процесу лазерного зварювання є міцність одержаних тонкостінних конструкцій [19].

Традиційно до суттєвих недоліків зварних тонкостінних конструкцій з алюмінієвих сплавів відносять значний рівень залишкових деформацій та низьку втомну міцність [20]. Для визначення схильності до утворення дефектів та невідповідності умов та результатів формування зварних з'єднань встановленим до виробів технічним вимогам необхідно визначити розподіл температур при зварюванні, дослідити структуру зварних з'єднань тонких листів, розрахунковим шляхом виконати прогнозування рівня зварювальних деформацій та залишкових напружень.

У роботі [21] показано, що у разі виготовлення тонкостінних нероз'ємних конструкцій доцільно застосовувати передові лазерні або гібридні лазерно-дугові способи зварювання, які здатні забезпечити локалізацію термічного впливу в зоні зварного шва.

Застосування високоміцних алюмінієвих та берилієвих сплавів дозволяє створювати полегшені конструкції з покращеними механічними властивостями, що робить їх використання у сучасній промисловості актуальним. До високоміцних берилієвих сплавів, що досить широко застосовуються, відносять, у першу чергу, трикомпонентні «Локалої» системи Al-Be-Mg марок Lx-59-3 (59%Be, 3%Mg), Lx-40-3 (40%Be, 3%Mg). Серед високоміцних алюмінієвих

сплавів найбільшу зацікавленість викликають сплави системи Al-Zn-Mg-Cu (серія 7xxx), що мають найвищі механічні властивості. Однак зварювання таких сплавів утруднене у зв'язку з їхньою схильністю до утворення гарячих тріщин та пор. Тому дослідження щодо структуроутворення при зварюванні тонкостінних з'єднань із цих сплавів зі застосуванням концентрованих джерел енергії є актуальними.

Для з'єднання тонколистових алюмінієвих та берилієвих сплавів можуть використовуватися як традиційні (дуговий або плазмовий) способи зварювання плавленням, так і більш сучасні (лазерний та гібридний лазерно-плазмовий). При використанні дугових способів зварювання зазвичай ширина шва перевищує його глибину, що обумовлено конвективним механізмом проплавлення металу та особливостями розповсюдження тепла. У роботі [22] показано, що на інтенсивність розповсюдження тепла та поведінку розплаву металу зварювальної ванни суттєвий вплив чинять легуючі елементи, які виступають поверхнево активними речовинами. Крім того, суттєвий вплив має температура поверхні, отже, параметри зварювання. У роботі [23] показано, що при зварюванні електричною дугою, що вільно горить, на конвективну течію металу зварювальної ванни впливають пов'язані з градієнтом поверхневого натягу сили і електромагнітна сила. Таке саме проплавлення металу можливо отримати при зварюванні лазерним та лазерно-плазмовим способами [24]. При цьому домінуючим силовим фактором, що визначає гідродинаміку розплаву, є сила Марангоні. У всіх розглянутих випадках на формування зони розплаву основний вплив має конвективне перенесення теплової енергії. Однак кількість енергії, що вкладається, може призводити до утворення гарячих тріщин (особливо при зварюванні високоміцних алюмінієвих і берилієвих сплавів) [25]. Більш ефективним є застосування лазерного та лазерно-плазмового зварювання з таким проплавленням, при якому ширина провару менша за його глибину. Цей вид проплавлення має назву глибокого проплавлення та характеризується утворенням парогазового каналу [26]. Особливості існування парогазового каналу пов'язані з його пульсаціями, які можуть сприяти виникненню пор у

переплавленому металі [27]. Утворення тріщин при цьому пов'язане зі збільшенням швидкості кристалізації легкоплавких евтектик, поява яких викликана збільшенням швидкості зварювання [28]. Крім пор і тріщин можуть виникати такі дефекти, як підрізи на поверхні шва по зоні сплавлення, нерівномірність формування валиків підсилення, провисання швів тощо [29].

Більшою мірою схильні до утворення тріщин і пор з'єднання високоміцних алюмінієвих сплавів серії 7xxx і сплавів з високим вмістом берилію (типу «Локалоїв»). У роботі [25] зазначено, що випаровування при лазерному зварюванні призводить до зміни концентрації найбільш летючих легуючих елементів, у першу чергу магнію та цинку. Це змінює швидкість кристалізації зварного шва і, отже, схильність до гарячого розтріскування. На цей ефект значною мірою впливає швидкість зварювання. У роботі [30] показано, що сплави серії 7xxx мають погану технологічну здатність до зварювання через їх високу схильність до утворення тріщин, велике значення коефіцієнту лінійного теплового розширення, а також низьку температуру випаровування легуючих елементів, зокрема, Zn та Mg. Це сприяє утворенню таких дефектів зварювання, як тріщини та пористість. Подібні дефекти можуть виникати і при зварюванні деформованих сплавів інших серій із меншою міцністю [31]. Окрім того, при зварюванні алюмінієвих сплавів у металі шва також можлива наявність оксидних включень. Останнім часом розроблена низка підходів до мінімізації та усунення згаданих дефектів. В основному такі підходи орієнтовані на зварювання з наскрізним проникненням з утворенням наскрізного каналу (кейхол) [31].

При виборі присадкових матеріалів для зварювання легких сплавів рекомендується враховувати низку основних чинників [32]. До них відносять відсутність тріщин, високу міцність з'єднань на розтяг або зсув, пластичність, діапазон робочих температур, корозійну стійкість та відповідність кольору зварного шва основному сплаву після анодування. Серед алюмінієвих сплавів найбільш популярними на сьогоднішній день стали сплави серії 7xxx завдяки такому комплексу їх властивостей, як висока статична і динамічна міцність, термостійкість, висока ударна в'язкість, стійкість до пошкоджень, низька

щільність, низька чутливість до загартування тощо [33]. Однак, через високі механічні властивості зварювання цих сплавів є проблематичним.

Одним із перспективних підходів до з'єднання сплавів серії 7xxx є зварювання тертям з перемішуванням [34]. Однак, у цьому випадку через особливості виділення тепла при зварюванні міцність швів та металу ЗТВ зменшується, потрібна післязварювальна термообробка, що призводить до небажаного укрупнення зерен у зварному з'єднанні [35]. Найкращі результати досягаються у разі застосування зварювання тертям з перемішуванням для з'єднань сплавів серії 7xxx зі сплавами інших серій, що мають кращу технологічну здатність до зварювання. Прикладом може бути з'єднання цих сплавів із сплавами серії 2xxx [36]. Сплави AA2139-T8/AA7020-T651 зварювали тертям з перемішуванням зі швидкостями обертання та подачі в діапазонах 600-1000 об./хв.<sup>-1</sup> / 250–550 мм.хв.<sup>-1</sup> відповідно. Межа плинності з'єднань склала 77-79%, межа міцності на розтяг – 88-96% від основного матеріалу AA7020. Однак, у ряді випадків виникають дефекти з боку сплаву серії 7xxx. Так, при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів 2017A/7075 пластична деформація підвищує твердість сплаву 7075, що призводить до послаблення навколошовної зони [37].

Сучасні технології дозволяють зварювати легкі сплави, які досі вважалися важкозварюваними [38]. До таких технологій відноситься не тільки зварювання тертям з перемішуванням, що успішно застосовується завдяки відсутності плавлення в зоні зварювання. Розроблена низка таких інноваційних процесів, як дугове зварювання з контрольованим підведенням тепла, а також зварювання плавленням з високою щільністю потужності джерела нагріву (лазерне та електронно-променеве зварювання) [39]. Прикладом може бути лазерне зварювання прорізним швом пакета листів із високоміцного алюмінієвого сплаву зі скануванням випромінювання [40].

До інноваційних процесів зварювання легких сплавів відносяться технології багат шарового та багатопрохідного зварювання GAMW, які були розроблені для з'єднання алюмінієвих сплавів 5083, 6005A та 7N01 товщиною 10

мм, що використовуються для виготовлення високошвидкісних потягів Китайської залізниці [41]. Міцність на розтяг отриманих з'єднань досягає 323, 206 і 361 МПа для сплавів 5083, 6005A і 7N01 відповідно. Для зварювання сплавів серій AA5xxx та AA6xxx, зокрема і при отриманні різнорідних з'єднань, може бути застосоване контактне зварювання [42].

Дугове зварювання вольфрамовим електродом у середовищі захисного газу (TIG або GTAW) є важливим методом з'єднання високоміцних алюмінієвих сплавів, які все більш широко застосовуються в аерокосмічній, авіаційній, автомобільній промисловості, при виготовленні ракетних двигунів, корпусів ракет, компонентів морських двигунів тощо [43]. Однак, ця технологія більшою мірою відпрацьована для менш міцних сплавів, включаючи бxxx серію (наприклад, сплав AA6105) [44]. При отриманні різнорідних з'єднань алюмінієвих сплавів 2024 T3 і 7075-T6 методом TIG (GTAW) спостерігається підвищення крихкості та зменшення межі міцності на розтяг на 44% та 37% для сплавів 7075-T6 та 2024 T3 відповідно [45].

У роботі [46] показано, що однією з перспективних технологій з'єднання високоміцних сплавів 7025-T6 і AW-7020 є імпульсне MIG зварювання. При постійному підведенні тепла швидкість зварювання практично не впливала на твердість металу зварного шва. Однак розмір зерен збільшувався зі збільшенням швидкості подавання присадного дроту, зварювального струму і швидкості зварювання. Попередній підігрів був шкідливий для зварних швів сплаву AW7020, проте штучне старіння виявилось корисним. Шви задовільної якості були отримані за допомогою імпульсного MIG зварювання без попереднього видалення шару  $Al_2O_3$ . Встановлено, що оксидний шар  $Al_2O_3$  має різний склад у різних алюмінієвих сплавах.

Основною особливістю зварювання берилію і його сплавів є токсичність зварювальних аерозолів, що виділяються при цьому [47]. Вміст берилію в повітрі не має перевищувати 0,001-0,003 мг/м<sup>3</sup>. Тому його зварювання зазвичай виконують у закритих камерах з контрольованою атмосферою, які забезпечують їх видалення та фільтрацію.

Дослідження технологічної здатності до зварювання берилію та його сплавів свідчать, що ливарні сплави на його основі можна успішно зварювати TIG, електронно-променевим та лазерним способами [48]. Однак, на сьогоднішній день для виготовлення відповідальних конструкцій з берилієвих сплавів перевагу віддають вакуумним технологіям, таким як електронно-променеве зварювання та вакуумне паяння [49].

Основними перешкодами для зварювання берилію є гаряче розтріскування, утворення тріщин через дефекти шва та низька пластичність [49]. Гаряче розтріскування можна зменшити, контролюючи хімічний склад зварюваного берилієвого сплаву таким чином, щоб співвідношення Fe:Al досягало до 2.4, при цьому кількість заліза і алюмінію має бути мінімальною [48]. Розтріскування на дефектах та пов'язане з низькою пластичністю розтріскування, можна зменшити, зменшивши вміст оксиду BeO та розмір зерен вихідного матеріалу [50]. Зварюваність берилію також може бути покращена шляхом зменшення швидкості зварювання, помірного тепловкладення, мінімізації зусиль фіксації деталей, що зварюються, і застосуванням відповідного попереднього підігріву. У деяких випадках тріщиноутворення у швах може бути успішно усунуте шляхом введення у зварювальну ванну присадкового металу з алюмінієвого сплаву. В останньому випадку слід враховувати, що використання присадкового металу може зменшити робочу температуру та межу міцності зварного з'єднання.

Використання спеціальних легованих присадок з алюмінієм при зварюванні берилію та його сплавів дозволяє підвищити міцність з'єднань з 0,5...0,6 до 0,7...0,8 від міцності основного металу при одночасному підвищенні пластичності. Введення в шов додаткових легуючих елементів дає можливість підвищувати міцність за рахунок термічної обробки, у той час, як сплави системи Al-Be-Mg є такими, що термічно не зміцнюються. Така термічна обробка забезпечує рівномірність шва основному металу [51].

Міцність швів при зварюванні берилієвих сплавів значною мірою залежить від величини кристалітів металу шва (рисунок 1.1). Подрібнення структури шва – один із шляхів отримання зварних з'єднань, що наближаються за міцністю до

основного металу: при зменшенні кристалітів у 3-4 рази (від 1,0 до 0,25 мм) межа міцності металу шва зростає приблизно у 3 рази – від 137 до 412 МПа [51].

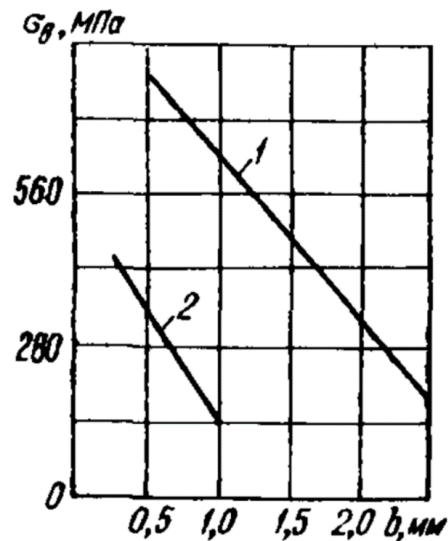
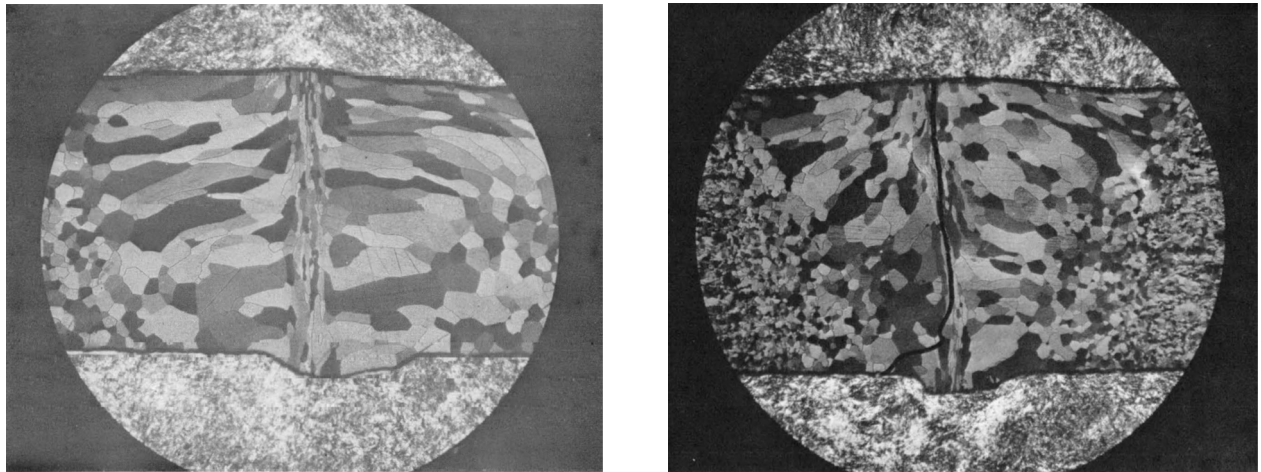


Рисунок 1.1 - Залежність межі міцності  $\sigma_b$  [МПа] берилію і його зварних з'єднань від величини зерна  $b$  [мм] [51]: 1 – основний метал; 2 – метал шва

Питання лазерного зварювання берилію та його сплавів у контрольованій атмосфері, а також лазерного, плазмового та електронно-променевого зварювання у вакуумі вивчалися в роботах [52-54]. Так, у роботі [54] описане електронно-променеве зварювання берилієвих сплавів А (99,58%Be + домішки), В (99,63%Be + домішки) і С (99,87%Be + домішки). Відзначена схильність до утворення гарячих тріщин уперек шва. При цьому особливість зростання дендритів при кристалізації зварювальної ванни призводила до ослаблення поздовжньої осьової зони шва (рисунок 1.2).

Застосування електронно-променевого зварювання алюмінієвих та берилієвих сплавів вимагає використання вакуумних камер. Це накладає обмеження на розміри виробів, що зварюються, а також знижує продуктивність на необхідний для вакуумування і розгерметизацію цих камер час.



а)

б)

Рисунок 1.2 - Структура отриманих електронно-променевим зварюванням з'єднань берилієвих сплавів ( $\times 25$ ), [54]: а) – сплав С ( $\delta=1,5$  мм), що був зварений із попереднім підігрівом  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $U=100$  кВ;  $I=7$  мА;  $V=8,5$  мм/с; б) – характерне руйнування зварного з'єднання сплаву А ( $\delta=2,5$  мм) після випробувань на статичний розтяг

Таким чином, незважаючи на можливість утворення деяких характерних дефектів зварних швів, найбільш перспективними передовими технологіями зварювання легких сплавів можна вважати лазерні, плазмові та гібридні лазерно-плазмові. У ряді випадків вони успішно застосовуються в авіаційній, ракетній та космічній галузях промисловості для виготовлення конструкцій зі сплавів на основі алюмінію та берилію.

## **1.2 Аналіз особливостей лазерного зварювання легких сплавів на основі алюмінію та берилію**

Однією з основних проблем лазерного зварювання легких сплавів є їхня висока відбивна здатність або низький коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання, що становить до 10% для довжини хвилі  $1,06$  мкм [55]. Це сприяє зниженню ефективного ККД лазерного зварювання. Крім того, процес зварювання ускладнюють високі значення теплопровідності цих сплавів:  $236$  Вт/(м·град) для алюмінію та  $201$  Вт/(м·град) для берилію за нормальних умов

[56]. Ще однією проблемою є наявність окисної плівки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  або  $\text{BeO}$ ) на поверхнях, що зварюються, потрапляння якої у литий метал шва призводить до його механічного ослаблення [57]. Легкі сплави є досить чутливими до впливу навколишнього середовища і утворюють окисні включення і пори при взаємодії з атмосферою повітря [57].

Металургійні особливості зварювання легких сплавів визначаються взаємодією їх із газами навколишнього середовища, інтенсивністю випаровування легуючих елементів, а також особливостями кристалізації в умовах зварювального процесу. Процес лазерного зварювання легких сплавів пов'язаний із низкою особливостей, які позначаються на технології, виборі умов, режимів та властивостях зварних з'єднань.

При розробці технології зварювання лазерним випромінюванням потрібним є ретельний захист шва від оточуючого середовища. У разі зварювання легких сплавів зазвичай використовують такі захисні гази, як  $\text{He}$ ,  $\text{Ar}$ , а також їх суміші [58]. З точки зору газового захисту у зоні лазерного випромінювання доцільно застосовувати гази з високим потенціалом іонізації. У літературі рекомендується наступна схема газового захисту зварного шва [59]: захист зварювальної ванни та поверхні шва  $\text{He}$  з витратами 8-10 л/хв., а кореня –  $\text{Ar}$  (5-8 л/хв.). Особливістю газового захисту є можливість регулювати в певних межах стрибкоподібне збільшення глибини проплавлення після подолання певних граничних значень енергії випромінювання.

Крім цього, можливим є флюсовий захист поверхні та кореня шва. Флюси наносять на поверхню стику та на його кореневу частину шляхом фарбування перед зварюванням. Застосування флюсового захисту дозволяє знизити вимоги щодо збирання заготовок за рахунок збільшення припустимого зазору в 2-3 рази [60]. До складу флюсів можуть входити графіт, порошки металів, фториди лужних та лужноземельних металів. Такі матеріали сприяють збільшенню коефіцієнта поглинання лазерного випромінювання, діють як поверхнево-активні речовини, забезпечують високий коефіцієнт поверхневого натягу розплаву флюсу. Застосування флюсів для лазерного зварювання легких сплавів

призводить до перерозподілу балансу енергії, що пов'язано зі збільшенням поглинання випромінювання, видалення оксидних плівок. При цьому досягається збільшення ефективного ККД процесу, знижується характерна для лазерного зварювання легких сплавів межа критичної густини потужності. На відміну від газового флюсового захист забезпечує плавне збільшення глибини проплавлення при зростанні енергії, що вводиться.

Як правило, зварюваність легких сплавів лазерним способом аналогічна їх технологічній здатності до зварювання традиційними способами. У таблиці 1.1 наведені дані щодо зварюваності алюмінієвих сплавів [61]. Зварюваність берилієвих сплавів буде розглянуто нижче.

Одним з важливих аспектів специфіки зварювання алюмінієвих та берилієвих сплавів є різниця їх температур плавлення, коефіцієнтів поглинання випромінювання сплавами та плівками їх оксидів. Алюміній та берилій інтенсивно окиснюються при температурах, які перевищують температуру плавлення. Оксидна плівка має високу температуру плавлення ( $>2000-2500^{\circ}\text{C}$ ) і не розплавляється в процесі зварювання, хоча може частково вигоряти за рахунок підвищеного поглинання випромінювання. Ця плівка характеризується високою адсорбційною здатністю до газів і пари води, що призводить до появи у зварювальній ванні газів та різних несучільностей (пор) [57]. Частинки плівки можуть потрапляти у зварювальну ванну, утворюючи оксидні включення у швах, що знижують механічні властивості зварних з'єднань. Тому при лазерному зварюванні застосовують спеціальні прийоми для руйнування та видалення плівок та захисту металу від повторного окиснення – від попереднього механічного усунення плівок оксидів до лазерного випалювання [62].

Ще однією відмінністю лазерного зварювання легких сплавів є пороговий характер проплавлення. Він полягає у тому, що розплавлення металу починається лише за певного рівня щільності потужності (близько  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ ) [60]. Це пояснюється поєднанням високого коефіцієнта відбиття, теплопровідності та теплоємності легких сплавів (алюмінію та берилію). При введенні достатньої кількості енергії після початку процесу плавлення

коефіцієнт відбиття різко знижується і відбувається інтенсивне проплавлення металу з утворенням парогазового каналу. Поріг щільності потужності залежить від довжини хвилі випромінювання, параметрів фокусування, швидкості зварювання, товщини та стану поверхні пластин, а також складу матеріалу.

Таблиця 1.1 - Зварюваність алюмінієвих сплавів [61]

| Серія | Тип сплаву, застосування                                                                                          | Зварюваність                                                                                                   | Виключення                                                                       | Присадковий сплав  |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 1xxx  | Технічно чистий алюміній (Al>99%). Провідники електричного струму, вироби з високою корозійною стійкістю тощо.    | Легко зварювані.                                                                                               | Ні.                                                                              | Частіш за все 1100 |
| 2xxx  | Високоміцні аерокосмічні алюмінієві сплави («дюралі») застосовують переважно у вигляді листів і плит.             | В основному не зварювані через велику схильність до гарячого розтріскування.                                   | Зварюються сплави 2219 і 2519.                                                   | 2319 або 4043      |
| 3xxx  | Середньоміцні алюмінієві сплави легко піддаються формуванню. Застосовуються для теплообмінників та кондиціонерів. | Легко зварювані.                                                                                               | Ні.                                                                              | 4043 або 5356      |
| 4xxx  | Застосовують як для конструкцій, так і як сплави для зварювання або паяння.                                       | Легко зварювані.                                                                                               | Ні.                                                                              | 4043               |
| 5xxx  | В основному для високоміцних листів та плит.                                                                      | Легко зварювані.                                                                                               | Для зварювання 5083 застосовують 5183 або 5556.                                  | 5356               |
| 6xxx  | Для пресованих профілів, листів та плит тощо.                                                                     | За відповідної технології гарна зварюваність.                                                                  | Схильні до гарячого розтріскування.                                              | 4043 та 5356       |
| 7xxx  | Високоміцні аерокосмічні сплави.                                                                                  | В основному не зварюються через схильність до гарячого розтріскування і корозії під дією механічних напружень. | Зварюються сплави 7003 та 7005 для пресованих профілів та сплав 7039 для листів. | 5356               |

Наявність порогового рівня потужності лазерного випромінювання, який забезпечує проплавлення при зварюванні, робить особливо актуальним правильний вибір параметрів режимів. Так, автори роботи [60] визначили, що для сплаву 1560 потужність  $\text{CO}_2$ -лазера на рівні 2,0-2,2 кВт забезпечує глибину проплавлення 1,5-2,0 мм. За меншої потужності випромінювання проплавлення практично відсутнє. Це пов'язано з поєднанням високого коефіцієнта відбиття (у алюмінію він дорівнює 0,97 для довжини хвилі 10,6 мкм) з високими теплоємністю і теплопровідністю алюмінію. При нагріванні поверхні алюмінію до близьких до температури плавлення температур коефіцієнт відбиття різко знижується і відбувається інтенсивне проплавлення матеріалу з утворенням парогазового каналу. Подальше збільшення потужності випромінювання призводить до практично лінійного зростання глибини проплавлення.

У даний час одними з найбільш перспективних промислових лазерів визнані волоконні [63]. Однак, використання волоконних лазерів може призводити до таких проблем якості формування кореня шва, як нестабільне проплавлення, викиди розплаву і нерівності верхнього валика підсилення [64]. Це пов'язано з такою основною відмінністю між зварюванням волоконним і  $\text{CO}_2$ -лазерами, як підвищення тиску на дно ванни (кейхола) при використанні волоконного лазера. Виникає необхідність у проведенні досліджень із зварювання волоконним лазером легких сплавів.

Для проведення досліджень із зварювання волоконним лазером у роботі [60] використовували комплекс на основі волоконного ітербієвого лазера фірми "ІРЕ-Полюс" ЛС-3,5 потужністю 3,5 кВт. Дослідження показали, що рівень щільності необхідної для початку проплавлення потужності при застосуванні волоконного лазера приблизно в 2 рази менший, ніж  $\text{CO}_2$ -лазера (рисунки 1.3). У таблиці 1.2 показані режими зварювання алюмінієвого сплаву 01570 системи Al-Mg-Sc волоконним та  $\text{CO}_2$ -лазером. З таблиці 1.3 видно, що необхідна для зварювання листа товщиною 2,0 мм волоконним лазером погонна енергія на 30% нижча, ніж при зварюванні  $\text{CO}_2$ -лазером.

Отримані випромінюванням CO<sub>2</sub>-лазера і волоконного лазера зварні з'єднання практично не відрізняються на вигляд і за макроструктурою. Зварні шви характеризуються малою шириною та зменшеним об'ємом зварювальної ванни. Як видно з рисунку 1.4 (а), при зварюванні матеріалу товщиною 2,0 мм (таблиця 1.2) досягається проплавлення з практично паралельними крайками при ширині шва близько 2,0 мм, заниження та провисання шва знаходяться в допустимих межах. У порівнянні з аргано-дуговим (TIG) зварюванням обсяг розплавленого матеріалу при лазерному зварюванні в 2-3 рази менший (рисунок 1.4 (б), таблиця 1.2).

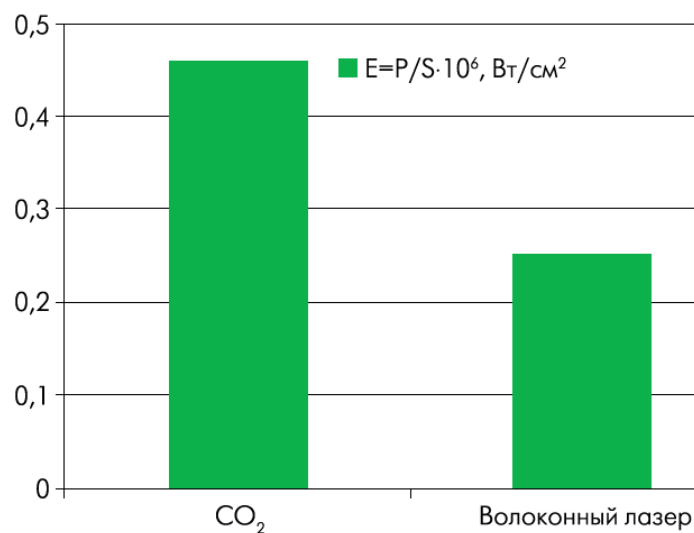


Рисунок 1.3 - Залежність порогової густини потужності (E, Вт/см²) проплавлення сплаву 01570 від типу джерела лазерного випромінювання [60]

Для усунення заниження шва та зменшення нерівномірності верхнього валика підсилення застосували лазерне зварювання з присадковим дротом (рисунок 1.5) [65]. Це дозволило знизити вимоги до збирання стиків і отримати якісні зварні з'єднання при зазорах у діапазоні від 0,1 до 1,0 мм [66]. Діаметр і швидкість подачі дроту підбирали, виходячи з товщини матеріалу, що зварюється, і швидкості зварювання. Зазвичай швидкість подачі дроту не перевищує швидкість зварювання. Наприклад, для алюмінієвого сплаву 6A02 при швидкості зварювання 6 м/хв. швидкість подачі дроту становить 2-4 м/хв.

[67]. Діаметр дроту при лазерному зварюванні зазвичай становить 0,6-1,2 мм. Оптимальний кут подачі лежить у межах 25-35°. Дріт можна подавати перед випромінюванням або за ним під час зварювання, що може впливати на ефективність та стабільність процесу [68]. Наприклад, на швидкостях подачі понад 4 м/хв. зварювальна ванна є більш стабільною, якщо подача дроту здійснюється в хвостову частину зварювальної ванни [60].

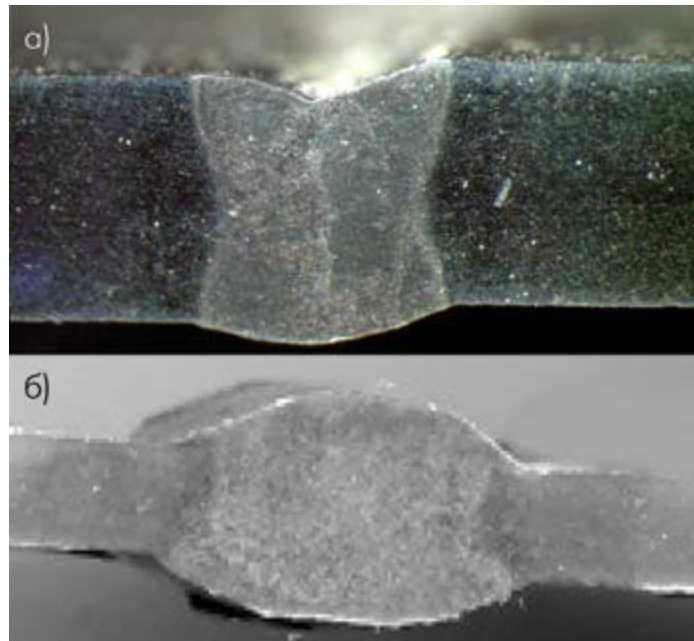


Рисунок 1.4 - Макроструктура зварних з'єднань сплаву АД37 (аналог 6013) товщиною 2,0 мм [60]: а) – лазер; б) – ТІГ

Таблиця 1.2 - Хімічний склад деяких алюмінієвих сплавів

| Марка сплаву | Вміст елементів, % |         |           |         |           |         |           |           |          | Домішки, % |         |
|--------------|--------------------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|-----------|----------|------------|---------|
|              | Li                 | Cu      | Mn        | Mg      | Sc        | Zn      | Cr        | Zr        | Ti       | Fe         | Si      |
| 01570        | -                  | -       | 0,05-0,1  | 5,0-5,6 | 0,25-0,35 | -       | -         | 0,1-0,12  | 0,05-0,1 | 0,07       | 0,05    |
| В-1424       | 1,5-1,8            | -       | 0,05-0,25 | 4,2-5,5 | -         | 0,4-0,8 | -         | -         | -        | ≤0,1       | ≤0,1    |
| АД37         | Ni<br>0,05-0,2     | 0,6-1,4 | 0,2-0,5   | 0,7-1,4 | 0,01-0,1  | 0,2-0,8 | 0,01-0,1  | 0,05-0,12 | 0,01-0,1 | 0,15       | 0,6-1,2 |
| 7075         | -                  | 1,2-2,0 | ≤0,3      | 2,1-2,9 | -         | 5,1-6,1 | 0,18-0,28 | -         | -        | ≤0,5       | -       |

Таблиця 1.3 - Порівняння оптимальних режимів зварювання встик пластин зі сплаву 01570 товщиною 2 мм різними типами лазерів [60]

|                                          |     |     |     |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|
| Швидкість зварювання,<br>м/хв.           | 2,0 | 3,0 | 4,0 |
| Потужність лазерного випромінювання, кВт |     |     |     |
| CO <sub>2</sub> -лазер                   | 1,6 | 2,6 | 4,0 |
| Волоконний лазер                         | 1,1 | 1,4 | 1,9 |

Одним із характерних дефектів лазерного зварювання легких сплавів є схильність до утворення пор. Їх джерелом можуть бути як пульсації кейхола [64], так і водень, що добре розчиняється в алюмінії та берилії при температурі плавлення [69, 70]. Підвищену схильність до утворення пор мають алюмінієво-магнієві сплави, оскільки магній збільшує розчинність водню в алюмінії [31]. Зменшенню пористості сприяє обробка поверхонь перед зварюванням, що здійснюється з метою видалення адсорбованої поверхнею металу вологи і оксидної плівки, яка знаходиться на поверхні у вигляді гідратованих оксидів. Найбільш ефективно застосовувати для цього механічну обробку або хімічне (травлення), яке видаляє окисну плівку на ширину до 25...30 мм по всій довжині з'єднання [71].

Іншим характерним дефектом лазерного зварювання легких сплавів є схильність до утворення гарячих тріщин при охолодженні зварного з'єднання. Вони можуть утворюватися навіть при імпульсному лазерному зварюванні, яке дозволяє зменшити енерговкладання в матеріал, що зварюється, у порівнянні з безперервним процесом. Найбільш ефективним способом усунення тріщин є легування шва шляхом введення присадкового матеріалу. Так, при імпульсному лазерному зварюванні термооброблюваного алюмінієвого сплаву Al-4,7Mg-0,32Mn-0,21Sc-0,1Zr без присадкового металу і з присадкою зі сплаву Al-5Mg спостерігалось утворення дуплексних (стовпчастих і дрібнозернистих) ливарних структур і газової пористості у вигляді дефектів у зоні шва [72]. Використання

для зварювання присадкового металу Al-5Ti-1B призвело до формування дрібнозернистої структури з середнім розміром зерна  $4 \pm 0,2$  мкм без дефектів шва. Середня концентрація елементів у зварному шві становила: 2,8% Mg, 0,2% Mn, 0,1% Zr, 0,15% Sc, 2,1% Ti. Межа міцності на розтяг такого зварного з'єднання склала 260 МПа, що відповідає характерним для основного металу в литому стані значенням. Після відпалу при 370°C протягом 6 год цей показник збільшився на 60 МПа, міцність становила 85% від міцності основного сплаву в стані після прокатування.

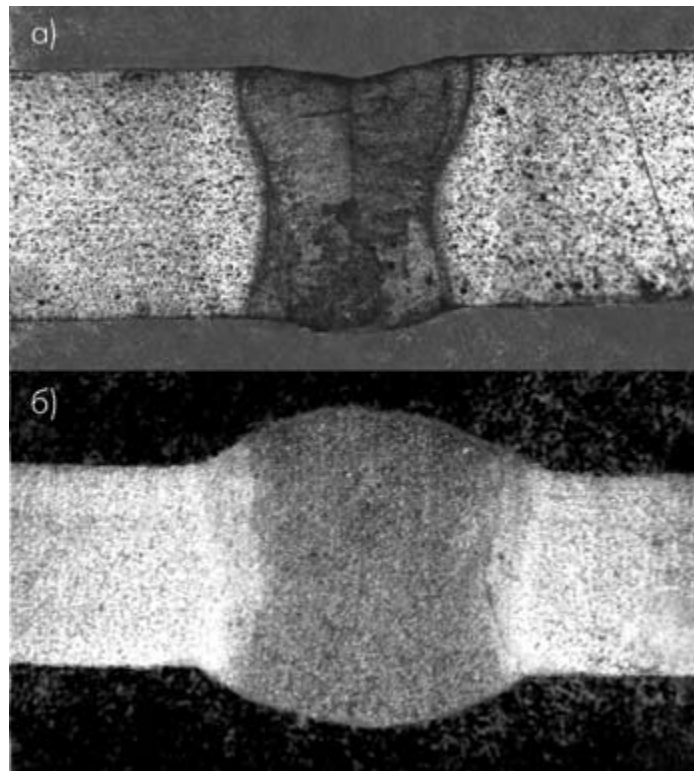


Рисунок 1.5 - Макроструктура зварного з'єднання сплаву В-1424 (аналог 2099) системи Al-Mg-Li, отриманого лазерним випромінюванням [65]: а) – без присадки; б) – з присадковим дротом

Технологічні дослідження особливостей процесів лазерного зварювання берилію показали його схильність до утворення гарячих тріщин [73]. Найбільш ефективним шляхом їх усунення є зниження локального перегріву зразка, що зварюється. Це досягається зменшенням величини погонної енергії зварювання, наприклад, за рахунок підвищення щільності потужності випромінювання шляхом фокусування короткофокусною оптикою з одночасним підвищенням

швидкості процесу. Ще одним дефектом зварювання берилію є виплески металу та нерегулярність формування швів. Усунення цих недоліків пов'язане з вибором режимів зварювання, зокрема швидкості процесу.

При виготовленні деяких спеціалізованих берилієвих деталей для космічних супутників (наприклад, циліндричних корпусів елементів джерел енергії, які працюють при температурі понад  $600^{\circ}\text{C}$ ) не допускається потрапляння в зварні з'єднання сторонніх хімічних елементів, що не дозволяє застосовувати зварювальні присадкові матеріали або замінювати зварювання паянням [74]. Для зварювання корпусу елемента джерела енергії його циліндричну частину з кришкою  $\varnothing 25,4$  мм, що приварюється кільцевим швом, поміщали до наповненої інертним газом під необхідним тиском герметичної камери, а промінь Nd:YAG-лазера пропускали через прозоре вікно. Уникнути розтріскування вдалося за допомогою застосування зварювання імпульсним випромінюванням (рисунок 1.6).

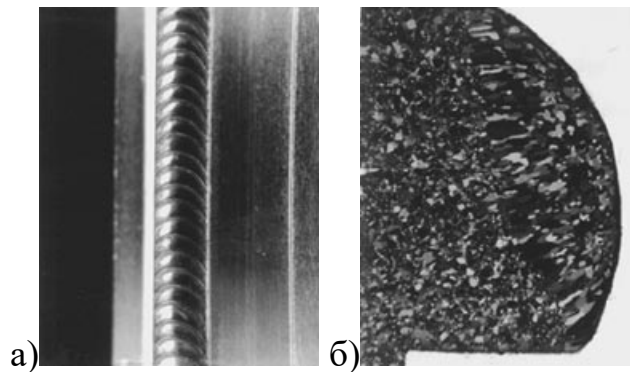


Рисунок 1.6 - Лазерне зварювання промислового конструкційного берилію [74]:

а) – вигляд зварного шва  $\varnothing 25,4$  мм (лусочки утворені імпульсами з перекриттям); б) – структура поперечного перерізу зони плавлення  $\times 100$

Дослідження рівня залишкових напружень у зварних деталях Be-AlSi показали, що міцність зварних швів значною мірою залежить від геометричної форми конструкції, величини проплавлення та наявності дефектів, але значно меншою мірою – від величини залишкових напружень [75-76]. Однак, залишкові напруження і деформації впливають на зміну геометричної форми тонкостінних виробів, що зварюються.

Для оцінки впливу процесу лазерного зварювання на формування з'єднань з тонкостінних циліндричних деталей із легких сплавів необхідне визначення розподілу температур у процесі зварювання з наступним аналізом рівня залишкових напружень і деформацій. Для цього в роботі [77] запропоноване застосування числового моделювання з метою визначення впливу потужності лазерного випромінювання, радіусу плями нагріву та його зміщення щодо осі стику на розподіл температур у циліндричних оболонках з берилію. На основі результатів розрахункових досліджень побудована регресійна модель, яка враховує зазначені три параметри. Був встановлений їх вплив на розподіл температури, що дозволило надати рекомендації щодо процесу зварювання берилієвих циліндричних тонкостінних оболонок.

Авторами роботи [78] були отримані зварні з'єднання берилію з алюмінієм. Це було досягнуто шляхом регулювання енергії лазерного випромінювання та швидкості зварювання. В результаті була отримана задовільна мікроструктура зварного шва. Показано, що мікроструктура шва та зони перегріву має типову евтектоїдну структуру. Проведене дослідження свідчить про можливість застосування алюмінієвих матеріалів для зварювання берилію. Це добре корелює з даними роботи [79], в якій експериментально встановлено, що отримані без присадкового матеріалу зварні з'єднання з берилію характеризуються дуже низькою пластичністю з міцністю близько 50% від міцності основного металу. Міцність отриманих з використанням алюмінієвих присадкових матеріалів зварних з'єднань берилію становила 70% міцності основного матеріалу з високою пластичністю.

Значення мікротвердості у шві та зоні термічного впливу (ЗТВ) при лазерному зварюванні легких сплавів істотно, на 20-25%, вищі, ніж при TIG. Зона розміцнення при лазерному зварюванні практично відсутня, тоді як при TIG зварюванні вона поширюється на відстань до 1,0-1,2 мм від зони сплавлення, зменшення мікротвердості в ній по відношенню до основного металу становить 13-14%. Твердість ділянок навколошовної зони при зварюванні нагартованого

матеріалу менша за твердість основного металу. Однак ділянка розміщення за довжиною при лазерному зварюванні в 3-4 рази менша, ніж при дуговому.

Основними недоліками лазерного зварювання легких сплавів є схильність до утворення внутрішніх пор та гарячих тріщин. Найбільш ефективними шляхами усунення пор є видалення окисної плівки перед зварюванням та якісний захист зварювальної ванни від атмосферного повітря. Для усунення тріщиноутворення доцільно знижувати погонну енергію зварювання, зменшувати ширину швів, застосовувати присадкові матеріали. Ще одним способом усунення тріщин може бути попередній або супутній підігрів деталей, що зварюються.

Використання оптимальних режимів лазерного зварювання легких сплавів, особливо в діапазоні швидкостей вище 1,5-2,5 м/хв., дозволяє суттєво знизити деформацію деталей. Як показали дослідження поперечної усадки зварних з'єднань, ця величина у 5-6 разів менша, ніж при TIG зварюванні [65, 80].

У зв'язку з нестачею відповідної інформації у літературі доцільно виконати фізичне моделювання лазерного зварювання легких сплавів. При цьому через високу токсичність аерозолів, що утворюються при зварюванні берилієвих сплавів, бажано застосовувати модельні зразки з алюмінієвих сплавів. Зварюваність таких зразків має бути максимально наближеною до зварюваності відповідних берилієвих (Al-Be) сплавів. При цьому бажано, щоб вони не мали характерної для берилію токсичності, мали високу питому міцність і відносно низьку вартість. Цим вимогам відповідають алюмінієві сплави серії 7XXX.

Сплави серії 7XXX після термічної обробки мають міцність вищу за 500 МПа. Вони характеризуються незадовільною технологічною здатністю до зварювання через високу схильність до розтріскування, мають високий коефіцієнт лінійного теплового розширення та низьку температуру випаровування легуючих елементів, таких, як Zn і Mg, що сприяє виникненню тріщин і пор у швах [81]. У роботі [30] показано, що шви, отримані лазерним зварюванням, мають більш високу міцність на розтяг, ніж при дуговому TIG зварюванні. Встановлено, що старіння мало впливає на твердість зони

сплавлення, а властивості металу в ЗТВ погіршуються незалежно від процесу зварювання. Це свідчить про обмеження можливостей підвищення міцності з'єднань під час використання будь-якого способу зварювання.

Одним із інноваційних способів підвищення якості готових зварних з'єднань є лазерне ударне зміцнення (LSP) [82]. Цим способом були оброблені деталі з алюмінієвого сплаву 7075, попередньо зварені лазерним випромінюванням. Отримані зразки досліджували на корозійну стійкість під дією механічних напружень за допомогою електронної скануючої мікроскопії (SEM) і випробовували на розтяг з низькою швидкістю деформації (SSRT). Результати показали, що обробка LSP дозволяє значно підвищити корозійну стійкість з'єднань. Механічні випробування SSRT показали, що у зразків з обробкою LSP відносно подовження, час руйнування та статична в'язкість зростають порівняно з необробленими зразками на 11%, 20% та 100% відповідно. LSP також впливає на зміну характеру та розташування зламу – тип тріщини переходить від міжкристалітного до внутрішньокристалітного. Причини таких поліпшень властивостей з'єднань спричинені подрібненням мікроструктури, зниженням величини залишкових напружень, а також деякими іншими факторами.

### **1.3 Основні проблеми, що виникають при зварюванні тонкостінних конструкцій із сплавів на основі алюмінію та берилію, у тому числі з неповним проплавленням**

Сплави серії 7xxx (система Al-Zn-Mg-Cu) мають найбільшу міцність серед алюмінієвих сплавів. Після термічної обробки цей показник досягає понад 500 МПа [81]. Завдяки поєднанню високої міцності з низькою щільністю вони є досить привабливими для застосування при виготовленні сучасної транспортної техніки [30]. Однак зварюваність таких сплавів є поганою через значну схильність до утворення гарячих тріщин, високий коефіцієнт лінійного теплового розширення та низької температури випаровування летючих легуючих елементів, зокрема Zn та Mg [3]. Зазначені недоліки сприяють

утворенню дефектів зварювання, таких як тріщини та пори, особливо у разі застосування лазерного зварювання з неповним (або частковим) проплавленням [83]. Подібні недоліки спостерігаються і при променевому зварюванні берилієвих сплавів, у тому числі при неповному проплавленні (рисунок 1.7) [84].

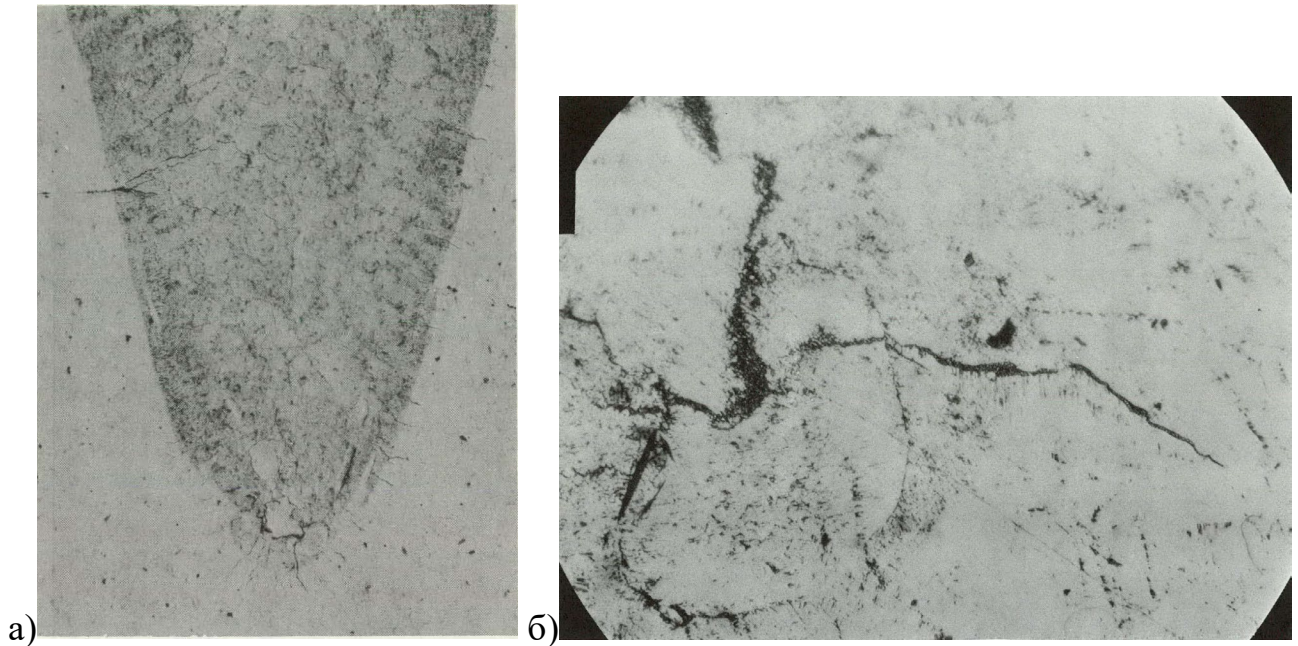


Рисунок 1.7 - Мікротріщини в кореневій частині та перехідній зоні при виконанні ненаскрізного електронно-променевого проплавлення в технічному берилії (98%Be) [84]: а) –  $\times 75$ ; б) –  $\times 750$

У разі зварювання без наскрізного проплавлення та утворення кейхолу змінюється тепловий режим лазерного зварювання (рисунок 1.8), що призводить до зміни структури металу, який зварюється, а також підвищення небезпеки виникнення пор і тріщин у нижній частині шва [85]. Проте іноді виникає необхідність виконання швів з ненаскрізним проплавленням. Прикладом можуть бути герметизуючі шви, які виконуються по замкнених траєкторіях, (наприклад, кільцевим) при приварюванні фланців або виготовленні деталей малих розмірів. У таких випадках герметизація може бути потрібна як фінальна операція збирання. У об'ємі, який герметизується, можуть бути встановлені елементи електроніки, що робить неприпустимим виведення в нього кореня шва. При

цьому вибір параметрів режиму ускладнюється тим, що для однієї і тієї ж погонної енергії (наприклад, 13 Дж/мм [86]) можуть мати місце процеси зварювання як у конвективному режимі, так і в режимі утворення кейхола.

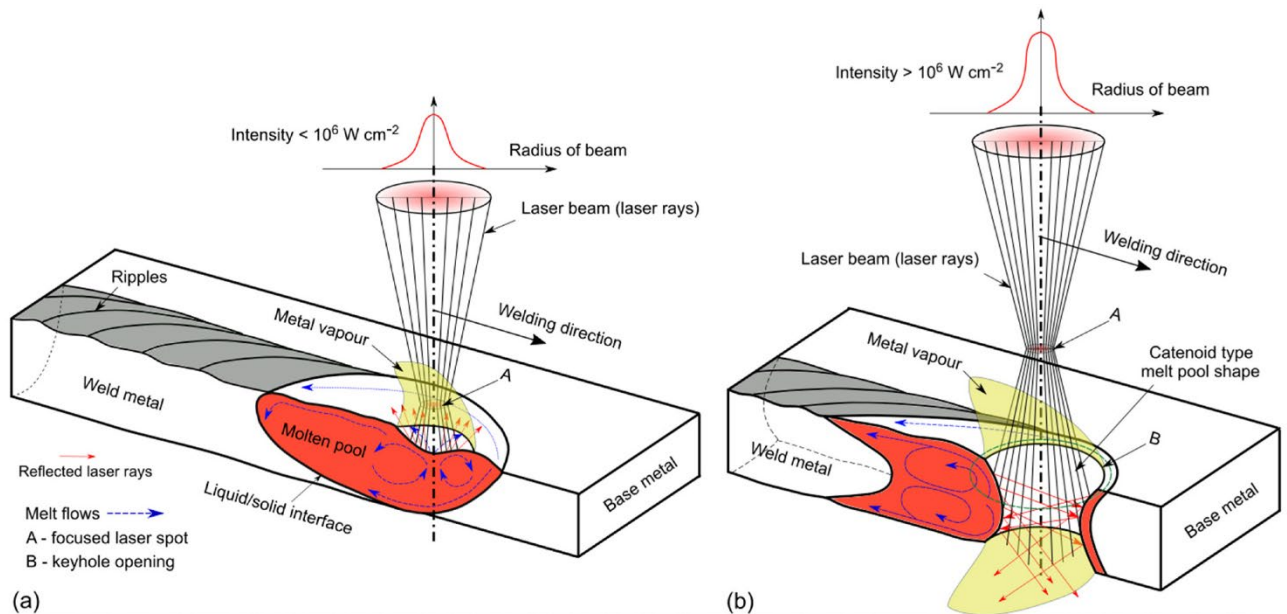


Рисунок 1.8 - Схематичні ілюстрації процесів лазерного зварювання із зазначенням потоків розплаву [85]: а) режим теплопровідного проплавлення (промінь сфокусований поблизу поверхні); б) режим замкової свердловини кейхола (розфокусований промінь)

У разі багатопрохідного лазерного зварювання також має місце необхідність формування зварних швів з ненаскрізним проплавленням. У роботі [87] встановлено, що короткі термічні цикли при багатопрохідному лазерному зварюванні призводять до недостатнього часу дифузії елементів зварюваного сплаву, що призводить до кращого збереження структур основного металу. Додаткові цикли нагрівання при багатопрохідному лазерному зварюванні сприяють утворенню взаємопов'язаних мікроструктур, які сприяють підвищенню міцності зварного з'єднання.

Одним із характерних для мікроплазмового зварювання тонколистових алюмінієвих сплавів устик дефектів є провисання швів [88]. Для усунення цього дефекту можна використовувати як лазерне, так і лазерно-плазмове зварювання

[89]. Лазерне та гібридне зварювання ефективне у разі необхідності отримання з'єднань з ненаскрізним проплавленням, наприклад, торцевих (рисунок 1.9). Однак, з позицій економічної та технологічної доцільності перевагу має лазерно-мікроплазмове зварювання. В роботі [88] встановлено, що характерними дефектами цього процесу може бути утворення підрізів та внутрішніх пор у швах. Причини виникнення таких дефектів пов'язані, переважно, з газодинамікою плазмового струменя, тиском плазмової дуги і конструкцією інтегрованого плазмотрона. У зв'язку з цим були проведені роботи з вивчення витікання плазмоутворювальних та захисних газів з відповідних сопел інтегрованого плазмотрону, а також розміщення в ньому електродів. Це дозволило розробити покращену конструкцію, в якій параксіальна одноелектродна схема [90] була замінена симетричною двоелектродною коаксіальною схемою [91]. Створені принципи були покладені в основу подальшої розробки універсального інтегрованого плазмотрона для гібридних процесів зварювання та різання [92].

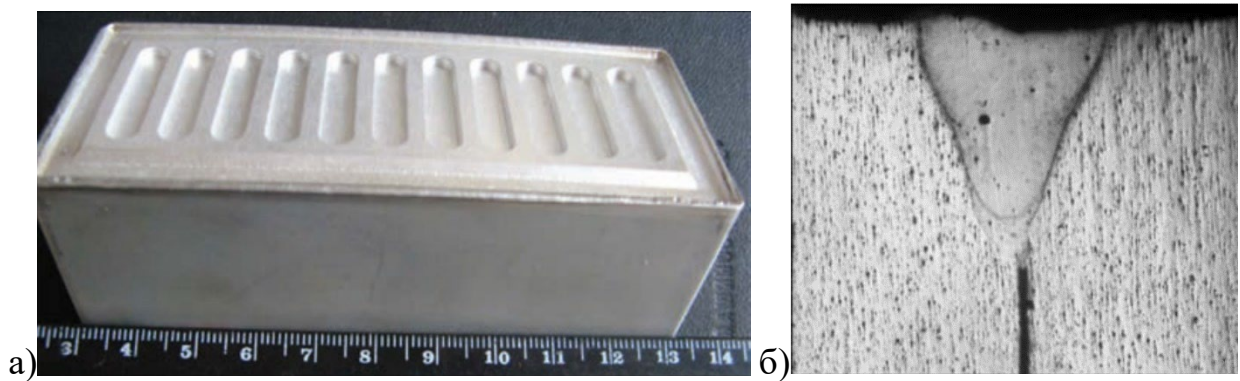


Рисунок 1.9 - Приклади застосування лазерного та гібридного зварювання з ненаскрізним проплавленням: а) зовнішній вигляд фрагмента корпусу акумулятора з алюмінієвого сплаву АМг6 завтовшки 0,8 мм, з'єданого лазерним зварюванням [89]; б) макроструктура ( $\times 25$ ) перерізу торцевого з'єднання сплаву АМг6 ( $\delta=1,4$  мм), виконаного гібридним лазерно-плазмовим зварюванням зі швидкістю 168 м/год [88]

У проаналізованих роботах залишаються невирішеними пов'язані з особливостями формування швів без наскрізного проплавлення питання.

Насамперед це стосується виникнення характерних дефектів та визначення шляхів їх усунення. У літературі не виявлена інформація щодо металургійних особливостей формування з'єднань високоміцних алюмінієвих та берилієвих сплавів швами згаданого типу та про вибір оптимальної технології отримання стикового герметизуючого шва з ненаскрізним проплавленням.

В цілому можна відзначити, що при лазерних, дугових та гібридних способах зварювання тонколистових легких сплавів можуть виникати такі основні проблеми [29, 93]:

- одержання різного за міцністю з основним металом з'єднання, що обумовлене відмінністю в розмірах зерен металу шва, зони сплавлення шва з основним металом, зони термічного впливу (ЗТВ) та основного металу;
- утворення підрізів на поверхні шва по зоні сплавлення, що викликане малим часом існування зварювальної ванни в рідкому стані та відсутністю можливості нормального розтікання рідкого металу;
- виникнення пор у металі шва, яке пов'язане зі зміною розчинності водню в алюмінієвому сплаві при різних температурах;
- виникнення гарячих тріщин через наявність евтектичних сполук у металі шва та зміни умов їх затвердіння з розплавленого металу при різних швидкостях кристалізації, які обумовлені різними погонними енергіями зварювання.

Таким чином, для зварювання тонкостінних конструкцій із високоміцних алюмінієвих та берилієвих сплавів необхідно вирішити низку спрямованих на розробку відповідних технологій та обладнання завдань. Як показав аналіз літератури, найбільш перспективними зварювальними технологіями з позицій мінімізації залишкових напружень є такі, в яких використовуються висококонцентровані джерела енергії. Тому доцільно розглянути процес лазерного зварювання. Для цього процесу необхідно визначити характерні утворювані дефекти і шляхи їх усунення, обрати параметри режимів зварювання за критеріями мінімізації температури нагрівання та залишкових деформацій. Відповідно до обраних параметрів режимів слід створити зварювальне обладнання, що дозволяє безпечно для оператора виконувати зварювання

тонкостінних конструкцій із алюмінієвих сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Cu і Al-Mg, а в перспективі й берилієвих сплавів системи Al-Be-Mg.

**Метою роботи** є встановлення закономірностей впливу параметрів режимів процесу лазерного зварювання та сумісної дії лазерного і плазмового джерел нагріву на структуру металу з'єднання, утворення характерних дефектів та особливості протікання термомеханічних процесів у зварних з'єднаннях із алюмінієво-магнієвих сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Cu і Al-Mg, розробка на цій основі технології отримання тонкостінних (до 2,5 мм) зварних конструкцій із мінімальним рівнем залишкових напружень і деформацій, а також обладнання для їх реалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- виконати аналіз сучасного стану зварювання тонкостінних конструкцій з легких сплавів, обґрунтувати вибір джерела тепла для зварювання тонкостінних конструкцій із легких сплавів, яке дозволяє формувати зварні конструкції аерокосмічного призначення із мінімальним рівнем залишкових напружень і деформацій;
- здійснити вибір необхідних матеріалів і обладнання та методів проведення досліджень;
- розробити розрахункову методику і здійснити прогнозування параметрів режимів зварювання різних типів легких сплавів із використанням лазерного випромінювання з урахуванням вимог щодо проплавлення, виконати її експериментальну верифікацію для алюмінієвих сплавів серій 7xxx (система Al-Zn-Mg-Cu) і 5xxx (система Al-Mg), встановити особливості протікання фізико-металургійних процесів при лазерному зварюванні цих сплавів в камері з контрольованою атмосферою;
- виконати математичне моделювання розподілу температур у тонкостінних виробах із легких сплавів при їх нагріванні лазерним джерелом тепла, в тому числі з урахуванням вимог щодо середньої температури конкретних виробів після локального нагріву в процесі зварювання;

- шляхом моделювання термдеформаційних процесів при лазерному зварюванні тонкостінних виробів із легких сплавів визначити вплив параметрів режимів та умов лазерного зварювання на рівень залишкових деформацій та напружень;
- розробити базові конструктивні елементи обладнання для створення дослідно-промислового комплексу для зварювання виробів аерокосмічного призначення із легких сплавів;
- розробити методику і обладнання для неруйнівного контролю та визначення рівня залишкових деформацій та напружень високоточних тонкостінних зварних виробів із легких сплавів аерокосмічного призначення методом кореляції стерео-цифрових 3D-зображень.

#### **1.4. Висновки за розділом 1.**

1. Аналіз сучасного стану зварювання тонкостінних конструкцій з легких сплавів показав, що за критеріями локалізації тепловкладання, мінімізації величини залишкового відхилення від заданої геометричної форми виробів і технологічності реалізації процесу найбільш прийнятним є лазерне джерело тепла, яке дозволяє формувати зварні конструкції аерокосмічного призначення із мінімальним рівнем залишкових напружень і деформацій.

2. Основною особливістю лазерного зварювання легких сплавів з газовим захистом є пороговий характер проплавлення. Він обумовлений інтенсивним (понад 90...95%) відбиттям лазерного випромінювання від поверхні, що зварюється, а також високими значеннями теплопровідності сплавів на основі алюмінію та берилію. Для подолання порога проплавлення необхідне вкладання енергії густиною від  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup> і більше. Зварювання крайок алюмінієвих сплавів завтовшки до 3 мм доцільно виконувати випромінюванням волоконного лазера з використанням аргону в якості захисного середовища, зі швидкістю понад 120 м/год при потужності випромінювання до 700 Вт.

3. Лазерне зварювання широкої номенклатури легких сплавів дозволяє отримувати якісні з'єднання у разі попереднього видалення окисної плівки та

забезпечення надійного захисту зварювальної ванни. Отримані випромінюванням  $\text{CO}_2$ - і волоконного лазерів шви практично не відрізняються на вигляд і по макроструктурі, проте необхідна для повного проплавлення волоконним лазером погонна енергія на  $\sim 30\%$  нижче, ніж при зварюванні  $\text{CO}_2$ -лазером.

4. Об'єм розплавленого металу при лазерному зварюванні менший, ніж при TIG зварюванні, що дозволяє значно зменшити ширину шва, у 3-4 рази зменшити ділянку розміщення в ЗТВ і в 5-6 разів зменшити залишкові деформації деталей. Мікротвердість шва та ЗТВ при цьому зростає на 20-25%. Для усунення занижень шва, збільшення допустимого складального зазору, підвищення механічних властивостей та усунення тріщиноутворення доцільно використовувати леговані присадкові матеріали на основі алюмінію.

5. Передові зварювальні технології забезпечують статичну міцність з'єднань алюмінієвих сплавів близько 80-90% міцності основного металу. У разі зварювання берилієвих сплавів без присадки досягається міцність з'єднань близько 50%, при використанні присадного матеріалу у вигляді сплавів на основі алюмінію – близько 70%.

6. До основних дефектів швів при зварюванні алюмінієвих сплавів відносяться гарячі тріщини, внутрішні пори, підрізи та провисання швів. Одним із ефективних шляхів усунення тріщин є зменшення величини погонної енергії, внутрішніх пор – усунення джерел потрапляння у зварювальну ванну окисної плівки, провисання швів – застосування присадних матеріалів. Для усунення підрізів доцільно не лише підбирати тепловий та швидкісний режими зварювання, а й враховувати динаміку газових потоків і тиск дуги на зварювальну ванну.

7. Зростання дендритів при кристалізації зварювальної ванни при зварюванні берилію призводить до зниження міцності шва в зоні вертикальної осі поперечного перерізу. Крім того, при зварюванні берилію можлива поява як осьових, так і поперечних гарячих тріщин. Найбільш небезпечними зонами виникнення тріщин є кристалізаційний кратер, а також дефекти шва. Шляхами

усунення тріщиноутворення є: попередній підігрів, мінімізація погонної енергії зварювання, використання присадкових матеріалів, плавне зменшення потужності лазерного випромінювання після закінчення зварювання, усунення оксиду BeO перед зварюванням, зменшення розміру зерен вихідного матеріалу.

8. Одним з достатньо ефективних і універсальних шляхів усунення дефектів, характерних для лазерного зварювання алюмінієвих сплавів, є застосування супутньої дії дугового джерела енергії, зокрема, додаткового плазмового підігріву зварювальної ванни. Такий прийом дозволяє мінімізувати пороутворення, покращити формування верхнього валика, усунути підрізи і частково замінити лазерну енергію плазмовою. Останнє сприяє зменшенню вартості погонного метру зварного шву до 2 разів.

## Розділ 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, ЗАСТОСОВАНІ МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

### **2.1 Методика проведення технологічних досліджень зварювання алюмінієвих сплавів із застосуванням лазерного випромінювання**

Для досягнення мети роботи та вирішення поставлених завдань було прийнято наступну методику проведення досліджень:

- вибір зварюваних алюмінієвих високоміцних сплавів, підготовка плоских зразків для попередніх експериментів зі зварювання, підготовка зразків-імітаторів виробів, що зварюються;
- математичне модельне дослідження особливостей лазерного зварювання легких високоміцних сплавів, у тому числі пов'язаних із поглинанням / віддзеркаленням лазерного випромінювання;
- виконання моделювання розподілу теплових полів у виробах з легких високоміцних сплавів для попереднього визначення параметрів режимів лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання за критеріями глибини проплавлення і температури нагріву виробу;
- створення лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень;
- проведення експериментів зі зварювання із використанням лазерного випромінювання плоских зразків з алюмінієвих сплавів;
- проведення металографічних досліджень зварених зразків, визначення наявності характерних дефектів та шляхів їх усунення, внесення необхідних коректив у технологію зварювання;
- розробка методики та обладнання комбінованого способу розрахунково-експериментального визначення залишкових деформацій та напружень у звареному виробі із застосуванням методу кореляції цифрових зображень (SDIC – Stereo Digital Image Correlation);

- розрахункове методом скінчених елементів визначення впливу режимів та умов лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання на розподіл компонент НДС у виробах з легких високоміцних сплавів;
- дослідження компонент залишкового НДС зварених зразків-імітаторів виробів SDIC-методом обробки цифрових стереозображень;
- визначення похибки обчислень НДС та оцінка прийнятності застосованого підходу обробки цифрових стереозображень для вибору параметрів режимів зварювання;
- коригування режимів зварювання зразків-імітаторів виробів з урахуванням даних щодо розподілу компонент залишкового НДС;
- проведення металографічних досліджень зварених зразків-імітаторів виробів космічної галузі з алюмінієвих високоміцних сплавів;
- створення технологічних рекомендацій щодо лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів;
- проектування зварювальних головок для реалізації процесів зварювання легких високоміцних сплавів із застосуванням лазерного випромінювання в середовищі захисного газу;
- проектування апаратури неруйнівного контролю компонент НДС у високоточних тонкостінних виробах космічної галузі з алюмінієвих високоміцних сплавів на базі використання методу SDIC кореляції цифрових зображень;
- проектування комплексу дослідно-промислового обладнання для герметизації зварюванням високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів.

Згідно цієї методики будуть проведені дослідження із застосуванням як лабораторного технологічного обладнання, так і обладнання для діагностики та оцінки характеристик якості з'єднань та виробів. Детальний опис такого обладнання наведений нижче.

## 2.2 Використані матеріали та їх характеристики

Окрім науково-дослідницької, робота має виробничо-практичну спрямованість, яка полягає в розробці технології та обладнання для зварювання малогабаритних виробів космічної галузі з високоміцних алюмінієвих сплавів серії 7xxx (система Al-Zn-Mg-Cu). Такі вироби мають циліндричну форму із двома фланцями, що приварюються по торцях. Внутрішнє наповнення виробів містить електронні пристрої. Зварювання фланців є фінішною складальною операцією, тому повинно виконуватися швами із ненаскрізним проплавленням. Крім того, для збереження вбудованої електроніки і мінімізації залишкових деформацій післязварювальний нагрів виробу не повинен перевищувати 100...120°C.

Для проведення попередніх експериментів з листових алюмінієвих матеріалів товщиною  $\delta=1,5$  мм виготовляли плоскі зразки розміром  $(50...100) \times (50...100) \times \delta$  мм. На таких зразках виконували попереднє відпрацювання режимів. При цьому лазерним та лазерно-мікроплазмовим способами зварювали кутові з'єднання. Для таких завдань використовували як сплав 5083 системи Al-Mg, що добре зварюється, так і більш важкозварювані сплави 7005 і 7075 (таблиця 2.1). Зразки-імітатори зварюваних виробів виготовляли зі сплаву 7005.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад (мас. %) досліджених алюмінієвих сплавів

| Марка сплаву   | Al     | Be | Si         | Fe         | Cu           | Mn           | Mg           | Cr             | Zn           | Ti                | Інше                                       |
|----------------|--------|----|------------|------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------|-------------------|--------------------------------------------|
| 5083<br>(1561) | основа | —  | до<br>0,40 | до<br>0,40 | до<br>0,10   | 0,4 –<br>1,0 | 4,0 –<br>4,9 | 0,05 –<br>0,25 | до<br>0,25   | до<br>0,15        | до<br>0,15                                 |
| 7005<br>(1915) | основа | —  | до<br>0,35 | до<br>0,40 | до<br>0,10   | 0,2 –<br>0,7 | 1,0 –<br>1,8 | 0,06 –<br>0,2  | 4 – 5        | 0,01<br>–<br>0,06 | Zr<br>0,08 –<br>0,2;<br>інше<br>до<br>0,15 |
| 7075           | основа | —  | до<br>0,40 | до<br>0,50 | 1,2 –<br>2,0 | до<br>0,30   | 2,1 –<br>2,9 | 0,18 –<br>0,28 | 5,1 –<br>6,1 | до<br>0,20        | до<br>0,15                                 |

Таблиця 2.2 - Основні фізико-механічні характеристики використаних у дослідженнях алюмінієвих сплавів (при нормальній температурі)

| Марка сплаву | Межа плинності $\sigma_T$ , МПа | Межа міцності $\sigma_B$ , МПа | Відносне подовження, % | Модуль Юнга E, ГПа | Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Твердість НВ, МПа |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------------|
| 5083 (1561)  | 130 – 160                       | 200 – 280                      | 15                     | 69                 | 2720                                 | 70                |
| 7005 (1915)  | 245 – 290                       | 355 – 400                      | 8 – 12                 | 72                 | 2770                                 | 90 – 95           |
| 7075         | 450 – 500                       | 510 – 570                      | 3 – 11                 | 71,7               | 2810                                 | 150 – 160         |

Для реалізації цієї методики зі сплаву 1915 (7005) були виготовлені циліндричні зразки-імітатори виробу з двома кришками на торцях, які необхідно приварювати кільцевими швами. Діаметр стику, що зварюється, становив близько 38 мм, габарити основної частини виробу –  $\varnothing 41 \times 41$  мм (рисунок 2.1,а).

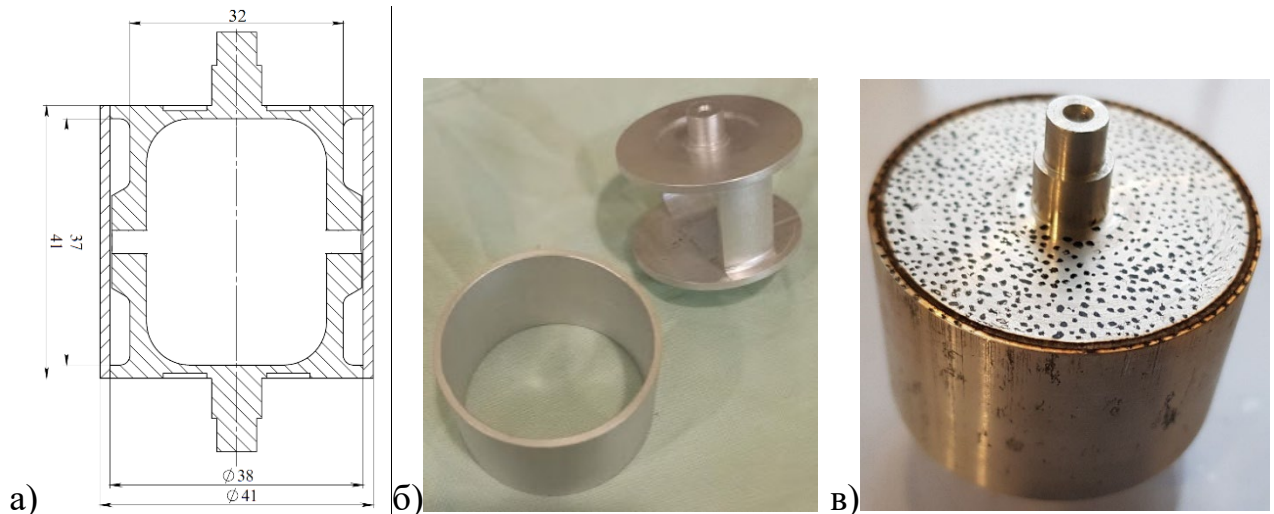


Рисунок 2.1 - Виріб, що зварюється: а) переріз; б) деталі, що з'єднуються зварюванням; в) загальний вигляд після зварювання

Товщина стінки виробу у зоні зварювання становила  $\delta=1,5$  мм (рисунок 2.1,б). При формуванні шва потрібно було досягти глибини провару  $h=0,5 \dots 0,7$  мм. Ширина провару має бути такою, щоб не допустити оплавлення кромки зовнішнього габариту  $\varnothing 41$  мм (рисунок 2.1,в).

У середині виробу можуть розташовуватися елементи електроніки. У зв'язку з цим при зварюванні неприпустимий вихід кореня шва у внутрішню порожнину, що зумовлює вищезгадану глибину провару. При цьому шов має бути герметичним. Крім того, наявність зазначених елементів робить неприпустимим післязварювальне нагрівання готового виробу понад 100...120°C. Наведені значення глибини проплавлення та загальної температури нагрівання виробу є критеріями вибору параметрів режиму зварювання.

### **2.3. Лабораторний зварювальний стенд та використане технологічне обладнання.**

Розробку лабораторного зварювального стенду базували на блок-схемі, представлений на рисунку 2.2.

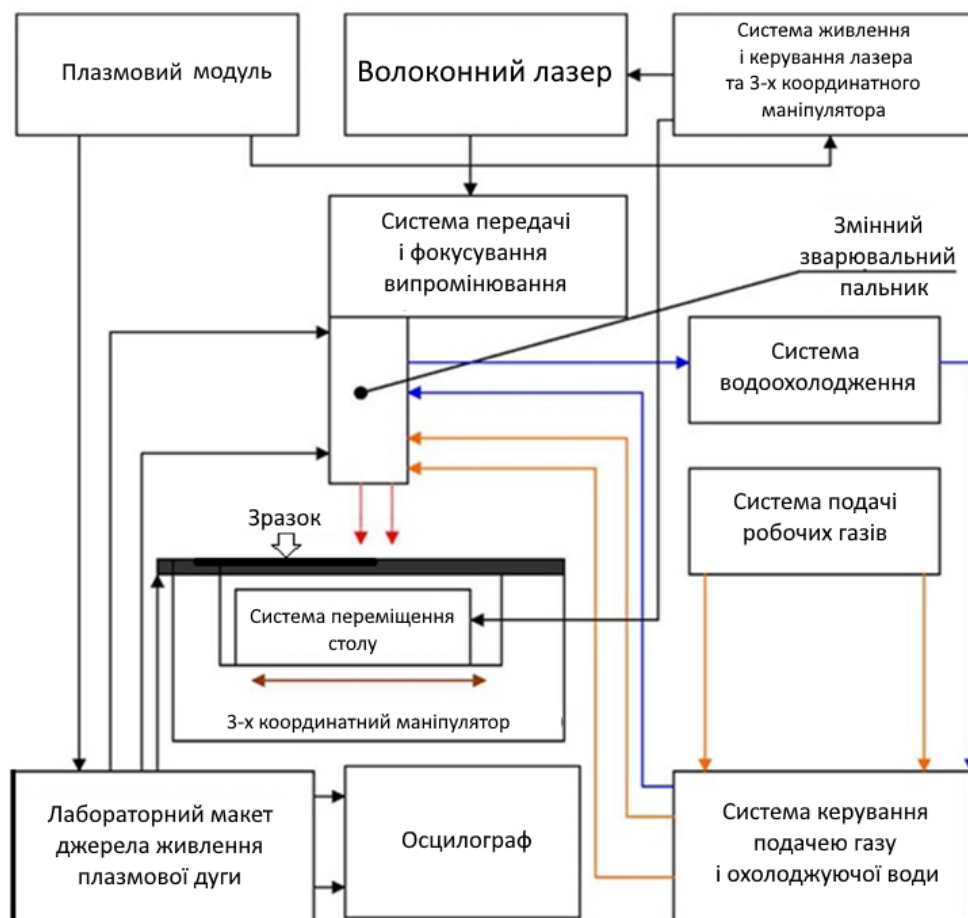


Рисунок 2.2 - Блок-схема компонування лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень

При виборі лазера орієнтувалися на найбільш сучасний тип лазера – волоконний. Для переміщення зварювальної головки щодо зварюваного зразка вибрали трикоординатний маніпулятор (плотер). Головку розміщували на каретці, що має можливість вертикального переміщення. Зварюваний зразок розташовували на його столі у відповідному складально-зварювальному пристосуванні. Також були обрані відповідні системи управління витратами та подачею робочих газів і охолоджувальної води. Джерело живлення та плазмовий модуль для мікроплазмового зварювання вибрали з наявного лабораторного обладнання власної розробки.

При розробці зварювальних головок як базові схеми прийняли схеми відповідних процесів, наведені на рисунку 2.3. Згідно з даними схемами, при лазерному зварюванні лазерне випромінювання 1 фокусується лінзою 2 і у газовому захисті 3 на зварюваному зразку 4 утворює зварювальну ванну (рисунок 2.3, а). У разі використання супутнього мікроплазмового підігріву зварювальної ванни використовували схему, наведену на рисунку 2.3, б). Згідно цієї схеми зварювальну ванну водночас утворюють стиснена дуга прямої дії і лазерне випромінювання. Така стиснена (плазмова) дуга утворюється між електродом (катодом) 5 і зразком 4 за допомогою струменя плазмоутворюючого газу (аргону), що подається через сопло 7. Зварювальна ванна захищається газом (аргоном), що подається соплом 3. Підпал стисненої дуги забезпечує плазмовий модуль, який генерує малоамперну чергову дугу, а її генерацію у процесі зварювання – відповідне джерело живлення. Коаксіальна подача лазерного випромінювання 1 та бокове розташування електродів 5 та 6 знижують втрати лазерного випромінювання на відбиття поверхнею зразка 4, які могли би мати місце при підведенні випромінювання під кутом. При цьому електрод 5 є катодом і забезпечує провар необхідної глибини у зразку 4, а електрод 6 – анодом, що забезпечує катодне очищення зразка 4 від окисної плівки  $Al_2O_3$ .

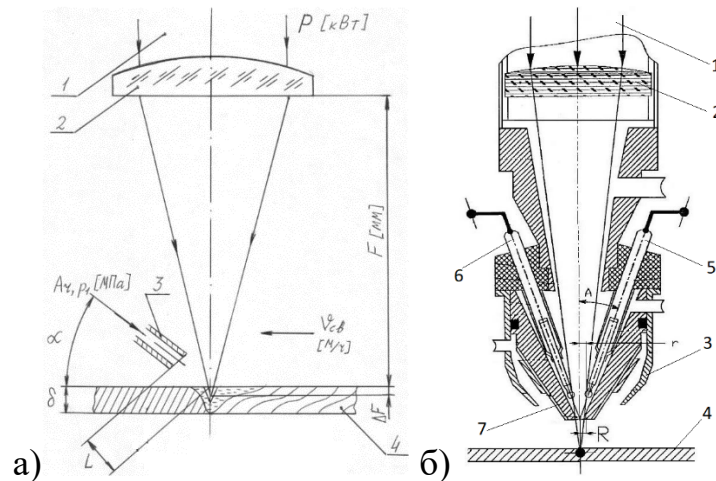


Рисунок 2.3 - Технологічні схеми процесів лазерного , а) та лазерно-мікроплазмового б) зварювання: 1 – лазерне випромінювання; 2 – фокусуюча лінза; 3 – сопло подачі захисного газу; 4 – зразок; 5, 6 – електроди; 7 – плазмоутворююче сопло

Для проведення технологічних експериментів задіяли волоконний лазер моделі MFSC 2000W (фірма MAX, Китай) потужністю до 2,0 кВт із довжиною хвилі випромінювання  $\lambda \approx 1,06$  мкм. Також використовували розраховане на струм до 80 А джерело живлення дуги неплавкого електрода і плазмовий модуль власного виробництва. Експерименти проводились на спеціально створеному лабораторному стенді (рисунок 2.4) із змінними зварювальними головками власної розробки (рисунок 2.5). Основні технічні характеристики цих головок наведені у таблиці 2.3. Для переміщення головок використовувався 3D-плоттер. Основні технічні характеристики створеного лабораторного комплексу наведені у таблиці 2.4.



Рисунок 2.4 - Загальний вигляд лабораторного стану щодо попередніх експериментів по зварюванню зразків легких сплавів: 1 – зварювальна головка; 2 – лазерне оптичне волокно; 3 – трикоординатний маніпулятор; 4 – система газопідготовки; 5 – блок автономного охолодження зварювальної головки; 6 – силова шафа; 7 – джерело живлення мікроплазмової дуги; 8 – блок автономного охолодження мікроплазмового джерела живлення; 9 – плазмовий модуль; 10 – пульт керування комплексом.

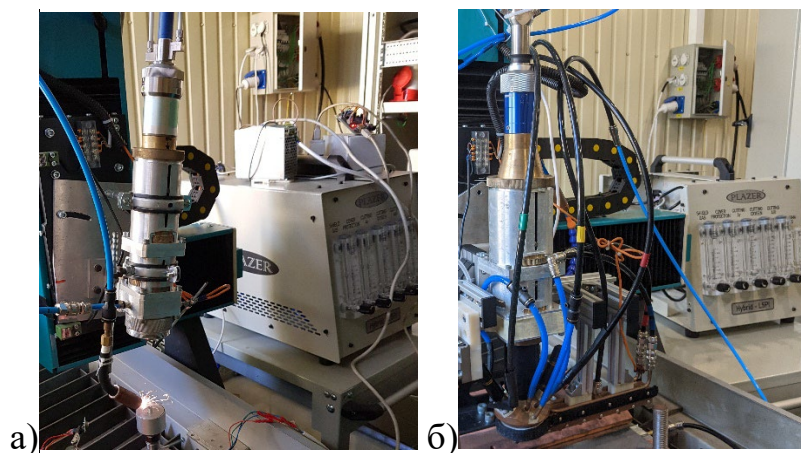


Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд лабораторного стану для технологічних експериментів: а) – лазерне зварювання; б) – лазерне зварювання з мікроплазмовим супутнім підігрівом

Таблиця 2.3 - Основні технічні характеристики зварювальних головок

| №<br>п/п | Параметр                                    | Значення    |
|----------|---------------------------------------------|-------------|
| 1.       | Лазерна зварювальна головка                 |             |
| 1.1.     | Потужність випромінювання, кВт              | до 2,0      |
| 1.2.     | Довжина хвилі випромінювання, мкм           | 1,06...1,07 |
| 1.3.     | Фокусна відстань, мм                        | 200 – 300   |
| 1.4.     | Межі налаштування фокусної відстані, мм     | 0...20      |
| 1.5.     | Точність налаштування фокусної відстані, мм | ±0,25       |
| 1.6.     | Витрати захисного газу (Ar), л/хв.          | 8...12      |
| 1.7.     | Введення лазерного випромінювання           | коаксіальне |
| 2.       | Інтегрована зварювальна головка             |             |
| 2.1.     | Потужність випромінювання, кВт              | до 2,0      |
| 2.2.     | Максимальна сила струму сумарна, А          | 80          |
| 2.3.     | Сила струму на одному катоді, А             | 5 – 80      |
| 2.4.     | Напруга, В                                  | 45 – 52     |
| 2.5.     | Витрати плазмоутворюючого газу (Ar), л/хв.  | 1 – 10      |
| 2.6.     | Витрати газу захисту катодів (Ar), л/хв.    | 2,5 – 5,0   |
| 2.7.     | Витрати газу захисного сопла (Ar), л/хв.    | 0 – 10      |
| 2.8.     | Діаметр плазмоутворюючого сопла, мм         | 2,0 – 3,0   |
| 2.9.     | Діаметр катодів, мм                         | 1,5 – 3,2   |
| 2.10.    | Введення лазерного випромінювання           | коаксіальне |
| 2.11.    | Відстань фокусування променя, мм            | 200 – 300   |
| 2.12.    | Охолоджуюча рідина                          | вода        |

Випромінювання волоконного лазера MFSC 2000W підводиться по оптичному волокну 2 до зварювальної головки 1 (рисунок 2.4). Головка розташовується на каретці трикоординатного маніпулятора (плотера) 3. Зразки, що зварюються, закріплюють у складально-зварювальних пристроях. Ці пристрої базуються на столі плоттера 3 (рисунок 2.5, а). Плазмоутворюючий та захисний газ подаються за допомогою системи газопідготовки 4, що дозволяє досить точно виставляти необхідні витрати та тиск.

Таблиця 2.4 - Основні технічні характеристики лабораторного комплексу для проведення технологічних досліджень

| №<br>п/п | Параметр                                                       | Значення      |
|----------|----------------------------------------------------------------|---------------|
| 1.       | Електричне живлення комплексу: напруга, В / кількість фаз      | 380 / 3       |
| 2.       | Потужність лазерного випромінювання у неперервному режимі, кВт | до 2,0        |
| 3.       | Частота лазерних імпульсів у імпульсному режимі, Гц            | 0...200       |
| 4.       | Сила зварювального струму прямої полярності, А                 | до 80,0       |
| 5.       | Сила зварювального струму зворотної полярності, А              | до 50,0       |
| 6.       | Тривалість імпульсів прямої та зворотної полярності, мс        | 1 – 99        |
| 7.       | Тривалість паузи прямої та зворотної полярності, мс            | 1 – 99        |
| 8.       | Напруга на дузі, В                                             | 45 – 52       |
| 9.       | Струм чергової дуги, А                                         | 3 – 8         |
| 10.      | Загальні витрати плазмоутворюючого газу (Ar), л/хв.            | 1 – 10        |
| 11.      | Загальні витрати захисного газу (Ar), л/хв.                    | 1 – 10        |
| 12.      | Загальні витрати додаткових газів (Ar), л/хв.                  | 1,5 – 5,0     |
| 13.      | Витрати охолоджувальної води, л/хв.                            | 1 – 10        |
| 14.      | Робоче поле 3-кординатного маніпулятора (X:Y:Z), мм            | 1200:600:200  |
| 15.      | Швидкість переміщення зварювальної головки, м/хв.              | 0...20        |
| 16.      | Точність позиціонування зварювальної головки, мм               | ±0,05         |
| 17.      | Управління комплексом                                          | Мікропроцесор |

Живлення мікроплазмової дуги інтегрованого плазмотрону здійснюють від розташованого в силовій шафі 6 джерела живлення 7. Також у ній розташований плазмовий модуль 9, що відповідає за утворення чергової дуги та підпалення основної плазмової дуги. Охолодження вольфрамового електрода та плазмоутворюючого сопла здійснюється за допомогою блоку автономного охолодження 5. Охолодження джерела 7 здійснюється блоком 8. Загальне керування експериментальним лабораторним комплексом здійснюється за допомогою пульта 10.

Робота комплексу відбувається в такий спосіб. На початку виконується включення обладнання, виведення лазера на необхідний тепловий режим, включення охолодження відповідних систем (наприклад, блоку 5), включення блоків 5 і 8, а також плазмових джерел живлення 7 та модуля 9, включення подачі робочих газів (переважно аргону) за допомогою системи 4. На столі плотера 3 розташовують складально-зварювальний пристрій, в якому закріплюють зразки, що зварюються (рисунок 2.4). Для плоских зразків та зразків-імітаторів використовуються різні складально-зварювальні пристрої. У першому випадку це притискні струбцини або лещата (рисунок 2.6,а), у другому – спеціалізований обертач з мікрометричною індикацією ексцентричності (рисунок 2.6,б).

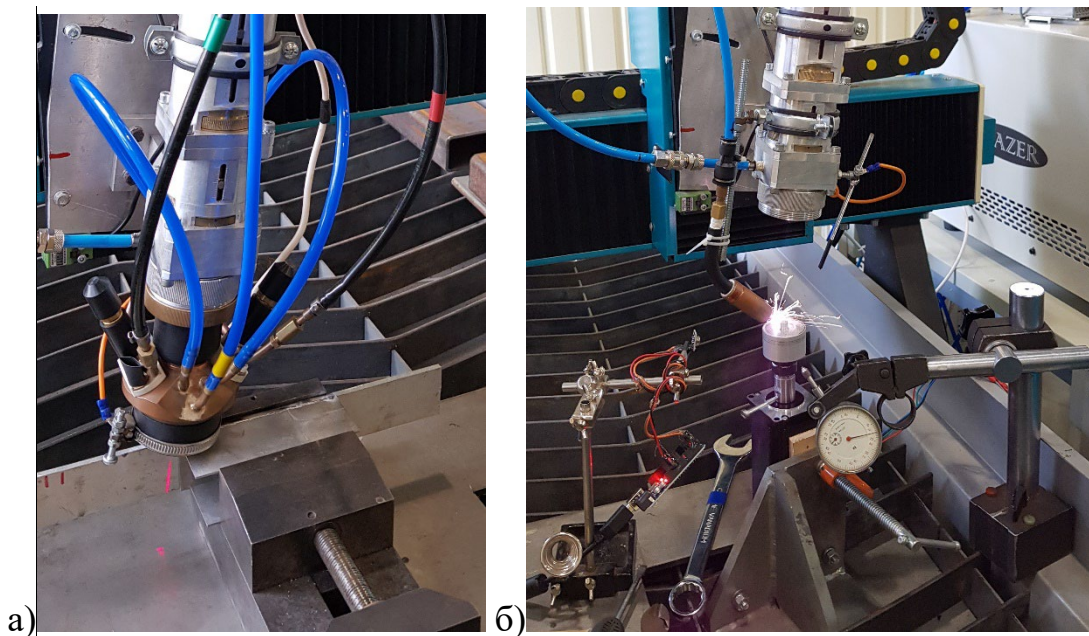


Рисунок 2.6 - Застосовані складально-зварювальні пристрої: а) лещата для фіксації плоских зразків при зварюванні кутових з'єднань; б) обертач із мікрометричною індикацією ексцентричності для зварювання зразків-імітаторів

За допомогою маніпулятора до місця початку зварювання підводять зварювальну голівку. У пульт управління 10 комплексом вводять необхідну інформацію про параметри режиму зварювання. Після початку процесу зварювання виконується в автоматичному режимі. Для лінійних швів здійснюється лінійне переміщення зварювальної головки на необхідну відстань при нерухомих зразках, що зварюються. Для кільцевих швів здійснюється

обертання деталі при нерухомій зварювальній головці. У разі зварювання кільцевих швів їх замикання здійснювалося шляхом переварювання початкової частини шву на довжину 5...10 мм із плавним зменшенням потужності випромінювання.

В процесі виконання експериментів передбачене вимірювання температури для визначення нагріву зразків (рисунок 2.7). При цьому використовували інфрачервоний пірометр моделі GM320 (Benetech Shenzhen Jumaoyuan Science And Technology Co., Ltd., Шеньчжень, КНР) з діапазоном вимірювань  $-50^{\circ}\text{C} \dots +380^{\circ}\text{C}$  та похибкою до  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Вимірювання температури виконували у ближній до шва зоні бічної поверхні зварної конструкції безпосередньо після закінчення процесу зварювання. Дистанція вимірювання  $Y=300 \dots 500$  мм.



Рисунок 2.7 - Схема вимірювання температури нагріву зразків після зварювання за допомогою ручного інфрачервоного пірометра (червона лінія візуалізує лазерний приціл)

Отримані в результаті проведення технологічних досліджень зразки вивчали візуально, за допомогою лупи та мікроскопа. Також зразки розрізали, виготовляли темплети, макро- та мікрошліфи. У ряді випадків наявність/відсутність внутрішніх пор визначали за допомогою радіографічного аналізу.

## 2.4 Методи та обладнання металографічних досліджень

Для проведення металографічного аналізу з отриманих з'єднань вирізали поперечні темплети і виготовляли мікрошліфи. При цьому застосовували кілька видів травлення [94]:

- холодне хімічне розчином 48%-вої плавикової кислоти у воді (0,5 мл на 100 мл, відповідно) або травлення розчином лугу з подальшою нейтралізацією розчином кислоти для виявлення макроструктур;
- холодне хімічне розчином лугу з наступною нейтралізацією для виявлення мікроструктур;
- електролітичне із застосуванням хромової кислоти або сірчанокислоного амонію для виявлення мікроструктур;
- іонно-вакуумне травлення для виявлення мікроструктур.

Металографічні дослідження проводили на наступних ділянках зразків: переплавлений метал шва → лінія сплавлення → зона термічного впливу (ЗТВ) → основний метал. Структуру виконаних з'єднань досліджували методами оптичної (мікроскопи Reichert Polyvar та Neophot-30, рисунок 2.8) та аналітичної растрової електронної (мікроскоп JSM-840 фірми PHILIPS, Голландія, рисунок 2.9) мікроскопії. За допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії визначали хімічний склад фаз і зерен металу (загальний та локальний точковий аналіз). За допомогою оптичної мікроскопії вивчали структурні зміни. Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра LM-400 (серії LECO) (рисунок 2.10).

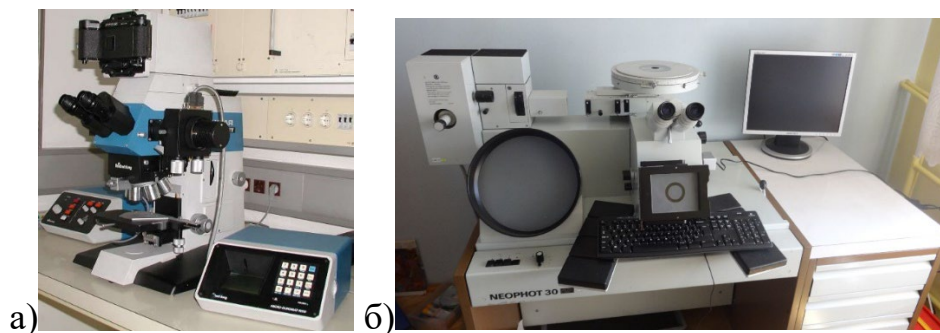


Рисунок 2.8 - Зовнішній вигляд оптичних мікроскопів Reichert Polyvar, а) і Neophot-30, б)



Рисунок 2.9 - Зовнішній вигляд аналітичного растрового електронного мікроскопа JSM-840



Рисунок 2.10 - Зовнішній вигляд мікротвердоміра LM-400 (серія LECO)

## 2.5 Висновки за розділом 2

1. Для вирішення завдання зварювання легких сплавів з використанням лазерного випромінювання була прийнята методика проведення досліджень, яка включає проведення експериментів та вивчення їх результатів на макро- та мікрорівнях. Для реалізації цієї методики були обрані тип та матеріали зразків, підібрані необхідні прилади та обладнання, розроблений лабораторний стенд для проведення технологічних досліджень.

2. Вибране дослідне обладнання дозволяє вивчити результати технологічних досліджень, що проводяться. Для визначення характерних дефектів і структурних особливостей одержуваних з'єднань необхідне проведення низки металографічних досліджень.

### Розділ 3 ОСОБЛИВОСТІ ПРОТІКАННЯ ФІЗИКО-МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТОНКОСТЕННИХ КОНСТРУКЦІЙ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

#### **3.1 Моделювання з'єднання легких сплавів лазерним зварюванням у порівнянні з іншими концентрованими джерелами нагрівання**

Поєднання високого коефіцієнта відбиття, теплопровідності та теплоємності алюмінієвих та берилієвих сплавів призводить до необхідності ретельного підбору оптимальних режимів їхнього лазерного і лазерно-дугового (лазерно-плазмового) зварювання [113]. Результати комплексного розрахункового дослідження можуть допомогти скласти більш повне уявлення про вплив зварювального процесу на матеріали і вироби, що зварюються. У вирішенні такої задачі значну допомогу можуть надати програми SOLIDWORKS Simulation, Visual Weld або Simufact Welding. Такі програми не тільки дозволяють уточнити параметри режиму залежно від розміру зварного шва, але й дозволяють здійснити попередній аналіз рівня напружень, що виникають під час зварювання [114].

При виконанні розрахунків лазерного та лазерно-плазмового зварювання повинна вирішуватися проблема моделювання впливу рухомого лазерного джерела енергії певної потужності. На ділянці дії лазерного випромінювання відбувається нагрів до високих температур. Перехідна теплова модель зварювання повинна враховувати, що температура зменшується від цієї ділянки по товщині деталі з просуванням лазерного джерела нагріву. Максимальна температура створюється в кінцевій точці зварювання, що пов'язане з накопиченням температури до досягнення закінчення процесу зварювання [115].

Термодинамічний вплив лазерного зварювання пов'язаний із властивостями матеріалу та параметрами процесу. Числове моделювання дозволяє розрахувати геометричні параметри зони сплавлення, зони термічного впливу (ЗТВ) та проаналізувати фазові перетворення [116]. Оцінку параметрів

зварювання та аналіз властивостей з'єднання можна проводити числовим моделюванням за допомогою програмного забезпечення Simufact Welding [117]. При такому чисельному розрахунку важливим є вибір джерел тепла, що імітують поглинання лазерного випромінювання та ефект замкової свердловини (keyhol) при зварюванні. Можуть використовуватись різні види таких джерел, наприклад, поверхневі та скінченно-об'ємні [118].

Для імітації процесу лазерного зварювання та прогнозування рівня деформацій зварених виробів доцільно використовувати тривимірну скінченно-елементну модель. При цьому розрахунки мають бути реалізовані в програмі SYSWELD, яка враховує теплові, металургійні та механічні аспекти [119]. Цей програмний продукт дозволяє моделювати процес лазерного зварювання з урахуванням нелінійності процесу теплопередачі, враховувати утворення замкової свердловини та здійснювати поєднаний термомеханічний аналіз перехідних процесів.

Однією з найбільш ефективних моделей теплового джерела, якою можна описати лазерне, мікроплазмове та лазерно-мікроплазмове зварювання, є модель J. Goldak [120]. Відповідно до цієї моделі теплове джерело представлене у вигляді подвійного еліпсоїда. З його допомогою можна виконати скінченно-елементне моделювання трьох зазначених термічних зварювальних процесів. При цьому застосований у ході розрахунків метод скінченних елементів заснований на припущенні, що виріб, який зварюється, можна представити у вигляді елементної сітки – набору елементів, з'єднаних один з одним тільки у вузлах. Взаємозв'язок вузлових змін температури у часі визначається за допомогою температурної матриці елемента. Розрахунок температури у вузлах такої матриці проводиться, виходячи з умови теплової рівноваги тіла, а також початкових та граничних умов.

В роботі [121] приведені рівняння теплового балансу гібридного плазмово-дугового (plasma-MIG) зварювання:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), 0 < z < \delta, t > 0, \quad (3.1)$$

де  $C(T)$ ,  $\rho(T)$ ,  $\lambda(T)$  – ефективна теплоємність металу (з урахуванням прихованої теплоти плавлення), щільність і коефіцієнт теплопровідності, відповідно;

$x$ ,  $y$ ,  $z$  – Декартові координати (теплове джерело переміщується вздовж координати  $x$  із швидкістю  $V$ );

$\delta$  – товщина пластини металу, що зварюється;

$t$  – координата часу.

При заданих температурах, дія яких змінюється у часі, і навіть за відомої загальної температурної матриці, рішення рівняння (3.1) теплової рівноваги (балансу) дозволяє знайти всі вузлові значення температури залежно від часу дії теплового джерела. Потім можуть бути знайдені часові зміни температури у межах кожного елемента температурної матриці. Таким чином, можна визначити просторово-часовий розподіл температур тіла [122].

Рівняння (3.1) може бути використане для виконання розрахунків нагріву виробу при лазерному та лазерно-мікроплазмовому зварюванні. Для цього вважаємо, що на поверхні пластини, яка нагрівається лазерно-мікроплазмовим тепловим потоком  $q_{\Sigma}(t)$  протягом часу  $t$ , утворюється теплове джерело радіусом  $R_{PL}$ , що містить у собі друге теплове джерело з дещо меншим радіусом  $R_{las}$ . У процесі лазерно-мікроплазмового зварювання в даній точці поверхні спочатку відбувається нагрівання мікроплазмовим джерелом, потім сумою лазерного та мікроплазмового джерел і, на завершення, знову мікроплазмовим джерелом. Постійна часу (час впливу теплового джерела) у кожному з цих трьох випадків буде

$$t_1 = \frac{R_{PL}-R_{las}}{V} ; t_2 = t_1 + \frac{2R_{las}}{V} ; t_3 = t_2 + t_1 . \quad (3.2)$$

Тоді на пластину, що зварюється, діятиме тепловий потік

$$q_{\Sigma}(t) \begin{cases} q_{PL}, & 0 < t < t_1 \\ q_{PL} + q_{las}, & t_1 < t < t_2 \\ q_{PL}, & t_2 < t < t_3 \end{cases} ; \quad (3.3)$$

де  $q_{las} = A(T) \frac{P_{las}}{\pi R_{las}^2}$  – тепловий потік, який вводиться лазерним випромінюванням;

$q_{PL} = A(T) \frac{P_{PL}}{\pi R_{PL}^2}$  – тепловий потік, що вводиться дуговою плазмою (мікроплазмою),

$A(T)$  – частка теплового потоку, яка поглинається поверхнею.

Такі теплові потоки створюють у пластині, що зварюється, об'ємне джерело нагріву, форма якого подається у вигляді подвійного еліпсоїда згідно моделі [120]. Для розв'язання задач лазерного або мікроплазмового зварювання тепловий потік  $q_{PL}$  або  $q_{las}$  (відповідно) приймається таким, що дорівнює нулю.

Таким чином, для вирішення завдання попереднього вибору параметрів лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання виробів з алюмінієвих та берилієвих сплавів необхідно накласти елементну сітку на виріб, що зварюється. Для підвищення точності розрахунків треба обрати різний розмір комірок сітки – у зоні зварювання менший (0,2 мм) та більший (1,5 мм) у віддалених областях виробу. В подальшому з урахуванням геометричних факторів та енергетичних параметрів процесу застосовують створену скінченно-елементну модель для визначення розподілу температур у виробі, що зварюється, та побудови температурних полів. За залежностями (3.1)–(3.3) розрахувати такі поля для різних режимів зварювання алюмінієвого та берилієвого виробу, що дозволяють одержувати зварні шви заздалегідь заданої геометрії. Вибрати відповідні режими за критерієм мінімізації температури нагрівання виробу. Для варіанта застосування алюмінієвого сплаву експериментально перевірити підібрані режими, визначити помилку обчислень. У разі допустимої похибки розрахунків можна припустити прийнятність отриманих результатів для берилієвого сплаву.

У даному підрозділі буде проведене моделювання розподілу теплових полів у виробах з алюмінієвих та берилієвих сплавів при лазерному і лазерно-мікроплазмовому зварюванні кільцевих швів у циліндричних виробах, а також вибір на основі такого моделювання параметрів режимів за критеріями глибини проплавлення та температури нагрівання виробу.

При проведенні розрахункового експерименту для визначення розподілу температур та побудови теплових полів у виробі, що зварюється (рисунок 3.1),

застосовували скінченно-елементне моделювання відповідно до вищеописаного підходу. В якості матеріалів циліндричного виробу, що зварюється лазерним і лазерно-мікроплазмовим способами, розглядали алюміній та берилій. Для проведення розрахунків була створена цифрова модель виробу, на яку нанесли елементну сітку (рисунок 3.1,б).

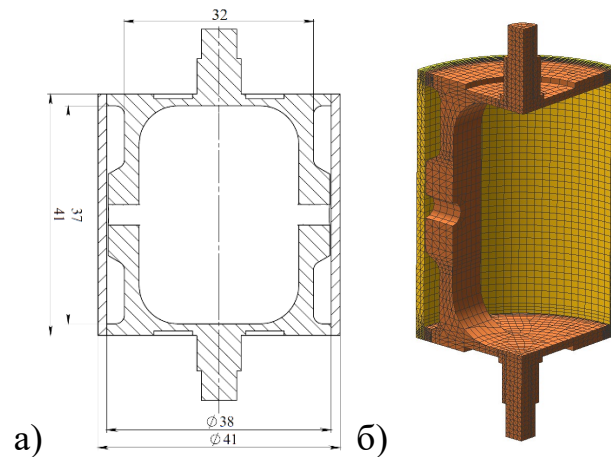


Рисунок 3.1 - Виріб, що зварюється: а) переріз; б) елементна сітка

В якості параметрів режиму зварювання розглядали потужність лазерного випромінювання  $P_{las}$ , швидкість зварювання  $V$ , зварювальний струм  $I$ , напругу на дузі  $U$ . Також по співвідношенню вкладеної енергії до швидкості процесу зварювання визначали умовну погонну енергію  $E$ . Умовність даного параметра пов'язана з тим, що при його визначенні для спрощення не враховували втрати енергії на тепловідведення, відбиття тощо.

Визначали розподіл теплових полів у виробах з берилієвого та алюмінієвого сплавів у процесі та після зварювання різними способами.

Графічний вигляд результатів розрахункової оцінки нагрівання виробу для зварювання берилієвих виробів даними способами наведений на рисунках 3.2-3.5, для алюмінію – на рисунках 3.6-3.9.

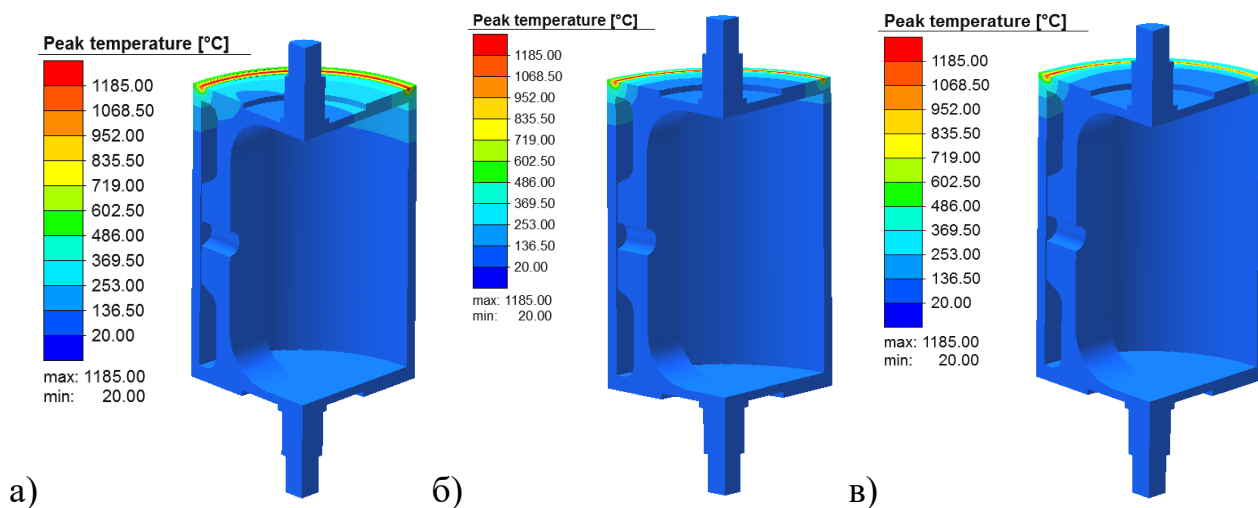


Рисунок 3.2 - Розподіл теплових полів у берилієвому виробі, що зварюється, в процесі лазерного зварювання ( $P=1000$  Вт) зі швидкістю: а) 80 м/год; б) 180 м/год; в) 240 м/год

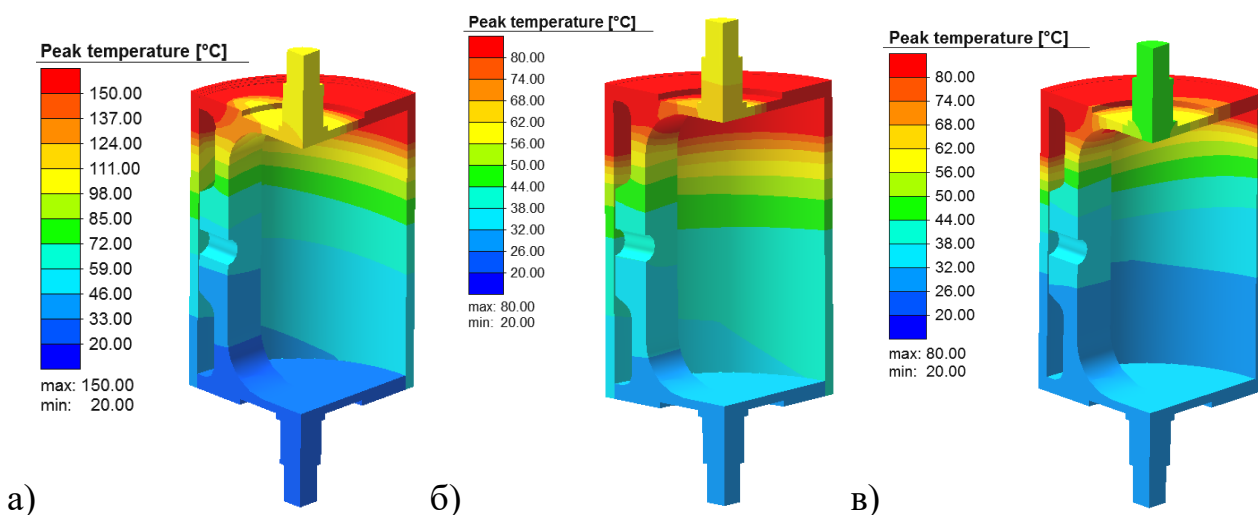


Рисунок 3.3 - Розподіл теплових полів у берилієвому виробі, що зварюється, після закінчення лазерного зварювання ( $P=1000$  Вт) зі швидкістю: а) 80 м/год; б) 180 м/год; в) 240 м/год

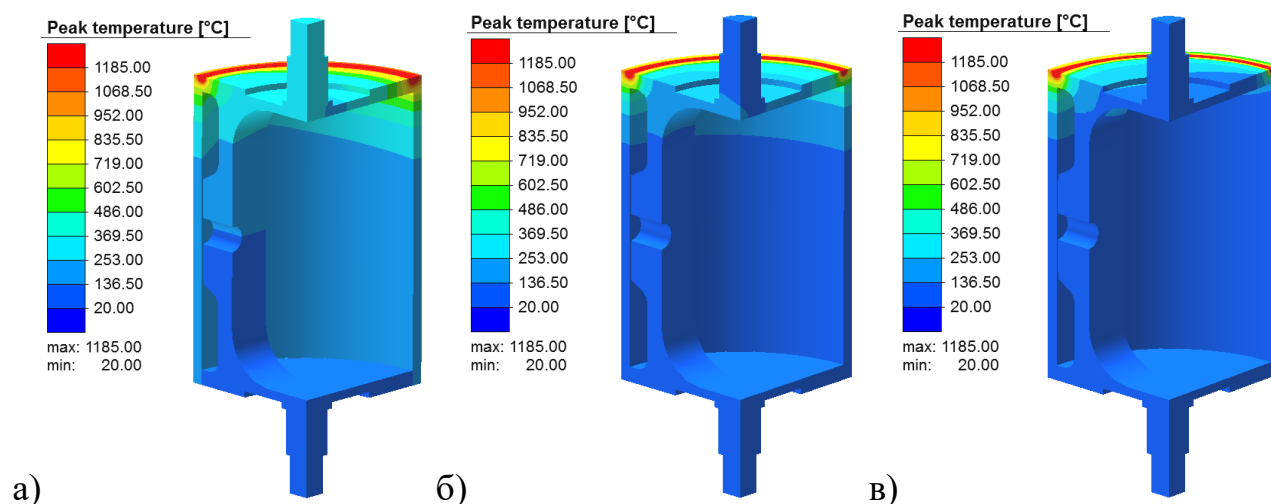


Рисунок 3.4 - Розподіл теплових полів у берилієвому виробі, що зварюється в процесі лазерно-мікроплазмового зварювання ( $P=800$  Вт,  $I=35$  А,  $U=20$  В) зі швидкістю: а) 50 м/год; б) 120 м/год; в) 240 м/год.

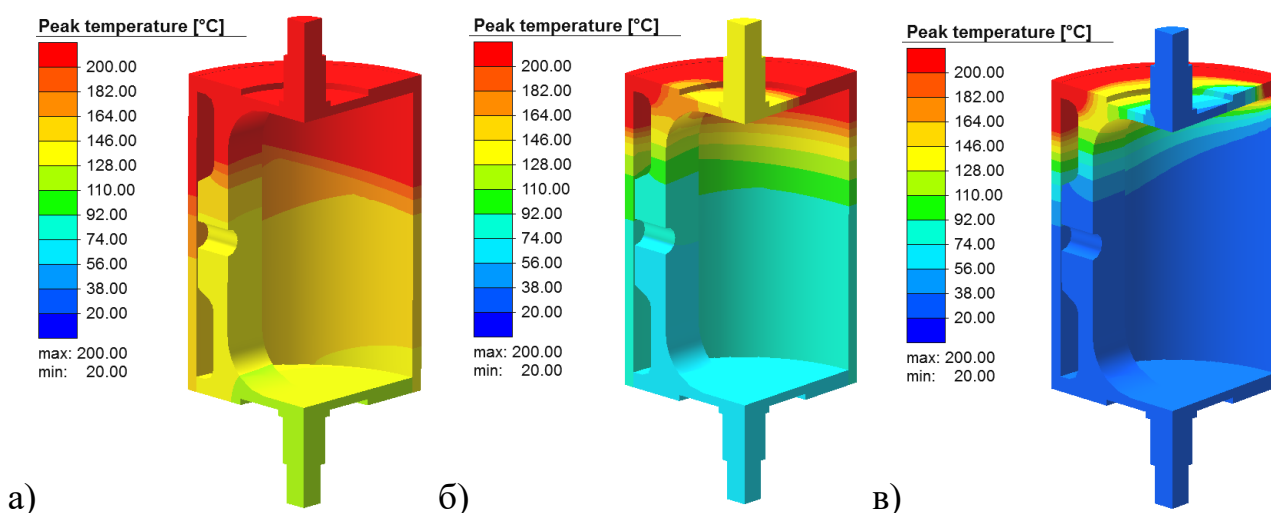


Рисунок 3.5 - Розподіл теплових полів у берилієвому виробі, що зварюється, після закінчення лазерно-мікроплазмового зварювання ( $P=800$  Вт,  $I=35$  А,  $U=20$  В) в аргоні зі швидкістю: а) 50 м/год; б) 120 м/год; в) 240 м/год

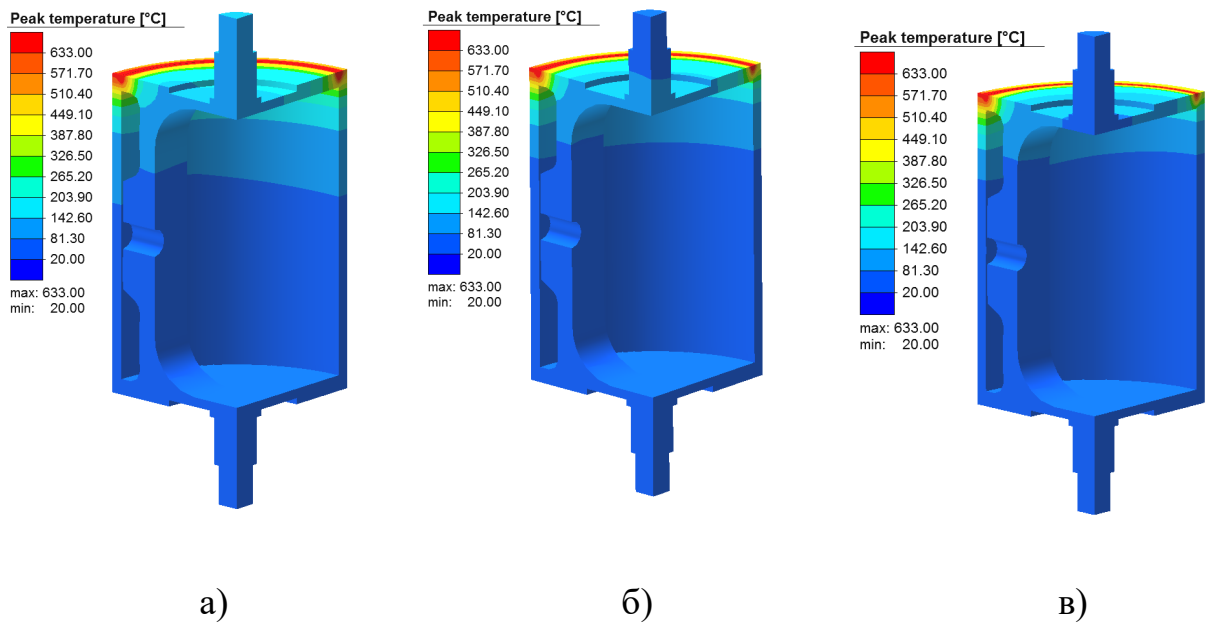


Рисунок 3.6 - Розподіл теплових полів у алюмінієвому виробі, що зварюється, в процесі лазерного зварювання ( $P=500$  Вт) зі швидкістю: а) 120 м/год; б) 180 м/год; в) 240 м/год

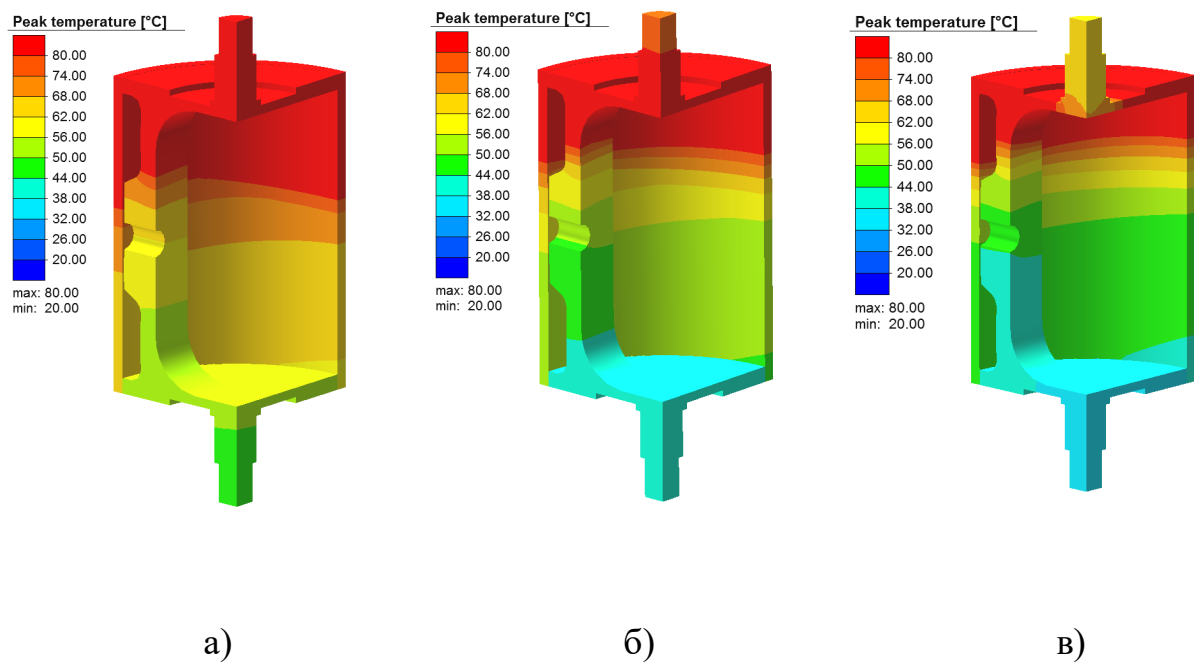
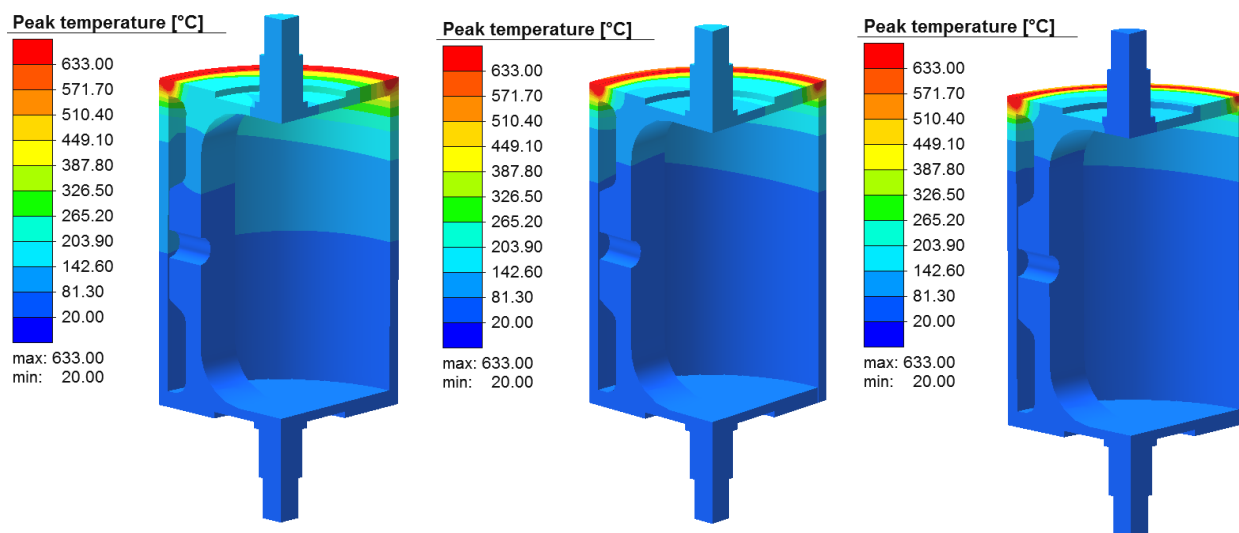


Рисунок 3.7 - Розподіл теплових полів у алюмінієвому виробі, що зварюється, після закінчення лазерного зварювання ( $P=500$  Вт) зі швидкістю: а) 120 м/год; б) 180 м/год; в) 240 м/год

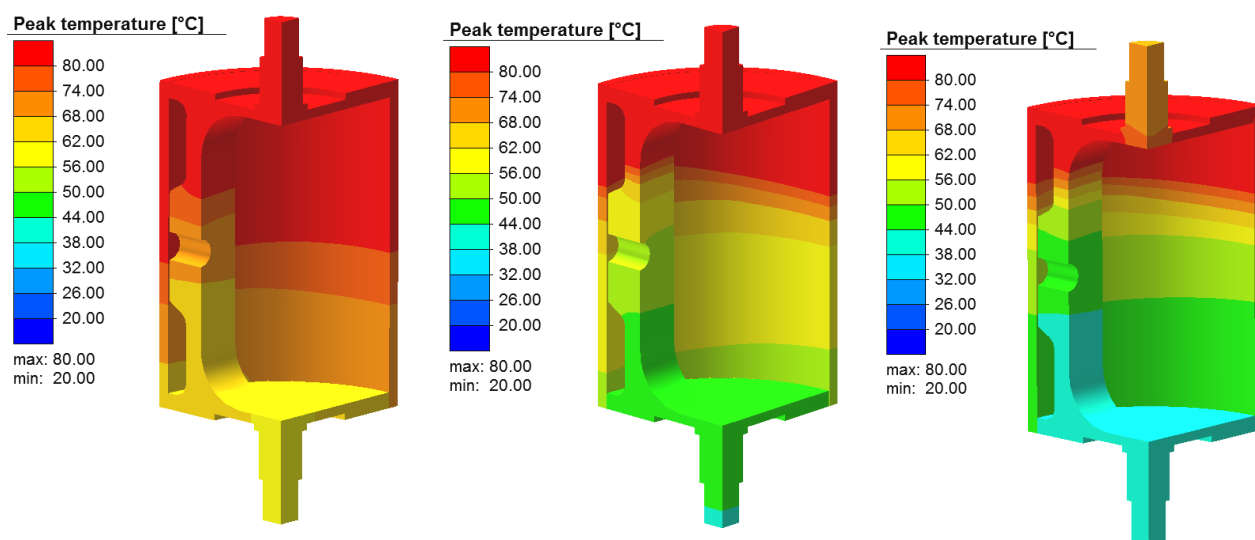


а)

б)

в)

Рисунок 3.8 - Розподіл теплових полів у алюмінієвому виробі, що зварюється в процесі лазерно-мікроплазмового зварювання ( $P=250$  Вт,  $I=45$  А,  $U=26$  В) зі швидкістю: а) 160 м/год; б) 240 м/год; в) 320 м/год



а)

б)

в)

Рисунок 3.9 - Розподіл теплових полів у алюмінієвому виробі, що зварюється, після закінчення лазерно-мікроплазмового зварювання ( $P=250$  Вт,  $I=45$  А,  $U=26$  В) в аргоні зі швидкістю: а) 160 м/год; б) 240 м/год; в) 320 м/год

В таблиці 3.1 наведені узагальнені результати щодо розрахункового визначення параметрів провару та температури нагрівання виробу залежно від режиму зварювання.

Таблиця 3.1 - Розрахункові параметри провару та температури нагрівання деталі залежно від режиму зварювання

| №<br>п/п | Методи і основні режими зварювання                                                                              | Температура,<br>С° | Параметри<br>зварного шва, мм |        |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------|
|          |                                                                                                                 |                    | глибина                       | ширина |
| 1.       | Лазерне зварювання (берилій)                                                                                    |                    |                               |        |
| 1.1.     | - режим 1 ( $P_{las}=1000$ Вт, $V=80$ м/год, $E=30$ Дж/мм)                                                      | 108                | 0,49                          | 0,55   |
| 1.2.     | - режим 2 ( $P_{las}=1000$ Вт, $V=180$ м/год, $E=20$ Дж/мм)                                                     | 65                 | 0,35                          | 0,46   |
| 1.3.     | - режим 3 ( $P_{las}=1000$ Вт, $V=300$ м/год, $E=12$ Дж/мм)                                                     | 49                 | 0,2                           | 0,25   |
| 2.       | Лазерно-мікроплазмове зварювання (берилій)                                                                      |                    |                               |        |
| 2.1.     | - режим 1 ( $P_{las}=800$ Вт, $I_{cp}=35$ А [ $I_{np}/I_{об} =45/25$ А], $U=20$ В, $V=50$ м/год, $E=108$ Дж/мм) | 263                | 0,92                          | 1,9    |
| 2.2.     | - режим 2 ( $P_{las}=800$ Вт, $I_{cp}=35$ А [ $I_{np}/I_{об} =45/25$ А], $U=20$ В, $V=120$ м/год, $E=45$ Дж/мм) | 139                | 0,72                          | 1,1    |
| 2.3.     | - режим 3 ( $P_{las}=800$ Вт, $I_{cp}=35$ А [ $I_{np}/I_{об} =45/25$ А], $U=20$ В, $V=240$ м/год, $E=23$ Дж/мм) | 45                 | 0,55                          | 0,8    |
| 3.       | Лазерне зварювання (алюміній)                                                                                   |                    |                               |        |
| 3.1.     | - режим 1 ( $P_{las}=500$ Вт, $V=120$ м/год, $E=15$ Дж/мм)                                                      | 111                | 1,2                           | 1,33   |
| 3.2.     | - режим 2 ( $P_{las}=500$ Вт, $V=180$ м/год, $E=10$ Дж/мм)                                                      | 106                | 0,8                           | 0,93   |
| 3.3.     | - режим 3 ( $P_{las}=500$ Вт, $V=240$ м/год, $E=7,5$ Дж/мм)                                                     | 100                | 0,45                          | 0,57   |
| 4.       | Лазерно-мікроплазмове зварювання (алюміній)                                                                     |                    |                               |        |
| 4.1.     | - режим 1 ( $P_{las}=250$ Вт, $I_{cp}=45$ А [ $I_{np}/I_{об} =55/35$ А], $U=26$ В, $V=160$ м/год, $E=32$ Дж/мм) | 131                | 1,28                          | 2,5    |
| 4.2.     | - режим 2 ( $P_{las}=250$ Вт, $I_{cp}=45$ А [ $I_{np}/I_{об} =55/35$ А], $U=26$ В, $V=240$ м/год, $E=21$ Дж/мм) | 93                 | 0,9                           | 1,52   |
| 4.3.     | - режим 3 ( $P_{las}=250$ Вт, $I_{cp}=45$ А [ $I_{np}/I_{об} =55/35$ А], $U=26$ В, $V=320$ м/год, $E=16$ Дж/мм) | 75                 | 0,7                           | 1,2    |

Проведені розрахунки показали, що для досягнення необхідних геометричних параметрів зварювальної ванни, а отже і зварного шва, при дотриманні критерію нагрівання деталі не вище за 100...120°C, доцільно дотримуватися режимів зварювання, що відповідають пунктам табл.3.1: 1.1, 2.3, 3.3, 4.3.

### 3.2 Вибір параметрів зварювання тонкостінних виробів з легких сплавів із ненаскрізним проплавленням із застосуванням лазерного випромінювання

При виготовленні ряду виробів авіакосмічної техніки за допомогою зварювання вирішується завдання герметизації внутрішніх порожнин та відсіків з розташованими у них компонентами електронної техніки. У цих випадках необхідно як забезпечити герметичність таких відсіків, так і мінімізувати рівень залишкових деформацій і напружень у конструкції. Для цього необхідно використовувати зварювальні технології, які забезпечують формування порівняно вузьких швів із локальним теплопокладанням. Загальне нагрівання виробу після зварювання не має перевищувати 100...120°C. Таке завдання добре вирішується за рахунок застосування технології лазерного зварювання.

Таким чином, при виборі параметрів режиму лазерного зварювання легких сплавів герметизуючими швами доцільно орієнтуватися на отримання ненаскрізного проплавлення з близькою до трикутної формою. При цьому шов повинен виконуватися з мінімальною погонною енергією без використання матеріалу присадки.

Даний підрозділ присвячений попередньому визначенню параметрів режиму лазерного зварювання герметизуючим швом з ненаскрізним проплавленням тонкостінних фланців циліндричних деталей виробів з легких металів та сплавів на основі Be та Al, що враховує температуру нагрівання після зварювання.

При зварюванні тонкостінних виробів герметичними швами дискові фланці можуть приварюватися до циліндричних конструкцій з легких сплавів. Основні геометричні розміри цих конструкцій показані на рисунку 3.10. До циліндричного корпусу діаметром  $D$ , висотою  $H$  з товщиною стінки  $B$  приварюється дисковий фланець близької товщини (рисунок 3.10,а). Зварний шов (спрощено) має форму трикутника з шириною шва  $b$  і висотою  $h$ , що є глибиною проплавлення (рисунок 3.10,б). Для спрощення розв'язання задачі приймемо припущення:  $D=H=41$  мм,  $B=1,5$  мм.

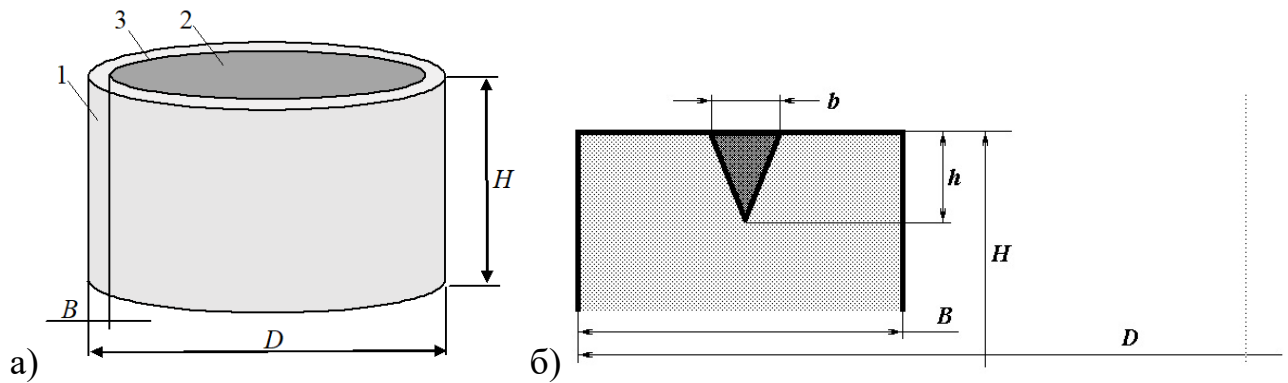


Рисунок 3.10 - Геометричні параметри деталей, що зварюються, і лазерного провару (темна трикутна ділянка): 1 – корпус; 2 – фланець, що приварюється; 3 – зварний шов

Для зниження небезпеки виникнення залишкових деформацій та схильності до утворення гарячих тріщин бажано уникнути підвищення температури деталі, що зварюється, понад 100...120°C. Тому постановку та вирішення теплової задачі приварювання фланця деталі з берилієвого (алюмінієвого) сплаву розділимо на два пов'язані між собою, але досить автономні завдання:

1. Вибір технологічних параметрів зварювання (потужності джерела нагріву, швидкості зварювання) виходячи з геометричних розмірів зварного шва.
2. Визначення температурних параметрів деталі після зварювання.

**1. Вибір технологічних параметрів зварювання.** При визначенні параметрів режиму лазерного зварювання враховуємо форму циліндричної деталі. Визначаємо масу зварюваної деталі, яка являє собою порожній циліндр діаметром  $D$  і товщиною стінки  $B$ , вона становить:

$$m_{piece} = \frac{\pi}{4} \gamma H [D^2 - (D - 2B)^2] + \frac{\pi}{4} \gamma B (D - 2B)^2, \quad (3.4)$$

а маса шва:

$$m_w = \pi \gamma (D - B) S_{weld} \quad (3.5)$$

де  $\gamma$  – щільність металу (берилію або алюмінію),

$S_{weld} = b \cdot h / 2$  – площа перетину зварного шва.

Залежність питомої теплоємності берилію та алюмінію від температури  $T$  представлені на рисунку 3.11 [123]. Зазначимо, що берилій має найбільшу теплоємність серед металів, яка сильно залежить від температури. Як видно з рисунку 3.11, а), значення теплоємності при кімнатній температурі та температурі плавлення відрізняються приблизно втричі (ділянка  $c_{solid}$ ). Більше того, при плавленні відбувається стрибкоподібне зменшення теплоємності. Теплоємність рідкого берилію вивчена слабо, при температурах трохи вище за температуру плавлення, вона постійна [123], тобто не залежить від температури (ділянка  $c_{liquid}$ ). Врахуємо це у тепловому балансі, яким опишемо процес лазерного зварювання.

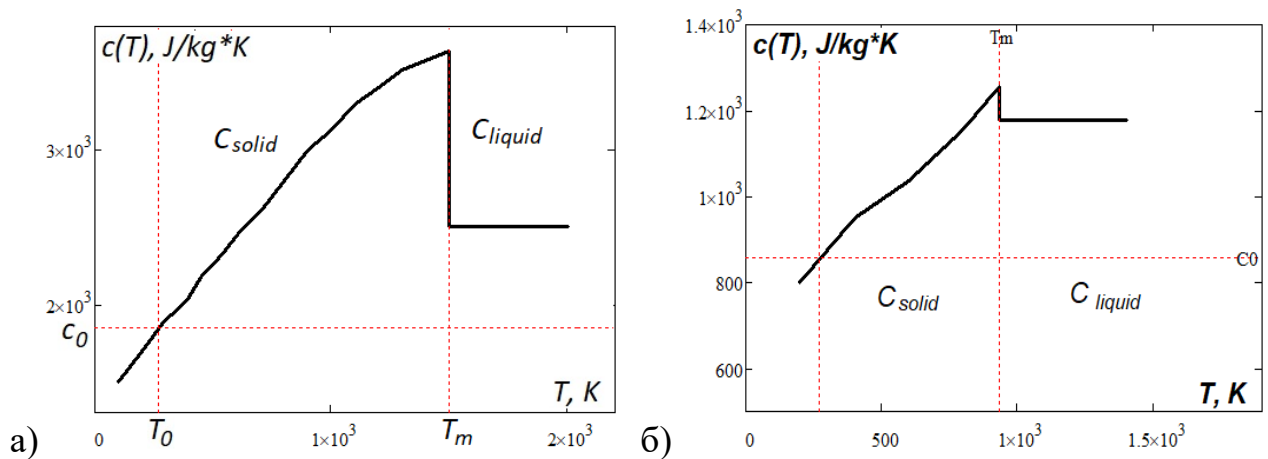


Рисунок 3.11 - Залежність питомої теплоємності  $c$  [Дж/(кг·К)] берилію, а) та алюмінію, б) від температури  $T$  [К]:  $T_0$  – температура навколишнього середовища;  $T_m$  – температура плавлення;  $c_0$  – питома теплоємність за нормальних умов, наведена у довідковій літературі [123]

Вся енергія, яка віддається лазерним випромінюванням металу, що зварюється, витрачається на його нагрівання до температури плавлення, власне плавлення, нагрівання рідкого металу до температури кипіння і часткове випаровування металу. Рівняння теплового балансу має вигляд:

$$(1 - \beta) P_L = \gamma v S_{weld} \left[ \int_{T_0}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT + \xi q_{ev} \right] \quad (3.6)$$

Тут  $P_L$  – потужність випромінювання лазера;

$\beta$  – здатність металу, щодо відбиття випромінювання;

$v$  – швидкість зварювання,

$q_m$  і  $q_{ev}$  – прихована теплота плавлення та пароутворення;

$\xi$  – частина металу, що випарувалася (зазвичай, вона становить 3-5%);

$T_{max}$  – максимальна температура нагрівання металу.

Рівняння (3.6) записано для лазерного зварювання з парогазовим каналом.

При цьому максимальна температура  $T_{max}$  на кілька градусів перевищує температуру кипіння металу  $T_b$ .

Використовуючи рівняння (3.6) теплового балансу можна визначити технологічні параметри зварювання залежно від необхідних розмірів зварного шва. Наприклад, швидкість зварювання визначається глибиною проплавлення та потужністю лазера, що застосований:

$$v = \frac{(1-\beta)P_L}{\gamma S_{weld} \left[ \int_{T_0}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT + \xi q_{ev} \right]} \quad (3.7)$$

За формулою (3.7) були розраховані залежності швидкості лазерного зварювання від глибини проплавлення за різних потужностей лазерного випромінювання (рисунок 3.12). По них легко вибрати такий важливий технологічний параметр, як швидкість зварювання, щоб забезпечити необхідну глибину проплавлення. При цьому слід зважати на деякі обмеження. Так, при малих швидкостях ширина шва може стати більшою за товщину стінки виробу, що неприпустимо. При високих швидкостях можливе виникнення дефектів формування зварного шва типу підрізів та несплавлень.

На рисунку 3.13 зображені залежності швидкості лазерного зварювання від потужності лазера при різних глибинах проплавлення. За допомогою даних, наведених на рисунках 3.12 і 3.13, можна вибрати швидкість зварювання та потужність випромінювання, що дозволяють досягти необхідної глибини проплавлення при забезпеченні відповідних характеристик якості та герметичної форми виробу.

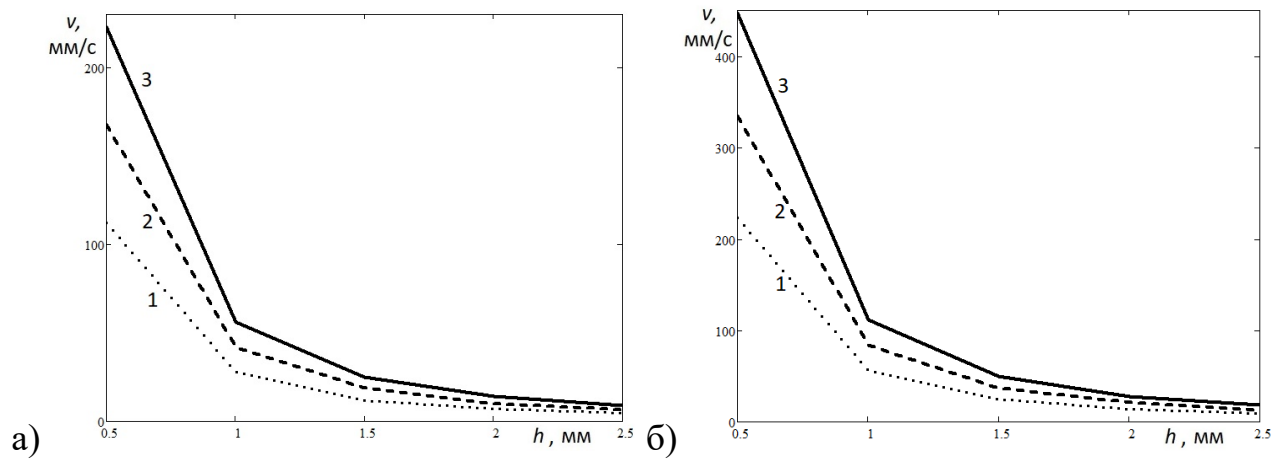


Рисунок 3.12 - Залежності швидкості  $v$  [мм/с] лазерного зварювання берилію, а) і алюмінію, б) від глибини  $h$  [мм] проплавлення при різній потужності  $P_L$  [Вт] лазера: 1 –  $P=500$  Вт; 2 –  $P=750$  Вт; 3 –  $P=1000$  Вт

Рисунок 3.13 свідчить про перспективність застосування технологічних режимів зварювання, при яких швидкість змінюється в межах 30...70 мм/с (108...252 м/год), а потужність лазера – від 500 до 2000 Вт для берилію та від 300 Вт для 1000 Вт для алюмінію. При цьому процес лазерного зварювання забезпечується без застосування додаткових технологічних прийомів та обладнання.

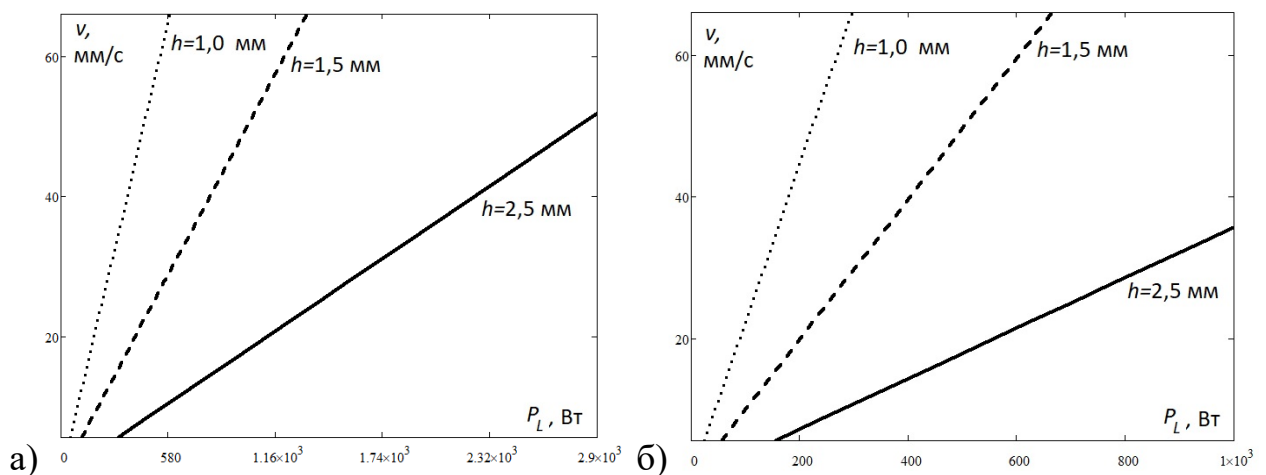


Рисунок 3.13. Залежності швидкості  $v$  [мм/с] лазерного зварювання берилію, а) і алюмінію, б) від потужності  $P_L$  [Вт] лазера при різних глибинах проплавлення  $h$  [мм]

З рівняння (3.6) можна визначити потужність лазера, необхідну для забезпечення необхідної глибини проплавлення. Очевидно, що вона визначається також швидкістю зварювання:

$$P_L = \frac{\gamma v S_{\text{weld}}}{1 - \beta} \left[ \int_{T_0}^{T_m} c_{\text{solid}}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{\text{max}}} c_{\text{liquid}}(T) dT + \xi q_{\text{ev}} \right] \quad (3.8)$$

Попередньо були проведені дослідження по визначенню впливу потужності лазерного випромінювання та швидкості зварювання на глибину проплавлення алюмінію та берилію. На рисунку 3.14 зображені залежності потужності лазера від швидкості лазерного зварювання для різних глибин проплавлення. За цими залежностями можна визначити діапазони потужностей випромінювання, які є необхідними для приварювання з ненаскрізним проплавленням фланців товщиною  $\delta \sim 1,5$  мм до корпусів з не меншою товщиною стінки. Для зварювання берилієвих сплавів це діапазон 800...1200 Вт, для випадку зварювання алюмінієвих сплавів – 400...800 Вт. Такі діапазони потужностей дозволяють зварювати з прийнятними швидкостями, а також покрити досить широкі діапазони глибин проплавлення.

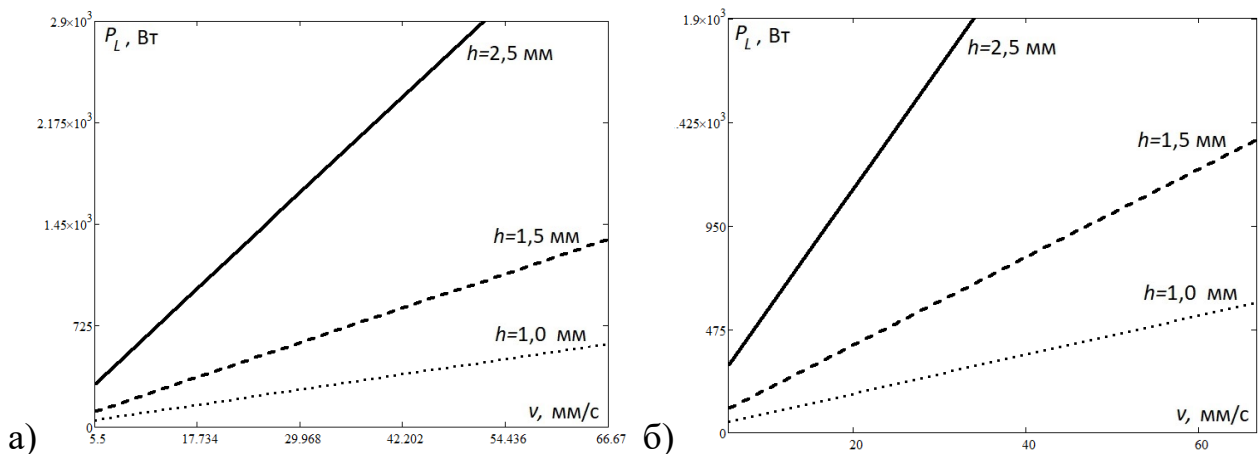


Рисунок 3.14 - Залежність потужності  $P_L$  [Вт] лазера від швидкості  $v$  [мм/с] зварювання берилію, а) і алюмінію, б) при різних глибинах проплавлення  $h$  [мм]

На рисунку 3.15 зображена залежність потужності лазера від глибини проплавлення при різних швидкостях лазерного зварювання. Ці залежності

показують, що для забезпечення провару з гарантованою глибиною 1,0...1,5 мм достатньо застосування лазерного випромінювання потужністю 800...1600 Вт для берилієвих сплавів та 400...1000 Вт для алюмінієвих.

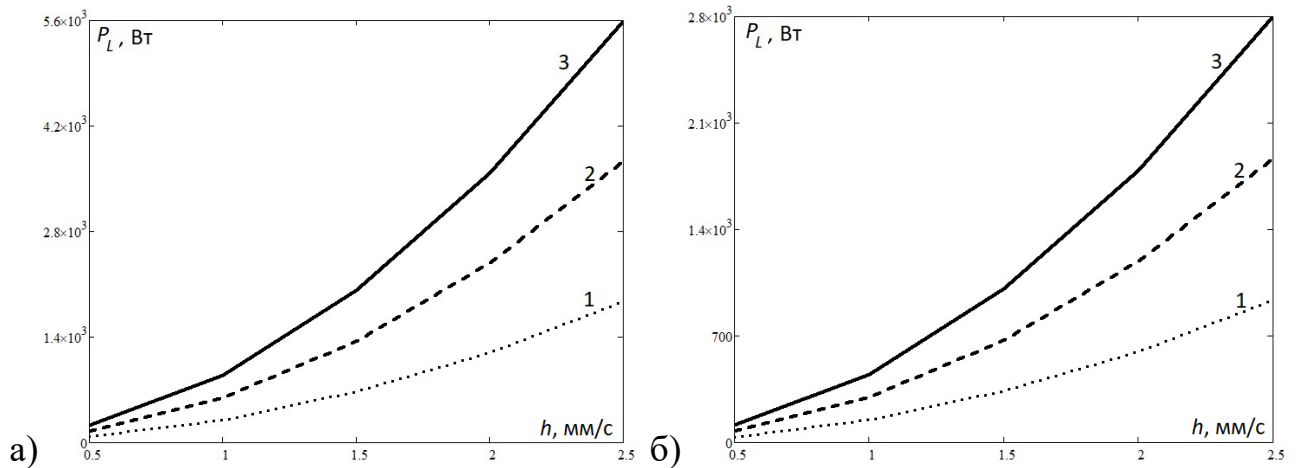


Рисунок 3.15 - Залежність потужності  $P_L$  [Вт] лазера від глибини проплавлення  $h$  [мм] при різних швидкостях  $v$  [мм/с] лазерного зварювання берилію, а) і алюмінію, б): 1 –  $v = 16,67$  мм/с; 2 –  $v = 33,3$  мм/с; 3 –  $v = 50$  мм/с

Таким чином, запропонована методика дозволяє зробити попередні оцінки технологічних параметрів зварювального процесу, а також вибрати обладнання (зокрема, технологічний лазер), необхідне для здійснення процесу зварювання.

**2. Визначення температурних параметрів деталі.** Для визначення температури деталі після зварювання виходитимемо з того, що температура локального нагріву виробу в зоні шва (темна трикутна ділянка на рисунку 3.10) набагато вища за температуру виробу. При охолодженні температура шва та температура виробу вирівнюються. Якщо відзначити середню температуру  $T_x$ , то рівняння балансу енергії виглядає так

$$m_w \left[ \int_{T_x}^{T_m} c_{solid}(T) dT + q_m + \int_{T_m}^{T_{max}} c_{liquid}(T) dT \right] = m_{piece} \int_{T_0}^{T_x} c_{solid}(T) dT \quad (3.9)$$

Іншими словами, енергія, що виділяється при охолодженні як рідкого металу, так і металу, що закристалізувався, спільно з прихованою теплотою

плавлення, витрачається на нагрівання решти виробу від температури навколишнього середовища  $T_0$  до температури  $T_x$ .

Рівняння (3.8) є нелінійним з тією особливістю, що невідома входить до нього як межа інтегрування певних інтегралів. Для вирішення подібних рівнянь ще немає усталених методик. Тому ми модифікували відомі методи чисельного розв'язання нелінійних рівнянь. Однією з проблем, що виникають при вирішенні рівняння (3.9), була проблема значних витрат часу при розрахунках. Це пояснювалося необхідністю на кожному етапі ітерації чисельно знаходити значення двох інтегралів зі змінною межею. Ситуація ускладнювалася тим, що функції, які знаходяться під знаком інтеграла, задавалися таблицею, тобто по точках. Для досягнення прийнятної точності доводилося використовувати кубічну сплайн-інтерполяцію.

Тому в результаті виконання розрахунків був отриманий не дуже великий масив даних (див. таблицю 3.2 і таблицю 3.3), яких все ж таки достатньо для попередніх оціночних висновків. Розрахункові дослідження проводилися за такими постійними параметрами: зовнішній діаметр деталі  $D = 41$  мм; висота деталі  $H = 41$  мм; температура навколишнього середовища  $T_0 = 27^\circ\text{C}$ , для табл.3.3, товщина стінки  $B = 1,5$  мм.

Таблиця 3.2 - Залежність середньої температури  $T_x$  виробу від товщини  $B$  його стінки (ширина зварного шва  $b=1.0$  мм)

| Товщина стінки виробу $B$ , мм | Середня температура $T_x$<br>(Ве сплав), $^\circ\text{C}$ | Середня температура $T_x$<br>(Al сплав), $^\circ\text{C}$ |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1.0                            | 88                                                        | 83                                                        |
| 1.2                            | 80                                                        | 77                                                        |
| 1.5                            | 74                                                        | 71                                                        |
| 2.5                            | 63                                                        | 61                                                        |
| 3.0                            | 61                                                        | 59                                                        |

Таблиця 3.3 - Залежність середньої температури  $T_x$  виробу від ширини зварного шва  $b$  (товщина стінки виробу  $B=1.5$  мм)

| Ширина зварного шва $b$ , мм | Середня температура $T_x$<br>(Ве сплав), °C | Середня температура $T_x$<br>(Al сплав), °C |
|------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 0.5                          | 54                                          | 53                                          |
| 1.0                          | 74                                          | 71                                          |
| 1.2                          | 85                                          | 81                                          |
| 1.5                          | 106                                         | 100                                         |
| 2.5                          | 203                                         | 186                                         |

Аналіз отриманих результатів показав, що можливо обрати такі параметри зварювального процесу, що забезпечують одержання розмірів шва, за наявності яких не досягається перегрів виробу понад 100°C. Так, для зварювання тонкостінних ( $B = 1,5$  мм) виробів бажано, щоб ширина шва не перевищувала 1,5 мм.

Найбільший вплив на нагрівання виробу мають товщина стінки виробу та ширина зварного шва  $b$ . У разі вибору параметрів режиму слід враховувати, що зварювання на підвищених швидкостях сприяє зменшенню ширини шва. Тому перспективним є застосування високошвидкісних режимів для зменшення середньої температури виробу.

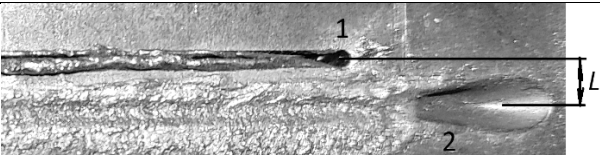
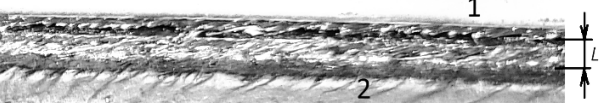
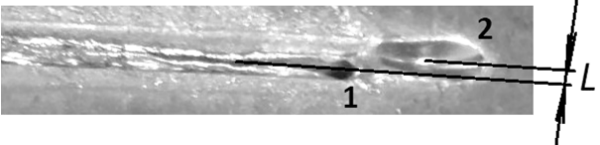
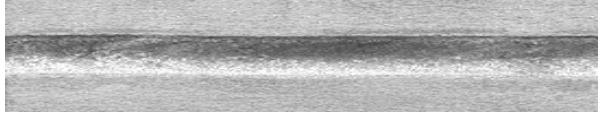
### 3.3 Експериментальна перевірка методики вибору режимів зварювання алюмінієвих сплавів

Експериментальну перевірку методики вибору режимів зварювання проводили на зразках з алюмінієвих сплавів 5083 (1561) та 7075 з інтегрованим плазмотроном власної розробки (розділ 2, п.2.3). За допомогою цієї зварювальної головки здійснювали лазерне та лазерно-плазмове зварювання. При цьому використовували волоконний лазер ( $\lambda=1,06$  мкм) потужністю до 2,0 кВт, джерело живлення (зварювальний струм до 100 А) і плазмовий модуль власної розробки. Лазерно-плазмове зварювання проводили з використанням аргону в якості плазмоутворюючого і захисного газів зі швидкістю 4 м/хв (240 м/год).

Зварювальний струм становив  $I=50$  А при напрузі на дузі  $U=26$  В. Також виконували лазерне зварювання зі швидкістю 3 м/хв (180 м/год).

Відстань між умовною точкою центру анодної плями та віссю лазерного випромінювання змінювали в межах  $L=0\ldots 2$  мм за рахунок відхилення стисненої дуги убік від лазерного пучка потоком плазموутворюючого газу (таблиця 3.4). При цьому стисла електрична дуга розташовувалась збоку і трохи попереду по ходу зварювання щодо сфокусованого лазерного випромінювання. В ході експериментів змінювали потужність лазерного випромінювання  $P_L$  і в кожному випадку визначали глибину провару (рисунки 3.16, 3.17).

Таблиця 3.4 - Результати виконання проварів у пластині 5083 ( $\delta=2$  мм) лазерно-плазмовим способом (1 – лазерний провар  $P_L = 400$  Вт, 2 – плазмовий провар  $I = 50$  А,  $U = 26$  В) з різними значеннями параметра  $L$

| №<br>п/п | $L$ , мм   | Зовнішній вигляд проварів                                                            |
|----------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | $> 1,5$    |  |
| 2.       | 1,5        |  |
| 3.       | 1,0        |  |
| 4.       | $< 0,5$ мм |  |

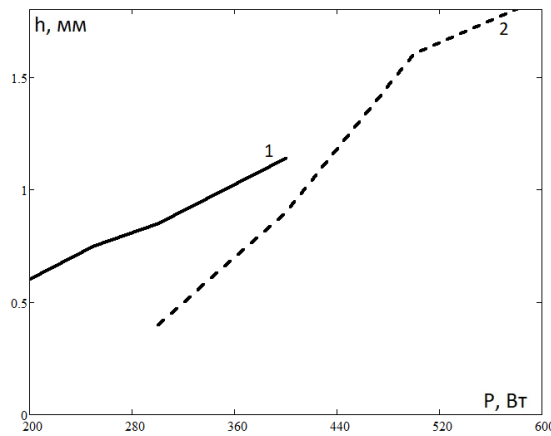


Рисунок 3.16 - Залежність глибини провару  $h$  [мм] зразків сплаву 5083 ( $\delta = 2$  мм) від потужності випромінювання  $P_L$  [Вт] волоконного лазера при зварюванні: 1 – лазерно-плазмовому ( $v_{zb} = 4$  м/хв,  $I = 50$  А,  $U = 26$  В); 2 – лазерному ( $v_{zb} = 3$  м/хв)

Аналіз одержаних результатів свідчить, що при значеннях  $L > 0,9...1,0$  мм спостерігалася роздільна дія лазерного випромінювання та плазми з формуванням двох окремих зварювальних ванн. Їхня спільна дія спостерігалася при  $L < 0,9$  мм. Повноцінний лазерно-плазмовий процес мав місце при  $L < 0,5$  мм.

Приклад впливу параметра  $L$  на зміну глибини проплавлення та формування шва наведений на рисунку 3.17. У разі лазерного зварювання сплаву 7075 при  $P_L=300$  Вт,  $v_{zg}=3$  м/хв досягається глибина проплавлення  $h \approx 0,4$  мм (рисунок 3.17,а). У випадку лазерно-плазмового зварювання на режимі  $P_L=300$  Вт,  $I=50$  А,  $U=26$  В,  $v_{zg}=4$  м/хв з параметром  $L=0,6$  мм глибина проплавлення  $h \approx 0,7$  мм (рис.3.17,б). З рисунку 3.17,б видно, що лазерне випромінювання фокусується ліворуч, а плазмова дуга зміщена в праву сторону і частково оплавляє край кутового стику. По всій висоті проплавлення спостерігається гаряча тріщина. У разі лазерно-плазмового зварювання на тому ж режимі при  $L=0,4$  мм (лазерне випромінювання фокусується правіше, а плазмова дуга зміщена в ліву сторону) глибина проплавлення зростає до  $h \approx 1,0$  мм (рис.3.17,в). Зазначимо, що в цьому випадку тріщиноутворення не спостерігається, покращується формування верхнього валика.

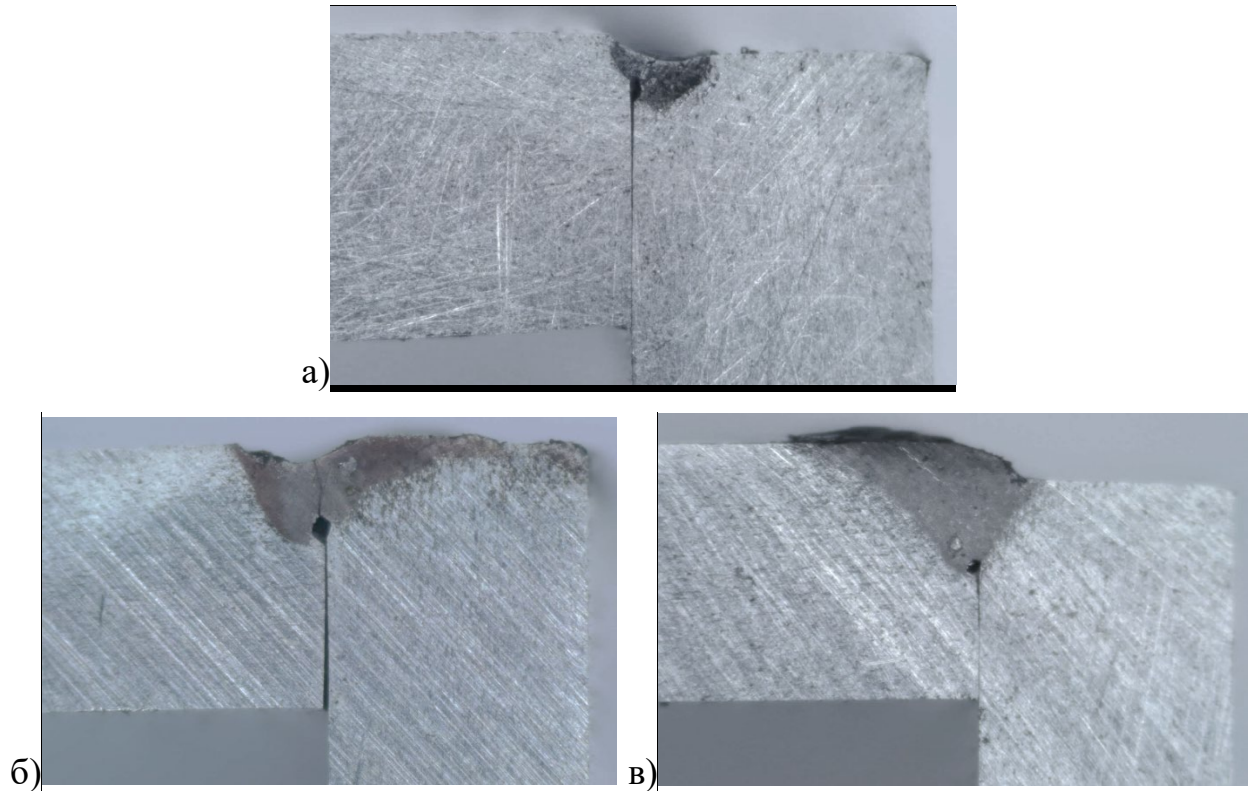


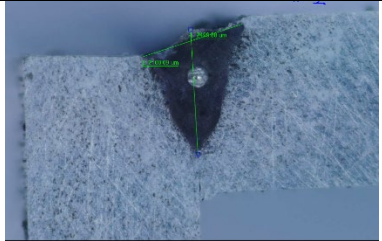
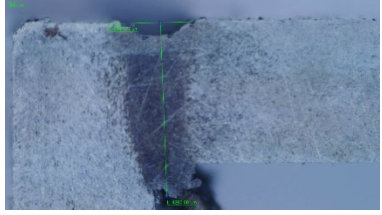
Рисунок 3.17 - Поперечні перерізи швів, виконаних лазерним (а) та лазерно-плазмовим (б, в) способами при зварюванні сплаву 7075 з параметрами режиму:  
 а)  $P_L = 300$  Вт,  $v_{зв} = 3$  м/хв; б)  $P_L = 300$  Вт,  $I = 50$  А,  $U = 26$  В,  $v_{зв} = 4$  м/хв,  $L = 0,6$  мм; в)  $P_L = 300$  Вт,  $I = 50$  А,  $U = 26$  В,  $v_{зв} = 4$  м/хв,  $L = 0,4$  мм

Вплив плазмової складової лазерно-мікроплазмового процесу призводив до підвищення глибини проплавлення на 30...60% без урахування різниці швидкостей зварювання (рисунок 3.16). При однакових швидкостях зварювання можна прогнозувати збільшення глибини провару при лазерно-мікроплазмовому зварюванні на 40...75% порівняно з лазерним процесом. Відповідно до рисунку 3.15 при значеннях  $P_L = 400$  Вт у лазерному та лазерно-мікроплазмовому процесах, різниця в глибинах провару повинна становити ~35%. Відповідно до рисунку 3.16 експериментально отримане значення становить ~30%. Можна припустити, що помилка обчислень близька до 15...20%. У технологічних розрахунках така помилка вважається прийнятною. Це дозволяє застосовувати

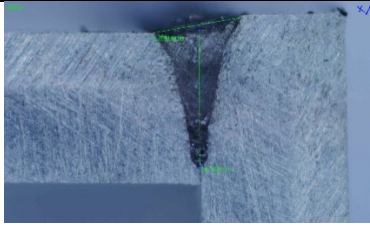
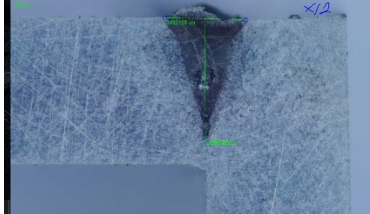
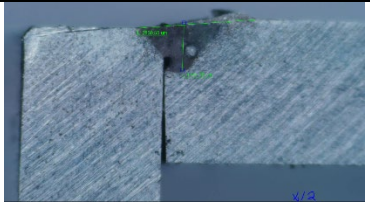
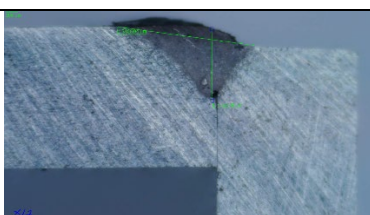
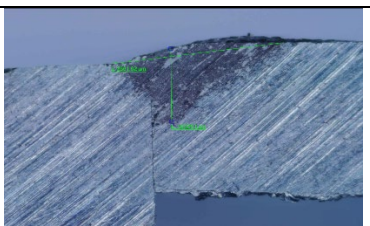
дану методику для прогнозування лазерного та лазерно-плазмового зварювання берилієвих сплавів.

Для перевірки отриманих у п.3.1 результатів був проведений ряд технологічних експериментів на виробках з алюмінієвого сплаву 1915 (7005) на описаних вище лабораторних стендах (п.2.3). Отримані результати зведені у таблицю 3.5. Порівняння розрахункових даних з експериментальними показало, що відмінність лежить у межах 15...20%. Цей показник вважається прийнятним для оціночних технологічних розрахунків, зокрема у разі зварювання берилію та його сплавів.

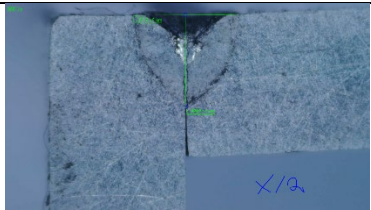
Таблиця 3.5 - Результати отримання з'єднань деталей зі сплаву 1915 (7005) з товщиною стінки 1,5 мм в залежності від режиму зварювання

| №<br>п/п                  | Параметри режиму                                  | Параметри шва, мм:<br>ширина шва В, глибина<br>провару h | Поперечний перетин шва                                                                |
|---------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Лазерне зварювання</b> |                                                   |                                                          |                                                                                       |
| 1.                        | $P_{las}=500$ Вт, $V=210$ м/год, $E=8,6$<br>Дж/мм | $B=1,25$ мм, $h=1,05$ мм                                 |  |
| 2.                        | $P_{las}=650$ Вт, $V=180$ м/год, $E=13$<br>Дж/мм  | $B=1,12$ мм, $h=2,14$ мм                                 |  |
| 3.                        | $P_{las}=500$ Вт, $V=180$ м/год, $E=10$<br>Дж/мм  | $B=1,24$ мм, $h=1,73$ мм                                 |  |

## Продовження таблиці 3.5

|                                         |                                                                     |                          |                                                                                       |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 4.                                      | $P_{las}=500$ Вт, $V=180$ м/год, $E=10$ Дж/мм                       | $B=1,03$ мм, $h=1,56$ мм |    |
| 5.                                      | $P_{las}=500$ Вт, $V=210$ м/год, $E=8,6$ Дж/мм                      | $B=1,24$ мм, $h=1,73$ мм |    |
| 6.                                      | $P_{las}=400$ Вт, $V=240$ м/год, $E=6$ Дж/мм                        | $B=0,7$ мм, $h=0,72$ мм  |    |
| <b>Лазерно-мікроплазмове зварювання</b> |                                                                     |                          |                                                                                       |
| 7.                                      | $P_{las}=200$ Вт, $I=50$ А, $U=26$ В, $V=240$ м/год, $E=22,5$ Дж/мм | $B=1,42$ мм, $h=0,57$ мм |  |
| 8.                                      | $P_{las}=200$ Вт, $I=50$ А, $U=26$ В, $V=240$ м/год, $E=22,5$ Дж/мм | $B=1,32$ мм, $h=0,65$ мм |  |
| 9.                                      | $P_{las}=250$ Вт, $I=45$ А, $U=26$ В, $V=240$ м/год, $E=21$ Дж/мм   | $B=1,7$ мм, $h=0,88$ мм  |  |
| 10.                                     | $P_{las}=250$ Вт, $I=45$ А, $U=26$ В, $V=210$ м/год, $E=24,4$ Дж/мм | $B=1,83$ мм, $h=0,84$ мм |  |

Продовження таблиці 3.5

|     |                                                                               |                          |                                                                                     |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 11. | $P_{\text{las}}=300$ Вт, $I=45$ А, $U=26$ В,<br>$V=180$ м/год, $E=29,4$ Дж/мм | $B=1,31$ мм, $h=1,14$ мм |  |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|

Як видно з порівняння параметрів режимів (таблиця 3.1), для зварювання берилію та його сплавів необхідно підвищення потужності теплового джерела порівняно зі зварюванням алюмінієвих сплавів. При однакових геометричних параметрах швів таке підвищення може бути до 2 разів. Це пов'язано з відмінністю питомої теплопровідності. Теплопровідність берилію приблизно в 3 рази перевищує теплопровідність алюмінію – як за нормальних умов, так і з підвищенням температури [124]. Підвищення потужності теплового джерела призводить до підвищення вкладення енергії у виріб, що зварюється. Це, у свою чергу, може негативно впливати як на перегрів виробу, так і на його залишкові деформації. Проведені розрахункові дослідження показали, що для швів малих розмірів (з неповним проплавленням) можна мінімізувати перегрів виробу, який зварюється, не вище  $100^{\circ}\text{C}$ . У разі потреби формування шва з повним проплавленням виріб перегріється до високих температур. У цьому випадку доцільно окремо дослідити питання критичності зварювальних деформацій, що виникають.

Зіставлення результатів лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання показали наступне (див. шліфи в таблиці 3.5). При лазерному зварюванні з неповним проплавленням у кореневій або середній частині шва можуть утворюватися внутрішні пори. Пори в кореневій зоні провару пов'язані з особливістю існування парогазового каналу, а саме з процесом його періодичного схлопування та утворення [125]. Утворення пор у середній частині шва переважно пов'язане із погіршенням умов газового захисту зварювальної ванни.

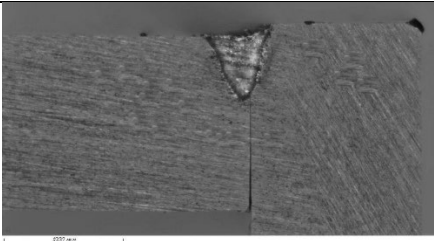
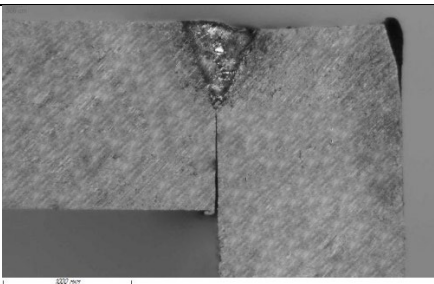
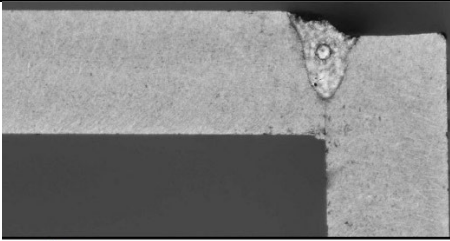
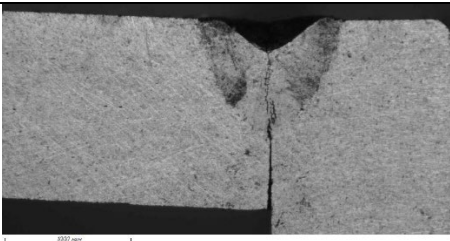
Лазерно-мікроплазмове зварювання дозволяє поліпшити формування шва. При цьому майже відсутнє пороутворення, а шви мають ширину, яка дозволяє усунути небезпеку оплавлення кутової зони з'єднання. Також лазерно-плазмове зварювання відрізняється меншою схильністю до утворення пор у корені шва, ніж лазерне зварювання. Це пов'язано із стабілізацією існування пароголового каналу при наявності дугового джерела енергії [126]. Поліпшення формування шва та зниження загрози утворення дефектів виправдовують підвищене вкладення енергії при лазерно-плазмовому зварюванні в порівнянні з лазерним. Лазерно-плазмове зварювання, як і лазерне, дозволяє сформувати шов з необхідними геометричними параметрами без перегріву виробу понад  $100^{\circ}\text{C}$ .

Для виконання експериментальної перевірки розрахунків підрозділу 3.2 на вищеописаному лабораторному стенді використовували зразки з алюмінієвих сплавів 7005 (1915) і 7075 системи Al-Zn-Mg-Cu (таблиці 2.1, 2.2). З цих сплавів виготовляли плоскі та циліндричні зразки з товщиною стінки  $B=1,5$  мм. Плоскі зразки розміром  $50\times 50\times 1,5$  мм зварювали лінійними кутовими швами, циліндричні зразки розміром  $\varnothing 41\times 41$  мм зварювали кільцевими швами.

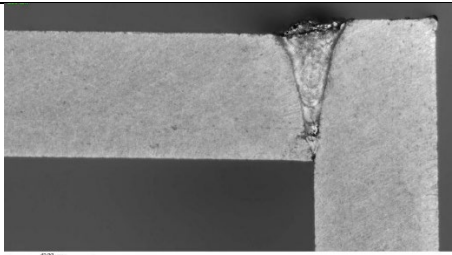
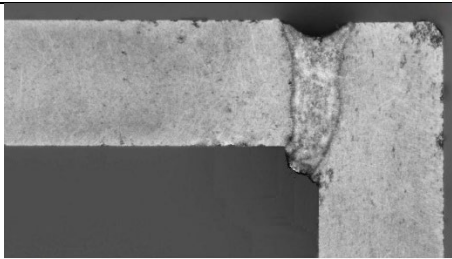
Зварювання зразків проводили згідно з розрахованими параметрами режимів (рисунки 3.12-3.15). Так, для отримання з'єднання з глибиною проплавлення  $h=0,6$  мм за даними рисунку 3.14,б буде потрібна швидкість  $66,7$  мм/с ( $240$  м/год) при потужності випромінювання до  $400$  Вт. За даними рисунку 3.15,б) при швидкості зварювання  $50$  мм/с ( $180$  м/год) потужність випромінювання має бути не більше  $P_L=350\dots 400$  Вт. Під час проведення експерименту було обрано потужність  $P_L=400$  Вт та швидкість  $v=66,7$  мм/с ( $240$  м/год). В результаті був отриманий шов глибиною  $h=0,6$  мм і шириною  $b=0,6$  мм (таблиця 3.6).

Таким чином, згідно з рисунками 3.12,б - 3.15,б був обраний ряд параметрів режимів, згідно з якими проводилися експерименти з лазерного зварювання. Режими та отримані результати (у вигляді макрошліфів поперечних перерізів швів) представлені в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 - Порівняння розрахункових параметрів режимів з експериментальними результатами лазерного зварювання сплаву 7075

| №<br>п/п | Варіанти<br>розрахункових<br>параметрів режиму<br>/ h [мм]                                        | Експериментально<br>встановлені<br>параметри режиму<br>/ h, b [мм] | Похибка<br>(за<br>параметр<br>ом h), % | Результат                                                                             |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | 2.                                                                                                | 3.                                                                 | 4.                                     | 5.                                                                                    |
| 1.       | 1) $P_L=300$ Вт, $v=67$<br>мм/с<br>2) $P_L=500$ Вт, $v=200$<br>мм/с<br>/<br>$h=0,5 \dots 0,53$ мм | $P_L=350$ Вт, $v=67$<br>мм/с<br>/<br>$h=0,51$ мм; $b=0,5$ мм       | 2...4                                  |    |
| 2.       | 1) $P_L=350$ Вт, $v=67$<br>мм/с<br>2) $P_L=500$ Вт, $v=150$<br>мм/с<br>/<br>$h=0,55 \dots 0,6$ мм | $P_L=400$ Вт, $v=67$<br>мм/с<br>/<br>$h=0,63$ мм; $b=0,62$<br>мм   | 5...15                                 |   |
| 3.       | 1) $P_L=500$ Вт, $v=50$<br>мм/с<br>2) $P_L=750$ Вт, $v=80$<br>мм/с<br>/<br>$h=1,0$ мм             | $P_L=500$ Вт, $v=58$<br>мм/с<br>/<br>$h=1,1$ мм; $b=0,86$ мм       | 10                                     |  |
| 4.       | 1) $P_L=500$ Вт, $v=42$<br>мм/с<br>2) $P_L=750$ Вт, $v=66$<br>мм/с<br>/<br>$h=1,2 \dots 1,3$ мм   | $P_L=500$ Вт, $v=50$<br>мм/с<br>/<br>$h=1,18$ мм; $b=1,28$<br>мм   | 2...9                                  |  |

Продовження таблиці 3.6

|    |                                                                                           |                                                            |        |                                                                                     |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 5. | 1) $P_L=500$ Вт, $v=28$ мм/с<br>2) $P_L=750$ Вт, $v=33$ мм/с<br>/<br>$h=1,3 \dots 1,5$ мм | $P_L=600$ Вт, $v=50$ мм/с<br>/<br>$h=1,34$ мм; $b=0,86$ мм | 3...11 |  |
| 6. | 1) $P_L=500$ Вт, $v=25$ мм/с<br>2) $P_L=750$ Вт, $v=37$ мм/с<br>/<br>$h=1,5 \dots 1,6$ мм | $P_L=650$ Вт, $v=33$ мм/с<br>/<br>$h=1,5$ мм; $b=0,77$ мм  | 2,5    |  |

При виконанні експериментів зі зварювання на наведених у таблиці 3.6 режимах, вимірювали температури нагріву зразків у ближній до шва зоні бічної поверхні зварної конструкції (рисунк 2.7).

Для отримання швів із глибиною проплавлення  $h \sim 1,0$  мм згідно з даними таблиці 3.6 виконали зварювання зі швидкістю  $v=58$  мм/с при потужності випромінювання 500 Вт. Виконані вимірювання показали, що температура знаходилася в межах  $70 \dots 75^\circ\text{C}$ , що з похибкою до 6% відповідає даним таблиць 3.2 і 3.3. Наступні експерименти показали, що розбіжність розрахункових та дослідних даних щодо нагрівання зварених зразків не перевищує 10%.

Порівняння таких розрахункових та експериментально встановлених параметрів режимів як потужність  $P_L$  та швидкість  $v$  зварювання, а також глибини провару  $h$  (табл.3.6) дозволяє говорити про те, що згідно із запропонованою розрахунковою методикою параметри режиму лазерного зварювання легких сплавів можуть бути визначені з похибкою до 15%. Така точність прийнятна у технологічних розрахунках.

Проведені технологічні дослідження показали прийнятний рівень похибки у запропонованій розрахунковій методиці. Можна припустити, що розбіжність у

розрахункових та експериментальних результатах пов'язана, у тому числі, з наявністю відбивної здатності  $\beta$  основного металу. Цей показник залежить як від температури нагрівання металу [112], так і від наявності на крайках, що зварюються, залишків оксидної плівки, яка поглинає лазерне випромінювання значно краще чистого алюмінію [127]. Прикладом є провар на глибину  $h \sim 1,18$  мм (п.4 таблиці 3.6). У цьому випадку спостерігалось значне збільшення об'єму переплавленого металу, що виражається у розширенні зварного шва, без суттєвого збільшення потужності випромінювання. Такий ефект може пояснюватися зниженням втрат випромінювання (коефіцієнта  $\beta$ ) через попадання у зварювальну ванну оксидної плівки  $Al_2O_3$ .

Дослідження виконаних на сплавах 7005 та 7075 швів показали, що характерними дефектами є особливості їх формування, внутрішні пори та тріщини. Пори утворювалися не у всіх швах, а лише у певних випадках (наприклад, пп.2 та 3 таблиці 3.6). Їх розмір знаходиться в межах 0,05...0,2 мм, розташування – переважно у середній частині швів. Розташування пор уздовж шва носить нерегулярний характер, відстань між ними коливається від 2,5 мм до 50 мм і більше (рисунок 3.18). Однак місця їх виникнення переважно збігаються зі смугами прокатки листів, що зварюються. Можна припустити, що виникнення цих пор пов'язане з потраплянням у зварювальну ванну дрібних частинок оксидної плівки  $Al_2O_3$ , а також повітря. Останнє потрапляє з нижньої сторони зварюваного стику, який не має газового захисту. Тріщини утворювалися переважно при ненаскрізному зварюванні сплаву 7075 у кореневій частині швів (див. п.4, табл.3.6). Схильність до їхнього утворення збільшується зі збільшенням ширини швів. Ймовірно, не повністю проварений стик працює як концентратор напружень, що в поєднанні з залишковими зварювальними напруженнями сприяє тріщиноутворенню.

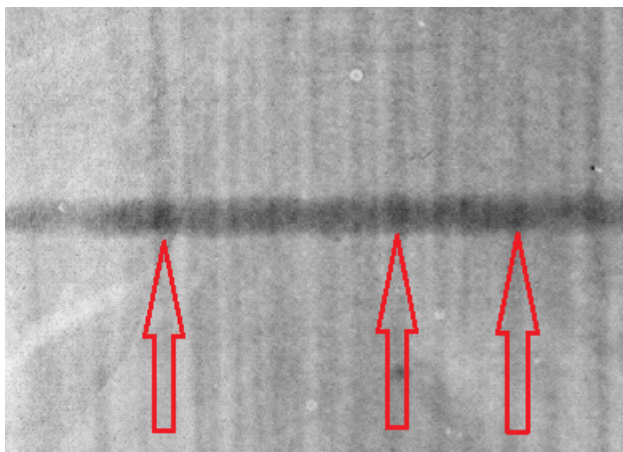


Рисунок 3.18 - Визначення за результатами радіографічного контролю пор у шві (провар у листі сплаву 7075, виконаний за режимом п.3, таблиця 3.6)

Ще одним підтвердженням прийнятності запропонованої розрахункової методики можна вважати досить точне (з похибкою до 10%, таблиці 3.2, 3.3) визначення температури післязварювального нагрівання тонкостінних виробів, розміри яких вказані вище. Для перевірки прийнятності розрахункової методики при зварюванні берилієвих сплавів було проведене порівняння розрахункових результатів із деякими літературними даними.

### **3.4 Металографічні дослідження результатів зварювання, визначення характерних дефектів та шляхів їх усунення**

Цей підрозділ присвячений дослідженню металургійних особливостей формування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів ненаскрізними стиковими швами, схильності до утворення характерних дефектів та можливості їх усунення. Дослідження щодо формування з'єднань проводили на отриманих лазерним та лазерно-мікроплазмовим способами зразках зі сплаву 7075.

З'єднання отримували шляхом зварювання встик з ненаскрізним проплавленням пластин товщиною 1,5 мм з високоміцного алюмінієвого сплаву 7075. Була прийнята наступна методика отримання та дослідження таких з'єднань:

- підбір параметрів режимів за критерієм формування з'єднання з поверхнею шва без характерних дефектів у вигляді поверхневих пор, тріщин та підрізів і виконання зварювання обраними способами;
- виготовлення темплетів для металографічних досліджень методами оптичної та растрової електронної мікроскопії;
- визначення розмірів шва, зони термічного впливу (ЗТВ) та величини зерен металу в цих зонах;
- вимірювання мікротвердості (на 1/3 глибини проплавлення) при навантаженні 100 гр., визначення структури та дефектів металу шва та ЗТВ;
- визначення наявності оксидних включень та зміни вмісту Mg, Mn, Zn у металі шва та ЗТВ у порівнянні з основним металом;
- визначення наявності та розмірів внутрішніх пор та тріщин, а також причин їх виникнення.

У таблиці 3.7 наведені як літературні дані з хімічного складу сплаву 7075, так і експериментально отримані авторами. Останні є вимірюваннями за окремими елементами, які були виконані методом рентгеноспектрального мікроаналізу. Цим методом визначали вміст деяких елементів сплаву як інтегрально, так і в об'ємі окремих зерен. Зі сплаву 7075 виготовляли пластини розміром 50×50×1,5 мм, які зварювали встик, орієнтуючись на максимально однакову глибину проплавлення порядку 0,5...0,7 мм.

Таблиця 3.7 - Вміст елементів (мас. %) у високоміцному алюмінієвому сплаві 7075

| Тип визначення           | Al              | Si            | Fe             | Cu            | Mn            | Mg            | Cr             | Zn             | Ti         | Інше    |
|--------------------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|------------|---------|
| Марочник сплавів         | основа          | до 0,40       | до 0,50        | 1,2–<br>2,0   | до<br>0,30    | 2,1–2,9       | 0,18–<br>0,28  | 5,1–6,1        | до<br>0,20 | до 0,15 |
| Загальний аналіз         | 89,26–<br>90,74 | 0,26–<br>0,95 | –              | 1,71–<br>1,96 | 0,06–<br>0,43 | 0,98–<br>1,28 | –              | 5,84–<br>6,87  | –          | –       |
| Аналіз в об'ємі зерен    | 89,35–<br>90,74 | 0,26–<br>0,68 | –              | 1,42–<br>1,91 | 0,05–<br>0,28 | 0,95–<br>1,28 | –              | 6,12–<br>6,97  | –          | –       |
| Включення в об'ємі зерен | –               | 0,08–<br>1,7  | 0,61–<br>30,27 | 3,13–<br>9,29 | 1,26–<br>2,93 | 0,04–<br>5,76 | 1,69–<br>12,83 | 1,49–<br>13,31 | –          | –       |

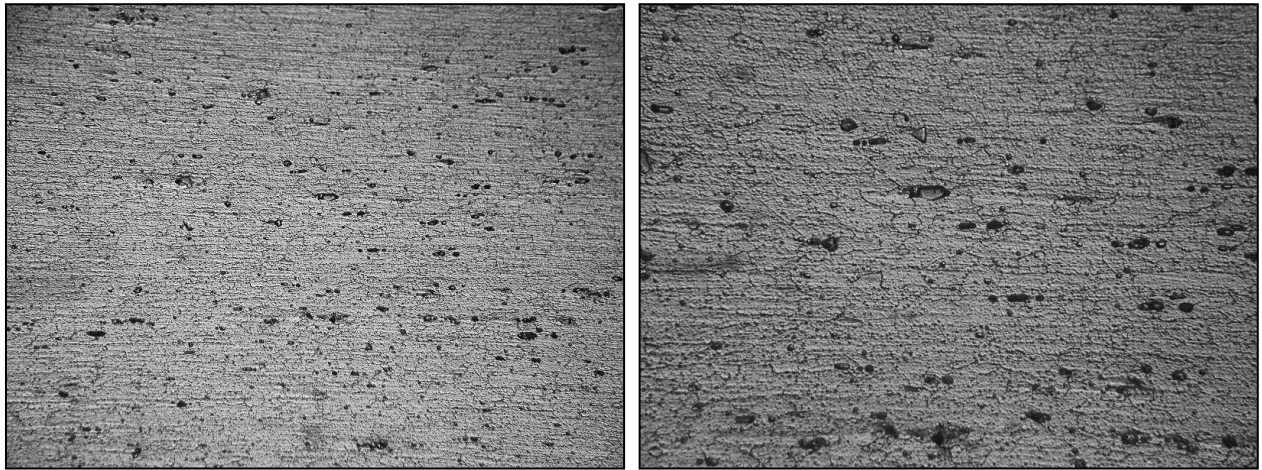
Для зварювання зразків використовували обладнання описане у підрозділі 2.3. Вибір параметрів режимів зварювання здійснювали за критеріями якісного формування верхнього валика шва без тріщин, поверхневих пор та підрізів, глибина провару близько 0,5...0,7 мм. Основні параметри режимів наведені у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 - Основні параметри режимів зварювання зразків зі сплаву 7075

| Спосіб зварювання     | Потужність лазерного випромінювання, Вт | Потужність мікроплазмової дуги, Вт |                     | Швидкість зварювання $V$ , мм/с | Витрати газу (Ar), л/хв |          |
|-----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------------------|-------------------------|----------|
|                       |                                         | Пряма полярність                   | Зворотна полярність |                                 | Плазмоутворюючий        | Захисний |
| Лазерне               | 400                                     | –                                  | –                   | 66,7                            | –                       | 8        |
| Лазерно-мікроплазмове | 250                                     | 1200                               | 600                 | 66,7                            | 10                      | 30       |

Розмір зерна  $Dg$  визначали за допомогою оптичної мікроскопії як відношення його висоти  $h$  до довжини  $l$ . В основному металі розмір зерна становить  $Dg=(10...20) \times (25...70)$  мкм, коефіцієнт форми  $\varphi=l/h=2,5...3,5$ . Мікротвердість HV при навантаженні 100 гр – в межах 1100...1240 МПа. Виявлені виділення рядкового типу  $l_B=15...35$  мкм у вигляді ланцюжків розміром 35...75 мкм (рисунок 3.19).

Для проведення металографічного аналізу отриманих з'єднань вирізали поперечні темплети і виготовляли мікрошліфи. При цьому застосовували іонно-вакуумне травлення. Дослідження проводили на наступних ділянках зразків: переплавлений метал шва  $\rightarrow$  лінія сплавлення  $\rightarrow$  ЗТВ  $\rightarrow$  основний метал. За допомогою оптичної мікроскопії вивчали структурні зміни. За допомогою растрової електронної мікроскопії визначали хімічний склад (загальний та локальний точковий аналіз).



а)

б)

Рисунок 3.19 - Структура основного металу (сплав 7075) при збільшенні:

а)  $\times 250$ ; б)  $\times 500$

**Лазерне зварювання.** Основні особливості формування ненаскрізного проплавлення лазерним способом пов'язані зі стабільністю існування парогазового каналу. Очевидно, що поліпшенню формування провару сприяють зниження величини та підвищення частоти пульсацій цього каналу. Сама наявність парогазового каналу сприяє формуванню глибокого проплавлення, відмінністю якого є перевищення глибини над шириною (рисунок 3.20,а). У даному випадку глибина проплавлення становила 0,68...0,74 мм, а ширина – 0,65...0,70 мм. Уздовж лінії сплавлення спостерігаються зерна дендритів подовженої форми, що дозволяє говорити про зону сплавлення шириною 12...16 мкм (рисунок 3.20,б).

У переплавленому металі спостерігаються окремі пори діаметром близько 10 мкм. Нижче середини шва виявлено порожнину розміром приблизно  $25 \times 100$  мкм і навколишні мікротріщини довжиною  $L_{cr}=25...30$  мкм (рисунок 3.21,а). Загальна об'ємна частка ( $V_D$ ) дефектів у металі шва становить порядку 5 %. У центрі метал шва структура рівновісної форми з розміром зерен  $Dg=10...25$  мкм (рисунок 3.20). Мікротвердість у центрі шва становить  $HV=1130...1140$  МПа (рисунок 3.21). Ближче до лінії сплавлення у переплавленому металі спостерігається структура із зернами подовженої форми, що мають розмір

$Dg=(10...15) \times (30...35)$  мкм при  $HV=980$  МПа (рисунки 3.21, 3.22). У нижній частині переплавленого металу виявлені виділення оксидної плівки, які повторюють формою лінію сплавлення в кореневій частині. Дані оксидні виділення рядкового типу розміром  $l_{Al_2O_3}=25...35$  мкм розташовані у вигляді ланцюжків протяжністю до  $L_{\Sigma Al_2O_3}=50...120$  мкм (рисунок 3.21,а).

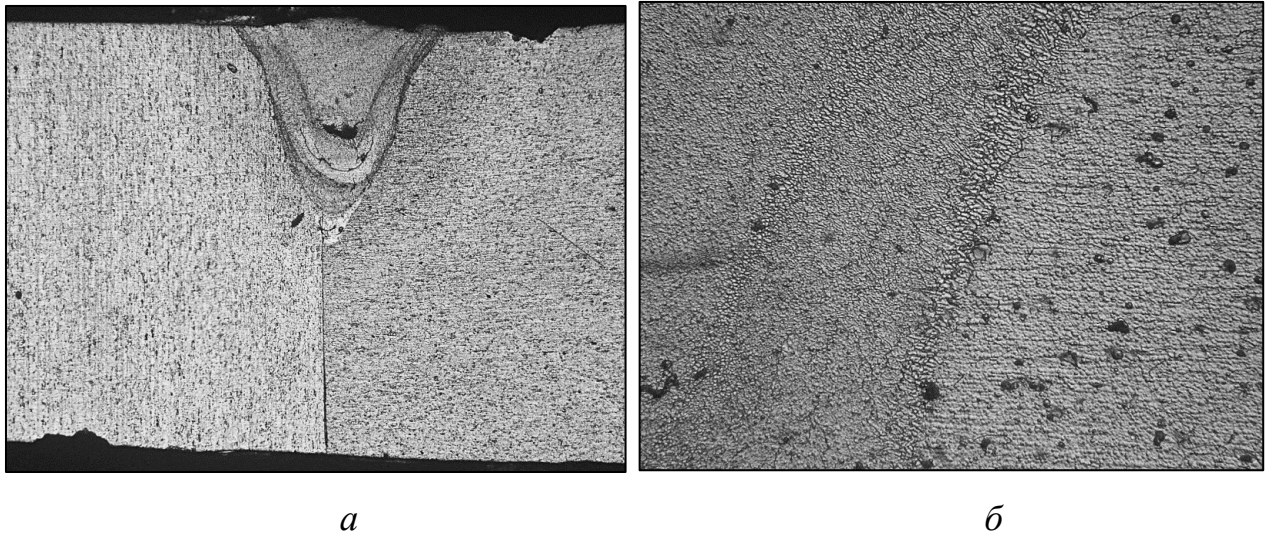


Рисунок 3.20 - Структури лазерного провару: а) загальний вигляд проплавлення  $\times 50$ ; б) зона сплавлення з основним металом,  $\times 500$

Ширина ЗТВ складає  $h_{HAZ}=130...150$  мкм (рисунок 3.20). Розмір зерен у ЗТВ становить  $Dg=(5...20) \times (26...50)$  мкм, коефіцієнт форми зерна  $\varphi=l/h=2,5...5$ . Мікротвердість порівняно із переплавленим і основним металом збільшена до  $HV=1190...1350$  МПа (рисунок 3.23). У ЗТВ біля лінії сплавлення спостерігаються окремі мікротріщини завдовжки  $L_{cr}=10...20$  мкм (рисунок 3.21,б).

В області з'єднання двох пластин сплаву 7075 розмір зерна  $Dg=(5...15) \times (40...70)$  мкм з боку лівої пластини та  $Dg=(5...15) \times (30...35)$  мкм з боку правої (рисунок 3.20,а). Спостерігається якісне з'єднання пластин без утворення зазору.

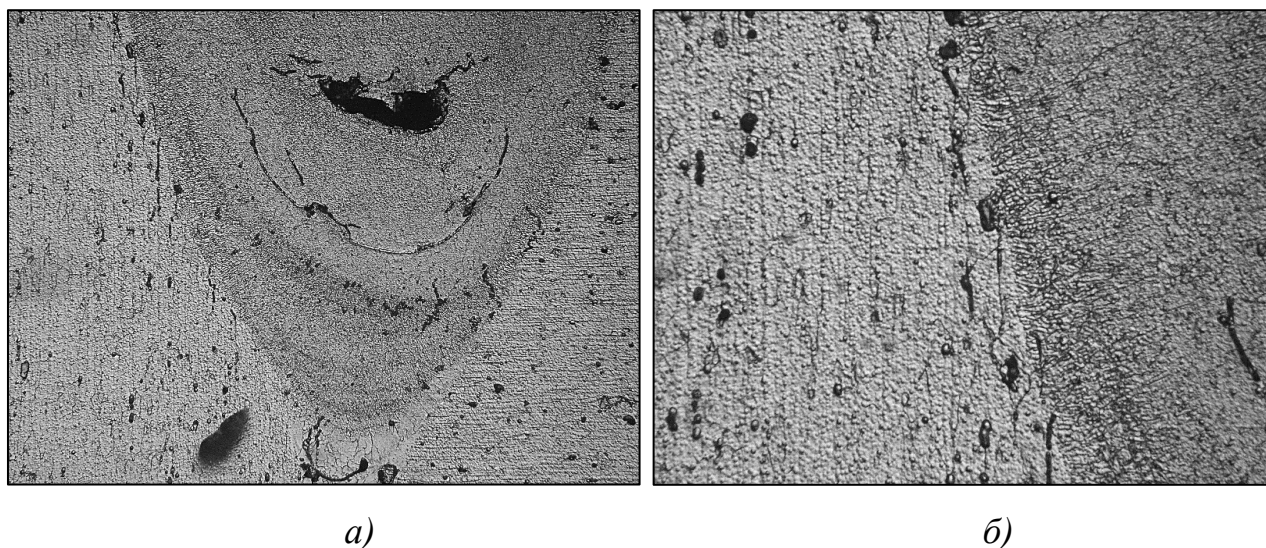


Рисунок 3.21 - Дефектні ділянки: а) в переплавленому металі  $\times 250$ ; б) в основному металі біля лінії сплавлення,  $\times 500$

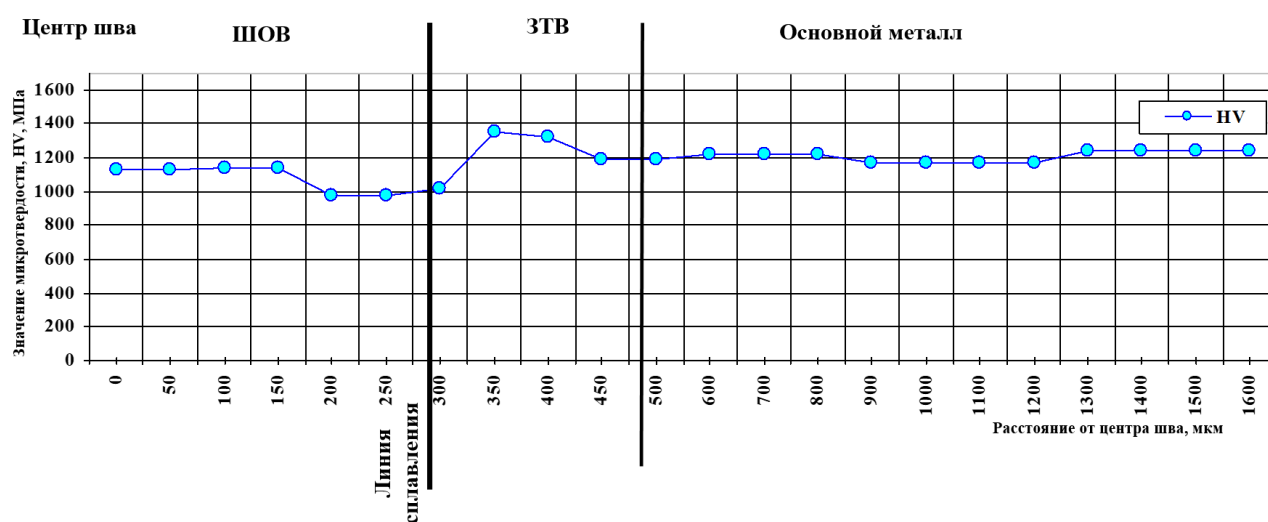


Рисунок 3.22 - Розподіл твердості від осі провару у бік основного металу у виконаному лазерним способом з'єднанні

Рентгеноспектральний мікроаналіз вмісту окремих елементів у металі з'єднання та основному металі проводився як інтегрально, за площею відповідної зони, так і в обсязі окремих зерен (таблиця 3.9).

Загальні (інтегральні) дослідження показали схильність до підвищення вмісту Zn у ЗТВ. Локальний аналіз вмісту елементів в об'ємі зерен показав підвищення вмісту Cu і Zn у переплавленому металі шва. Відсутність можливості

наскрізного проходження лазерного випромінювання провокує утворення в кореневої частини металу шва великих порожнин.

Таблиця 3.9 - Результати визначення вмісту основних елементів способом рентгеноспектрального мікроаналізу (лазерне зварювання)

| Зона дослідження    | Тип аналізу           | Вміст елемента, мас.% |       |       |       |       |       |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                       | Al                    | Mg    | Si    | Mn    | Cu    | Zn    |
| Переплавлений метал | Загальний аналіз      | 89,74–                | 1,08– | 0,40– | 0,22– | 1,88– | 6,25– |
|                     |                       | 90,07                 | 1,09  | 0,51  | 0,32  | 2,11  | 6,33  |
| Переплавлений метал | Аналіз в об'ємі зерен | 85,43–                | 1,10– | 0,53  | 0,35  | 2,59– | 7,78– |
|                     |                       | 87,61                 | 1,13  |       |       | 3,35  | 10,10 |
| ЗТВ                 | Загальний аналіз      | 89,17–                | 1,09– | 0,32– | 0,12– | 1,99– | 6,87– |
|                     |                       | 89,25                 | 1,14  | 0,43  | 0,13  | 2,06  | 7,20  |
| Основний метал      | Загальний аналіз      | 89,26–                | 1,0–  | 0,42– | 0,16– | 1,73– | 6,17– |
|                     |                       | 90,52                 | 1,13  | 0,52  | 0,43  | 1,78  | 6,87  |
| Основний метал      | Аналіз в об'ємі зерен | 89,35–                | 1,06– | 0,38– | 0,05– | 1,73– | 6,57– |
|                     |                       | 89,83                 | 1,28  | 0,62  | 0,23  | 1,84  | 6,97  |

Не зважаючи на взаємодію з повітрям, яке потрапляє зі стику між пластинами, що зварюються (зварювання без додаткового захисту зі зворотньої сторони шва), малий час існування зварювальної ванни (0,02...0,04 с) при лазерному зварюванні мінімізує утворення порожнин в нижній (кореневій) частині металу шва.

**Лазерно-мікроплазмове зварювання.** При лазерно-мікроплазмовому зварюванні різнополярним асиметричним струмом на поверхні деталей, що з'єднуються, під впливом стиснутої дуги формується зварювальна ванна. Наявність розплавленого металу сприяє підвищенню поглинутої частки лазерного випромінювання, а електрична дуга стабілізує парогазовий канал, що утворюється в металі. Використання стиснутої малоамперної дуги різнополярного асиметричного струму дозволяє ефективно руйнувати оксидну плівку на поверхні алюмінієвих сплавів, які зварюються, що у свою чергу усуває

можливість попадання частинок плівки в шов. За рахунок використання додаткової енергії дуги при лазерно-мікроплазмовому зварюванні ширина швів збільшується в порівнянні зі зварюванням лазерним випромінюванням тієї ж потужності. Збільшена ширина шва дозволяє збирати заготовки з більшим зазором та гарантовано отримувати якісні шви при виконанні герметичних з'єднань деталей. У проведених експериментах глибина проплавлення становила 0,55...0,56 мм, а ширина – 1,0...1,1 мм (рисунок 3.23,*а*). Лінія сплавлення виражена досить чітко, але при великих збільшеннях може розглядатися як зона шириною порядку 15...20 мкм (рисунок 3.23,*б*).

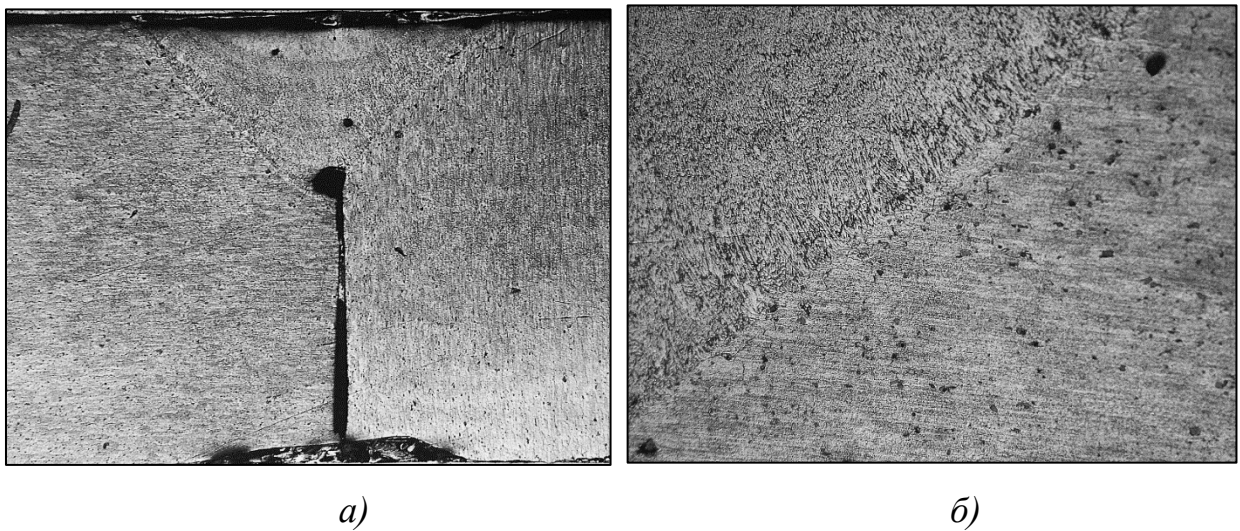


Рисунок 3.23 - Структури лазерно-мікроплазмового провару: *а)* загальний вигляд,  $\times 50$ ; *б)* зона сплавлення з основним металом,  $\times 250$

У шві спостерігаються окремі пори діаметром 15...25 мкм (рисунок 3.24,*а*). В корені шва спостерігається порожнина округлої форми діаметром близько 100 мкм (рисунок 3.24,*б*). Мікротріщини навколо порожнини не виявлені. У центральній частині переплавленого металу спостерігається дисперсна структура рівноосної форми із розміром зерен  $Dg=5...15$  мкм (рисунок 3.24,*а*). Мікротвердість у центрі шва становить  $HV=896...1180$  МПа (рисунок 3.25). Близьче до лінії сплавлення в шві виявлена структура подовженої форми з розміром зерен  $Dg=(5...10)\times(15...60)$  мкм твердістю  $HV=876...916$  МПа

(рисунки 3.24,б, 3.25, 3.26). У металі шва виявлені поодинокі включення глобулярної форми розміром 15...25 мкм (рисунок 3.24,б).

Ширина ЗТВ становить  $h_{HAZ}=140\ldots200$  мкм. Розмір зерен у ЗТВ становить  $Dg=(5\ldots10)\times(20\ldots50)$  мкм (рисунок 3.26), а мікротвердість підвищується порівняно із металом шва до  $HV=876\ldots916$  МПа (рисунок 3.25).

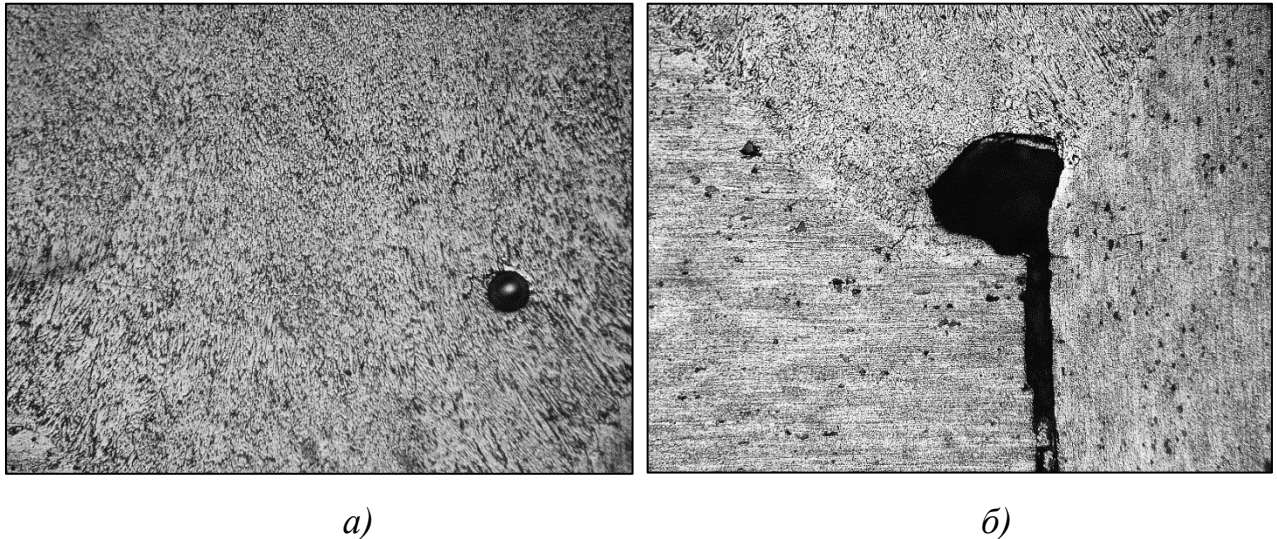


Рисунок 3.24 - Дефектні ділянки в металі шва при лазерно-мікроплазмовому зварюванні ( $\times 250$ ): а) окремі пори; б) порожнина у кореневій зоні

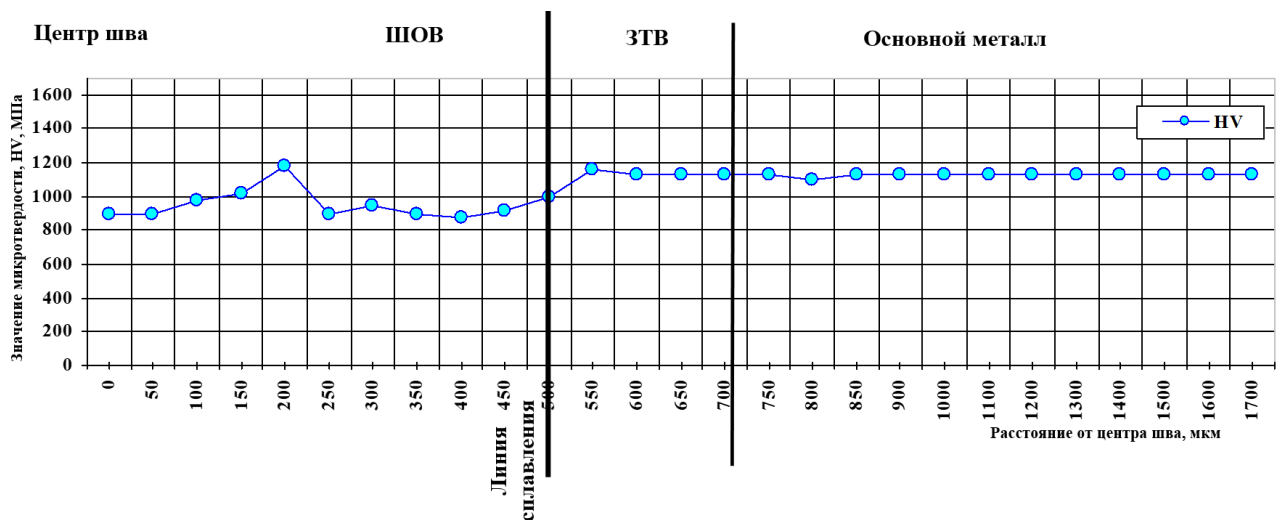


Рисунок 3.25 - Розподіл твердості від осі провару у бік основного металу у виконаному лазерно-мікроплазмовим способом з'єднанні

В області з'єднання двох пластин сплаву 7075 розмір зерен металю становить: для лівої пластини  $Dg=(5...15)\times(20...30)$  мкм, а для правої  $Dg=(5...6)\times(20...30)$  мкм.

Рентгеноспектральний мікроаналіз вмісту окремих елементів у металі з'єднання та основному металі проводився інтегрально за площею відповідної зони, а також локально в об'ємі окремих зерен та за їх межами (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11 - Результати визначення вмісту основних елементів способом рентгеноспектрального мікроаналізу (лазерно-мікроплазмове зварювання)

| Зона дослідження    | Тип аналізу              | Вміст елемента, мас.% |               |               |               |               |               |
|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     |                          | Al                    | Mg            | Si            | Mn            | Cu            | Zn            |
| Переплавлений метал | Загальний аналіз         | 90,26–<br>90,58       | 1,0–<br>1,08  | 0,54–<br>0,89 | 0,09          | 1,62–<br>1,93 | 5,89–<br>5,98 |
| Переплавлений метал | Аналіз в об'ємі зерен    | 90,34                 | 0,89          | 0,74          | 0,06          | 1,67          | 6,3           |
| Переплавлений метал | Аналіз по границях зерен | 90,37                 | 0,88          | 0,70          | 0,14          | 1,78          | 6,12          |
| ЗТВ                 | Загальний аналіз         | 88,55–<br>89,76       | 1,03–<br>1,07 | 0,64–<br>0,82 | 0,07–<br>0,21 | 1,72–<br>1,97 | 6,59–<br>6,75 |
| ЗТВ                 | Аналіз в об'ємі зерен    | 89,76                 | 1,18          | 0,77          | 0,16          | 1,62          | 6,51          |
| ЗТВ                 | Аналіз по границях зерен | 89,34                 | 1,12          | 0,76          | 0,08          | 2,02          | 6,68          |
| Основний метал      | Загальний аналіз         | 90,21–<br>90,37       | 1,01–<br>1,23 | 0,60–<br>0,95 | 0,06–<br>0,10 | 1,71–<br>1,96 | 5,84–<br>6,25 |
| Основний метал      | Аналіз в об'ємі зерен    | 89,76                 | 0,95          | 0,68          | 0,16          | 1,91          | 6,43          |

Як інтегральні, так і локальні дослідження показали, що вміст визначених елементів у металі шва та ЗТВ знаходиться приблизно на рівні основного металю. У шві спостерігається невелике (близько 2%) зниження вмісту Zn, а в ЗТВ – його підвищення до ~7%. У шві виявлені окремі вclusions з підвищеним вмістом Cu

(3,83%) та Zn (13,59%). У ЗТВ також виявлені різні включення: одні з підвищеним вмістом Mg (3,57 %), Si (4,25 %), Cu (3,74 %) і Zn (10,65 %), інші з підвищеним вмістом Mg (3,11 %), Mn (2,35 %), Cu (4,82 %), Zn (13,59 %) і Cr (12,57 %).

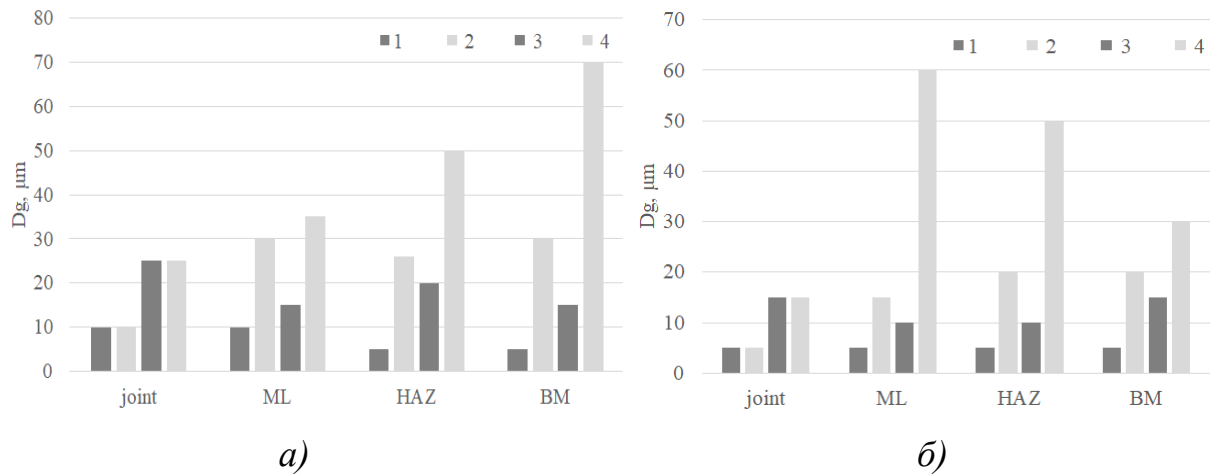


Рисунок 3.26 - Розмір зерен ( $D_g=l \times h$  [мкм], де  $h$  – 1 і 3,  $l$  – 2 і 4) у переплавленому металі (joint), в зоні сплавлення (ML), в ЗТВ (HAZ) і основному металі (BM) для з'єднань, виконаних способами: а) лазерним; б) лазерно-мікроплазмовим

Порівняння зміни розмірів зеренної структури при різних способах зварювання може свідчити про відсутність прямого зв'язку з тріщиноутворенням. Відсутність можливості наскрізного проходження лазерного випромінювання при лазерно-мікроплазмовому зварюванні, незважаючи на короткий час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с), провокує утворення в кореневій частині металу шва порожнин.

Розподіл вмісту легуючих елементів свідчить, що при обох видах зварювання у швах та ЗТВ спостерігається деякий їх перерозподіл. Так, при лазерному зварюванні за інтегральними показниками у металі шва зростає вміст Cu (на ~15%), а в металі ЗТВ – Cu (на ~15%) та Zn (8...10%). При лазерно-мікроплазмовому зварюванні вміст визначених елементів у металі шва та ЗТВ знаходиться приблизно на рівні основного металу. Винятки становлять зниження

вмісту Zn (близько 2%) у металі шва та його підвищення (на ~7%) у ЗТВ. У шві та ЗТВ виявлені окремі включення з підвищеним вмістом Mg, Si, Mn, Cu, Zn і Cr.

Отримані результати можуть пояснюватися розчиненням з перерозподілом на інтегральному рівні та/або перерозподілом у межах зерен включень, що є в основному металі. В зернах основного металу були виявлені включення таких елементів, як Mg, Si, Mn, Cu, Zn, Cr, Fe, зі значними відхиленнями від паспортних даних (таблиця 3.7). Незначне зниження вмісту Mg та Zn свідчить про відсутність їх вигорання під дією зварювальних джерел тепла, що пояснюється високими швидкостями процесів і малим часом існування зварювальної ванни при лазерному (0,02...0,04 с) і лазерно-мікроплазменному (0,03...0,05 с) зварюванні.

Дослідження форми зерен свідчить, що при лазерному зварюванні їх розмір у металі шва приблизно однаковий ( $D_g=10...25$ ), вздовж лінії сплавлення коефіцієнт форми  $\varphi=2...3$ , у ЗТВ  $\varphi=2,5...5$  (рис.3.26,а). При лазерно-мікроплазмовому зварюванні зерна у центральній частині шва мають рівноосну будову розміром  $D_g=5...15$  мкм (рисунок 3.26,б). Ближче до лінії сплавлення в шві спостерігаються структура з більш подовженими зернами (коефіцієнт форми  $\varphi=3...6$ ). У ЗТВ коефіцієнт форми зерен становить  $\varphi=4...5$ .

Отримані результати щодо форми та розмірів зерен у металі швів пов'язані з досить високими швидкостями кристалізації рідкого металу зварювальної ванни. Розмір та форма зерен у ЗТВ частково залежить від їх параметрів в основному металі. У ньому розкид за розмірами зерен становить до 1,5 разів і більше, за коефіцієнтом форми зерна  $\varphi=2,5...3,5$  (рисунок 3.27).

Дослідження мікротвердості у швах та ЗТВ показали, що при лазерному зварюванні в металі шва ближче до лінії сплавлення твердість знижується на 10...15%. У ЗТВ твердість металу підвищується приблизно на 8...12%. Це пояснюється жорстким термічним циклом лазерного зварювання, малим часом існування зварювальної ванни (0,02...0,04 с) і значенням погонної енергії (5 Дж/мм). При лазерно-мікроплазмовому зварюванні порівняно з основним металом мікротвердість переплавленої зони знижується на 15...20%, є окремі

ділянки без зниження твердості. У ЗТВ мікротвердість приблизно відповідає основному металу. Це пояснюється втричі більшою погонною енергією (15 Дж/мм) проти лазерного зварювання. Зазначимо, що основний метал має розсіяння значень твердості до 10%.

Дослідження наявності характерних дефектів свідчать, що при лазерному зварюванні загальна об'ємна частка дефектів (переважно пор розміром 10...30 мкм) у переплавленому металі становить близько  $V_D \sim 5\%$ . У нижній третині шва є порожнина розміром приблизно  $25 \times 100$  мкм, яка є центром зародження гарячих тріщин довжиною  $L_{cr} = 25 \dots 30$  мкм. Утворення цієї порожнини пояснюється потраплянням газу зі стику, що зварюється та відсутністю вільного виходу лазерного випромінювання. Газ утворює бульбашки, які не встигають піднятися на поверхню розплаву через малу величину погонної енергії (5 Дж/мм) і короткий час існування ванни рідкого металу (0,02...0,04 с). Лазерне випромінювання, що не має вільного виходу, утворює описану в роботі [110] пічкову структуру кореня шва. Це сприяє виникненню кореневої пористості.

В кореневій зоні шва виявлені виділення оксидної плівки, що повторюють формою лінію сплавлення (рис.3.21,*а*). Ці виділення рядкового типу розміром  $l_{Al_2O_3} = 25 \dots 35$  мкм розташовані у вигляді ланцюжків протяжністю до  $L_{\Sigma Al_2O_3} = 50 \dots 120$  мкм. Їхнє розташування пов'язане з гідродинамічними течіями у ванні рідкого металу.

Підвищення твердості в ЗТВ на 8...12% у поєднанні з описаною вище зеренною структурою пояснює утворення окремих мікротріщин довжиною  $L_{cr} = 10 \dots 20$  мкм у ЗТВ біля лінії сплавлення (рисунок 3.21,*б*). Утворення цих мікротріщин може також пояснюватися релаксацією внутрішніх залишкових напружень.

При лазерно-мікроплазмовому зварюванні загальна об'ємна частка дефектів (переважно пор розміром 15...25 мкм) у переплавленому металі становить до  $V_D \sim 5\%$ . У кореневій зоні шва спостерігається порожнина, розмір якої у різних перерізах змінюється від круглого  $100 \times 100$  мкм до подовженого  $30 \times 100$  мкм (рисунок 3.24,*б*). Утворення порожнини, як і в попередніх випадках,

пояснюється потраплянням повітря зі стику заготовок, що зварюються. Утворюються бульбашки, які не встигають впливати через малий час існування ванни розплавленого металу (0,03...0,05 с). Слідів оксидної плівки не виявлено, оскільки відбувалося її катодне руйнування.

Отримані результати по лазерно-мікроплазмовому зварюванню високоміцного сплаву 7075 можуть бути поширені на зварювання і інших сплавів серії 7xxx. Такий підхід дозволить:

- досягти найменшої дисперсності зерен у швах та ЗТВ;
- усунути характерні для лазерного зварювання підвищення твердості в ЗТВ і схильність до утворення в ній мікротріщин;
- за рахунок ефекту катодного руйнування оксидної плівки усунути небезпеку утворення її включень у металі шва;
- підвищити економічність процесу за допомогою зменшення використання лазерної енергії на 40...50% проти лазерного зварювання;
- наблизити погонну енергію (15 Дж/с) та час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 м) до аналогічних показників лазерного зварювання без небезпеки вигорання легуючих елементів.

Подальше підвищення якості зварних з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів, які одержуються герметичними ненаскрізними швами, можливе за рахунок внесення певних конструктивних змін. Наприклад, у стику нижче кореневої частини майбутнього шва можна передбачити технологічну порожнину, так звану «кишеню». Даний прийом сприятиме вільному виходу лазерного випромінювання при лазерному або лазерно-мікроплазмовому зварюванні. Це дозволить усунути утворення пори в корені шва.

### 3.5 Висновки за розділом 3

1. В результаті проведення обчислювальних експериментів встановлено, що при досягненні температури плавлення частка поглиненого лазерного випромінювання стрибкоподібно зростає від ~20% для берилію та до двох і більше разів для алюмінію. При переході від використання випромінювання з

довжиною хвилі  $\lambda=10,6$  мкм ( $\text{CO}_2$ -лазер) до випромінювання з  $\lambda=1,06$  мкм (волоконний, дисковий або Nd:YAG-лазер) при зварюванні легких сплавів його поглинання зростає приблизно у 2,5 рази. Застосування лазерного зварювання із супутнім плазмовим плавленням дозволяє збільшувати глибину проплавлення на 40...75% порівняно з лазерним, у тому числі за рахунок поліпшення поглинання випромінювання. Для поліпшення поглинання випромінювання при лазерно-плазмовому зварюванні відстань між центром анодної області стиснутої дуги електрода, що не плавиться, і віссю лазерного випромінювання не повинна перевищувати 1,0 мм. Для встановлення повноцінного гібридного лазерно-плазмового процесу ця відстань не повинна перевищувати 0,5 мм.

2. Експериментальна перевірка розрахункових результатів проводилася шляхом порівняння розрахункової та вимірної глибин провару при зварюванні з використанням лазерного випромінювання алюмінієвих сплавів 5083 (1561) та 7075. Лазерно-плазмове зварювання дозволило поліпшити формування верхнього валика шва порівняно з лазерним. При цьому мінімізація відстані між центром анодної плями та віссю лазерного випромінювання підвищувала якість формування швів та збільшувала глибину проплавлення. Встановлену помилку обчислень (15...20%) можна вважати допустимою для застосування розробленої методики з метою прогнозування лазерного та лазерно-плазмового зварювання легких сплавів, у тому числі берилієвих.

3. Вибрані параметри режимів лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання берилієвих і алюмінієвих сплавів за критеріями глибини проплавлення та температури нагрівання виробу після зварювання. Встановлено, що застосований підхід до моделювання процесів зварювання алюмінієвих сплавів дозволяє визначати параметри режимів з точністю до 15...20%. Очікується, що цей підхід з аналогічною точністю дозволить спрогнозувати параметри режимів зварювання берилію та його сплавів.

4. Встановлено, що завдяки високій теплопровідності берилію та його сплавів (приблизно в 3 рази перевищує теплопровідність алюмінієвих сплавів) для їх зварювання потрібно більше вкладення енергії. При цьому погонна енергія

лазерного зварювання берилієвих сплавів повинна приблизно вдвічі перевищувати необхідну для лазерного зварювання алюмінієвих сплавів енергію. Погонна енергія лазерно-мікроплазмового зварювання берилієвих сплавів повинна перевищувати енергію зварювання алюмінієвих сплавів на ~30%.

5. Встановлено, що при лазерному зварюванні має місце найменше вкладання енергії у виріб, що зварюється, при лазерно-мікроплазмовому зварюванні енерговкладання збільшується в 2-3 рази у порівнянні з лазерним. При цьому лазерно-мікроплазмове зварювання дозволяє покращувати формування шва в порівнянні з лазерним зварюванням та мінімізувати пороутворення у швах.

6. Запропонована методика розрахункового визначення параметрів режиму лазерного зварювання тонкостінних (товщиною до 2-3 мм) виробів із високоміцних легких металів та сплавів. Експериментальна перевірка на зразках із алюмінієвих сплавів серії 7xxx системи Al-Zn-Mg-Cu та порівняння з літературними даними щодо зварювання берилієвих сплавів показали, що похибка запропонованої методики становить до 15...20%. Також запропоноване нелінійне рівняння теплового балансу, розв'язання якого дозволило визначити температуру нагрівання виробу після зварювання з похибкою до 10%.

7. Із застосуванням даної методики обрані основні параметри лазерного зварювання конструкції зі сплаву 7075 із товщиною стінки 1,5 мм швами глибиною та шириною 0,5...1,5 мм. Встановлено, що при зварюванні випромінюванням волоконного лазера потужністю до 650 Вт із швидкостями не менше 120 м/год (33,33 мм/с) забезпечується мінімальне об'ємне нагрівання виробів не вище 100°C.

8. Експериментальні дослідження показали, що характерними дефектами лазерного зварювання алюмінієвих сплавів системи Al-Zn-Mg-Cu є внутрішні пори діаметром 0,05-0,2 мм та тріщини у кореневій частині швів при формуванні їх з неповним проплавленням. Формування пор може бути пов'язане з потраплянням у зварювальну ванну повітря зі стику, а тріщин – з роботою стику

як надрізу-концентратора, який під дією залишкових напружень сприяє тріщиноутворенню.

9. Встановлено, що лазерне зварювання стикових з'єднань алюмінієвого сплаву 7075 дозволяє отримувати досить вузькі (до 0,74 мм) шви з мінімальними витратами погонної енергії (5 Дж/мм) та часом існування ванни розплаву (0,02...0,04 с). Зернистість з'єднання носить регулярний характер, зерна рівноосні в переплавленому металі та подовжені вздовж лінії сплавлення ( $\alpha=2...3$ ) і в ЗТВ ( $\alpha=2,5...5$ ). Мікротвердість у швах знижується до 15%, а в ЗТВ підвищується на 8...12% щодо основного металу. Основні дефекти – утворення в ЗТВ мікротріщин довжиною 10...20 мкм та наявність у кореневій частині швів включень неруйнованої оксидної плівки.

10. Для усунення виявлених дефектів пропонується використовувати лазерне зварювання із супутнім мікроплазмовим підігрівом до стану плавлення. Зеренна структура переплавленого металу має рівноосну будову, розмір зерен зменшується в 1,5-2 рази порівняно з лазерним зварюванням. Уздовж лінії сплавлення й у ЗТВ формуються структури з подовженими зернами ( $\alpha=3...6$  і  $\alpha=4...5$ , відповідно). Мікротвердість переплавленого металу знижується до 15...20%, а ЗТВ приблизно відповідає основному металу. При цьому використання кошовної лазерної енергії зменшується на 40...50%, час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с) наближається до лазерного зварювання, усувається небезпека вигорання легуючих елементів.

## Розділ 4 ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИ ОТРИМАННІ ТОНКОСТІННИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

### 4.1 Розробка методики експериментально-розрахункового визначення компонент НДС зварних примітивів

Одним з важливих завдань, які виникають при виготовленні зварних конструкцій, є необхідність визначення їхнього залишкового напружено-деформованого стану (НДС). Для експериментального виміру компонент напружено-деформованого стану найбільш поширеним є використання електротензометрів [129, 130]. Однак, застосування безконтактних оптичних методів реєстрації деформування поверхні досліджуваних об'єктів дозволяє отримати більше вихідних даних, які можуть бути використані при обчисленні значень внутрішніх напружень [131–137]. Для визначення компонент напруженого стану все частіше використовують метод цифрової кореляції зображень (DIC – Digital Image Correlation) [138–140], який отримав розвиток за рахунок суттєвого збільшення якості та зниження вартості цифрових камер, а також збільшення швидкодії комп'ютерної техніки. Він заснований на розрахунковій обробці оптичного потоку, який несе інформацію про деформацію твердих тіл. В основі його дії лежить обчислення векторів переміщень та подальший розрахунок компонентів деформації за допомогою процедури чисельного диференціювання [141]. В умовах сьогодення метод кореляції цифрових зображень є одним із найпоширеніших підходів до вивчення процесів деформації і руйнації структурно-неоднорідних матеріалів. Істотний внесок у розвиток цього методу внесли М.А. Sutton [142], F. Hild, S. Roux [143], B. Pan [144] та ін.

В останні роки апаратно-програмні комплекси, принцип дії яких заснований на кореляції цифрових зображень, набули комерційного поширення. До таких комерційних систем належить продукція Correlated Solutions Inc. (VIC

3D), LaVision GmbH (StrainMaster) та ін. Зазначені комплекси, як правило, обладнуються штатними оптичними системами, калібрування яких проводиться перед проведенням експерименту в залежності від умов відео (або фото) спостереження. Однак комп'ютерний код, який постачається у складі таких систем, є закритим, що не дозволяє ефективно вирішувати ряд прикладних завдань. Тому окремі науково-дослідні колективи займаються розвитком власних програмно-алгоритмічних рішень, а також розробкою апаратних засобів для вивчення процесів деформації та руйнування. Одним із перспективних підходів до визначення деформацій та руйнувань є розрахунок стандартних параметрів на основі методу кореляції цифрових зображень [145, 146].

У порівнянні з інтерференційними оптичними методами, які використовуються для вимірювання деформації у площині, метод кореляції 3D стерео-цифрових зображень (далі DIC) має такі переваги:

1) *Простота експериментальної установки*: не потрібне обов'язкове використання джерел когерентного випромінювання та фазозсувних оптоелектронних компонентів.

2) *Мінімальна підготовка поверхні досліджуваного об'єкта*: не потрібна попередня підготовка поверхні (якщо біля природної поверхні об'єкта спостерігається випадковий розподіл інтенсивності сірого кольору). При необхідності можна створити штучні спекли, наприклад, розпорошенням фарби на поверхню об'єкта, що досліджується, нанесенням хаотичного зображення окремих точок та іншими способами.

3) *Низькі вимоги до умов освітлення*: DIC не потребує висококогерентного лазерного джерела. Для освітлення під час навантаження може використовуватися біле джерело світла або природне світло. Таким чином, метод може бути використаний як за лабораторних, так і за промислових умов.

4) *Широкий діапазон чутливості вимірювання і дозволу*: оскільки DIC метод обробляє цифрові зображення, його безпосередньо можна застосовувати до отриманих різними приладами високої роздільної здатності зображень.

Для отримання універсального інструменту обробки інформації та визначення переміщень елементів зварних конструкцій доцільно застосувати підхід розбиття цих конструкцій на окремі примітиви. Приклад таких примітивів для зварювання плоских елементів наведений на рисунку 4.1. У разі приварювання фланців кільцевими швами прикладом просторового примітиву може бути розглянута в даній роботі конструкція (рисунок 2.1).

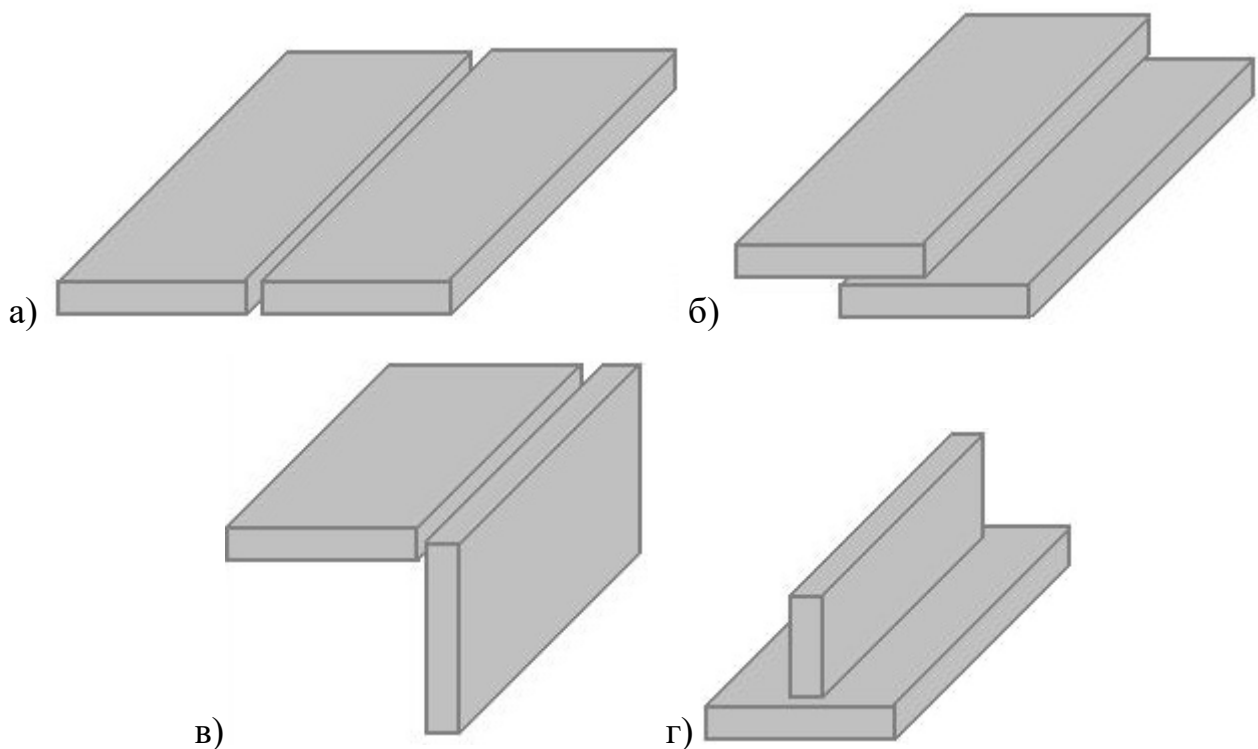


Рисунок 4.1 - Види просторових примітивів з'єднань плоских елементів, підготовлених до зварювання: а) стикове; б) напусткове; в) кутове; г) таврове

Розбиття конструкції, що зварюється, на окремі примітиви дозволить провести розрахунок окремих ділянок, у тому числі з урахуванням впливу переміщень одних ділянок на інші (сусідні). Це пов'язано з розмірами поля вимірювань, яке залежить від якості та роздільної здатності цифрових камер, які застосовуються для отримання цифрових зображень. Роздільна здатність таких камер має перевищувати 20 МП. Зазвичай вона становить 24...48 МП. Мінімальна величина переміщення точок, які реєструється на об'єкті, зазвичай

не менша 3,0 мкм, максимальна величина таких переміщень може становити 3000,0 мкм.

Для розглянутого в даній роботі випадку зварювання кільцевого шва, що має діаметр порядку 38 мм, всю зварювану конструкцію можна розглядати як один примітив. Досліджуване поле при цьому є диском діаметром 41 мм. У просторі даного поля виконується приварювання фланця Ø38 мм герметичним кільцевим швом з ненаскрізним проваром. Матеріалами примітиву, який зварюється, є легкі сплави на основі алюмінію.

Метою дослідження є визначення залишкових переміщень (з точністю 3,0...3000,0 мкм) зварних примітивів конструкцій високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів, що мають товщину стінки порядку 1,5 мм і циліндричну конфігурацію, шляхом застосування методу кореляції та обробки 3D-цифрових зображень (stereo digital image correlation) без руйнування або будь-якого механічного впливу на досліджуваний об'єкт, а також розрахункове прогнозування залишкових напружень, які можуть виникати після лазерного зварювання.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробка способу визначення переміщень окремих точок примітиву (виробу) після його зварювання шляхом обробки цифрових стереозображень;
- розробка способу розрахунку залишкових деформацій та напружень у звареному примітиві (виробі) за режимами зварювання;
- розробка апаратного комплексу визначення компонент напружено-деформованого стану зварених примітивів (виробів).

При розробці способу визначення переміщень примітиву після його зварювання методом DIC необхідно врахувати наступні основні моменти. В процесах зварювання та фото-фіксації дискової поверхні примітиву має бути задіяна та сама база закріплення. Величина зміщень примітиву при його перевстановленні зі зварювального стенду на вимірювальний і назад не повинна перевищувати  $\pm 1,0$  мкм (бажано  $\pm 0,5$  мкм). Для визначення переміщень ділянок поверхні, які відбулися в процесі зварювання, необхідна чітка ідентифікація цих

ділянок. Найпростіше цього досягти шляхом графічного нанесення (тобто такого, що не порушує цілісність поверхні) хаотичного набору точок (тобто випадкового спекл-узору), переміщення кожної з яких фіксуватиметься методом DIC.

Для розробки розрахункового способу визначення залишкових деформацій та напружень у звареному примітиві (виробі) за режимами зварювання необхідно розробити оригінальний програмний продукт. В основу програми, що розробляється, має бути покладене математичне формулювання завдання визначення переміщень окремих точок поверхні примітиву під впливом тепла при зварюванні. Вирішення такої задачі доцільно проводити чисельними методами, наприклад, методом скінченних елементів. Такий підхід дозволить зробити методику визначення залишкових деформацій і напружень досить універсальною для різних видів прототипів, що зварюються. Тому, відпрацювавши розрахункову методику на дисковому примітиві з кільцевим зварним швом, її можна буде порівняно легко адаптувати і до інших примітивів (наприклад, показаних на рисунку 4.1).

Для підвищення точності розрахункової методики визначення залишкових деформацій і напружень доцільно виконати порівняння розрахункових та практично отриманих результатів визначення залишкових переміщень дискового примітиву, що розглядається, після зварювання його кільцевим швом.

При розробці апаратурного комплексу для визначення компонент НДС зварених примітивів враховуватиметься досвід, що був отриманий при визначенні компонент НДС аналізованої конструкції високоточного тонкостінного виробу космічної галузі з легких сплавів. У тому числі, досвід створення лабораторного стенду для фото-фіксації переміщень, що виникають на поверхні примітиву на різних етапах зварювання лазерним (а в перспективі – будь яким іншим) методом. Вирішення завдання створення апаратурного комплексу буде розглянуте у наступному розділі.

В якості досліджуваного об'єкту використовували виріб, що являє собою порожнистий циліндричний корпус розміром  $\varnothing 41 \times 41$  мм, в який з двох торців вварювали кришки діаметром 38 мм. Кожен із цих торців у дослідженні НДС

розглядався як окремий дисковий примітив. Товщина стінки виробу становила близько 1,5 мм, матеріал – алюмінієвий сплав 1915 (аналоги 7005, AlZn4.5Mg1.5Mn). Зварювання виконували ненаскрізними кільцевими швами, глибина провару – близько 0,5...0,7 мм. Розглядалося виконання таких швів лазерним зварюванням у середовищі аргону. При проведенні вимірювань та подальших розрахунків приймали, що досліджуваний об'єкт має 2 ідентичні примітиви у вигляді дисків Ø41 мм, на кожному з яких виконується по одному кільцевому шву по стику Ø38 мм.

В експериментальних дослідженнях була прийнята така методика визначення компонент НДС зварних конструкцій (об'єктів) високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких алюмінієвих сплавів:

1) збирання об'єкта під зварювання, графічне нанесення на кожен із двох дискових примітивів (торців) об'єкта випадкового спекл-узору у вигляді хаотичного набору крапок;

2) фіксація об'єкта у відповідному пристрої та підготовка першого дискового примітиву (торця) об'єкта до процесу зварювання;

3) запис цифрового зображення поверхні, що зварюється, першого примітиву об'єкта до виконання зварювання в недеформованому (або початковому) стані;

4) запис цифрового зображення поверхні першого примітиву об'єкта після виконання точкових прихваток;

5) запис цифрового зображення поверхні першого примітиву об'єкта після виконання зварювання кільцевим швом;

6) обробка отриманих зображень методом 3D стерео-цифрової кореляції з використанням оригінального програмного продукту, отримання необхідних даних про переміщення;

7) повторення виконання пунктів 2-6 для другого дискового примітиву (торця) об'єкта;

8) на підставі даних про режими зварювання, а також про переміщення, що сталися, з використанням оригінального програмного продукту виконання

прогнозних розрахунків і передбачення розподілу і величин залишкових напружень об'єкта в цілому.

Для реєстрації зображень методом 3D стерео-цифрової кореляції та їх подальшої обробки розроблено лабораторний стенд (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 - Лабораторний стенд для спекл-кореляційних вимірювань: 1 – цифрові фотокамери, 2 – лазерне джерело освітлення, 3 – об'єктив, 4 – досліджуваний об'єкт

До складу стенду увійшли цифрові фотокамери з системою кріплення, встановлене на штативі лазерне джерело освітлення з об'єктивом, який направляє розширений паралельний лазерний пучок на об'єкт, що досліджується, а також сам об'єкт, зафіксований у відповідному оснащенні. Лазерний пучок, який використовували для освітлення об'єкта, мав довжину хвилі 632,8 нм. Інформація від цифрових фотокамер високої роздільної здатності направлялася на комп'ютер з оригінальним програмним забезпеченням, за допомогою якого проводилася обробка. Надалі стенд модифікували шляхом заміни лазерного джерела освітлення звичайним штучним лабораторним освітленням лампами денного світла. Такий підхід дозволяє перевірити можливість використання

звичайного кімнатного (цехового) освітлення для полегшення подальшої розробки апаратурного комплексу визначення НДС.

На першому етапі на досліджувані поверхні (примітиви) об'єкта нанесли випадковий спекл-візерунок для отримання високоякісного контрастного зображення з довільним розподілом інтенсивності сірого кольору по поверхні об'єкта. Цей спекл-візерунок надалі буде спотворюватися разом з поверхнею об'єкта при його деформуванні. Спекл-візерунок наносили вручну за допомогою маркера або спеціальним чорнильним штампом. Взагалі, в окремих випадках, в якості такого візерунку може бути використана природна структура поверхні об'єкта.

На другому етапі виконували спекл-кореляційні виміри обох досліджуваних торців об'єкта до зварювання. Після цього на одному з торців проводили точкове лазерне зварювання чотирьох допоміжних точок – прихваток. На третьому етапі спочатку виконували зйомку першої досліджуваної поверхні об'єкта після зварювання прихваток і після зварювання кільцевого шва. Потім процедури зварювання прихваток і кільцевого шва повторювали для другого торця, при чому після чого кожної процедури зварювання виконували зйомку другий досліджуваної поверхні об'єкта. Завдяки показаному на рисунку 4.2 лабораторному стенду, кожного разу після зварювання для спекл-кореляційних вимірювань зразок встановлювали в тому самому положенні, що й до зварювання.

На четвертому етапі визначення переміщень DIC методом використовували представлений на рисунку 4.3 алгоритм. Відповідно до цього алгоритму вибираються однакові ділянки початкового (вихідного) та кінцевого зображень, які характеризують стан поверхні об'єкта, що досліджується. Обчислюються кореляційні параметри даних зображень, якими визначається взаємне зміщення однієї ділянки зображення (кінцевого) від іншого (початкового). Повторення даної процедури для всіх ділянок поверхні (або вздовж певного напрямку) дозволяє отримати двомірні поля переміщень по поверхні об'єкта, які виникли між двома експозиціями.

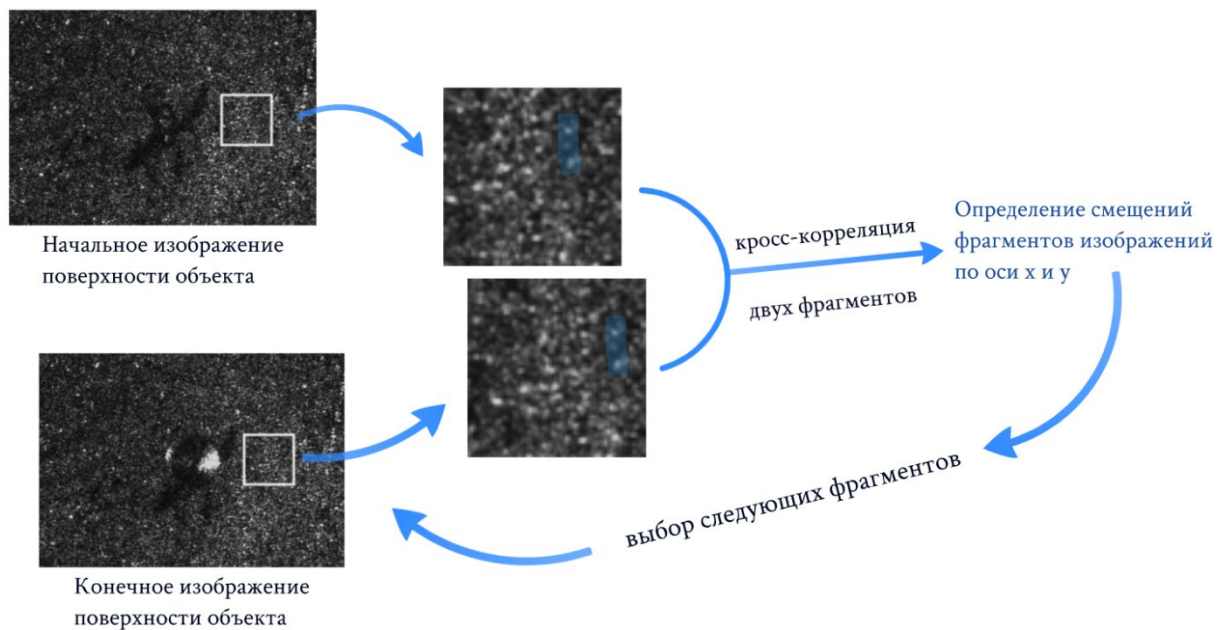


Рисунок 4.3 - Алгоритм визначення переміщень методом кореляції цифрових зображень (DIC)

На п'ятому етапі виконувались розрахунки з метою визначення розподілу та величин залишкових напружень, що виникають після зварювання високоточного тонкостінного виробу космічної галузі з легкого сплаву. Для цього використовували наступний алгоритм, який ґрунтується на розрахунковій методиці (рисунок 4.4):

- вибір початкових фізико-механічних властивостей виробу, що зварюється, на основі його матеріалу та геометрії;
- вибір досліджуваних процесів зварювання (в нашому випадку лазерного) та параметрів його режиму;
- розрахунок теплових полів у процесі зварювання та по закінченню процесу, що виконується на підставі параметрів режиму;
- розрахункове визначення залишкових зварювальних переміщень;
- порівняння залишкових зварювальних переміщень визначених розрахунковим способом з переміщеннями, що були виміряні на четвертому етапі;

- визначення похибки  $i$ , при необхідності, введення кореляційного коефіцієнта в подальші розрахунки;
- розрахункове визначення залишкових напружень у масштабах всього виробу.

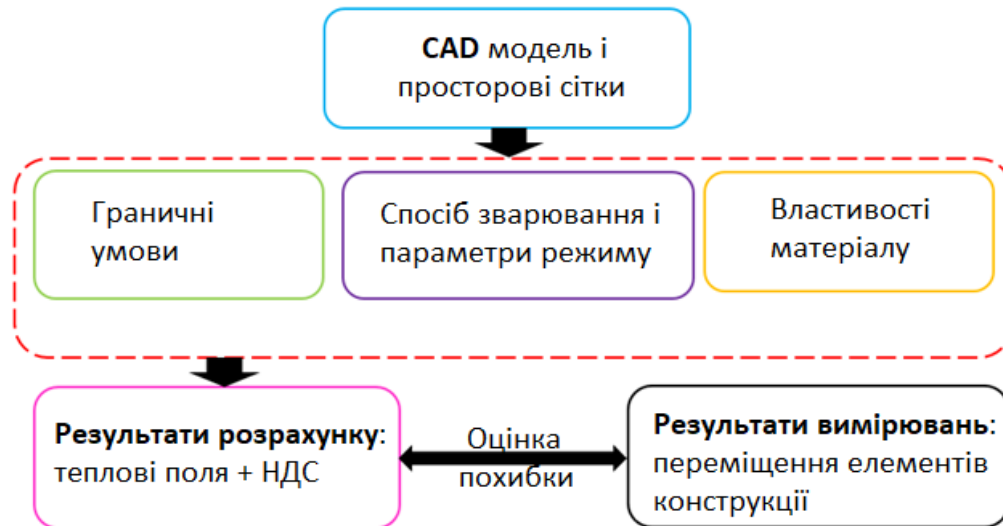


Рисунок 4.4 - Алгоритм визначення залишкових напружень

## 4.2 Розрахункове визначення параметрів залишкового НДС отриманих лазерним та лазерно-мікроплазмовим зварюванням високоміцного алюмінієвого сплаву 7005 модельних прототипів

Для розрахункового прогнозування розподілу компонент НДС зварених виробів, як і при визначенні розподілу температур, використовували тривимірну скінченно-елементну модель (рис. 3.1). Розрахунки здійснювали з урахуванням зміни від температури теплових та фізико-механічних властивостей матеріалів.

### 4.2.1 Аналіз розподілу нормальних окружних, поздовжніх та осьових напружень зварних з'єднань модельних прототипів

З метою оцінки впливу способу та параметрів режимів лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання на формування НДС модельних прототипів з високоміцного алюмінієвого сплаву 7005 методом скінченних елементів визначали розподіл залишкових зварювальних напружень,

деформацій та переміщень. Компоненти НДС визначали для варіантів зварювання модельних зразків, які виконувались за режимами, що наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Режими зварювання модельних зразків

| Номер моделі | Спосіб зварювання     | Потужність лазерного випромінювання, Вт | Потужність мікроплазмової дуги, Вт | Швидкість зварювання $V_z$ , м/год |
|--------------|-----------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1            | Лазерне               | 500                                     | —                                  | 180                                |
| 2            | Лазерне               | 500                                     | —                                  | 240                                |
| 3            | Лазерно-мікроплазмове | 250                                     | 1200                               | 240                                |
| 4            | Лазерно-мікроплазмове | 250                                     | 1000                               | 240                                |

При моделюванні враховували особливості технологічного процесу збирання-зварювання прототипів, зокрема: попереднє закріплення фланців зі стінками циліндру виконується лазерним зварюванням шляхом встановлення 4-х діаметрально протилежних прихваток розмірами 1,0 мм (потужність лазерного випромінювання 500 Вт, час 0,2 с); початок зварювання шва та його закінчення розташовані на прихватці; для лазерно-мікроплазмового зварювання обидва джерела нагріву діяли в одну зварювальну ванну.

Для розрахунків використовували модель, що враховувала наявність діаметрально розташованої напівстінки для закріплення електронних компонентів гіроскопу, наявність якої підвищувала жорсткість конструкції. Тобто жорсткість конструкції в площині напівстінки була вищою ніж в площині, що розташована під кутом в  $90^0$  від площини напівстінки.

Поля розподілу нормальних радіальних та поздовжніх напружень для моделей 2 та 3 наведені на рисунку 4.5.

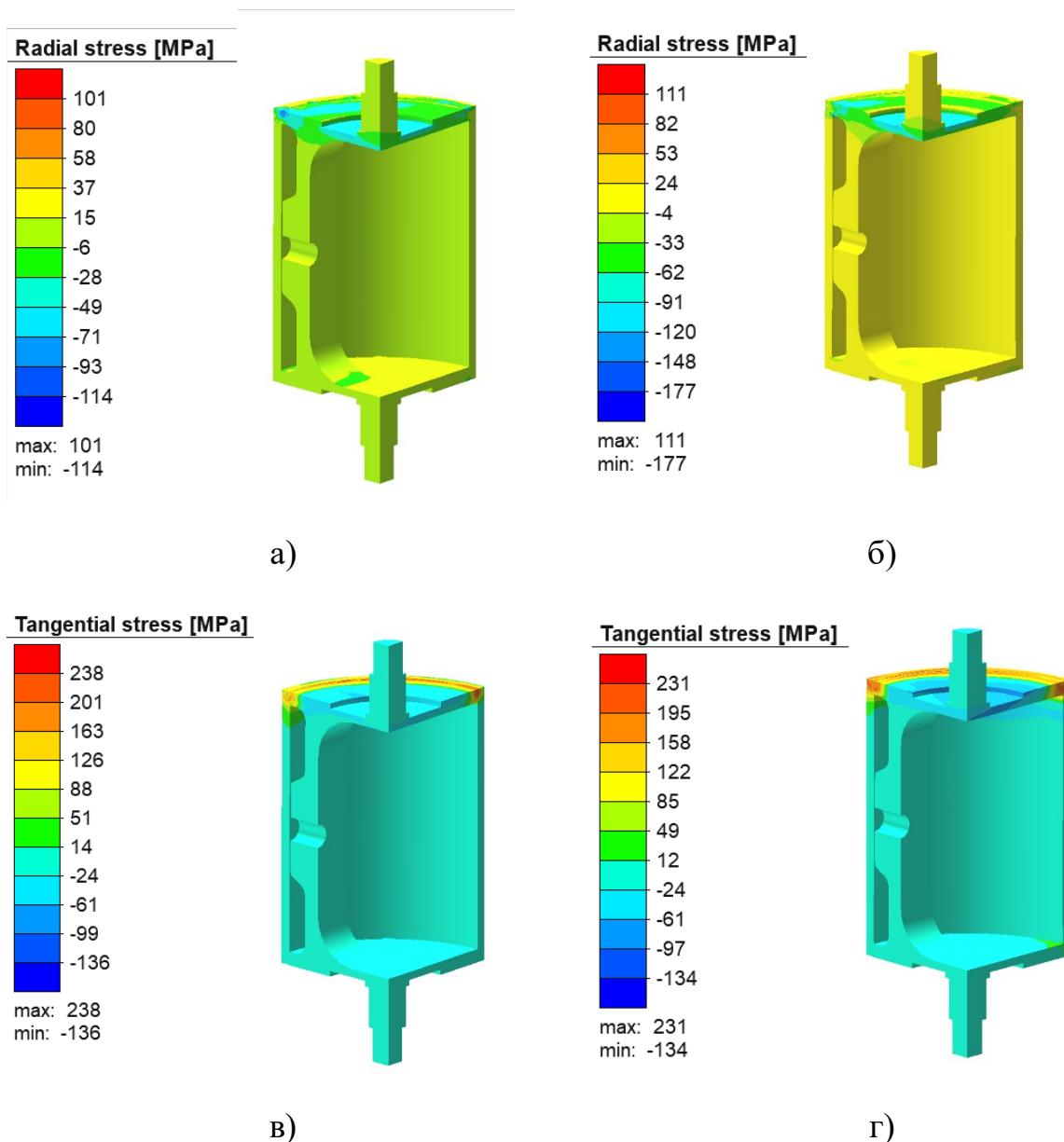


Рисунок 4.5 - Поля розподілу нормальних радіальних та поздовжніх напружень для моделей 2 та 3: а) радіальні нормальні напруження для моделі 2; б) радіальні нормальні напруження для моделі 3; в) поздовжні напруження для моделі 2; г) поздовжні напруження для моделі 3

На ділянці зварного шва в області напівстінки формуються нормальні радіальні напруження стиску величиною до - 114 МПа при лазерному зварюванні за режимом моделі 2, які зменшуються за абсолютною величиною при віддаленні від площини напівстінки та змінюються на напруження розтягу величиною до 40 МПа в області зварного шва в площині, що розташована під кутом в  $90^0$  до

площини напівстінки. При лазерно-мікроплазмовому зварюванні (модель 3) напруження стиску досягають значень до - 90 МПа та до 25 МПа на відповідних ділянках. Для інших досліджених варіантів залежність аналогічна.

Для поздовжніх напружень залежність зміни їх величини зворотна. На ділянці зварного шва в області напівстінки формуються поздовжні напруження розтягу величиною до 165 МПа при лазерному зварюванні за режимом моделі 2, які збільшуються при віддаленні від площини напівстінки до 200 МПа в області зварного шва в площині, що розташована під кутом в  $90^0$  до площини напівстінки. При лазерно-мікроплазмовому зварюванні (модель 3) напруження розтягу досягають значень до 160 МПа та до 190 МПа на відповідних ділянках. Вони розподілені більш рівномірно по довжині шва та охоплюють більшу область, що відповідає зміні форми проплавлення та збільшенню ширини шва. Для інших досліджених варіантів залежність аналогічна.

Як нормальні радіальні, так і поздовжні напруження не перевищують межу текучості основного матеріалу високоміцного алюмінієвого сплаву марки 7005 (середнє значення згідно стандарту близько 270 МПа). Максимальні за значеннями поздовжні напруження близько 200 МПа формуються в металі зварного шва в площині, що розташована під кутом в  $90^0$  до площини напівстінки для моделі 2.

Величина осьових нормальних напружень розтягу для всіх досліджених варіантів знаходилась в межах від 15 до 35 МПа, їх максимальні значення спостерігались на ділянці навколо напівстінки.

#### **4.2.2 Аналіз розподілу еквівалентних напружень у модельних прототипах**

Граничне значення напруженого стану в точці тіла, сформованого під впливом тепла зварювального джерела нагріву, що характеризує значення інтенсивності напружень в точці, перевищення якого призводить до утворення в точці пластичних деформацій визначали за умовою пластичності Мізеса-Генкі.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \sigma_s = 0 \quad (2.12)$$

де,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження;

$\sigma_s$  – критичне значення напружень, коли починається пластична деформація (максимально припустимі напруження).

Згідно неї, пластична деформація у точці тіла починається з моменту часу, коли величина інтенсивності напружень в точці досягає значення нормальної межі текучості матеріалу.

Утворення деформацій і напружень при зварюванні пов'язане з пружно-пластичною поведінкою металу в умовах дії нестационарних температурних полів, впливом високих температур з суттєво нерівномірним їх розділом. Утворення тимчасових і залишкових деформацій та напружень у зварних з'єднаннях пов'язане зі зміною об'єму тіл під впливом тепла зварювального джерела нагріву.

Величина пластичних деформацій залежить, головним чином, від теплових характеристик зварювальних процесів та властивостей металу, що зварюється. В нашому випадку зварювання виконувалось без застосування присадкового матеріалу. Термодеформаційні процеси при зварюванні призводять до формування об'ємного напруженого стану, при якому значення головних нормальних напружень відмінні від нуля. Відповідно до четвертої теорії міцності (для пластичних матеріалів, які однаково працюють на розтяг та стиск) цей стан, можна оцінити шляхом співставлення значень еквівалентних напружень з гранично допустимими напруженнями для металу, що зварюється. Застосування висококонцентрованих рухомих джерел нагріву призводить до утворення нерівномірно розподілених пластичних деформацій виробів, спричиняє виникнення усадкових сил, під впливом яких відбувається переміщення точок тіла в просторі.

Поля еквівалентних напружень для моделей 1 – 4 наведені на рисунку 4.6.

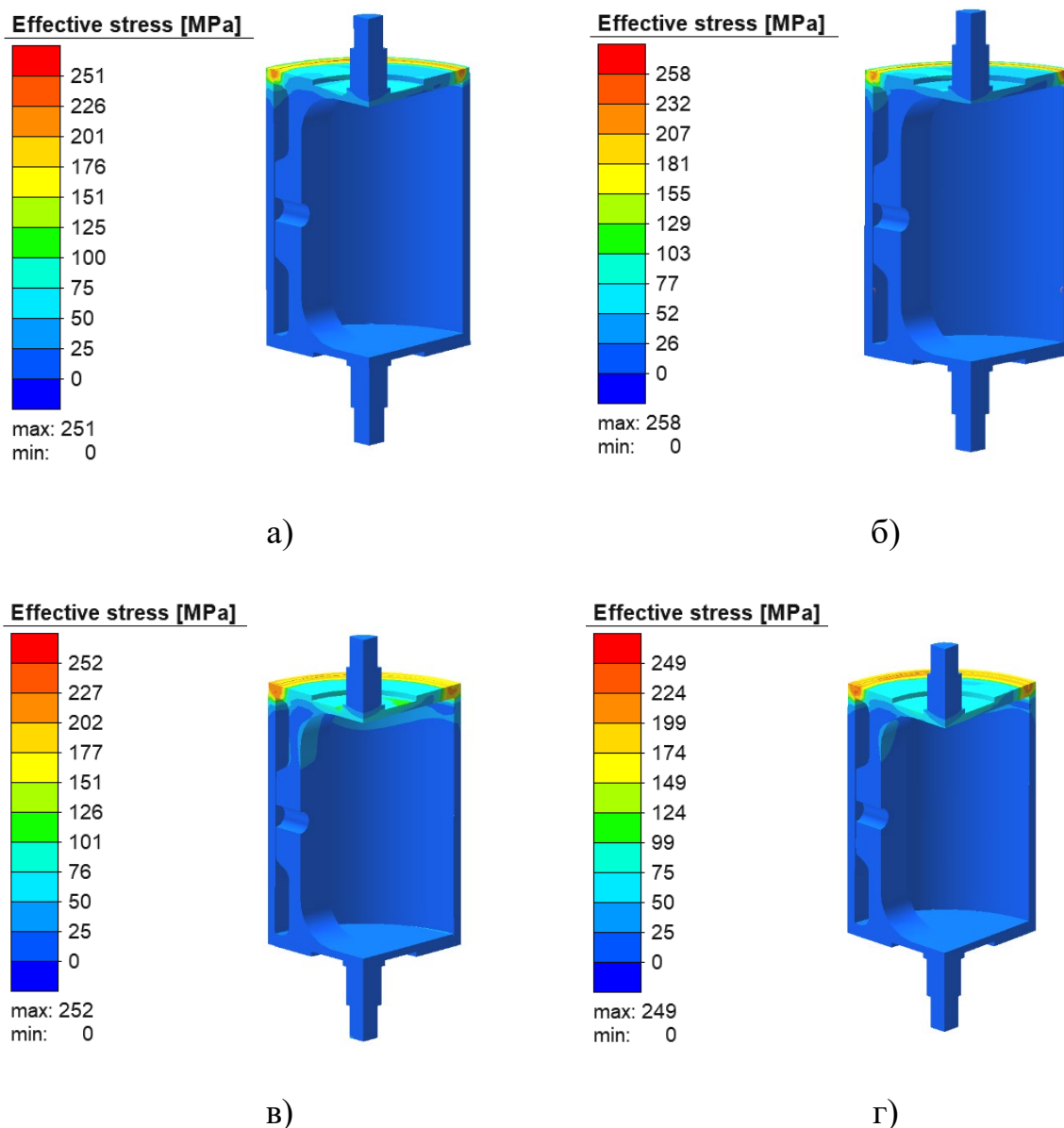


Рисунок 4.6 - Поля розподілу еквівалентних напружень для моделей 1 – 4:

а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

Поля розподілу еквівалентних напружень на рисунку 4.6 дозволяють простежити характерні для всіх модельних зразків особливості формування НДС.

Максимальні за своєю величиною еквівалентні напруження формуються при лазерному зварюванні при потужності випромінювання 500 Вт на швидкості 240 м/год (модель 2) у площині напівстінки. Їх величина на ділянці зварного шва досягає близько 260 МПа та мало змінюється по довжині шва при віддаленні від площини напівстінки. Зменшення швидкості зварювання до 180 м/год при

постійній потужності лазерного випромінювання призводить до збільшення тепловкладення та розширення ділянки дії максимальних еквівалентних напружень у зоні зварного шва, хоча максимальна величина еквівалентних напружень дещо зменшується до 250 МПа. Мінімальні значення характерні для лазерно-мікроплазмового зварювання за режимом, що був застосований для розрахунку моделі 4, коли потужність плазмового джерела нагріву зменшується з 1200 до 1000 Вт. Величина еквівалентних напружень на ділянці зварного шва знаходиться в межах 175 – 200 МПа, а по лінії сплавлення та в корені шва знаходиться в межах від 200 до 225 МПа. Для моделі 3 еквівалентні напруження набувають максимальних значень близько 230 МПа лише на ділянці кореня шва, хоча область дії максимальних еквівалентних напружень дещо збільшується у порівнянні з моделлю 4.

Таким чином при лазерному зварюванні зі швидкістю 240 м/год величина еквівалентних напружень максимальна і досягає до 260 МПа в зоні зварного шва в площині напівстілки. Збільшення тепловкладення при лазерному зварюванні на більшій погонній енергії або перехід до лазерно-мікроплазмового процесу призводять до зміни форми та збільшення ширини зварного шва, зменшення величини максимальних еквівалентних напружень при розширенні області їх дії. Однак, у всіх випадках величина еквівалентних напружень не перевищує межу текучості матеріалу, який зварюється, що свідчить про адекватність запропонованого в розділі 3 підходу щодо визначення рекомендованих режимів зварювання. При збільшенні області дії максимальних еквівалентних напружень ділянка локалізації їх максимальних значень зменшується і вони зосереджені по лінії сплавлення та/або у корені шва.

#### **4.2.3 Аналіз розподілу еквівалентних деформацій та переміщень у модельних прототипах**

Розподіл еквівалентних пружних деформацій для всіх чотирьох модельних зразків наведений на рисунку 4.7, а еквівалентних пластичних деформацій на рисунку 4.8.

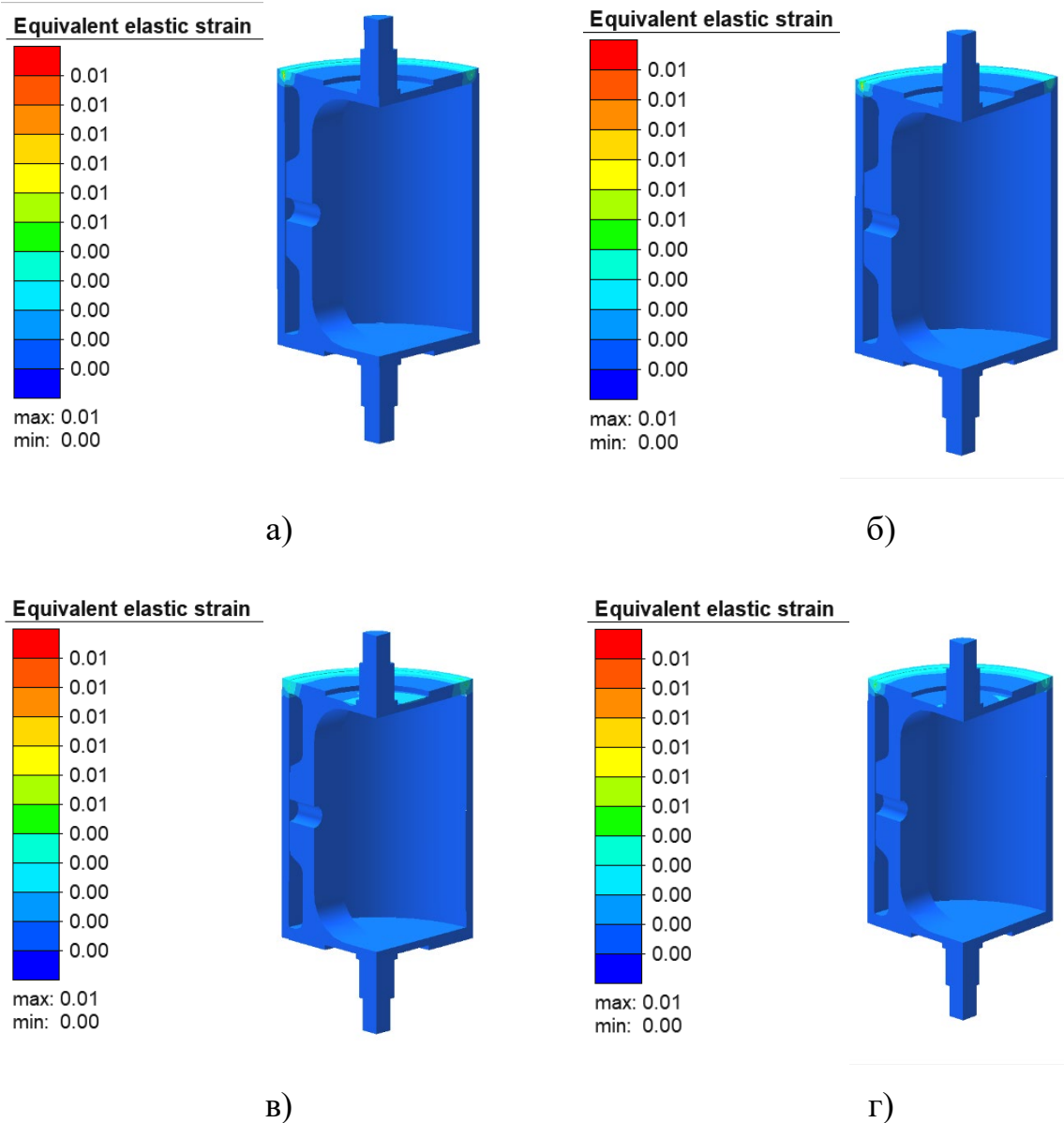


Рисунок 4.7 - Поля розподілу еквівалентних пружних деформацій для модельних зразків номер 1 – 4: а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

У таблиці 4.2 наведені максимальні значення пружних та пластичних еквівалентних деформацій, значення максимальних еквівалентних деформацій для моделей 1 – 4.

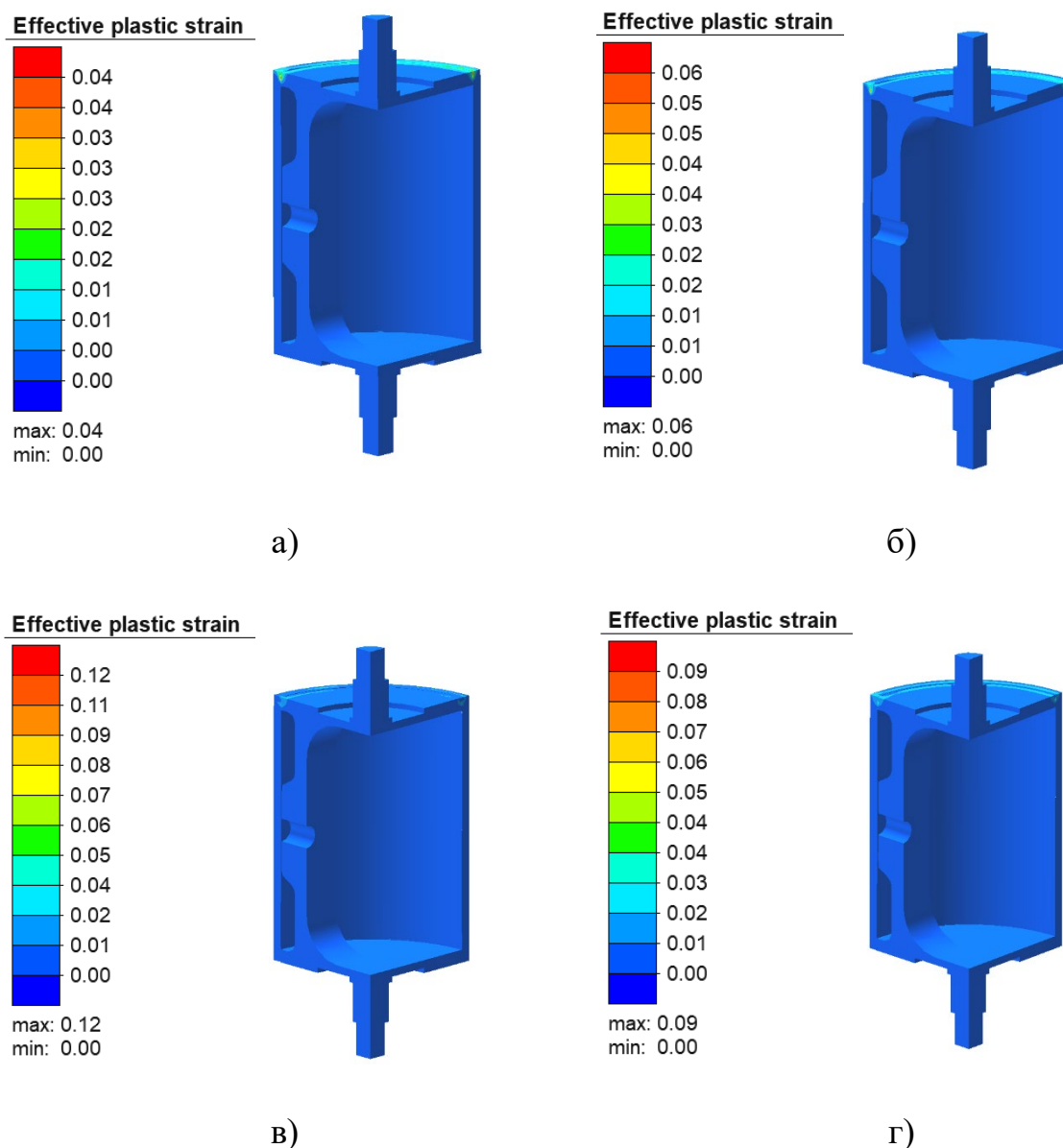


Рисунок 4.8 - Поля розподілу еквівалентних пластичних деформацій для модельних зразків номер 1 – 4: а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

Максимальні значення як пружних, так і пластичних еквівалентних деформацій спостерігаються в кореневій частині зварних швів у всіх випадках. По довжині шва їх розподіл практично рівномірний, хоча можна відзначити незначне зменшення їх величини в розташованій під кутом в  $90^0$  до площини внутрішньої напівстінки області. При лазерно-мікроплазмовому зварюванні з максимальним тепловкладенням (модель 3) область, в якій діють максимальні

пластичні еквівалентні деформації переміщується в бік фланцю, при лазерному зварюванні розподіл максимальних еквівалентних пластичних деформацій майже симетричний відносно осі зварного шва. Максимальні по величині еквівалентні деформації досягають 0,06 % при лазерному зварюванні на мінімальній погонній енергії (модель 2), вони локалізовані в вузькій області, яка відповідає області зварного шва. Мінімальні еквівалентні деформації спостерігаються при лазерно-мікроплазмовому зварюванні за мінімального тепловкладення мікроплазмового джерела нагріву в 1000 Вт (модель 4), область їх дії зростає, а розподіл більш рівномірний при переході від лазерного зварювання до лазерно-мікроплазмового.

Таблиця 4.2 - Максимальні значення пружних, пластичних еквівалентних деформацій та максимальні еквівалентні деформації для моделей 1 – 4 (%)

| Еквівалентні деформації | Номер моделі |      |      |      |
|-------------------------|--------------|------|------|------|
|                         | 1            | 2    | 3    | 4    |
| пружні                  | 0,01         | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| пластичні               | 0,04         | 0,05 | 0,03 | 0,02 |
| Сумарне значення        | 0,05         | 0,06 | 0,04 | 0,03 |

Враховуючи вимоги до виробу, нам необхідно забезпечити мінімальну величину переміщень утворюючої циліндра та мінімальні значення переміщень з площини для фланцю.

Результати розрахунків переміщень утворюючої по діаметру досліджених моделей 1 – 4 після встановлення прихваток та зварювання кільцевого шва наведені на рисунку 4.9.

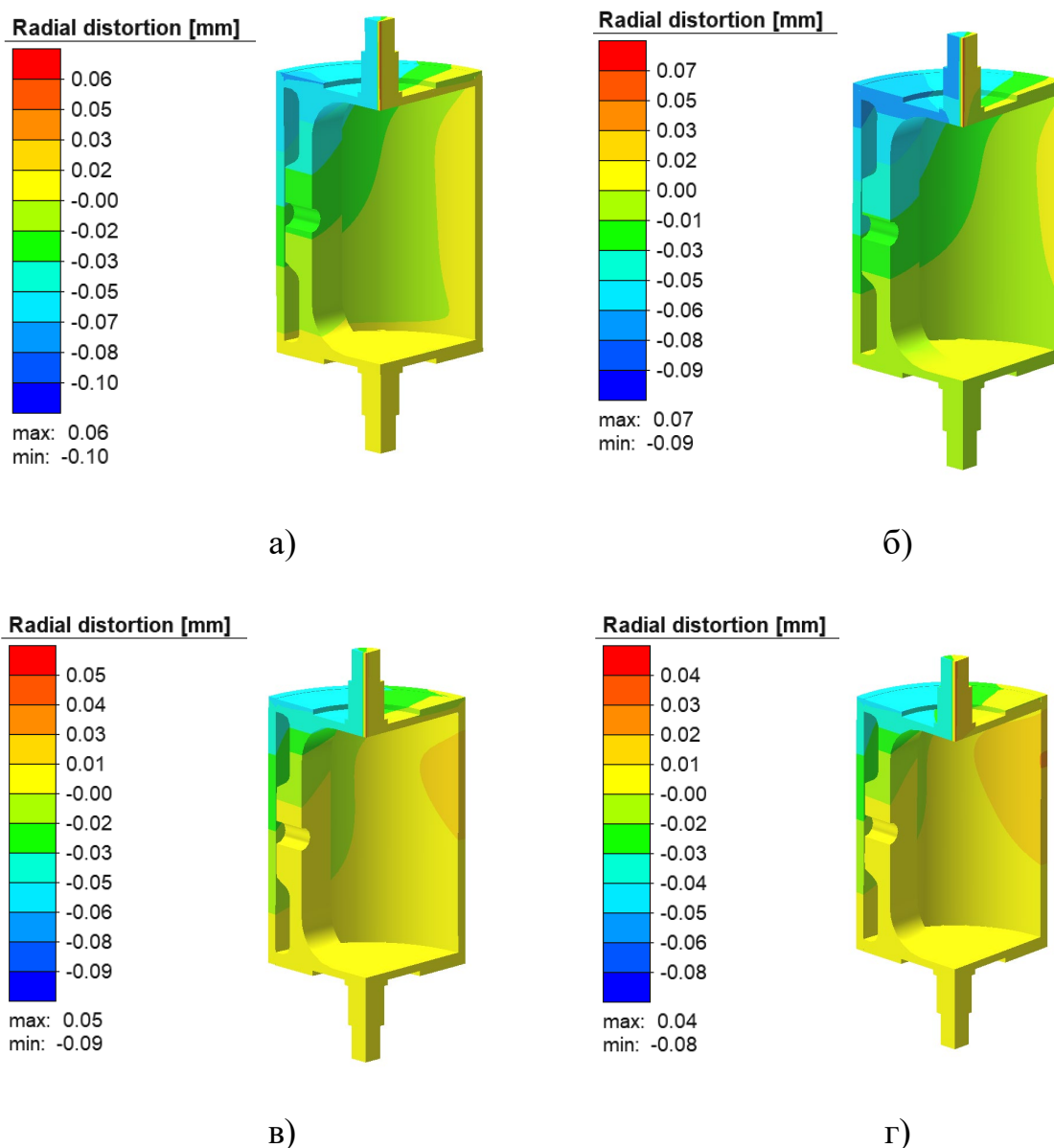


Рисунок 4.9 - Поля переміщень утворюючої циліндра по діаметру після встановлення прихваток та зварювання для модельних зразків номер 1 – 4:  
 а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

Аналіз полів переміщень утворюючої циліндра по діаметру модельних зразків свідчить, що при лазерному зварюванні з мінімальною погонною енергією ( $V_z = 240$  м/год) максимальне скорочення зразка в діаметральній площині близько -0,07 мм спостерігається в області внутрішньої напівстілки навколо фланця (модель 2). При віддаленні від фланця по утворюючій переміщення зменшуються за своєю величиною, але на половині висоти

спостерігається скорочення модельного зразка близько  $-0,03$  мм. В області фланцю по довжині шва при віддаленні від напівстінки скорочення в діаметральній площині зменшуються та досягають нуля. Така залежність характерна для всіх досліджених режимів зварювання, однак значення переміщень дещо відрізняються.

Зокрема при лазерно-мікроплазмовому зварюванні (моделі 3 та 4) в діаметральній площині, що є перпендикулярною напівстінці, в розташованій приблизно на три чверті висоти стінки області виникає ділянка збільшеного відносно вихідного розміру діаметра до  $0,02$  мм.

Результати розрахунків величини поздовжніх переміщень наведені на рисунку 4.10, а загальних на рисунку 4.11.

Аналіз полів поздовжніх переміщень свідчить, що в області напівстінки вони фактично дорівнюють нулю, але в міру віддалення від напівстінки по довжині шва скорочення збільшуються та досягають максимальних значень у площині, що є перпендикулярною площині напівстінки для всіх випадків. Для лазерного зварювання за режимом 2 величина максимального скорочення сягає до  $-0,07$  мм у перпендикулярній напівстінці області. При зварюванні на режимі 1, з більшою погонною енергією, величина максимального поздовжнього скорочення складає до  $-0,05$  мм. При переході до лазерно-мікроплазмового зварювання величина максимального значення поздовжнього скорочення зменшується до  $-0,04$  мм для моделей 3 та 4. Їх величина фактична однакова як в металі стінки, так і фланця в області зварного шва.

Значення загальних переміщень (рисунок 4.11) суттєво відрізняються в області зварного шва для стінки та фланця. У всіх випадках величина загальних переміщень стінки більша за переміщення в фланці, досягає максимального значення до  $0,08$  мм в області напівстінки при лазерному зварюванні. Їх величина зменшується в міру віддалення від напівстінки, у перпендикулярній напівстінці площині загальні переміщення складають до  $0,06$  мм, а їх величина однакова для матеріалу стінки та фланця навколо зварного шва, що пов'язано зі зміною

жорсткості конструкції. Мінімальні значення загальних переміщень характерні для лазерно-мікроплазмового зварювання.

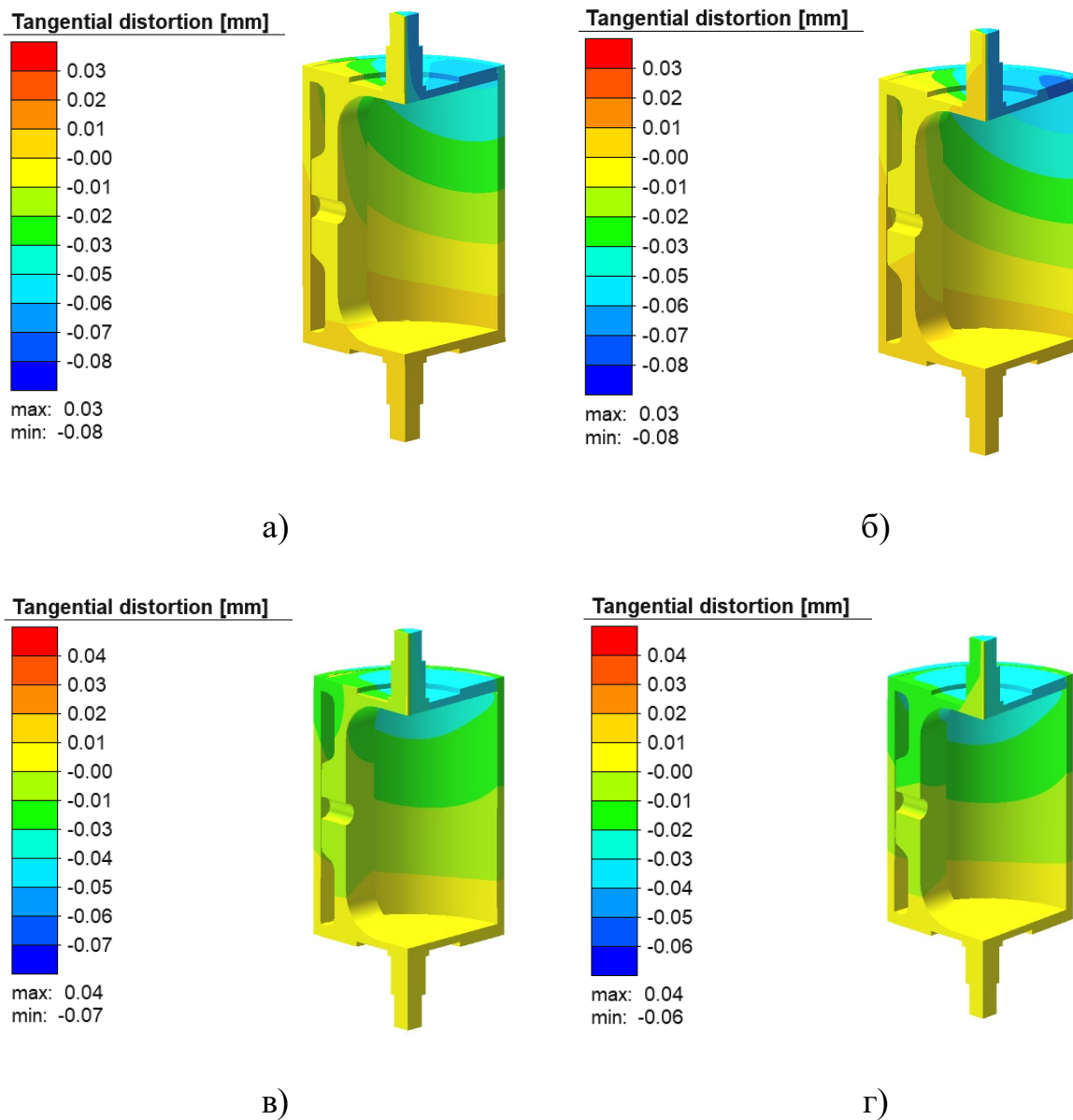


Рисунок 4.10 - Поля поздовжніх переміщень після встановлення прихваток та зварювання для модельних зразків номер 1 – 4: а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

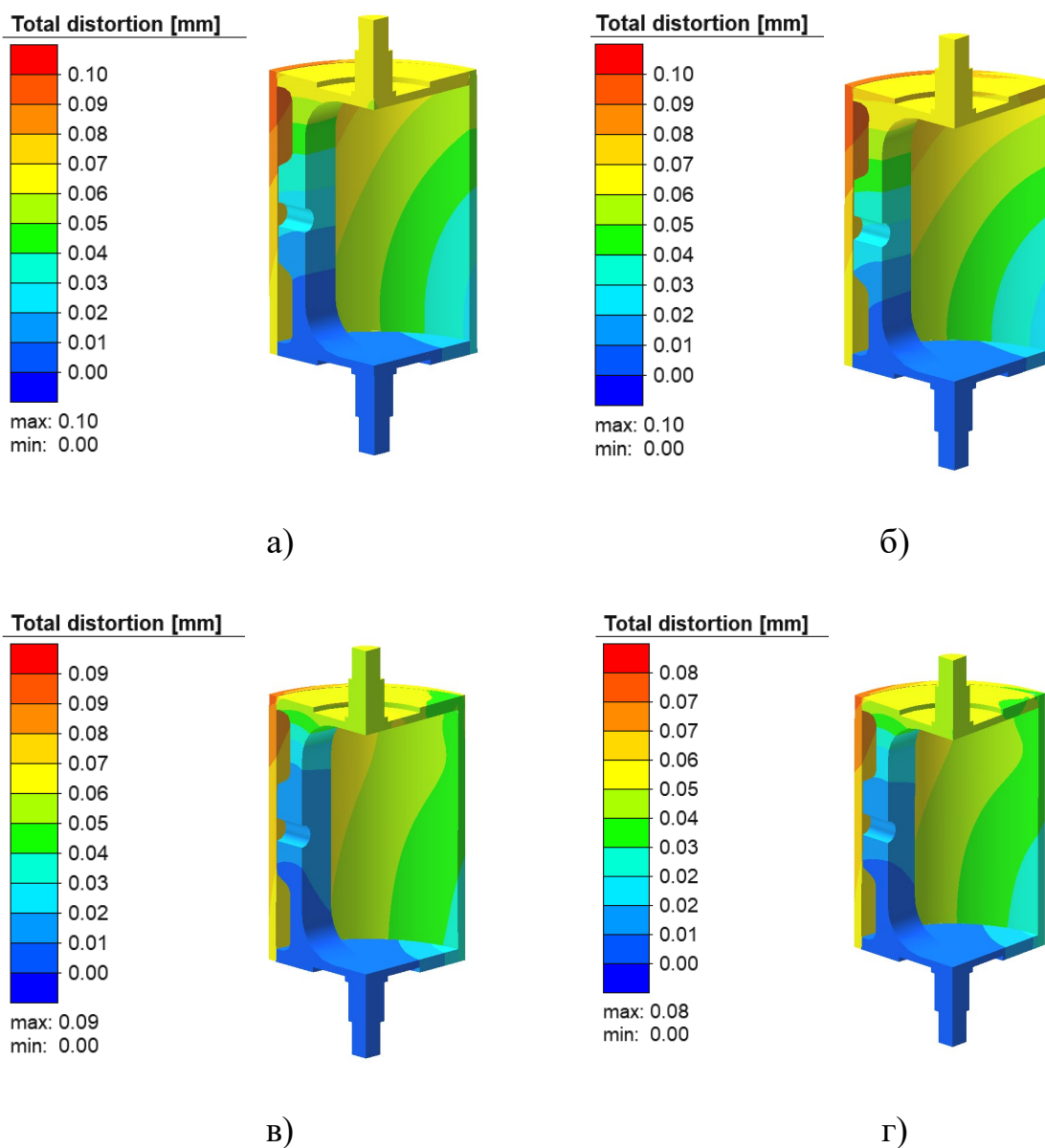


Рисунок 4.11 - Поля загальних переміщень після встановлення прихваток та зварювання для модельних зразків номер 1 – 4: а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

Важливою умовою при виборі режимів зварювання було забезпечення величини осьових переміщень на рівні не більше за 0,02 мм.

Поля осьових переміщень для моделей 1 – 4 наведені на рисунку 4.12.

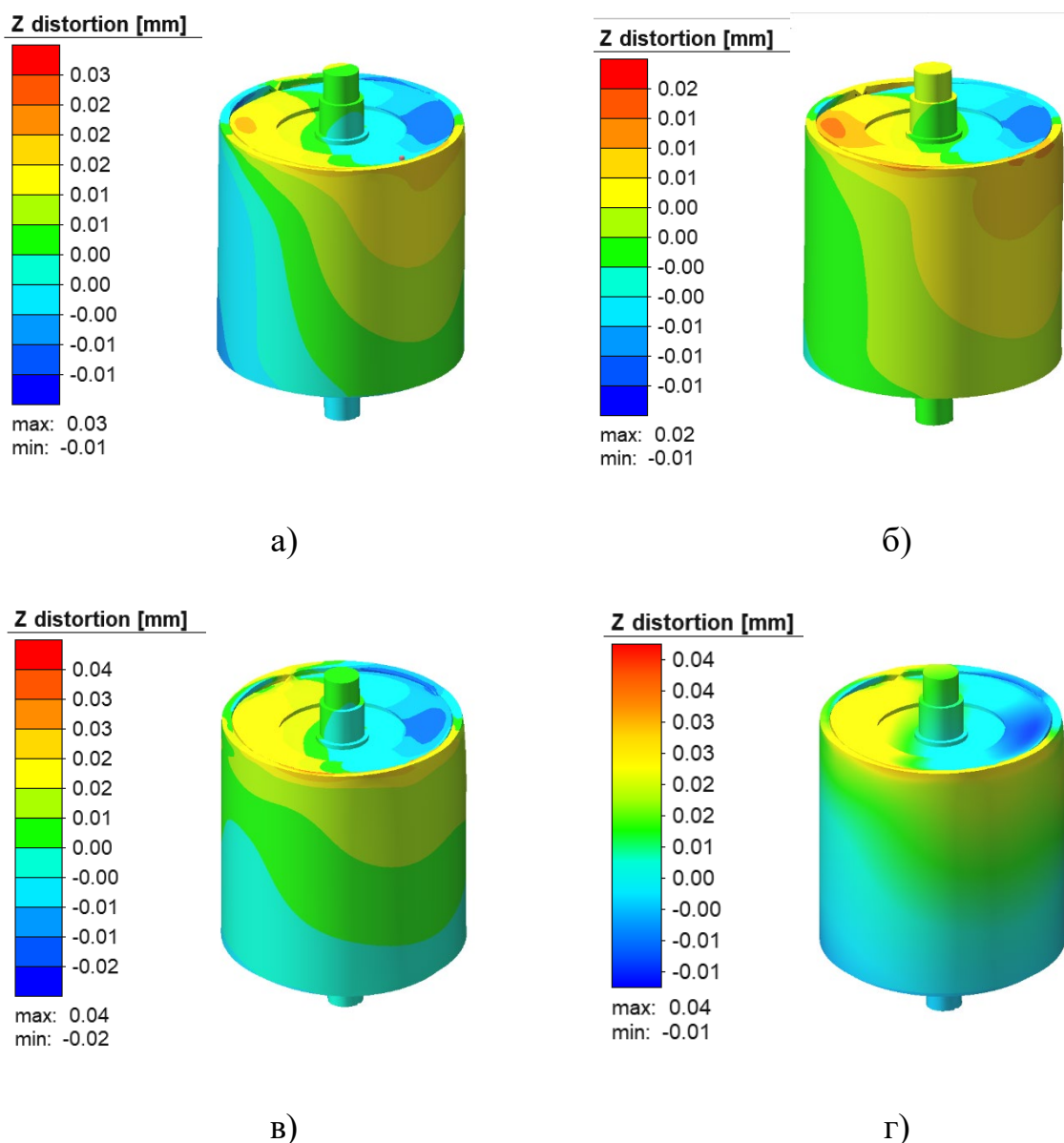


Рисунок 4.12 - Поля осьових переміщень після встановлення прихваток та зварювання для модельних зразків номер 1 – 4: а) для моделі 1; б) для моделі 2; в) для моделі 3; г) для моделі 4

Аналіз результатів розрахунків осьових переміщень свідчить, що вони розподілені по довжині зварного шва не рівномірно, що пов'язано з наявністю чотирьох прихваток та внутрішньої напівстінки, нерівномірністю нагріву при послідовному формуванні шва. В області напівстінки при лазерному зварюванні модельного зразка 2 величина осьових переміщень мінімальна та близька до нуля,

але при віддаленні від напівстінки вона зростає до 0,012 мм при проходженні однієї восьмої частини шва, а потім зменшується до -0,008 мм на діаметрально протилежній ділянці. Зварювання за режимом моделі 1, з більшим тепловкладенням, призводить до збільшення максимальних осьових переміщень до 0,015 мм, хоча максимальні значення скорочення залишаються на рівні близько -0,008 мм.

Перехід до лазерно-мікроплазмового зварювання не змінює загальну картину осьових переміщень хоч і призводить до збільшення їх максимальних значень до 0,021 мм для моделі 3 та 0,023 мм для моделі 4. Максимальні значення осьових скорочень знаходяться на рівні близько -0,009 мм.

Загальний аналіз формування НДС для модельних зразків свідчить, що встановлення прихваток для верхнього та нижнього фланців виробу та наступне послідовне накладання кільцевих швів характеризується незначним взаємним впливом на формування загального НДС виробу, що пов'язано зі значною відстанню між зварними швами та майже відсутністю взаємного впливу термічних циклів зварювання окремих швів для всіх досліджених моделей.

Однак, на рівень переміщень суттєвий вплив має жорсткість зібраної на прихватках конструкції, яка залежить від кількості встановлених для закріплення фланців у циліндричному корпусі прихваток. Для лазерного зварювання за режимами моделі 2 були виконані розрахунки величини максимальних осьових переміщень залежно від кількості прихваток. Розглядали варіанти для 4-х та 8-ми прихваток. Результати наведені в таблиці 4.3.

Внаслідок змінної по довжині зварного шва жорсткості зібраної конструкції моделі гіроскопа (наявність напівстінки), нерівномірного нагріву та формування складного НДС спостерігається втрата стійкості фланцю в його площині, про що свідчать поля осьових переміщень на рисунку 4.12. Задля зменшення величини переміщень фланця з площини необхідна менша відстань між окремими прихватками. За результатами розрахунків встановлено, що для мінімізації переміщення поверхні фланця із площини кількість діаметрально протилежно розташованих прихваток має бути збільшена. При збільшенні

кількості прихваток від 4-х до 8-ми величина переміщень поверхні фланця із площини зменшується з 0,02 до 0,014 мм.

Таблиця 4.3 - Значення осьових переміщень після встановлення прихваток та після зварювання кільцевого шва для моделі 2

| Кількість прихваток, шт | Максимальне значення осьових переміщень після встановлення прихваток, мм | Мінімальне значення осьових переміщень після встановлення прихваток, мм | Максимальне значення осьових переміщень після встановлення прихваток та зварювання, мм | Мінімальне значення осьових переміщень після встановлення прихваток та зварювання, мм |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 4                       | 0,043                                                                    | -0,017                                                                  | 0,012                                                                                  | -0,008                                                                                |
| 6                       | 0,033                                                                    | -0,013                                                                  | 0,01                                                                                   | -0,006                                                                                |
| 8                       | 0,027                                                                    | -0,011                                                                  | 0,009                                                                                  | -0,005                                                                                |

#### 4.3 Експериментально-розрахункове визначення компонент НДС при лазерному зварюванні модельного прототипу з алюмінієвого сплаву 7005

Апробацію розробленого апаратного та програмного забезпечення проводили шляхом проведення експерименту з лазерного зварювання порожнього циліндричного виробу розміром  $\varnothing 41 \times 41$  мм з алюмінієвого сплаву 1915 (7005) (рисунок 4.13). Швидкість зварювання становила 4 м/хв за потужності випромінювання волоконного лазера 500 Вт. Спочатку виріб протравлювали хімічно (для усунення оксидної плівки) та збирали, вставляючи обидві кришки в посадкові місця корпусу. Потім для однієї з кришок виконували зварювання чотирьох точок-прихваток, які мають діаметрально протилежне розташування. Після цього кришку приварювали кільцевим швом зі стикуванням початкової та кінцевої ділянок. Після закінчення зварювання однієї сторони циліндричного виробу переходили до зварювання другої сторони, яка виконувалася аналогічно.

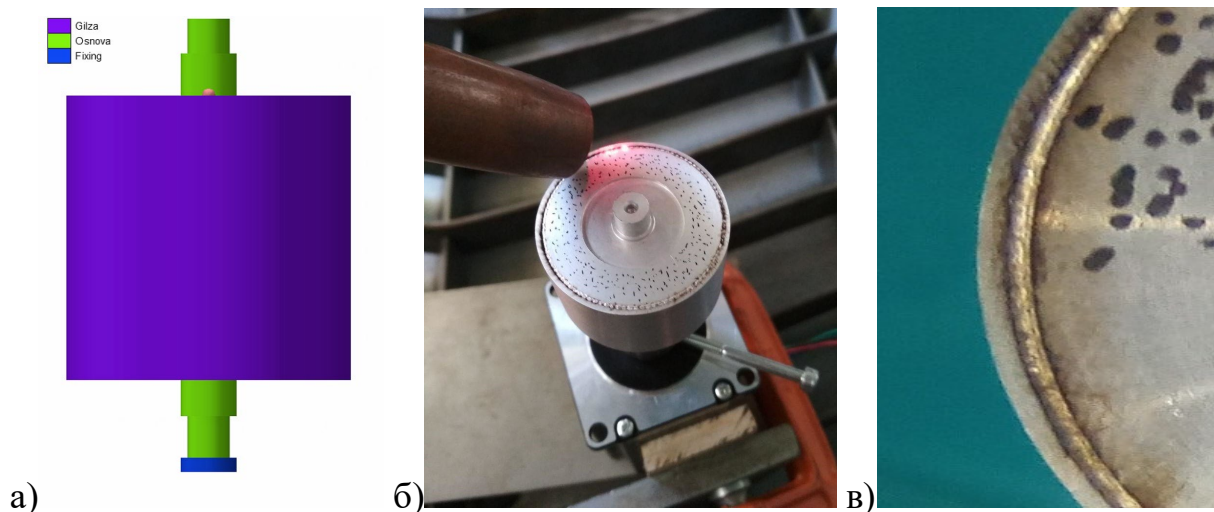


Рисунок 4.13 - Приварювання кришки до стакану (матеріал – сплав 7005):

а) деталь, що зварюється (вид збоку); б) фрагмент зварювального стенду зі звареною деталлю; в) фрагмент зварного шва.

Фотографування зварюваного зразка з кожної сторони виконували в 3 прийоми: перед зварюванням, після зварювання точкових прихваток і після зварювання безперервного кільцевого шва. Перед фотографуванням на досліджувані поверхні був нанесений спекл-візерунок у вигляді хаотично розташованих чорних крапок. Після другого та третього прийомів фотографування відповідної зі зварених сторін виконували програмну обробку порівнюваних зображень (рисунок 4.14). Для цього застосовували оригінальний програмний продукт визначення компонент напружено-деформованого стану виробу після зварювання DIC методом.



Рисунок 4.14 - Обробка отриманих фотографічних зображень (а) та розрахунок залишкових зварювальних деформацій (б) за допомогою програмного продукту визначення компонент напружено-деформованого стану виробу DIC методом

За результатами програмної обробки фотографічних зображень отримували загальні картини залишкових переміщень з кількісним указанням значень відхилення від базового (початкового) положення (рисунок 4.15). Було встановлено, що найбільші залишкові переміщення спостерігаються після лазерного зварювання точкових прихваток. Величина переміщень у цьому разі доходила до 0,02...0,05 мм, хоча точкові прихватки виконували діаметрально протилежно при потужності випромінювання до 500 Вт протягом 0,2 секунд кожна. Після виконання лазерного зварювання кільцевого шва величина залишкових переміщень дещо зменшувалась – до 0,01...0,02 мм. Переміщення першого зі зварюваних торців конструкції були дещо меншими на до  $\pm 0,005$  мм

переміщень другої сторони. Це може пояснюватися певним зміщенням бази другого торця щодо першого після виконання на ньому зварного з'єднання.

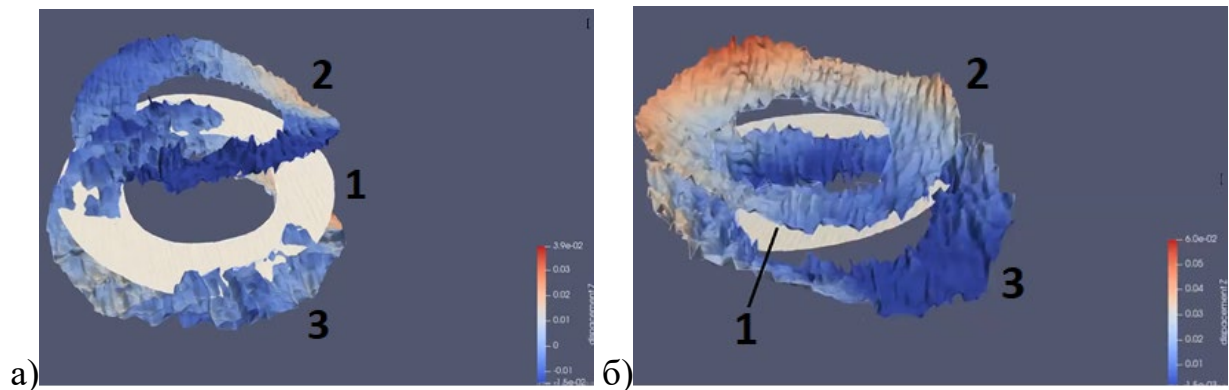


Рисунок 4.15 - Результати визначення відхилень положення приварених кришок від початкового положення після зварювання першої (а) і другої (б) сторін циліндричного зразка: 1 – базове положення; 2 – положення після зварювання точкових прихваток; 3 – положення після зварювання кільцевого шва

Визначення залишкових напружень виконували розрахунковим методом, ґрунтуючись на кривих плинності досліджуваних матеріалів та величинах залишкових переміщень та деформацій. Для цього, згідно з описаною методикою розрахункового передбачення компонент НДС, на підставі параметрів режимів відповідних способів зварювання виконувалося визначення температурних полів нагрівання звареного виробу. За розрахунковим розподілом температурних полів у виробі, що зварюється, визначали величини переміщень ділянок елементної сітки. Це дозволяло розрахувати залишкові напруження в звареній конструкції (рисунок 4.16). Розрахунок показав, що величини залишкових переміщень торця виробу після зварювання кільцевого шва перебувають на рівні 0,02 мм, а залишкових напружень у цій же зоні – в межах 50-60 МПа. При цьому в зоні шва напруження можуть доходити до 200 МПа, а в ЗТВ – від 70 до 150 МПа. При цьому переміщення, які виникають від попередньо виконаних зварювальних точок – прихваток, майже не впливають на рівень залишкових напружень.

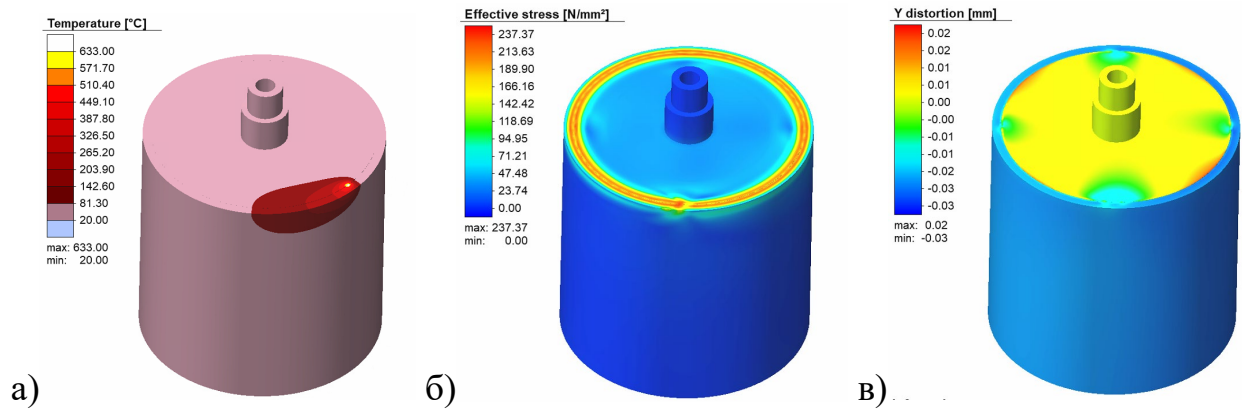


Рисунок 4.16 - Результати розрахунку температурних полів (а), полів залишкових напружень по Мізесу (б) і полів залишкових переміщень (з урахуванням 4-х діагональних прихваток) (в)

Для визначення похибки розрахункового методу було виконане порівняння отриманих експериментально за допомогою DIC методу результатів залишкових переміщень (рисунок 4.15,а) з обчисленими за допомогою методики розрахункового передбачення компонент НДС результатами (рисунок 4.16,в). У розглянутому прикладі величини залишкових переміщень збіглися (0,02 мм в обох випадках). Більш детальне вивчення інших зразків показало, що відхилення збіжності залишкових переміщень (похибка розрахунків) перебуває у межах 10...20%, що є задовільним результатом.

#### 4.4. Висновки за розділом 4.

1. Виконаний методом скінчених елементів аналіз компонент напружено-деформованого стану показав, що при зварюванні з неповним проплавленням максимальні поздовжні напруження розтягу, близько 200 МПа, формуються в металі зварного шва в площині, що розташована під кутом в  $90^0$  до площини напівстінки при лазерному зварюванні на мінімальній погонній енергії, що пов'язано з нерівномірністю нагріву при послідовному формуванні шва та зміною умов відведення тепла від ділянки нагріву залежно від наявності та близькості напівстінки. При цьому величина еквівалентних напружень досягає 260 МПа в площині напівстінки.

2. При зварюванні з неповним проплавленням перехід від лазерного до лазерно-мікроплазмового процесу з мінімальною погонною енергією призводить до зменшення рівня еквівалентних напружень в зварному з'єднанні хоча область дії максимальних еквівалентних напружень дещо збільшується. Величина еквівалентних напружень на ділянці зварного шва знаходиться в межах 175 – 200 МПа, а по лінії сплавлення та в корені шва змінюється від 200 до 225 МПа залежно від перетину який розглядається.

3. Розроблений спосіб визначення компонент напружено-деформованого стану виробу після його зварювання шляхом отримання цифрових стереозображень до та після зварювання з подальшою комп'ютерною обробкою. В якості джерела світла при фотографуванні виробу може використовуватися лазерне випромінювання з довжиною хвилі 632,8 нм або природне (цехове) освітлення. Основними перевагами даного способу є можливість визначення переміщень у межах 3...3000 мкм, простота і доступність устаткування, що застосовується, мінімальна підготовка поверхні досліджуваного об'єкта, можливість використання як лазерного, так і звичайного освітлення, а також досить висока точність.

4. Розроблений комбінований розрахунково-експериментальний спосіб визначення залишкових переміщень, деформацій та напружень у звареному виробі за режимами зварювання. Спосіб заснований на визначенні залишкових переміщень примітивів зварюваного виробу методом кореляції цифрових зображень цих примітивів, які були зроблені до і після зварювання, а також на розрахунковому визначенні залишкових переміщень тих самих примітивів. Залишкові напруження в окремих примітивах та у виробі в цілому визначаються розрахунковим методом. Порівняння експериментальних і розрахункових результатів дозволяє визначати похибку і, за необхідності, вводити поправочний коефіцієнт.

5. Розглянутий приклад лазерного зварювання виробів космічної галузі з легких сплавів двома герметичними кільцевими швами з неповним проплавленням із попереднім виконанням прихваток точковим лазерним

зварюванням. Встановлено, що після виконання чотирьох діаметрально протилежних прихваток залишкові переміщення торців виробу можуть сягати 0,02...0,05 мм, а після виконання безперервних кільцевих швів – знижуватися до 0,01...0,02 мм.

6. Розрахунок показав, що величини залишкових переміщень торця виробу після зварювання кільцевого шва перебувають на рівні 0,02 мм, а залишкових напружень у цій же зоні в приповерхневому шарі мадельного зразка – в межах 50-60 МПа. При цьому в зоні шва напруження можуть доходити до 200 МПа, а ЗТВ – від 70 до 150 МПа. При цьому переміщення, що вносяться попередньо виконаними точковими прихватами, майже не впливають на рівень залишкових переміщень.

7. У розглянутому прикладі виміряні та розрахункові величини залишкових переміщень збіглися (по ~0,02 мм в обох випадках). Дослідження інших зразків показали, що відхилення у збігу залишкових переміщень (похибка розрахунків) перебуває у межах 10...20%, що є задовільним результатом і може розглядатися як похибка результатів визначення компонент НДС в цілому.

8. На основі розроблених способів експериментально-розрахункового визначення компонент НДС запропоновано розробити дослідно-промисловий комплекс, який дозволяє виконувати лазерне зварювання об'єктів зі сталей та сплавів з можливістю визначення компонент напружено-деформованого стану цих об'єктів.

Розділ 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ,  
РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ОТРИМАННЯ І НЕРУЙНІВНОГО  
КОНТРОЛЮ ВИСОКОТОЧНИХ ТОНКОСТІННИХ ЗВАРНИХ ВИРОБІВ З  
АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ КОСМІЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

**5.1 Розробка спеціалізованих головок для зварювання із застосуванням  
лазерного випромінювання тонкостінних виробів з алюмінієвих  
високоміцних сплавів**

На підставі проведених досліджень для виконання герметизації високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів були розроблені дві технології зварювання: лазерна та лазерна із супутнім мікроплазмовим підігрівом. Згідно з розробленими технологіями були проведені експерименти зі зварювання зразків-імітаторів гіроскопів. В якості матеріалу зразків використовували алюмінієвий сплав 7005. Зварювання виконували за допомогою відповідних змінних зварювальних головок, які закріплювалися на 3D-маніпуляторі (плотері). Зразки-імітатори, що зварювалися, базували у встановленому на столі плотера обертачі. Зварювання здійснювали в автоматичному режимі з плавним зниженням потужності зварювального джерела нагріву після закінчення процесу (рисунок 5.1). Режими та результати зварювання для двох розроблених зварювальних технологій наведені у таблиці 5.1. Приклад звареного зразка-імітатора наведений на рисунку 5.2.

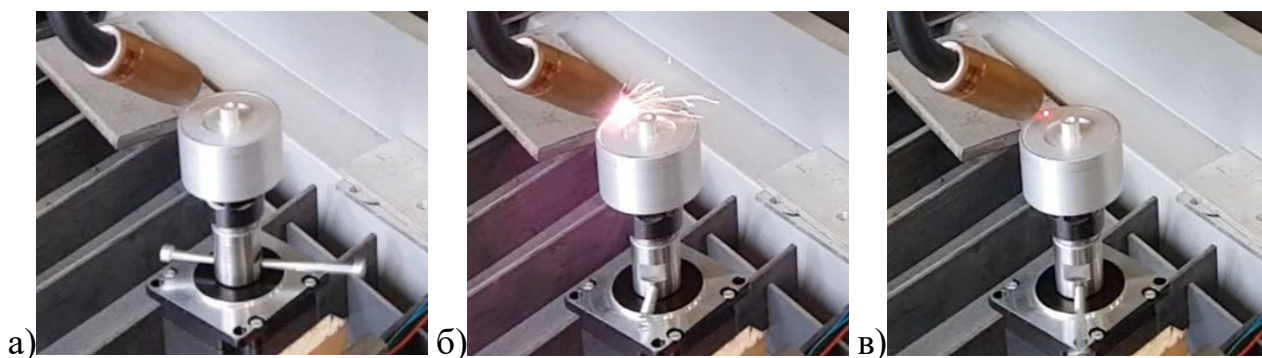
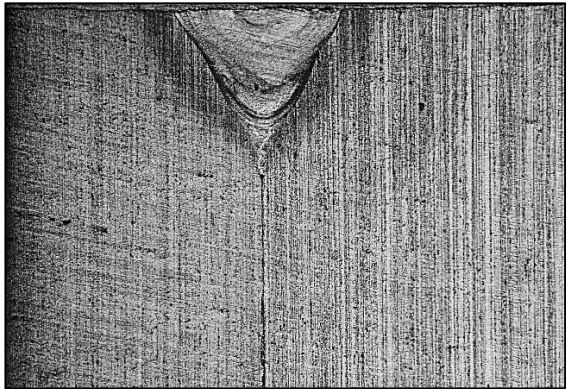
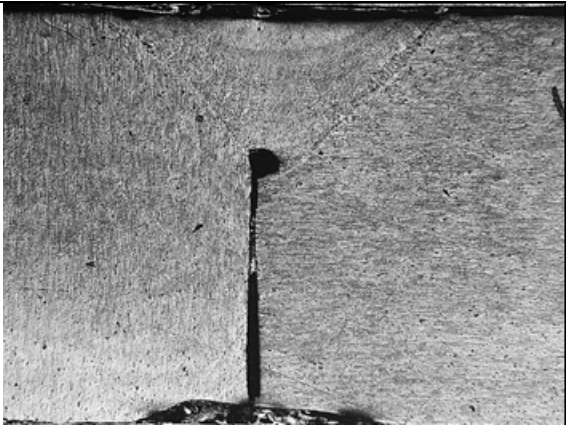


Рисунок 5.1 - Процес лазерного зварювання зразка-імітатора: а) перед стартом;  
б) в процесі; в) зупинка після зварювання

Таблиця 5.1 - Параметри режимів двох розроблених зварювальних технологій та одержувані результати

| №<br>п/п | Найменування<br>технології<br>/<br>Параметри режиму                                                                                                                                                    | Параметри<br>провару h, b<br>[мм] | Результат                                                                            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.       | 3.                                                                                                                                                                                                     | 4.                                | 5.                                                                                   |
| 1.       | Лазерне зварювання<br>/<br>Р = 400 Вт, V = 4 м/хв,<br>Q <sub>з</sub> = 8 л/хв                                                                                                                          | h=0,6 мм;<br>b=0,6 мм             |   |
| 2.       | Лазерне зварювання із<br>супутнім<br>мікроплазмовим<br>підігрівом<br>/<br>Р = 250 Вт, V = 4 м/хв,<br>I=45/31 А, U=27 В,<br>діаметр сопла d=2 мм,<br>Q <sub>пл</sub> =0,3 л/хв, Q <sub>з</sub> =18 л/хв | h=0,56 мм;<br>b=1,1 мм            |  |

Примітка: Р – потужність випромінювання, V – швидкість зварювання; I – зварювальний струм; U – напруга на дузі; d – діаметр сопла плазмотрону; Q<sub>пл</sub> – витрата плазмоутворюючого газу; Q<sub>з</sub> – витрата захисного газу.

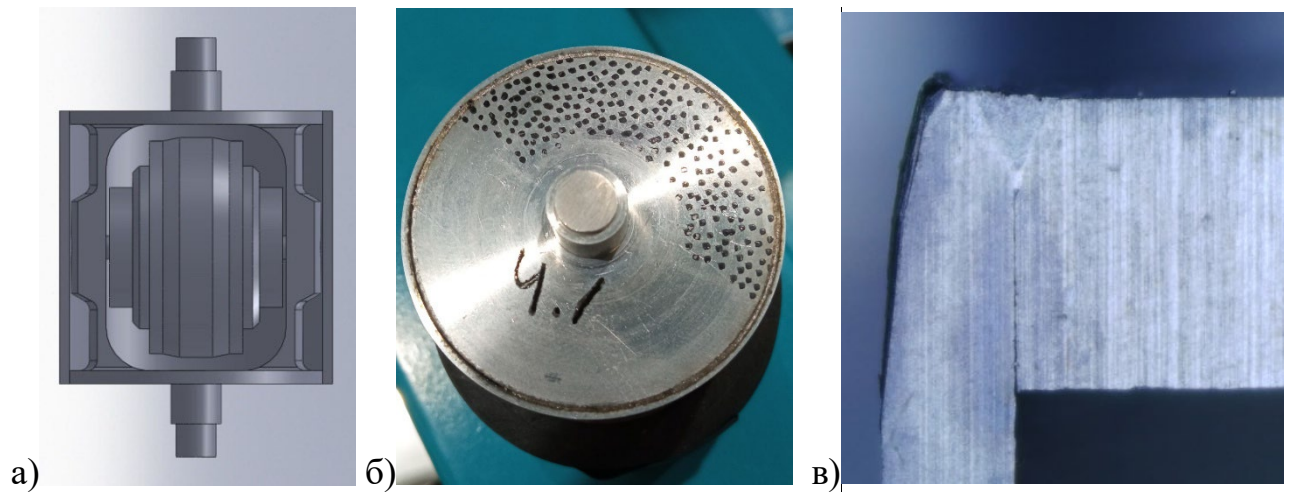


Рисунок 5.2 - Ескіз виробу, що зварюється, а); вид зверху звареного зразка-імітатора, б) і макроструктура поперечного перерізу провару, що був виконаний у зразку-імітаторі цього виробу, в)

Згідно з розробленими технологіями замикання кільцевого шва виконується шляхом переплавлення початкової ділянки на дистанції близько 10...15 мм. При цьому виконується поступове зменшення потужності зварювального джерела. Так, при лазерному зварюванні випромінюванням потужністю 400 Вт на ділянці переплавлення шва потужність знижується до 100 Вт у 3 етапи шляхом зниження її по 100 Вт на кожному етапі. Осцилограми прикладу плавного поетапного зниження потужності з 500 до 100 Вт та до 0 Вт за різний час наведені на рисунку 5.3. Такий підхід дозволяє отримувати бездефектну герметичну ділянку замикання шва (рисунок 5.4).

Як показали дослідження, дотримання температурного режиму в процесі зварювання може виконуватися двома способами: підбором параметрів режиму зварювання, що забезпечують післязварювальне нагрівання не вище 100...120°C, і супутнім охолодженням зварюваного виробу обдуванням потоками захисного газу. Для реалізації останнього способу було розроблене спеціальне кільцеве оснащення, яке розташовується навколо торця виробу, що зварюється.

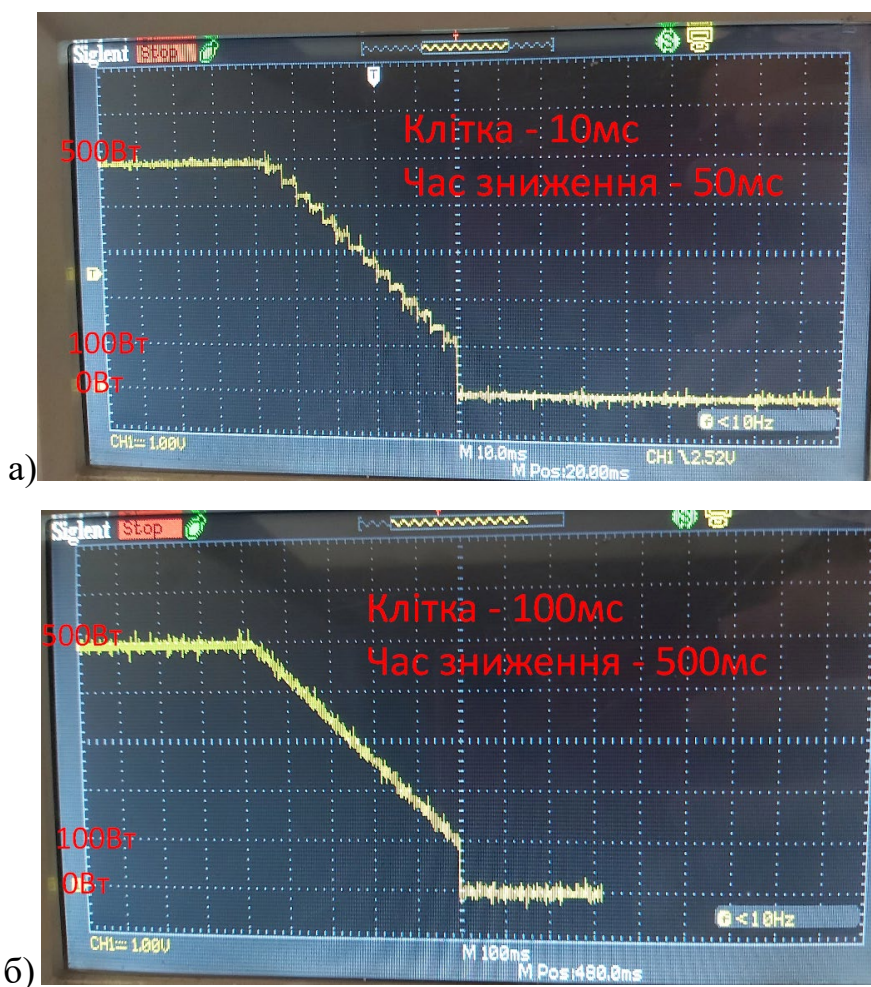


Рисунок 5.3 - Плавне зниження потужності лазерного випромінювання з 500 до 100 Вт з наступним його вимкненням: а) за 50 мс; б) за 500 мс



Рисунок 5.4 - Зовнішній вигляд ділянки замикання кільцевого шва при лазерному зварюванні

Надлишковий тиск захисного газу в зварювальній камері, який виникає при такій схемі охолодження, компенсується безперервним прокачуванням захисного газу через камеру системою газопідготовки.

Таким чином, технології зварювальної герметизації високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів складаються з наступних етапів:

- 1) підготовка виробів до зварювання хімічним травленням деталей, що зварюються, лугом з подальшою нейтралізацією кислотою;
- 2) складання деталей, що зварюються, під зварювання;
- 3) закріплення зібраної деталі у обертачі зварювального комплексу;
- 4) виконання двох кільцевих швів для герметизації виробу лазерним або лазерно-мікроплазмовим зварюванням на наведених у таблиці 5.1 режимах;
- 5) контроль температури нагрівання виробу в процесі зварювання та керування його температурою за допомогою потоків захисного газу;
- 6) видалення готового виробу із зони зварювання та діагностика рівня його напружено-деформованого стану (НДС);
- 7) заміна звареного виробу зібраним під зварювання новим виробом, повторення процесів зварювання та діагностування НДС.

## **5.2 Розробка дослідно-промислового обладнання для герметизації лазерним зварюванням високоточних тонкостінних виробів з алюмінієвих високоміцних сплавів**

Для адаптації розробленої методики вимірювання НДС зварних виробів був розроблений дослідно-промисловий комплекс, який включає зварювальну та вимірювальну системи (рисунк 5.5). В якості зварювальної системи використаний 3D-маніпулятор, що забезпечує можливість зварювання змінними головками. Для цього на каретці маніпулятора закріплюють необхідну для реалізації відповідного способу зварювання головку, а на столі базують зразок, у якому необхідно виміряти НДС. Досліджувані зразки можуть з'єднуватися як лінійними, так і кільцевими швами. Робоче поле маніпулятора збігається з полем

реєстрації зображення застосованими у вимірjuвальному комплексі камерами високої розрізняльної здатності. Таким чином вивчають залишкові зварювальні деформації у зразках, що зварюються кожним із двох розглянутих способів: лазерним та лазерним із супутнім мікроплазмовим підігрівом.



Рисунок 5.5 - Загальний вигляд комплексу апаратури для зварювання та визначення залишкових деформацій DIC методом: 1 – пульт управління маніпулятором; 2 – змінний зварювальний пальник; 3 – камери високої розрізняльної здатності (2 шт.); 4 – маніпулятор для виконання процесу зварювання; 5 – плазмовий модуль; 6 – спеціалізоване джерело живлення для мікроплазмового зварювання; 7 – блок охолодження зварювального пальника; 8 – стійка устаткування

Вимірjuвальна система складається з *апаратної* та *програмної* частин власної оригінальної розробки. *Апаратна частина* містить (рисунок 5.5): 3D-маніпулятор 4 для виконання процесу зварювання та фотографування об'єкта, пульт управління 1 даним маніпулятором, комплект з трьох змінних зварювальних пальників 2, спеціалізоване джерело живлення 6 для

мікроплазмового зварювання, плазмовий модуль 5, блок охолодження 7 мікроплазмової частини зварювального пальника, дві камери 3 високої розрізняльної здатності, стійку обладнання 8, ноутбук з оригінальним програмним забезпеченням (на рисунку 5.5 не показаний). Технологічний волоконний лазер із власною системою охолодження до складу цього комплекту апаратури не входить. У разі базування на каретці маніпулятора 4 лазерної або гібридної головки лазерне випромінювання підводиться оптичним волокном окремо розташованого лазера.

*Програмна частина* містить модулі для обчислення переміщень за зображеннями початкового та кінцевого стану поверхні досліджуваних об'єктів та виконання прогнозних розрахунків напруженого стану цих об'єктів.

Застосування комплекту апаратури відбувається в такий спосіб. На рухомій каретці маніпулятора 4 (координата Z) закріплюють зварювальний пальник 2 (рисунок 5.5). Пальник вибирають у залежності від реалізованого процесу зварювання: лазерного або лазерного із супутнім мікроплазмовим підігрівом. На робочому столі маніпулятора 4 розташовують досліджуваний зразок. За допомогою двох камер 3 високої розрізняльної здатності роблять його фотографічну зйомку. Потім за допомогою пульта управління 1 задають режими обраного способу зварювання і виконують зварювання. В процесі зварювання задіяні спеціалізоване джерело живлення 6 і плазмовий модуль 5. У процесі лазерного зварювання задіяний тільки технологічний волоконний лазер (розташований окремо від комплексу, випромінювання передається оптоволоконном). Охолодження зварювального пальника 2 при цьому здійснюють за допомогою блоку охолодження 7. Після виконання зварювання за допомогою двох камер високого дозволу 3 проводять повторну фотографічну зйомку вже звареного зразка. На комп'ютері (з операційною системою не нижче за Windows 10) за допомогою набору відповідних програмних модулів здійснюють порівняння зроблених до і після зварювання двох фотографій. При цьому визначають величини переміщень окремих точок, за якими розраховують

залишкові деформації всього зразка. Потім з урахуванням режимів зварювання розраховують НДС.

Фотографування звареного зразка та визначення НДС у ньому може здійснюватися один або два рази: один раз, якщо зразок не має закріплення (наприклад, у разі зварювання кільцевого шва); двічі – якщо зразок має закріплення (наприклад, зварювання встик двох пластин). Перший раз фотографують зварений зразок без розкріплення складально-зварювального оснащення, вдруге – після розкріплення складально-зварювального оснащення. Таким чином, порівняння фотографій виконують або один або два рази, внаслідок чого отримують одну чи дві картини НДС. Для фотографування застосовують камери високої (понад 20 МП) розрізняльної здатності (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 - Зовнішній вигляд камери високої розрізняльної здатності, яка використовується при визначенні НДС DIC методом

Порівняння визначених DIC методом та розрахованих залишкових деформацій дозволяє встановити точність передбачення отриманого напруженого стану об'єкта. Крім того, для підвищення точності розрахункових результатів на початковому етапі відпрацювання створеної методики пропонується вводити поправочні коефіцієнти, які базуються на визначенні різниці деформацій двома розглянутими способами зварювання і виконувати коригування розрахункової методики.

Для вирішення завдання контролю НДС високоточних тонкостінних виробів космічної галузі після зварювання будь-яким з обох розглянутих методів

був виготовлений спеціалізований стенд. Реєстрація НДС за допомогою цього стенду здійснювалася наступним чином. Після закріплення зібраного під зварювання виробу у складально-зварювальному оснащенні (рисунок 5.7,а) його розташовували на спеціалізованому стенді (рисунок 5.7,б) і за допомогою двох камер високої розрізняльної здатності (рисунок 5.6) виконували фотофіксацію торця, на якому виконуватиметься зварювальний шов. Потім виріб в оснащенні переміщали до зварювальної камери комплексу, де на траєкторії шва діаметрально протилежно виконували 4 точкові зварні прихватки. Після цього виріб в оснащенні переміщали на стенд реєстрації НДС (рисунок 5.7,б) і повторювали фотофіксацію того ж торця. Після цього виріб в оснащенні знову переміщували до камери зварювального комплексу, де виконували герметизуючий кільцевий зварний шов згідно з розробленою технологією. Після цього виріб в оснащенні знову переміщували на стенд реєстрації НДС (рисунок 5.7,б) і виконували завершальну фотофіксацію того ж торця.

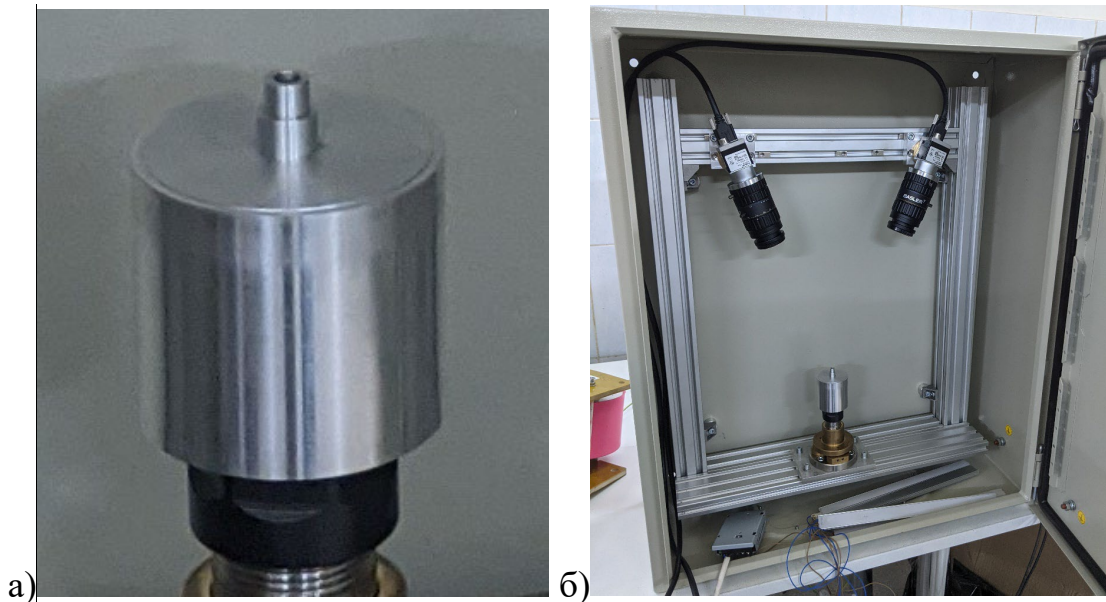


Рисунок 5.7 - Зовнішній вигляд високоточного тонкостінного виробу космічної галузі у зварювально-складальному оснащенні (а) та стенду для визначення НДС готового виробу після зварювання (б)

Після кожної фотофіксації (за винятком першої) описаним у розділі 4 розрахунковим способом визначали НДС поверхні торця, на якому виконувалося зварювання. Аналогічні процедури проводили при виконанні прихваток та зварюванні кільцевого шва на другому (протилежному) торці виробу. Отримані результати порівнювали з еталонними допусками та визначали придатність високоточного тонкостінного виробу космічної галузі до подальшої експлуатації.

### **5.3 Розробка технологічного процесу зварювання високоточних тонкостінних виробів з алюмінієвих сплавів із застосуванням лазерного джерела нагріву**

При розробці спеціалізованих головок для лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів орієнтувалися на обрані в розділі 2 схеми даних процесів. Для спрощення завдання газового захисту зварювальної ванни та усунення небезпеки утворення внутрішніх пор, яка пов'язана з попаданням повітря з нижньої частини стику, що зварюється, прийняли рішення виконувати зварювання в закритій камері з контрольованою атмосферою інертного газу (аргону). Застосування закритої камери також актуальне у зв'язку з полегшенням завдання уловлювання та усунення небезпечних для здоров'я людини зварювальних аерозолів.

Процес зварювання в камері з контрольованою атмосферою інертного газу значно спрощує завдання лазерного зварювання. Достатньо за допомогою однолінзового об'єктива сфокусувати випромінювання на поверхню виробу, що зварюється (рисунок 5.8). При цьому лазерна головка повинна також включати в свою конструкцію лінзу коліматора, який збирає випромінювання з оптоволокна в паралельний пучок і передає його на лінзу, що фокусує. Крім того, дана головка забезпечена системами юстування лінзи коліматора і лінзи, що фокусує, які забезпечують точність позиціонування лінз порядку  $\pm 0,25$  мм.

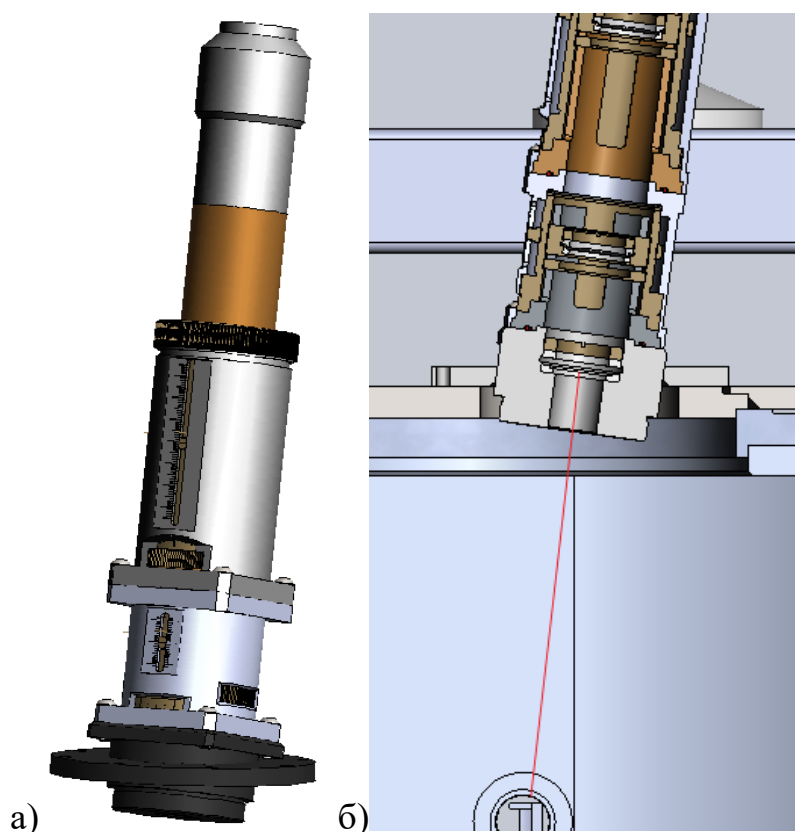


Рисунок 5.8 - Зовнішній вигляд (а) і розріз (б) головки для лазерного зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів (вісь випромінювання показана в розрізі червоною лінією)

При лазерно-мікроплазмовому зварюванні необхідно враховувати динаміку газових потоків, які сприяють генерації дугової плазми. Тому для оптимізації конструкцій комбінованої зварювальної головки, яка є необхідною для гібридної реалізації двох складових процесів, доцільно розглянути газодинаміку плазмоутворюючого струменю. Для цього використали комп'ютерне моделювання за допомогою прикладного пакету програм SolidWorks. Такий підхід дозволив створити ефективні конструкції зварювальних головок.

При проектуванні інтегрованого плазмотрону для лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів за основу конструкції лазерної частини було взято раніше розроблену конструкцію (рисунок 5.8). Завдяки цьому підходу до конструкції інтегрованого плазмотрону були додані вузли введення оптоволокну,

однолінзового коліматора та однолінзового фокусуєчого об'єктива з відповідними системами налаштування. Це дало можливість позиціонувати фокус випромінювання щодо поверхні зварюваного виробу з точністю порядку  $\pm 0,25$  мм. За основу конструкції мікроплазмової частини інтегрованого плазмотрона була взята конструкція мікроплазмотрону (рисунок 5.9). Основною відмінністю було бічне (під кутом до  $\sim 20^\circ$  до осі лазерного випромінювання) розташування вольфрамового електрода. У зв'язку з поєднанням виводів лазерного випромінювання та дугової плазми через спільне сопло була розроблена оригінальна конструкція такого сопла. При конструюванні сопла враховувалося положення фокусу відносно поверхні зварюваного виробу, тобто необхідність виведення фокусу за межі сопла на відстань не менше ніж до 5 мм. Розроблена з урахуванням даних міркувань конструкція інтегрованого плазмотрону для лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів наведена на рисунку 5.10.

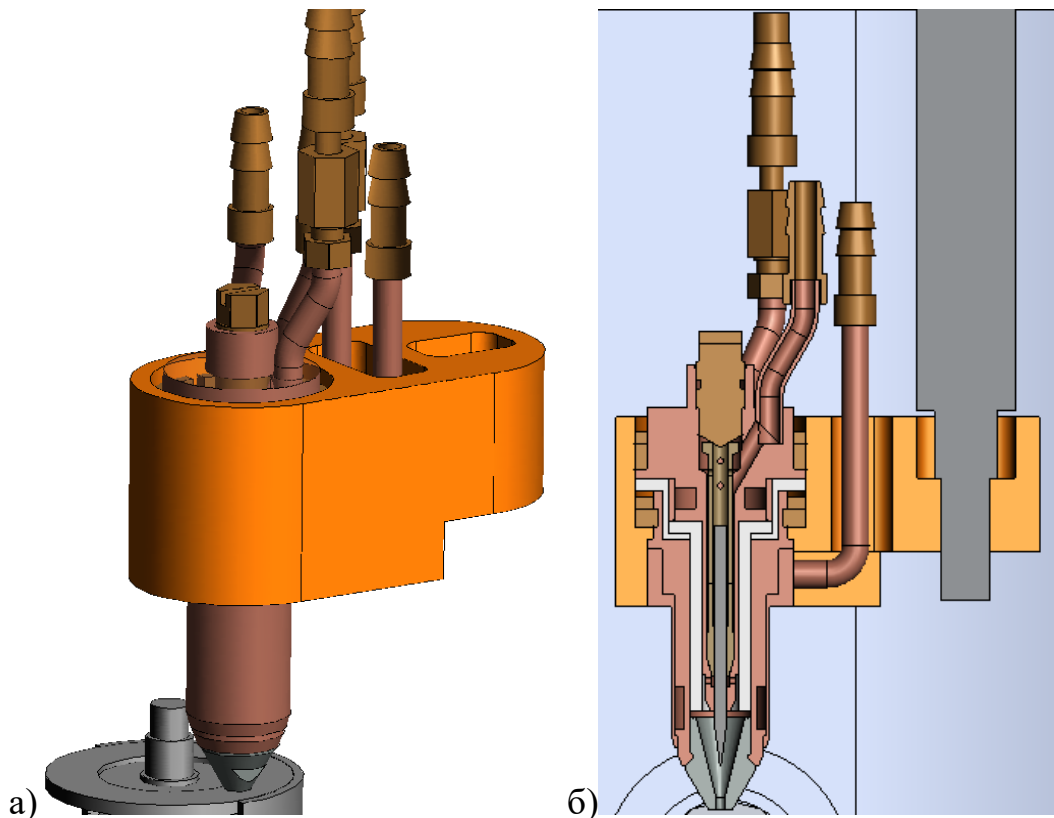


Рисунок 5.9 - Зовнішній вигляд (а) та розріз (б) плазмотрону для мікроплазмового зварювання в камері із атмосферою захисного газу

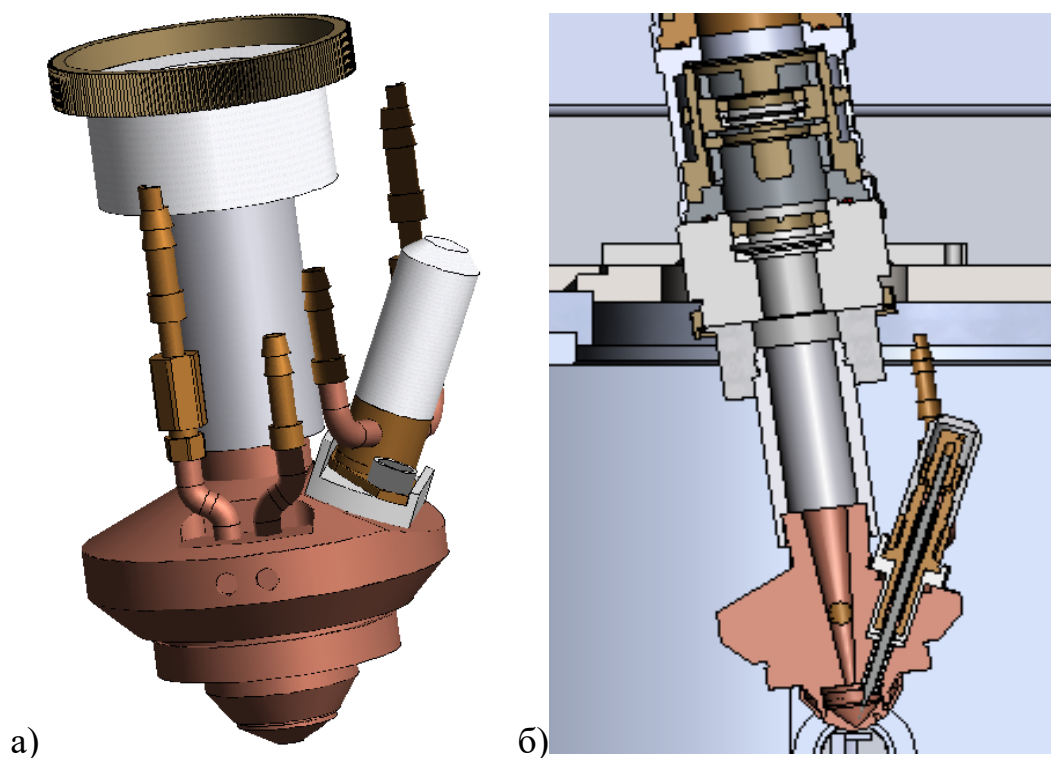


Рисунок 5.10 - Зовнішній вигляд (а) та розріз (б) інтегрованого плазмотрону для лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

При лазерно-мікроплазмовому зварюванні загострений під кутом  $30^\circ$  вольфрамовий електрод ( $\varnothing 1,6 \dots 3,2$  мм) призначений для роботи в режимі різнополярних імпульсів. При цьому імпульси прямої полярності (електрод – катод) забезпечують необхідну глибину провару, а імпульси зворотної полярності (електрод – анод) забезпечують катодне очищення від окисної плівки на виробу, що зварюється.

У конструкцію інтегрованого плазмотрона прямої дії для лазерно-мікроплазмового зварювання металів та сплавів входять (рисунок 5.10):

- вузол введення лазерного випромінювання в інтегрований плазмотрон, що включає однолінзовий коліматор (лінза  $\varnothing 25,4$  мм з фокусною відстанню  $100 \dots 150$  мм), а також систему кріплення оптичного волокна;

- вузол кріплення, юстування та настроювального переміщення фокусуєної лінзи, який включає лінзу діаметром 25,4 мм з фокусною відстанню 150...250 мм;

- система газового захисту та термостабілізації вікна введення випромінювання в плазмоутворюючу камеру, яка включає вікно для введення лазерного випромінювання ( $\varnothing 25,4 \times 3$  мм);

- вузол кріплення та настроювального переміщення неплавкого вольфрамового електрода, який включає електрод ( $\varnothing 1,6 \dots 3,2$  мм);

- система рідинної термостабілізації роботи неплавкого вольфрамового електрода і плазмоутворюючого сопла, яка включає підведення та відведення охолоджувальної води;

- система введення плазмоутворюючого газу;

- вузол кріплення сопла для формування струменя мікроплазми, який включає сопло ( $\varnothing 1,5 \dots 2,5$  мм);

- система кріплення плазмотрону в камері з контрольованою атмосферою.

У результаті проведених проектно-конструкторських робіт для подальшого практичного відпрацювання технологій лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання були прийняті, відповідно, дві конструкції змінних зварювальних головок (рисунк 5.8 і рисунок 5.10). Дія цих головок у процесі зварювання відбувається так:

- 1) Головка лазерного зварювання (рисунк 5.8). Після введення випромінювання волоконного лазера за допомогою оптоволока воно перетворюється на паралельний пучок коліматорною лінзою і спрямовується на лінзу, що фокусує. За допомогою лінзи, що фокусує, лазерний пучок фокусується на поверхні зварюваного виробу. Зварювання закріпленого у обертачі виробу відбувається при його обертанні з визначеною технологічним процесом швидкістю. Після закінчення зварювання потужність лазерного випромінювання плавно знижується, а потім відключається.

- 2) Головка лазерно-мікроплазмового зварювання (рисунк 5.10). У початковий момент зварювання відбувається генерація дугової плазми згідно з

описаним алгоритмом початку мікроплазмового зварювання. Безпосередньо після виникнення основного плазмового розряду включається подача лазерного випромінювання згідно з описаним для процесу лазерного зварювання алгоритмом. Зварювання закріпленого у обертачі виробу відбувається при його обертанні з визначеною технологічним процесом швидкістю. Після закінчення зварювання величина зварювального струму і потужність лазерного випромінювання синхронно знижуються до повного відключення.

Для реалізації описаних технологічних процесів зварювання управління будь-якої зі змінних головок здійснюється за допомогою системи автоматичного управління (САУ), яка підключена до комп'ютера, що управляє (або PLC-контролеру). При цьому забезпечується подача газів, включення-вимикання зварювального струму та лазерного випромінювання, синхронізація дії лазерного випромінювання та плазми тощо. Комплектність змінних головок наведена у таблиці 5.3.

Вісь фокусуєючої лінзи – фокус 150...250 мм,  $\varnothing 25,4 \times (3...5)$  мм – повинна розташовуватися під кутом  $5...10^\circ (7^\circ)$  до осі плазмотрона для усунення можливості потрапляння відбитого від оброблюваної поверхні лазерного випромінювання в транспортуюче оптичне волокно (усунення так званого «відблиску»).

Система кріплення та захисту фокусуєючої лінзи може мати вигляд тубуса з вертикальним ходом  $\pm 10$  мм (точність до 0,05 мм), у якому за допомогою прокладок з вакуумної гуми або фторопласту та різьбового кільця закріплюється лінза. Можливий варіант базування лінзи та плоскопаралельного вікна у швидкозмінній касеті. Обидві оптичні поверхні лінзи та плоскопаралельного вікна повинні безперервно охолоджуватися (аргоном та/або стисненим повітрям, очищеним від вологи та масляної пари). Спочатку оптична вісь лінзи розташовується під кутом  $\pm 5...10^\circ$  до осі плазмотрону.

Таблиця 5.3 - Комплектність змінних зварювальних головок комплексу для зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

| №    | Найменування вузлів                                                                                                                                  | Кількість, шт. |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1.   | Головка для лазерного зварювання                                                                                                                     |                |
| 1.1. | Вузол введення лазерного випромінювання в головку, який містить однолінзовий коліматор та систему кріплення оптичного волокна                        | 1              |
| 1.2. | Вузол кріплення, юстування та настроювального переміщення лінзи, який містить лінзу з фокусною відстанню 150...250 мм                                | 1              |
| 1.3. | Система захисту та термостабілізації вікна введення лазерного випромінювання в камеру з контрольованою атмосферою                                    | 1              |
| 1.4. | Вузол кріплення головки на кришці камери                                                                                                             | 1              |
| 2.   | Головка для лазерно-мікроплазмового зварювання (інтегрований плазмотрон)                                                                             |                |
| 2.1. | Вузол введення лазерного випромінювання в інтегрований плазмотрон, який містить однолінзовий коліматор та систему кріплення оптичного волокна        | 1              |
| 2.2. | Вузол кріплення, юстування та настроювального переміщення лінзи, який містить лінзу з фокусною відстанню 100...150 мм                                | 1              |
| 2.3. | Система захисту та термостабілізації вікна введення випромінювання в плазмоутворюючу камеру, яка містить вікно для введення лазерного випромінювання | 1              |
| 2.4. | Вузол кріплення і настроювального переміщення вольфрамового неплавкого електрода, який містить електрод ( $\varnothing 1,6...3,2$ мм)                | 1              |
| 2.5. | Вузол введення плазмоутворюючого газу                                                                                                                | 1              |
| 2.6. | Вузол кріплення сопла для формування струменя мікроплазми (плазми), який містить сопло ( $\varnothing 1,5...2,5$ мм)                                 | 1              |
| 2.7. | Вузол введення охолоджувальної води                                                                                                                  | 1              |
| 2.8. | Вузол кріплення плазмотрону на кришці камери                                                                                                         | 1              |

Система кріплення та настроювального переміщення фокуруючої лінзи – не більше  $\varnothing 25,4 \times 30$  мм, забезпечує вертикальне переміщення лінзи на  $\pm 10$  мм з точністю до 0,05 мм, також повинна забезпечувати настроювальну зміну кута нахилу оптичної осі лінзи (в межах  $\pm 10...15^\circ$ ), сама лінза в системі кріплення

затискається за допомогою контргайки у фторопластових прокладках.

Вікно для введення лазерного випромінювання в плазмоутворюючу камеру – плоскопаралельне, розміром  $\varnothing 25,4 \times (2 \dots 4)$  мм, затискається за допомогою контргайки у фторопластових прокладках, оптична вісь вікна має збігатися з віссю фокусування лазерного випромінювання.

Система захисту та термостабілізації вікна введення випромінювання – не більше  $\varnothing 25,4 \times 10$  мм, вікно повинне обдуватися аргонем з боку камери з контрольованою атмосферою (або камери плазмотрона).

Вузол кріплення та настроювального переміщення неплавкого вольфрамового електрода (катода) – забезпечує жорстке кріплення електрода  $\varnothing (1,6 \dots 3,2) \times 30 \dots 200$  мм під фіксованим кутом (в межах  $15 \dots 25^\circ$ ) щодо осі плазмотрона, можливість кріплення електрода після його переточування (мінімальний розмір  $30 \dots 40$  мм), а також можливість його переміщення для налаштування відносно осі плазмоутворюючого сопла в межах  $0 \dots 3$  мм.

Система введення плазмоутворюючого газу – газ (аргон) може вводитися таким чином, щоб обдувати вікно для введення лазерного випромінювання в плазмоутворюючу камеру; має бути передбачена можливість плавного регулювання витрати плазмоутворюючого газу в межах від  $0,1$  до  $1,5$  л/хв.; плазмоутворюючий газ виводиться з плазмоутворюючої камери через сопло, що формує струмінь мікроплазми (плазми).

Подача газу захисту вікна введення випромінювання, а також плазмоутворюючого газу, має починатися за  $5 \dots 10$  с до запалювання чергової дуги та/або початку процесу зварювання та закінчуватися у такий самий термін після закінчення процесу зварювання. Початок/кінець подачі захисного та плазмоутворювального газів здійснюється автоматично за допомогою електричних клапанів, які разом з реле потоків та витратомірами розміщуються в окремому блоці газопідготовки.

Вузол кріплення сопла для формування струменя мікроплазми повинен мати водяне охолодження і виконуватися з міді, саме сопло є змінним, виконується з міді, і кріпитися за допомогою накидної гайки або різьблення,

діаметр вихідного отвору сопла 1,5; 2,0 і 2,5 мм, його внутрішня частина має бути конічною і виконуватися таким чином, щоб відстань між робочим кінцем вольфрамового електрода (катода) та стінкою сопла становила близько 1 мм (0,2...1,0 мм).

Вузол кріплення плазмотрона в кришці камери – повинен забезпечувати можливість жорсткого кріплення змінної зварювальної головки на кришці камери, витримувати навантаження, які щонайменше вдвічі переважають вагу головки, та розташовуватися на її корпусі.

Для забезпечення можливості лазерно-мікроплазмового зварювання необхідно забезпечити підведення зварювального струму до неплавкого вольфрамового електрода і до виробу, що зварюється. Підведення струму має здійснюватися гнучкими кабелями. Зварювання може вестися безперервним струмом, одно- та різнополярними імпульсами (в т.ч. модульованими). Усі струмопідводи повинні бути ізольовані.

Вузол плазмоутворюючого сопла виконуються з міді, інші вузли з метою полегшення можуть виконуватися з алюмінієвих сплавів. Основні технічні параметри змінних головок для лазерного і лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів наведені в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 - Основні параметри змінних головок для лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

| №<br>п/п | Найменування параметра                                                    | Норма               |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1.       | Потужність лазерного випромінювання із довжиною хвилі 1,03...1,07 мкм, Вт | $\leq 1000$         |
| 2.       | Фокусна відстань фокусуючої лінзи, мм                                     | $(150 - 250) \pm 5$ |
| 3.       | Фокусна відстань лінз коліматора, мм                                      | $(100 - 150) \pm 5$ |
| 4.       | Діаметр фокусуючої лінзи та захисного скла, мм                            | 25,4                |

## Продовження таблиці 5.4

|     |                                                                              |                     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 5.  | Діаметр неплавкого вольфрамового електрода, мм                               | 1.6; 2.0; 3.2       |
| 6.  | Вихідний діаметр плазмоутворюючого сопла, мм                                 | 1.5; 2.0; 2.5       |
| 7.  | Діапазон регулювання зварювального струму плазми (мікроплазми) прямої дії, А | 5 – 80<br>(5 – 100) |
| 8.  | Максимальна споживана потужність, кВт                                        | 1.0 (2.0)           |
| 9.  | Номінальна напруга мережі живлення, В                                        | 220 / 380           |
| 10. | Число силових фаз мережі живлення                                            | 1 / 3               |
| 11. | Частота, Гц                                                                  | 50 – 60             |
| 12. | Споживання охолоджувальної води, м <sup>3</sup> /год                         | до 0.5              |
| 13. | Маса головки, кг, не більше                                                  | 8.0                 |

#### 5.4 Розробка апаратури для неруйнівного контролю НДС у високоточних тонкостінних виробх з алюмінієвих високоміцних сплавів

Для виконання зварювання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів була спроектована установка, яка складається з вакуумної камери з системами кріплення, переміщення та зварювання заготовки, зварювального джерела живлення, систем управління, вакуумування, газопідготовки та очищення відпрацьованих газів (рисунок 5.11). Розглянемо докладніше основні вузли цієї системи.



Рисунок 5.11 - Зовнішній вигляд дослідно-промислового комплексу зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

Вакуумна камера 1 зварювальної установки за допомогою опор 2 базується на рамі 3, яка встановлюється на опорах, що амортизують 4 (рисунок 5.12,а). Камера 1 за допомогою фланця 5 підключається до систем вакуумування, газопідготовки та очищення відпрацьованих газів. Для зміни деталей, що зварюються, в камері 1 передбачені герметичні двері 6 з вікном візуального спостереження 7. Двері закріплені на петлях 8 і вони мають запірні кріплення 9, що забезпечують вакуумно-щільне прилягання дверей 6 до корпусу камери 1. Крім вікна 7 є вікно для пірометричної системи 10, яка призначена для стеження за зміною температури зварюваної деталі. У нижній частині камери 1 розташований привід 11 обертання деталі, що зварюється. На верхній стінці камери 1 розташована система 12 наведення на стик зварювальної головки 13, в якій базується одна з 3-х призначених для реалізації зварювальних процесів змінних зварювальних головок (лазерного зварювання у вакуумі та контрольованому середовищі аргону та гібридної лазерно-мікроплазмового зварювання). Для підключення додаткових вакуумних, газових та електричних комунікацій служать спеціалізовані роз'єми 14.

У середині камери 1 на обертачі 15 базується деталь 16, що зварюється (рисунок 5.12,б). Обертач 15 має систему вертикального переміщення 17, яка служить для зміни деталей, що зварюються. У верхній частині деталі 16 навколо зони зварювання розташована система 18 газового обдування, яка служить для охолодження деталі, що зварюється. Всередині камери 1 під верхньою стінкою розташована система 19 освітлення камери. Форма камери 1 забезпечує простоту очищення внутрішніх поверхонь від зварювальних аерозолів і мінімізує число і розмір важкодоступних місць, в яких можуть накопичуватися виділення цих аерозолів.

Дія цієї установки відбувається наступним чином (рисунок 5.12).

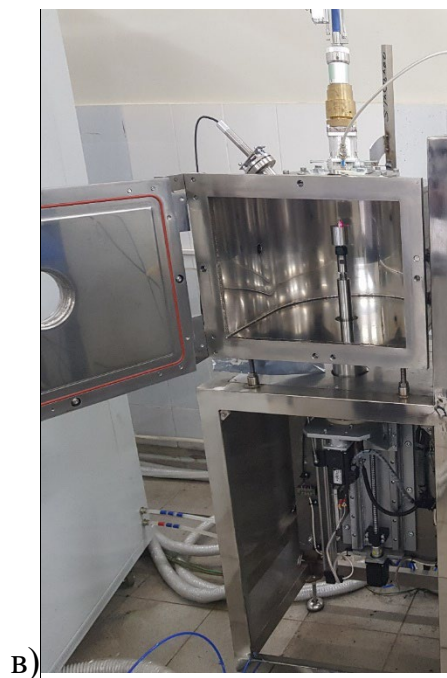
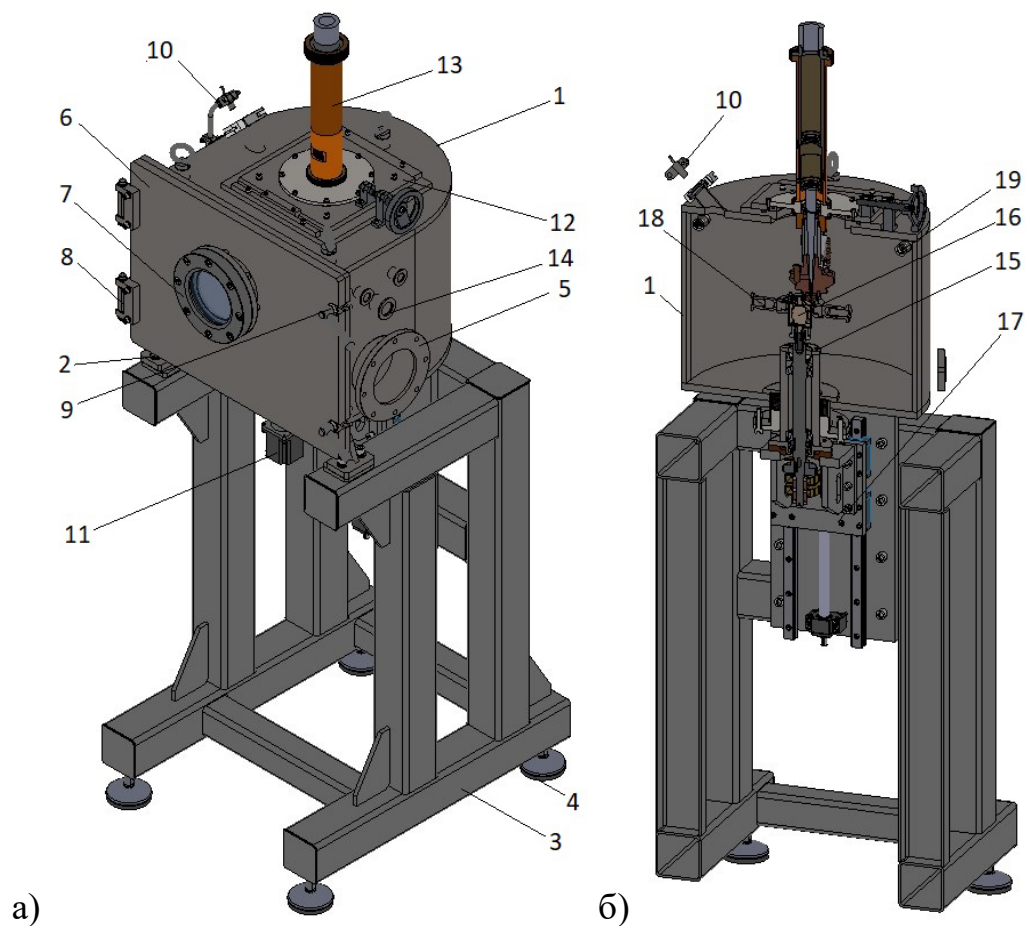


Рисунок 5.12 - 3D-модель (а, б) та зовнішній вигляд (в) установки для зварювання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів у контрольованій атмосфері інертних газів

Після розташування деталі 16, що зварюється, у обертачі 15, кришка 6 закривається і герметизується запірними кріпленнями 9. Через фланець 5 проводиться відкачування повітря з камери 1. Після цього процес лазерного зварювання може вестися у вакуумі або середовищі інертного газу (аргону). Процес лазерного зварювання із супутнім мікроплазмовим підігрівом ведеться виключно у середовищі інертного газу (аргону). Тому при необхідності через штуцера 14 камера 1 заповнюється аргонем під необхідним тиском.

Деталь 16 за допомогою обертача 15 приводиться у обертання з необхідною швидкістю. Шляхом візуального спостереження через ілюмінатор 7 за допомогою системи 12 зварювальна головка 13 наводиться на стик, що зварюється, з необхідною точністю. Після цього здійснюється процес зварювання. В процесі зварювання температура деталі 16 постійно контролюється пірометром 10. У разі підвищення температури понад критичну включається система газового обдування 18 і відбувається знімання надлишкового тепла.

Після закінчення зварювання обертання деталі 16 відключається, з камери 1 видаляється забруднений захисний газ, у камеру напускається атмосферне повітря, двері 6 відкривається, обертач 15 з деталлю 16 опускається вниз за допомогою системи 17 і проводиться виїмка звареної деталі. Забруднений захисний газ очищається системою фільтрації та може бути використаний повторно або випущений в атмосферу. На місце звареної деталі у обертачі 15 розташовують нову заготовку, обертач піднімається, заготовка займає своє місце в системі охолодження 18 і процес повторюється.

Для виконання зварювання високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів використовуються дві змінні зварювальні головки. Розглянемо їх докладніше.

Лазерна зварювальна головка з'єднується з підключеним до технологічного волоконного лазера оптичним волокном за допомогою з'єднувального перехідника 1 (рисунок 5.13,а). Основними вузлами цієї головки

є коліматор 2, система фокусування випромінювання 3, фланець 4 кріплення до системи юстування, перехідна камера 5 і сопло 6.

Випромінювання волоконного лазера, виходячи з оптичного волокна, потрапляє на лінзу 7 коліматора 2 (рисунок 5.13,б). Ця лінза налаштовується попередньо і забезпечує паралельний пучок випромінювання, який спрямовується на лінзу 8. Ця лінза фокусує лазерний пучок на деталі, що зварюються. Положення фокальної площини щодо поверхні деталей, що зварюються, може змінюватися за рахунок вертикального переміщення лінзи 8 за допомогою фокусувального кільця 9. Для герметизації перехідної камери 5 і захисту фокусувальної лінзи 8 від зварювальних аерозолів служить пласкопаралельне захисне вікно 10, герметично встановлене у корпусі зварювальної головки. Розташоване безпосередньо над зоною зварювання сопло 6 підключається до вакуумного відсмоктування при зварюванні у вакуумі або до трубки подачі аргону при зварюванні в контрольованій атмосфері інертного газу. Це дозволяє мінімізувати шкідливу дію зварювальних аерозолів на захисне вікно 10.

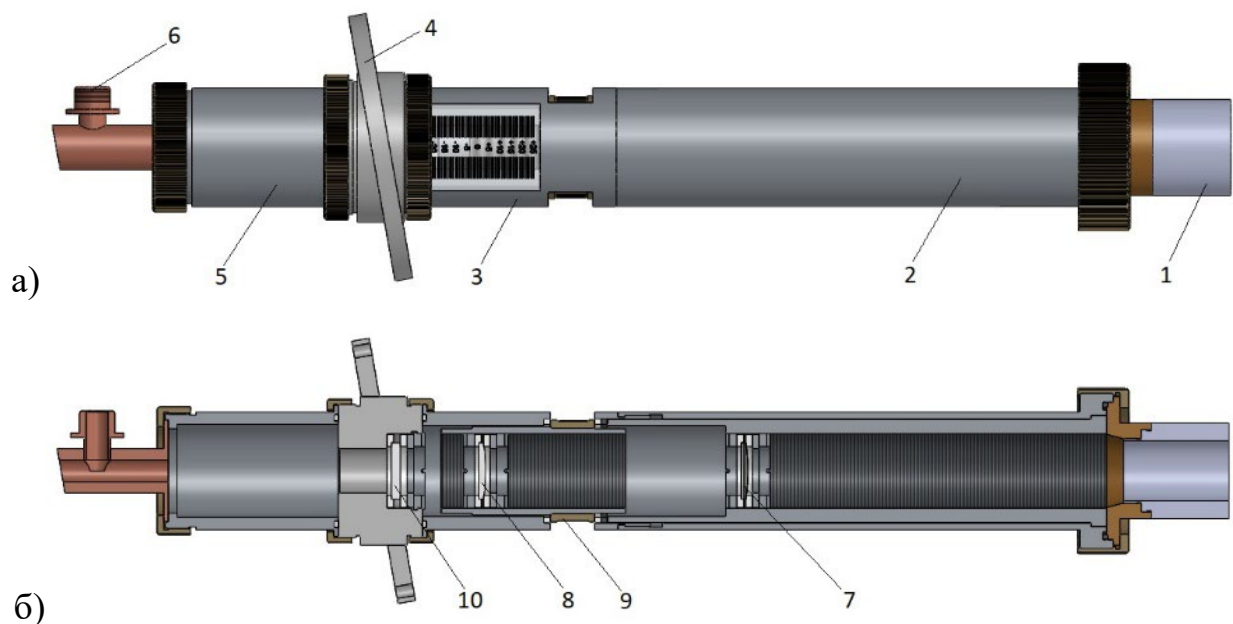


Рисунок 5.13 - Лазерна головка для зварювання в захисній атмосфері аргону

Головка для зварювання лазерним випромінюванням із супутнім мікроплазмовим підігрівом складається з лазерної частини 1 та мікроплазмової частини 2 (рисунок 5.14). Лазерна частина є корпусом з внутрішнім каналом 3, який за допомогою накидної гайки 4 кріпиться на лазерній головці замість перехідної камери (рисунок 5.13). Мікроплазмова частина за своєю суттю аналогічна мікроплазмовій головці на рисунку 5.9. Основною відмінністю є похиле розташування вольфрамового електрода 5, що пов'язане з необхідністю вертикального підведення лазерного випромінювання до виробу, який зварюється. Підведення комунікацій електроенергії, води та газу – аналогічне. Сфокусоване лазерне випромінювання і стиснена мікроплазмова дуга виводяться на деталь, що зварюється, через спільне сопло 6.

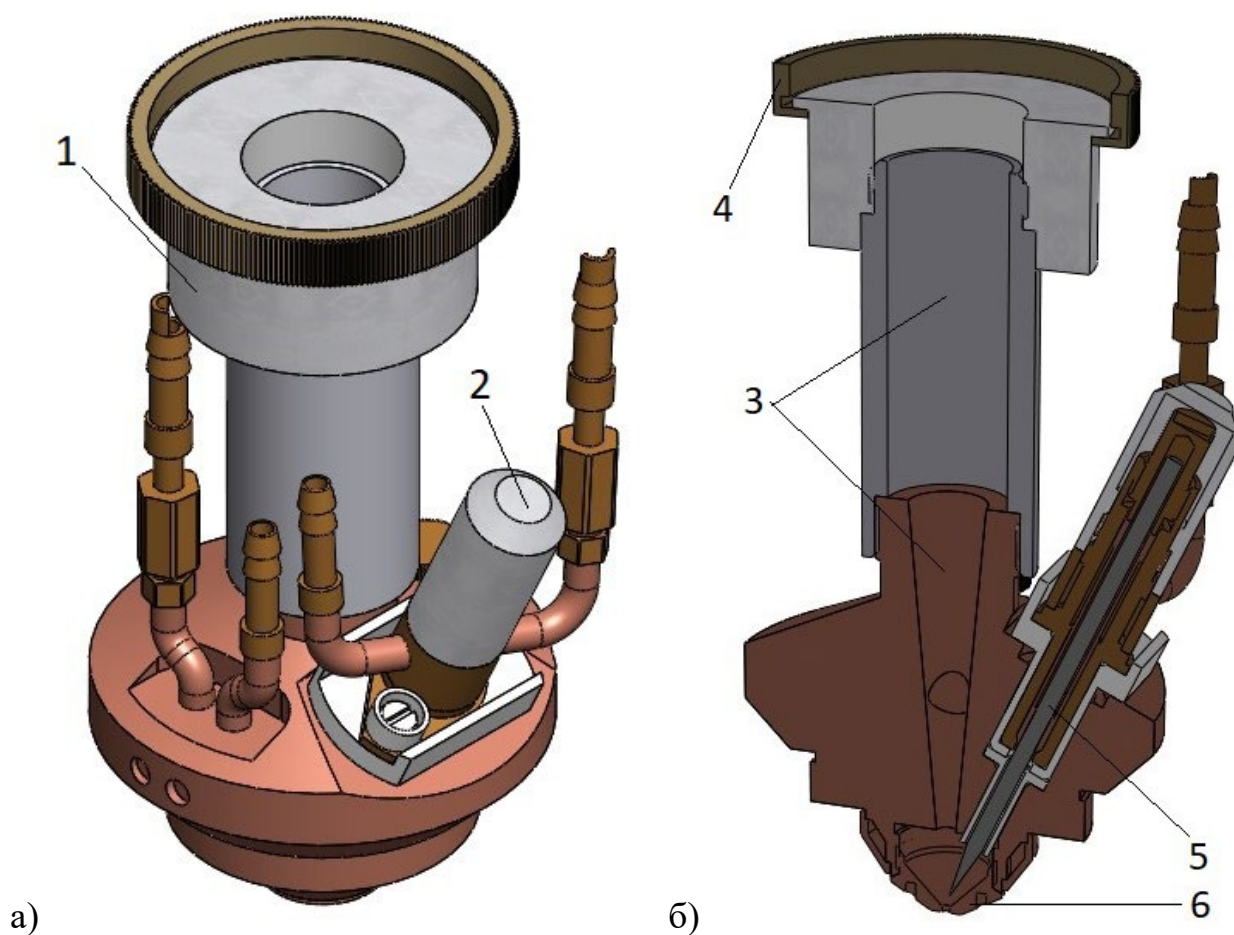


Рисунок 5.14 - Лазерно-мікроплазмова головка для зварювання в контрольованій атмосфері інертного газу

Дія лазерно-мікроплазмової зварювальної головки відбувається в наступний спосіб (рисунок 5.14). Після розташування головки по осі зварюваного стику подається плазмоутворюючий газ і між електродом 5 і соплом 6 запалюється чергова дуга, яка видувається з сопла 6 потоком плазмоутворюючого газу в напрямку деталі, що зварюється. Після цього між електродом 5 і деталлю запалюється основна дуга і одночасно з цим подається лазерне випромінювання. Виконується процес лазерно-мікроплазмового зварювання. Охолодження мікроплазмової частини головки при налаштуванні та зварюванні включено постійно.

Основні технічні характеристики спроектованого комплексу наведені у таблиці 5.5. Розглянемо докладніше основні вузли даного комплексу.

#### Функції ССУПЗ:

- налаштування енергетичних властивостей джерел нагрівання – тобто регулювання рівня вихідної потужності лазерного випромінювання та величини струмів прямої/зворотної полярності зварювальної дуги;
- налаштування імпульсних властивостей джерела нагрівання – тобто встановлення режиму нагрівання (неперервний або імпульсний). В імпульсному режимі роботи джерела нагріву – для встановлення тривалості, частоти проходження імпульсів та регулювання взаємного розташування переднього та заднього фронту імпульсів обох джерел нагріву;
- регулювання інтервалів часу, які необхідні для попереднього прокачування (заповнення) трубопроводів технологічними газами перед початком здійснення технологічного процесу;
- управління (включення/вимкнення) клапанами подачі технологічних газів та охолоджуючої рідини;
- управління реле підпалювання/відключення чергової дуги;
- управління реле підпалювання/відключення основної дуги;
- синхронізація початку процесу зварювання з моментом початку переміщення маніпулятора по траєкторії;
- синхронізація закінчення процесу зварювання з моментом завершення

переміщення маніпулятора по траєкторії;

- дозвіл/заборона роботи джерела нагріву для визначення виду технологічної обробки (лазерна, лазерно-мікроплазмова).

Таблиця 5.5 - Основні технічні характеристики обладнання для лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

| №  | Найменування і розмірність параметру                                                                                  | Величина            |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 1  | Напруга трифазної мережі змінного струму з частотою 50 Гц, В                                                          | 380 ( $\pm 15\%$ )  |
| 2  | Робоча напруга на дузі, В                                                                                             | 0 - 50              |
| 3  | Робочий струм дуги у гібридному лазерно-мікроплазмовому процесі, А                                                    | 5 – 80              |
| 4  | Захисний газ (контрольована атмосфера камери)                                                                         | Ar                  |
| 5  | Газ для захисту оптики в інтегрованому плазмотроні (гібридному лазерно-мікроплазмовому пальнику)                      | Ar                  |
| 6  | Плазмоутворюючий газ в інтегрованому плазмотроні (гібридному лазерно-мікроплазмовому пальнику)                        | Ar, He              |
| 7  | Робочий струм спеціалізованої системи електроживлення інтегрованого плазмотрону (лазерно-мікроплазмового пальника), А | 5 – 80              |
| 8  | Робоча напруга джерела для лазерно-мікроплазмового зварювання, В                                                      | 380                 |
| 9  | Тиск робочих газів на вході до джерел живлення, бар                                                                   | 2 – 4               |
| 10 | Витрати газів:                                                                                                        |                     |
|    | - захисного (для заповнення камери), л/хв                                                                             | 0 – 100             |
|    | - плазмоутворюючого, л/хв                                                                                             | 0.5 – 1.5           |
|    | - газ для захисту оптики, л/хв                                                                                        | 4.0 – 6.0           |
| 11 | Діаметри плазмоутворюючих сопел для інтегрованого плазмотрона (лазерно-мікроплазмового пальника), мм                  | 1.5; 2.0; 2.5       |
| 12 | Діаметри вольфрамових електродів для інтегрованого плазмотрону (лазерно-мікроплазмового пальника), мм                 | 1,6; 2,0; 3,2       |
| 13 | Фокусна відстань фокусуючої лінзи, мм                                                                                 | (150...250) $\pm$ 5 |
| 14 | Діаметр фокусуючої лінзи та захисного скла, мм                                                                        | 25,4                |
| 15 | Швидкість зварювання в нижньому положенні, м/год                                                                      | 5 – 500             |
| 16 | Довжина кабель-шлангового пакета, м, мінімум                                                                          | 5                   |
| 17 | Метод управління (контролю)                                                                                           | PLC<br>контролер    |



Рисунок 5.15 - Зовнішній вигляд лицьової панелі прототипу системи управління обладнання для зварювання тонкостінних виробів космічної галузі з легких високоміцних сплавів

При підготовці та здійсненні технологічного процесу зварювання можуть бути використані наступні режими роботи ССУПЗ:

- «Налаштування»;
- «Робота».

Режим «Налаштування» призначений для читання та зміни параметрів (налаштувань) ССУПЗ за допомогою програми графічного інтерфейсу, яка розташована на персональному комп'ютері. Обмін даними між персональним комп'ютером та ССУПЗ у режимі «Налаштування» можливий лише у тому разі, якщо немає рівня сигналу «Початок переміщення» від ЧПУ маніпулятора чи зварювального робота, тобто перед здійсненням чи після проведення технологічного процесу обробки.

На програмному рівні обмін інформацією здійснюється за спеціально розробленим протоколом (угода про формат даних, що передаються) у режимі «запит-відповідь». Протокол має здійснювати:

- запит поточного значення параметра (наприклад, поточного значення

струму прямої полярності або рівня вихідної потужності);

- зміни значень параметра.

Режим «Робота» призначений для організації послідовного виконання всіх операцій, які необхідні для здійснення процесів зварювання.

Основні характеристики ССУПЗ наведені у таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Технічні характеристики спеціалізованої системи управління процесом зварювання (ССУПЗ)

| № | Найменування параметру                                                           | Величина |
|---|----------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | Час спрацювання аварійного відключення всієї системи кнопкою «Аварійний стоп», с | 0.1      |
| 2 | Час затримки увімкнення механізму переміщення, с                                 | 0 – 1    |
| 3 | Час затримки вимкнення механізму переміщення, с                                  | 0 – 1    |
| 4 | Час спрацювання аварійного відключення всієї системи, с                          | 0.1      |

## 2) Інверторне джерело живлення дугової плазми при імпульсних різнополярних режимах.

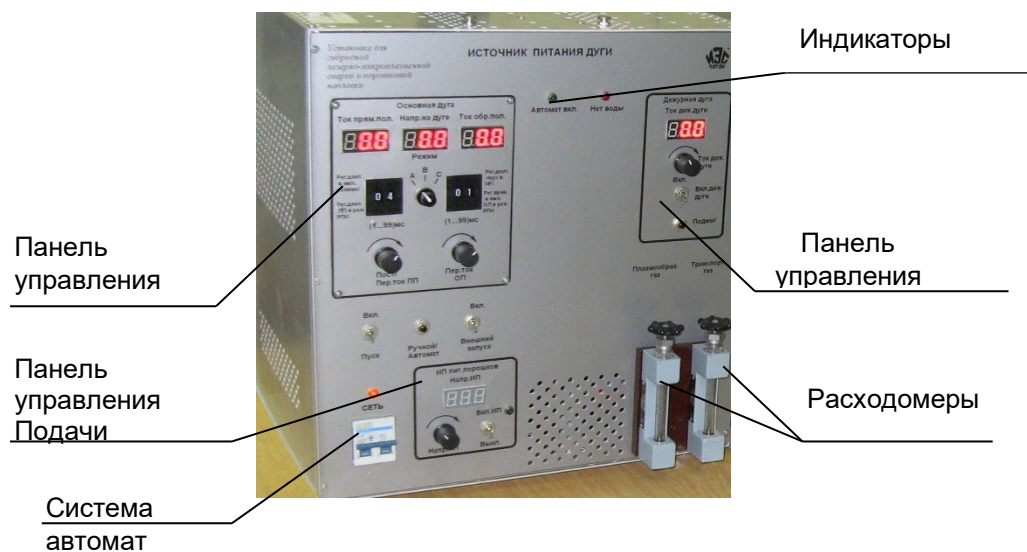
Джерело живлення плазмової дуги (ДЖП) є електричним пристроєм (рисунок 5.16, таблиця 5.7), який призначений для організації живлення чергової та основної зварювальної дуги при підпалюванні та підтримці горіння плазмового потоку з лазерно-плазмової головки. ДЖП може працювати у двох режимах – «Локальний» та «Дистанційний». У режимі локального налаштування джерела здійснюється за допомогою панелі управління, яка розташована на корпусі ДЖП. У режимі «Дистанційний» налаштування джерела здійснюється за допомогою блоку управління.

ДЖП має забезпечує такі режими роботи:

- зварювання постійним струмом прямої полярності з плавним регулюванням струму від 5 до 80 А (від 5 до 100 А);

- зварювання імпульсним струмом прямої полярності з плавним регулюванням;

- імпульсів струму від 5 до 80 А (від 5 до 100 А) та тривалістю імпульсу (паузи) від 1 до 99 мс;



а)



б)



в)

Рисунок 5.16 - Зовнішній вигляд лицьової панелі прототипу джерела живлення (а) та всієї шафи управління в єдиному блоці з джерелом живлення (б, в) прототипу обладнання лазерного зварювання із супутнім мікроплазмовим підігрівом

- зварювання імпульсним струмом прямої полярності з плавним регулюванням;
- імпульсів струму від 5 до 80 А (від 5 до 100 А) та тривалістю імпульсу від 1 до 99 мс у режимі одиночних імпульсів;
- зварювання різнополярним струмом із можливістю незалежного регулювання величини струму прямої полярності в діапазоні від 5 до 80 А (від 5 до 100 А); і зворотної полярності в діапазоні від 5 до 30 А (від 5 до 50 А), а також тривалістю протікання струму при прямій та зворотній полярності від 1 до 99 мс;
- зварювання імпульсним струмом прямої полярності в режимі пачок імпульсів із синхронізацією запуску від зовнішнього пристрою.

Таблиця 5.7 - Технічні характеристики інверторного джерела живлення дугової плазми при різнополярних імпульсних режимах

| №  | Технічні характеристики                      | Значення         |
|----|----------------------------------------------|------------------|
| 1  | Напруга мережі живлення, В                   | 220 / 380        |
| 2  | Частота мережі живлення, Гц                  | 50 / 60          |
| 3  | Струм прямої полярності, А                   | 5 – 80 (5 – 100) |
| 4  | Струм зворотної полярності, А                | 5 – 30 (5 – 50)  |
| 5  | Струм підставки, А                           | 5 – 10 (25)      |
| 6  | Струм чергової дуги, А                       | 3 – 8            |
| 7  | Тривалість імпульсів прямої полярності, мс   | 1 – 99           |
| 8  | Тривалість паузи прямої полярності, мс       | 1 – 99           |
| 9  | Тривалість імпульсу зворотної полярності, мс | 1 – 99           |
| 10 | Тривалість пачки імпульсів, мс               | 0.5 – 1.0        |
| 11 | Частота заповнення імпульсів, кГц            | 10 – 40          |
| 12 | Напруга холостого ходу, В                    | 48               |
| 13 | ПВ, %                                        | 85               |

Для живлення чергової дуги у джерелі передбачений окремий Блок чергової дуги (плазмовий модуль), який включається та вимикається за

командою з Блоку Управління. Для запалювання чергової дуги використовується Блок запалення, що входить до складу плазмового модуля. Увімкнення та відключення Блоку підпалювання відбувається за командою з ССУПЗ.

Функціонування джерела живлення плазмової дуги відбувається при здійсненні технологічного процесу лазерно-мікроплазмового зварювання. При цьому можуть забезпечуватись наступні режими роботи ДЖП (режими живлення плазмової дуги):

- «Синхронізація»;
- «Автономний».

Режим «Синхронізація» призначений для здійснення процесу імпульсного лазерно-мікроплазмового зварювання спільно з додатковим джерелом нагріву – генератором лазерного випромінювання. У режимі роботи «Синхронізація» керування ДЖП здійснюється за допомогою ССУПЗ у режимі «Дистанційний» (див. нижче). Для управління частотою і тривалістю імпульсів і пауз ДЖП задіює зовнішні управляючі сигнали, які формує ССУПЗ. При цьому ДЖП здійснює імпульсне живлення плазмової дуги таким чином, що передній та задній фронт імпульсу зміщені на задане значення часу щодо переднього та заднього фронту лазерного імпульсу.

У режимі «Автономний» для керування частотою і тривалістю імпульсів та пауз ДЖП задіює внутрішній генератор частоти. Налаштування параметрів джерела здійснюється в режимі «Локальний». Режим «Автономний» призначений для проведення процесу імпульсного мікроплазмового зварювання без використання додаткового джерела нагріву.

Для перемикання режиму живлення плазмової дуги використовується перемикач панелі управління. Для регулювання параметрів можуть бути використані наступні режими регулювання параметрів роботи ДЖП:

- «Дистанційний»;
- «Локальний».

У режимі «Дистанційний» регулювання параметрів ДЖП (величина струму, частота та тривалість імпульсів тощо) здійснюється за допомогою ССУПЗ.

Значення параметрів, що регулюються, можуть бути попередньо змінені за допомогою програми графічного інтерфейсу (GUI), яка розташована на персональному комп'ютері. Після зміни параметри можуть бути збережені в незалежній пам'яті Блоку синхронізації для подальшого використання.

У режимі «Локальний» регулювання параметрів роботи ДЖП здійснюється з панелі управління, яка розташована на комплексній стійці.

### *3) Блок регулювання подачі газів (плазмоутворюючого, захисного та термостабілізаційного).*

Блок регулювання подачі газів повинен забезпечувати безперебійну роботу всіх зварювальних головок, а також надійне заповнення зварювальної герметичної камери газом, який захищає метал зварювальної ванни і нагрітий метал шва. До його складу входять: система регулювання подачі газів (здійснюваного за допомогою ротаметрів), газова система захисту оптичного каналу інтегрованого плазмотрону, системи подачі газу на чергову дугу та плазмоутворюючого газу, система подачі захисного газу в камеру з контрольованою атмосферою.

Один із варіантів компонування блоку регулювання подачі газів – у шафі системи управління обладнанням.

Газова система захисту оптичного каналу призначена для дозованої подачі захисту газу в зону оптичного каналу і складається з джерела стисненого газу (компресора), блоку управління клапаном газу, самого клапана подачі газу і датчика масових витрат газу.

Для видування захисним газом за межі плазмоутворюючого сопла чергової дуги передбачений окремий канал для подачі захисного газу. Канал складається з джерела захисного газу, блоку управління клапаном газу, самого клапана подачі газу та витратоміра (датчика масових витрат захисного газу).

Канал подачі плазмоутворюючого газу складається з джерела захисного газу, блоку управління клапаном газу, самого клапана подачі газу і витратоміра (датчик масових витрат плазмоутворюючого газу).

4) *Універсальний блок водяного охолодження плазмотрону для лазерно-мікроплазмового зварювання.*

Для охолодження електродної системи інтегрованого лазерно-мікроплазмового пальника повинна використовуватися замкнута рідинна система охолодження. Рідина складається з блоку управління компресором, самого компресора (насос прокачування хладагента), радіатора з вентилятором для відведення тепла, реле протоки та датчика температури.

Блок водяного охолодження зварювального інтегрованого плазмотрону повинен забезпечувати такі вимоги:

- охолодження інтегрованого плазмотрона виконується від автономного блоку охолодження замкненого циклу;
- блок охолодження має вбудований датчик контролю протоки охолоджувальної рідини; при недостатній кількості та натиску холодоагенту датчик відключає джерело живлення;
- охолоджувальна рідина має температуру замерзання не вище  $-10^{\circ}\text{C}$ ;
- охолоджувальна рідина не є електропровідною;
- потужність блоку охолодження – не менше ніж 1,5 кВт;
- витрата охолодної рідини – не менше 5 л/хв;
- тиск рідини у системі – 2,5 бар.

## **5.5. Висновки за розділом 5.**

1. Розроблений технологічний процес зварювальної герметизації високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів, який включає: підготовку виробу до зварювання хімічним травленням деталей, що зварюються, лугом з подальшою нейтралізацією кислотою; складання під зварювання деталей, що зварюються; базування в оснащенні та зварювання виробу з одночасним контролем/керуванням температурою його нагрівання; діагностику рівня його НДС.

2. Розроблений дослідно-промисловий технологічний комплекс обладнання, який включає зварювальну вакуумовану камеру з системами кріплення, переміщення та зварювання заготовки, зварювальне джерело живлення з плазмовим модулем, систему управління, вакуумування, газопідготовки та очищення відпрацьованих газів, а також рукавичну камеру ручного складання деталей виробу під зварювання.

3. Для виконання зварювання високоточних виробів космічної галузі з легких сплавів сконструйовані та виготовлені дві зварювальні головки: лазерну та інтегровану лазерну з мікроплазмовим підігрівом. Виконана оптимізація подачі потоку плазмоутворюючого газу для інтегрованої лазерно-мікроплазмової головки з урахуванням особливості її функціонування в камері з контрольованою захисною атмосферою.

4. Сконструйований та виготовлений стенд для визначення НДС готового виробу після зварювання, а також створені необхідні алгоритми та програмне забезпечення для супутніх розрахунків.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблені методики попереднього розрахункового визначення параметрів режимів лазерного зварювання (як звичайного, так із супутнім мікроплазмовим підігрівом), а також післязварювального напружено-деформованого стану виробів космічної промисловості з високоміцних алюмінієвих сплавів. За допомогою експериментальної перевірки розроблених методик визначена величина їхньої похибки (до 10...20%) та доведена прийнятність для розв'язуваних завдань. На підставі проведених досліджень визначені характерні дефекти зварних з'єднань та шляхи їх усунення, розроблені відповідні технології зварювання, створений дослідно-промисловий комплекс для реалізації розроблених технологій, а також обладнання та методика неруйнівного контролю результатів використання зварювальних технологій.

2. Встановлено, що лазерне зварювання стикових з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів дозволяє отримувати шви з близьким до 1 коефіцієнтом форми при мінімальних витратах погонної енергії (5...10 Дж/мм) та часу існування ванни розплаву (0,02...0,04 с). Зернистість з'єднання носить регулярний характер, зерна рівноосні в переплавленому металі, дещо подовжені вздовж лінії сплавлення ( $\alpha=2...3$ ) і в ЗТВ ( $\alpha=2,5...5$ ). Мікротвердість у швах знижується до 15%, а ЗТВ підвищується на 8...12% щодо основного металу. Основні дефекти – утворення в ЗТВ мікротріщин довжиною 10...20 мкм та наявність у кореневій частині швів включень неруйнованої оксидної плівки.

3. Для підвищення якості з'єднань та усунення виявлених дефектів запропоновано при лазерному зварюванні використовувати супутній мікроплазмовий підігрів. Ширина швів при такому зварюванні в 1,5-3 рази підвищується порівняно з лазерним. Зеренна структура переплавленого металу має рівноосну будову, розмір зерен зменшується в 1,5-2 рази порівняно із лазерним зварюванням. Вздовж лінії сплавлення й у ЗТВ формуються структури з подовженими зернами ( $\alpha=3...6$  і  $\alpha=4...5$ , відповідно). Мікротвердість переплавленого металу знижується до 15...20%, а ЗТВ приблизно відповідає

основному металу. При цьому використання кошовної лазерної енергії зменшується на 40...50%, час існування зварювальної ванни (0,03...0,05 с) наближається до лазерного зварювання, усувається небезпека вигорання легуючих елементів.

4. Розроблені розрахункові методики дозволили спрогнозувати, що у разі зварювання авіакосмічних виробів з берилію та його сплавів завдяки високій теплопровідності (яка в  $\sim 3$  рази перевищує теплопровідність алюмінієвих сплавів) потрібно більше вкладення енергії. Тому погонні енергії провару берилієвих сплавів на глибину порядку 0,5-0,7 мм за умови нагрівання виробу до 100...120°C повинні перевищувати енергії аналогічного провару алюмінієвих сплавів: при лазерному зварюванні приблизно в 4 рази, при лазерному зварюванні із супутнім мікроплазмовим підігрівом – приблизно в 1,5 рази.

5. За допомогою методу скінчено-елементного моделювання та розробленого комбінованого розрахунково-експериментального методу по визначенню залишкових переміщень, деформацій та напружень у звареному виробі за режимами зварювання встановлено, що при лазерному зварюванні виробів космічної галузі зі сплаву 7005 після виконання чотирьох діаметрально протилежних зварних точок залишкові деформації торців виробу ( $\varnothing 41 \times 41$  мм) можуть сягати 0,02...0,05 мм, а після виконання безперервних кільцевих швів – знижуватися до 0,01...0,02 мм. Величини залишкових напружень по площині торців звареного виробу знаходяться у межах 50-60 МПа. При цьому в зоні шва напруження можуть доходити до 200 МПа, а ЗТВ змінюватися від 70 до 150 МПа. Внесені попередньо виконаними зварними точками деформаційні відхилення майже не впливають на рівень залишкових напружень.

6. Розроблений технологічний процес зварювальної герметизації високоточних тонкостінних виробів космічної галузі з легких сплавів, який включає: підготовку виробу до зварювання хімічним травленням лугом з подальшою нейтралізацією кислотою деталей, що зварюються; складання під зварювання деталей, що зварюються; базування в оснащенні та зварювання

виробу з одночасним контролем/керуванням температури його нагрівання; діагностику рівня залишкового НДС виробу.

7. Розроблений дослідно-промисловий технологічний комплекс обладнання, який включає зварювальну вакуумовану камеру з системами кріплення, переміщення та зварювання заготовки, зварювальне джерело живлення з плазмовим модулем, систему управління, вакуумування, газопідготовки та очищення відпрацьованих газів, а також рукавичну камеру ручного складання деталей виробу під зварювання. Конструювання головки для лазерного зварювання із супутнім мікроплазмовим підігрівом базувалося на оптимізації подачі потоку плазмоутворюючого газу з урахуванням особливостей камери з контрольованою захисною атмосферою. До технологічного комплексу увійшов стенд для визначення НДС готового виробу після зварювання, для функціонування якого були створені необхідні алгоритми та програмне забезпечення для супутніх розрахунків.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Varshney D., Kumar K. (2021). Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization // Ain Shams Engineering Journal, Vol. 12, Is. 1. – P. 1143-1152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.013>
2. Naik B. G., Sivasubramanian N. (1994). Applications of Berillium and its Alloys, Mineral Processing and Extractive // Metallurgy Review, Vol. 13:1. – P. 243-251. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827509408914113>
3. Löveborn D., Larsson J. K., Persson K.-A. (2017). Weldability of Aluminium Alloys for Automotive Applications // Physics Procedia, Vol. 89. – P. 89-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.08.011>
4. Schubert E. (2018). Challenges in Thermal Welding of Aluminium Alloys // World Journal of Engineering and Technology, Vol. 06(02). – P. 296-303. DOI: <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62018>
5. Hoang H., Morin D., Langseth M. (2022). Testing and modelling of butt-welded connections in thin-walled aluminium structures // Thin-Walled Structures, Vol. 171(2), 108681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108681>
6. Kornienko A. N., Litvinov A. P. (2011). Plasma-arc welding of circular joints in thin-wall cylindrical and spherical structures made of aluminium alloys // Welding International, Vol. 25, Issue 7. – P. 538-540. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.554258>
7. Zhang H., Zhan M., Zheng Z., Li R., Lyu W., Lei Y. (2021). A Systematic Study on the Effects of Process Parameters on Spinning of Thin-Walled Curved Surface Parts With 2195 Al-Li Alloy Tailor Welded Blanks Produced by FSW // Front. Mater., 8:809018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.809018>
8. Arzhannikova I.E., Sultanov N.Z. (2018). Trend of Application of Automated Welding Process of Cold Metal Transfer in Structures Made of Aluminum Alloy // Advances in Engineering Research (AER), vol. 157, International Conference "Actual

Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018). – P. 56-59. DOI: <https://doi.org/10.2991/aime-18.2018.11>

9. Zhang C.Q., Robson J.D., Prangnell P.B. (2016). Dissimilar ultrasonic spot welding of aerospace aluminum alloy AA2139 to titanium alloy TiAl6V4 // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 231. – P. 382–388. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.01.008>

10. Lynch F., Price M., Murphy A., Gibson A., Poston K., Moore G. (2004). Analysis of Weld Configuration for Laser Welded Skin-Stringer Fuselage Sub-Panels in Compression // Thin-Walled Structures, 1st Edition, CRC Press, eBook Published 22 December 2017. – 988 Pages. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351077309>

11. Simmons M.C., Schleyer G.K. (2006). Pulse pressure loading of aircraft structural panels // Thin-Walled Structures, Vol. 44, Issue 5. – P. 496-506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2006.05.002>

12. Zhang Y., Tao W., Chen Y., Lei Z., Bai R., Lei Z. (2020). Experiment and Numerical Simulation for the Compressive Buckling Behavior of Double-Sided Laser-Welded Al–Li Alloy Aircraft Fuselage Panel // Materials (Basel), Vol. 13(16): 3599. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13163599>

13. Banasik M., Stano S., Polak J. (2013). Possibility of using Nd:YAG laser for precise joining of thin-walled elements of structures on the example of the flow sensor pitot probe // Welding International, Vol. 27, Issue 6. – P. 429-433. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.606139>

14. Zhou, Q., Liu, F., Li, J., Li, J., Zhang, S. and Cai, G. (2022). Detection of butt weld of laser-MIG hybrid welding of thin-walled profile for high-speed train // Railway Sciences, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. DOI: <https://doi.org/10.1108/RS-04-2022-0010>

15. Huang A. G., Zhang H., Liu J., Yu W., Li Z. Y., Li H. (2011). Study on Solidification Crack Criterion during Laser Welding Pure Aluminum and ZL114A Aluminum Alloy // Advanced Materials Research, Vol. 308-310. – P. 852-858. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.308-310.852>

16. Tabakin E.M., Andreev S.A. (2019). Influence of surface tension on the pores formation at the welding of thin-walled structures // *Welding International*, Vol. 33, Issue 7-9. – P. 321-327. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1881341>
17. Miyagi, M., Wang, H., Yoshida, R. et al. (2018). Effect of alloy element on weld pool dynamics in laser welding of aluminum alloys // *Scientific Reports*, Vol. 8, 12944. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31350-4>
18. Quintino, L., Miranda, R., Dilthey, U., Iordachescu, D., Banasik, M., Stano, S. (2010). Laser Welding of Structural Aluminium. In: Moreira, P., da Silva, L., de Castro, P. (eds) *Structural Connections for Lightweight Metallic Structures. Advanced Structured Materials*, Vol. 8. Springer, Berlin, Heidelberg. – P. 33–57. DOI: [https://doi.org/10.1007/8611\\_2010\\_46](https://doi.org/10.1007/8611_2010_46)
19. Seib E., Koçak M. (2005). Fracture Analysis of Strength Undermatched Welds of Thin-Walled Aluminium Structures Using Fitnet Procedure // *Welding in the World* volume, Vol. 49. – P. 58–69. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03266503>
20. Xu S., Chen J., Shen W., Hou R., Wu Y. (2022). Fatigue strength evaluation of 5059 aluminum alloy welded joints Considering welding deformation and residual stress // *International Journal of Fatigue*, Vol. 162, 106988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106988>
21. Krivtsun I., Khaskin V., Korzhyk V, Dong C., Klochkov I., Luo Z. (2019). Analysis of the possibilities of using the synergistic effect to improve the performance of hybrid cutting and welding technologies // *Colloquium-journal*, №17 (41). – P. 36-43. DOI: <https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10556>
22. Zacharia T., David S.A., Vitek J.M., DebRoy T. (1990). Modeling of interfacial phenomena in welding // *Metall. Trans. B*, Vol. 21B. – P. 600–603.
23. Tanaka M., Ushio M., Lowke J. J. (2005). Numerical Analysis for Weld Formation Using a Free-Burning Helium Arc at Atmospheric Pressure // *JSME International Journal Series B*, Vol. 48, No. 3. – P. 397-404. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmeb.48.397>

24. Borisov Yu. S., Demchenko V. F., Lesnoj A. B., Khaskin V. Yu., Shuba I. V. (2013). Numerical modelling of heat transfer and hydrodynamics in laser-plasma treatment of metallic materials // The Paton Welding Journal, #4. – P. 2-7.
25. Holzer M., Hofmann K., Mann V., Hugger F., Roth S., Schmidt M. (2016). Change of Hot Cracking Susceptibility in Welding of High Strength Aluminum Alloy AA 7075 // Physics Procedia, Vol. 83. – P. 463-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.048>
26. Behler K., Berkmanns J., Ehrhardt A., Frohn W. (1997). Laser beam welding of low weight materials and structures // Materials & Design, Vol. 18, No. 4/6. – P. 261-267. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(97\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(97)00085-X)
27. Gündoğdu İş E., Akman E., Yilmaz M., Topuz P. (2020). Effect of laser welding speed on pore formation in AA 6061 T6 alloy // Materials Testing, Vol. 62, No. 10. – P. 979-984. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.111573>
28. Hagenlocher C., Weller D., Weber R., Graf T. (2019). Reduction of the hot cracking susceptibility of laser beam welds in AlMgSi alloys by increasing the number of grain boundaries // Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 24:4. – P. 313-319. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2018.1534775>
29. Olabode M., Kah P., Martikainen J. (2013). Aluminium alloys welding processes: Challenges, joint types and process selection // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 227, Is. 8. – P. 1129-1137. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954405413484015>
30. Kang M., Kim C. (2017). A Review of Joining Processes for High Strength 7xxx Series Aluminum Alloys // Journal of Welding and Joining, Vol. 35, No. 6. – P. 79-88. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.12>
31. Cao X., Wallace W., Immarigeon J.-P., Poon C. (2003). Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. II. Metallurgical Microstructures, Defects, and Mechanical Properties // Materials and Manufacturing Processes, Vol. 18:1. – P. 23-49. DOI: <https://doi.org/10.1081/AMP-120017587>
32. Dickerson P. B. (1993). Welding of Aluminum Alloys // Welding, Brazing, and Soldering, Vol. 6, ASM Handbook, Edited By D. L. Olson, T. A. Siewert, S. Liu,

G. R. Edwards, ASM International. – P. 722–739. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001436>

33. Dai Y., Yan L., Hao J. (2022). Review on Micro-Alloying and Preparation Method of 7xxx Series Aluminum Alloys: Progresses and Prospects // Materials (Basel), Vol. 15(3): 1216. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15031216>

34. Shah P. H., Badheka V. J. (2017). Friction stir welding of aluminium alloys: An overview of experimental findings – Process, variables, development and applications // Proc. I. Mech. E., Part L: J. Materials: Design and Applications, Vol. 233, Issue 6. – P. 1191-1226. DOI: <https://doi.org/10.1177/1464420716689588>

35. Lezaack M. B., Simar A. (2021). Avoiding abnormal grain growth in thick 7XXX aluminium alloy friction stir welds during T6 post heat treatments // Materials Science and Engineering: A, Vol. 807, 140901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140901>

36. Bertrand R., Robe H., Texier D., Zedan Y., Feulvarch E., Bocher P. (2019). Analysis of AA2XXX/AA7XXX friction stir welds. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, Vol. 271. – pp. 312-324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.027>

37. Mroczka K., Wójcicka A., Pietras A. (2013). Characteristics of Dissimilar FSW Welds of Aluminum Alloys 2017A and 7075 on the Basis of Multiple Layer Research // Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 22, Number 9. – P. 2698–2705. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0570-7>

38. Dai Y., Yan L., Hao J. (2021). Review On Progress of 7xxx Series Aluminum Alloy Materials // Preprints 2021, 2021110271. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202111.0271.v1>

39. Çam G., İpekoğlu G. (2017). Recent developments in joining of aluminum alloys // Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 91. – P. 1851–1866. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9861-0>

40. Choi K.-D., Ahn Y.-N., Kim C.-H. (2009). Crack Susceptibility Reduction and Weld Strength Improvement for Al Alloy 5J32-T4 by using Laser Weaving

Method // Journal of Welding and Joining. The Korean Welding and Joining Society, Vol. 27, No. 4. – pp. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.5781/kwjs.2009.27.4.026>

41. Wu L., Yang B., Han X., Ma G., Xu B., Liu Y., Song X., Tan C. (2022). The Microstructure and Mechanical Properties of 5083, 6005A and 7N01 Aluminum Alloy Gas Metal Arc-Welded Joints for High-Speed Train: A Comparative Study // Metals, Vol. 12, 213. – 15 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12020213>

42. Lee T. (2020). Resistance spot weldability of heat-treatable and non-heat-treatable dissimilar aluminium alloys // Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 25, Issue 7. – P. 543-548. DOI: <https://doi.org/10.1080/13621718.2020.1761619>

43. Pujari K. S., Patil D.V. (2013). A Review on GTAW Technique for High Strength Aluminium Alloys (AA 7xxx series) // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2, Issue 8. - P. 2477-2490. ISSN: 2278-0181

44. Dorta-Almenara M., Capace M. C. (2016). Microstructure and mechanical properties of GTAW welded joints of AA6105 aluminum alloy // Revista Facultad de Ingeniería, Vol. 25(43). – P. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.19053/01211129.v25.n43.2016.5293>

45. Kaba L., Djeghlal M. E., Ouallam S., Kahla S. (2022). Dissimilar welding of aluminum alloys 2024 T3 and 7075 T6 by TIG process with double tungsten electrodes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Issue 3-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07888-5>

46. Olabode M. (2015). Weldability of high strength aluminium alloys // Diss. Lappeenranta University of Technology. – 59 p. ISBN 978-952-265-865-4

47. Stange A.W., Hilmas D.E., Furman F.J. (1996). Possible health risks from low level exposure to beryllium // Toxicology, V. 111(1-3), P. 213-224. DOI: [https://doi.org/10.1016/0300-483x\(96\)03378-1](https://doi.org/10.1016/0300-483x(96)03378-1).

48. Hill M., Damkroger B.K., Dixon R.D., Robertson E. (1990). Beryllium weldability // Los Alamos National Laboratory, Materials Weldability Symposium, ASM Materials Week, Detroit, Michigan (USA), 9 p. Permalink: <https://www.researchgate.net/publication/236557474>

49. Veness R., Simmons G., Dorn C. (2011). Development of beryllium vacuum chamber technology for the LHC // Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, Spain, TUPS024, P. 1578-1580.
50. Дяченко С. С. Фізичні основи міцності та пластичності металів. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2003. – 226 с.
51. Gurevich S. (1990). Non-ferrous metal welding reference, resp. ed. V. Zamkov, 2nd ed., revised. and add., Kiev: Naukova dumka, 512 p.
52. Falkner G.E., Ramos T.J., Murchie J.R. (1982). Laser Welding Beryllium in a Deuterium Atmosphere // Lawrence Livermore National Laboratory Report UCID-19602, Order Number DE83003312, 17 p.
53. Manly W.D., Dombrowski D.E., Hanafee J.E. etc. (1995). Report of a Technical Evaluation Panel on the Use of Beryllium for ITER Plasma Facing Material and Blanket Breeder Material // Sandia National Laboratories (USA), SAND95-1693 • UC-420, 150 p.
54. Campbell R.P., Dixon R.D., Liby A.L. (1978). Electron-beam fusion welding of beryllium // Rockwell International (USA), RFP-2621, January 1. – 24 p.
55. Steen W., Mazumder J. (2010). Laser Material Processing, Springer, London. – 558 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-062-5>
56. Kuneš J. (2012). Dimensionless Physical Quantities in Science and Engineering. – Elsevier, 454 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2011-0-06212-9>
57. Doshi S.J. , Gohil A.V., Mehta N.D. , Vaghasiya S.R. (2018). Challenges in Fusion Welding of Al alloy for Body in White // Materials Today: Proceedings, Volume 5, Issue 2, Part 1, P. 6370-6375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.247>
58. İş E. G., Yılmaz M. (2021). Effects of Ar-He shielding gas mixture on mechanical and metallurgical properties of weld metal in laser welding of 6061 T6 aluminium alloy // Journal of Laser Applications, Vol. 33, 042011. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000414>
59. Cao X., Wallace W., Poon C., Immarigeon J.-P. (2003). Research and Progress in Laser Welding of Wrought Aluminum Alloys. I. Laser Welding Processes,

Materials and Manufacturing Processes, Vol. 18, – P. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1081/AMP-120017586>

60. Shyganov I. Kholopov A. (2010). Laser welding of aluminum alloys // Photonics Russia, №3, P. 6-10.

61. Mathers G. (2002). The Welding Aluminium and its Alloys // Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 1st edition, October 8, 248 p. ISBN-13: 978-1855735675

62. Zhu G., Wang S., Cheng W. etc. (2019). Investigation on the Surface Properties of 5A12 Aluminum Alloy after Nd: YAG Laser Cleaning // Coatings, V.9(9), P. 578-593. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings9090578>

63. Kah P., Lu J., Martikainen J., Suoranta R. (2013). Remote Laser Welding with High Power Fiber Lasers // Engineering, Vol. 05(09). – P. 700-706. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2013.59083>

64. Powell J., Ilar T., Frostevarg J., Torkamany M. J. (2015). Weld root instabilities in fiber laser welding // Journal of Laser Applications, Vol. 27, S29008. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4906390>

65. Shyganov I., Shakhov S., Kholopov A. (2012). Laser welding of aviation aluminum alloys // Engineering Journal: Science and Innovation, №6(6), P. 34–50. DOI: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2012-6-224>

66. Grünenwald S., Kujanpää V., Salminen A. (2007). Nd:YAG laser welding of 5083 aluminium alloy using filler wire // Journal of Laser Applications, ICALAO 2007, 1002. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5060979>

67. Xu F., Chen L., He E.G., Guo L. Y. (2019). Laser welding 6A02 aluminum alloy with filler wire under high welding speed // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, April 2019, Vol. 504(1): 012028. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/504/1/012028>

68. Krivtsun I.V., Khaskin V.Yu., Korzhik V.N., Luo Ziyi (2015). Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review) // The Paton Welding Journal, 2015, No.7. – P. 41-46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.07.07>

69. Malikov A., Orishich A., Karpov E., Vitoshkin I. (2019). Laser welding of aluminium alloys for the aircraft industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 681, 012029, P. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012029>
70. Zhao H., White D.R., DebRoy T. (1999). Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys // International Materials Reviews, ASM International, P. 238-266. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066099101528298>
71. Xiao R., Zhang X. (2014). Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys // Journal of Manufacturing Processes. V.16, P.166-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.10.005>
72. Loginova I., Khalil A., Pozdniakov A. etc. (2017). Effect of Pulse Laser Welding Parameters and Filler Metal on Microstructure and Mechanical Properties of Al-4.7Mg-0.32Mn-0.21Sc-0.1Zr Alloy // Metals-Open Access Metallurgy Journal, V.7(12), P. 564-572. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7120564>
73. Hashiguchi D.H., Svilar M., Sayer A.B., Morales A.L. (2015). Beryllium and Aluminum-Beryllium Alloys // Powder Metallurgy, Vol. 7, ASM Handbook, Edited By P. Samal, J. Newkirk, ASM International. – P. 757–765. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v07.a0006058>
74. Hanafee J. E., Ramos T. J. (1995). Laser Fabrication of Beryllium Components // 2nd International Energy Agency International Workshop on Beryllium Technology for Fusion, Moran, Wyoming (USA), September 6-8, 6 p.
75. Criss E.M. (2015). Surrogacy of Beryllium Welds and Heat Transfer in Metals // Dissertation for the degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering), University of California, San Diego (USA), 129 p. Permalink: <http://escholarship.org/uc/item/8sx939v4>
76. Прохоренко В.М., Прохоренко О.В. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях. – К.: НТУУ «КПІ», 2009. – 268 с.
77. Yu S.R., Yan Y.X., Hao Z.M. etc. (2009). Analysis of Temperature Distribution and its Influencing Factors in Laser Welding of Beryllium Cylindrical

Shells // Key Engineering Materials, V. 419-420, P. 449-452. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.419-420.449>

78. Zhi L., Junpin L., Yanli W., Guojian H., Guoliang C., Ying Z., Shenghe L. (2003). Analysis of Condensation Structure in a YAG Laser Welded Be/Al Alloy // Chinese Journal of Engineering, V. 25(5). – P. 433-435. DOI: <https://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2003.05.038>

79. Komarov M.A., Guitarsky L.S. (2015). Welding of beryllium // Welding International, V. 29, No. 7. – P. 561-566. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2014.952497>

80. Narsimhachary D., Bathe R.N., Padmanabham G., Basu A. (2014). Influence of Temperature Profile during Laser Welding of Aluminum Alloy 6061 T6 on Microstructure and Mechanical Properties // Materials and Manufacturing Processes, V.29, P. 948-953. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2013.872258>

81. Korzhyk V.M., Khaskin V.Yu., Grynyuk A.A., Peleshenko S.I., Yuhui Yao, Hrygorenko S.G., Shcheretskyi V.O., Kushnareva O.S. (2022). Fibre laser welding of aluminium alloys of 7xxx series (Al–Zn–Mg–Cu) by nonthrough thickness welds // The Paton Welding Journal, #4. – P. 19-25.

82. Wang J.T., Zhang Y.K., Chen J.F. etc. (2015). Effects of laser shock peening on stress corrosion behavior of 7075 aluminum alloy laser welded joints // Materials Science and Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, V.647, P. 7-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.084>

83. Kang M., Cheon J., Kam D. H., Kim C. (2021). The hot cracking susceptibility subjected the laser beam oscillation welding on 6XXX aluminum alloy with a partial penetration joint // Journal of Laser Applications, Vol. 33, 012032. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000319>

84. Perkins, M.A. Electron-beam braze welding of beryllium. – United States: N. p., 1978. – 22 p. DOI: <https://doi.org/10.2172/6428491>

85. Bunaziv I., Akselsen O.M., Ren X., Nyhus B., Eriksson, M., Gulbrandsen-Dahl S. A. (2021). Review on Laser-Assisted Joining of Aluminium Alloys to Other Metals // Metals, Vol. 11, 1680. – 40 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111680>

86. Coelho B. N., de Lima M. S. F., de Carvalho S. M., da Costa A. R. (2018). A Comparative Study of the Heat Input During Laser Welding of Aeronautical Aluminum Alloy AA6013-T4 // J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, V.10, e2918. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.5028/jatm.v10.925>
87. Volpp J., Jonsén P., Ramasamy A., Kalfsbeek B. (2020). Toughness properties at multi-layer laser beam welding of high-strength steels // Welding in the World. – 12 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01004-z>
88. Shelyagin V.D., Orishich A.M., Khaskin V.Yu., Malikov A.G., Chajka A.A. (2014). Technological peculiarities of laser microplasma and hybrid laser-microplasma welding of aluminium alloys // The Paton Welding Journal, No.5. – P. 33-39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.05.06>
89. Shelyagin V.D., Lukashenko A.G., Khaskin V.Yu., Bernatsky A.V., Siora A.V., Lukashenko D.A., Shuba I.V. (2017). Developments in the field of laser welding equipment and technologies performed at E.O. Paton Electric Welding Institute (Review) // The Paton Welding Journal, No.12. – P. 42-46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.12.08>
90. Krivtsun I.V., Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Shulym V.F., Ternovoj E.G. (2007). Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys // The Paton Welding Journal, No.5. – P. 36-39.
91. Korzhyk V., Bushma O., Khaskin V., Dong C., Sydorets V. (2017). Analysis of the Current State of the Processes of Hybrid Laser-Plasma Welding // Advances in Engineering Research (AER), V.102, 2017. – P. 80-90.
92. Khaskin V., Korzhyk V., Bernatsky A., Gos I., Kostash S., Voitenko O. (2018). Analysis of features of technological schemes of processes of laser-plasma cutting and welding // Austria-science, №20. – P. 34-43.
93. Patterson R. A., Olson D. L., Goldberg A., Dalder E. N.C. (2009). ASM TECHNICAL BOOKS. Beryllium Chemistry and Processing. Chapter 23: Welding and Joining of Beryllium and Beryllium Alloys. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.bcp.t52230401>

94. Анисович А.Г., Румянцева И.Н. Практика металлографического исследования материалов. – Монография. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 221 с. — ISBN 978-985-08-1603-0.

95. Kusano K., Watanabe H. (2002). Recent trends in development of high-efficiency TIG welding; high-deposition TIG welding and ultranarrow-gap TIG welding // *Welding International*, Vol. 16, Issue 12. – P. 986-991, DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110209549651>

96. Moglia F., Raspa A. (2020). New Trends in Laser Beam Welding: How automotive applications are driving the future of laser technologies // *Photonics Views*, V. 17(5). – P. 26-29. DOI: <https://doi.org/10.1002/phvs.202070508>

97. Aiqin D., Li C. (2018). The dynamic characteristics of the combined plasma during hybrid laser-arc welding of 5A90 Al-Li alloy // *Journal of Laser Applications*, PICALO 2010, 509; DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5057207>

98. Bushma O. (2015). State-of-the-art of hybrid laser-plasma welding (Review) // *TPWJ*, 2015, #8, 18-25. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.08.04>

99. I. Bunaziv, O. M. Akselsen, X. Ren, B. Nyhus, M. Eriksson (2021). Laser Beam and Laser-Arc Hybrid Welding of Aluminium Alloys // *Metals*, Vol. 11(8). – P. 1150. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11081150>

100. Sokolov M., Salminen A. (2014). Improving Laser Beam Welding Efficiency // *Physics Procedia* 6(09):559-571. DOI: <https://doi.org/10.4236/eng.2014.69057>

101. Fetzer F. (2018). Fundamental investigations on the spiking mechanism by means of laser beam welding of ice // *Journal of Laser Applications*, Vol. 30, No. 1. P. – 012009-1 – 012009-9. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4986641>

102. Noskov, M.M. (1983). Optical and magneto-optical properties of metals. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR. – 219 p.

103. Kiselev, A.I., Akashev, L.A., Kononenko, V.I. (2004). Effective mass of electrons in the alloys of aluminum, cesium and binary system Al—3 at.% Ce. *Zhurnal Tekhnich. Fiziki*, 74(3), p. 20—23.

104. Zinoviev, V.E. (1989). Thermal properties of metals at high temperatures: Refer. Book. Moscow: Metallurgiya. – 384 p.
105. Ujihara, K. (1972). Reflectivity of metals at high temperatures. *J. Appl. Physics*, 43(5), p. 2376—2383.
106. Ordal, M.A., Long, L.L., Bell, R.J. et al. (1983). Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared. *Appl. Optics*, 22(7), p. 1099—1119.
107. Chi T.C. (1979). Electrical Resistivity of Alkaline Earth Elements / T.C. Chi // *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 8, № 2. – P. 439–497.
108. Miller J.C. (1969). Optical properties of liquid metals at high temperatures. *Phil. Magazine*, Issue 168, 20(12), p. 1115—1132.
109. Comins N.R. (1972). The optical properties of liquid metals. *Ibid.*, Issue 4, 25, p. 817—831.
110. Korkmaz S.D. A Comparative Study of Electrical Resistivity of Liquid Alkaline Earth Metals / S.D. Korkmaz, S. Korkmaz and F. Resuloglu // *AIP Conf. Proc.* – 2007. – Vol. 899. – P. 649-649. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2733390>
111. Dupont J.N., Marder A.R. (1995). Thermal Efficiency of Arc Welding Processes // *Welding Journal*, Vol. 74. – pp. 406s-416s.
112. Khaskin V.Yu., Korzhik V.N., Sydorets V.N., Bushma A.I., Wu B., Luo Z. (2015). Improving the efficiency of hybrid welding of aluminum alloys // *The Paton Welding Journal*, 2015, No12. – P. 14-18. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.12.03>
113. Shiganov I.N., Misyurov A.I., Trushnikov A.N., Kholopov A.A., Blinkov V.V. (2017). Hybrid laser-arc welding of aluminium alloys // *Welding International*, Vol. 31, Issue 1. – P. 67-70. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2016.1213043>
114. Mascenik J., Pavlenko S. (2020). Determination of stress and deformation during laser welding of aluminium alloys with the pc support // *MM Science Journal*, November. – P. 4104-4107. DOI : [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020\\_11\\_2020037](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_11_2020037)
115. Mwema F.M. (2017). Transient Thermal Modeling in Laser Welding of Metallic/Nonmetallic Joints Using SolidWorks® Software // *International Journal of*

Nonferrous Metallurgy, Vol. 6, No. 1. – P. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4236/ijnm.2017.61001>

116. Vincent Y., Bergheau J.M., Leblond J.B. (2003). Viscoplastic behaviour of steels during phase transformations // C.R. Mecanique, V. 331. – P. 587-594, Académie des Sciences de l'Institut de France. Published by Editions scientifiques et médicales Elsevier SAS.

117. Danielewski H., Skrzypczyk A. (2020). Steel Sheets Laser Lap Joint Welding—Process Analysis // Materials (Basel), Vol. 13(10): 2258. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13102258>

118. Shanmugam S. (2009). Some studies on temperature profiles in AISI 304 stainless steel sheet during laser beam welding using FE simulation // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 43. – P. 78-94. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1685-0>

119. Tsirkas S., Papanikos P., Kermanidis Th. (2003). Numerical Simulation of the Laser Welding Process in Butt-Joint Specimens // Journal of Materials Processing Technology, Vol. 134(1). – P. 59-69. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00921-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00921-4)

120. Goldak J. A., Akhlaghi M. Computational welding mechanics. – O.: USA, 2005. – 325 pp.

121. Babych O.A., Korzhyk V.M., Grynyuk A.A., Khaskin V.Yu., Chunlin Dong, Shanguo Han (2020). Hybrid welding of aluminium 1561 and 5083 alloys using plasma-arc and consumable electrode arc (Plasma-MIG) // The Paton Welding Journal, No.7. – P. 11-22. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.07.02>

122. Bofang Zhu. The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering – John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018. – 872 pp.

123. Chirkin V.S. (1968). Thermophysical properties of nuclear engineering materials. Handbook. – Moscow: Atomizdat. – 484 p.

124. Zinoviev V.E. (1989). Thermophysical properties of metals at high temperatures. – Moscow: Metallurgy. – 384 p.

125. Svenungsson J., Choquet I., Kaplan A.F.H. (2015). Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling // *Physics Procedia*, V. 78. – P. 182-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.042>
126. Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Garashchuk V.P., Siora A.V., Bernatsky A.V., Sakharov A.V. (2002). Hybrid CO<sub>2</sub>-laser and CO<sub>2</sub> consumable-arc welding // *The Paton Welding Journal*, No10. – P. 35-37.
127. Miller E., Liu S. (2018). Laser Welding of Aluminum Alloys // *ASM HANDBOOK ONLINE*. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v02a.a0006502>
128. Khaskin V.Yu., Shulym V.F., Bernatsky A.V., Siora A.V., Palagesha A.N. (2012). Laser welding in a low pressure atmosphere // *Visnik NUK*, No. 5, 2012. – P. 167-169.
129. Soete W., Vancrombrugge R. (1950). An Industrial Method for the Determination of Residual Stress // *Proc. SESA*, VIII. – pp. 17-26.
130. Rendler N.J., Vigness I. (1966). Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses // *Proc. SESA*, XXIII. – pp. 577-586.
131. Makino A., Nelson D. (1994). Residual stresses determination by single-axis holographic interferometry and hole-drilling. Part I // *Theory Exp. Mech.*, Vol. 34. – pp. 66-78.
132. Wu Z., Lu J., Han B. (1998). Study of residual stress distribution by a combined method of moiré interferometry and incremental hole drilling, part I: theory and part II: implementation // *J. ApplMech*, Vol. 65, No. 4. – pp. 837–850.
133. Steinzig M., Ponslet E. (2003). Residual stress measurement using the hole drilling method and laser speckle interferometry: Part 1. Experimental Techniques // *Vol. 27*. – pp. 43–46.
134. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Kyjanets I.V., Savitsky V.V., Tkachuk G.I. (2005). Express control of quality and stressed state of welded structures using method of electron shearography and speckle-interferometry // *The Paton Welding Journal*, Vol.8. – pp.35-40.
135. Lobanov L. M., Pivtorak V. A., Savitsky V.V., Tkachuk G. I. (2006). Procedure for Determination of Residual Stresses in Welded Joints and Structural

Elements using Electron Speckle-Interferometry // The Paton Welding Journal. Vol. 1. – pp.24-29.

136. Viotti M. R., Kapp W., Albertazzi Jr. A. (2009). Achromatic digital speckle pattern interferometer with constant radial in-plane sensitivity by using a diffractive optical element // App. Opt. Vol. 48, No. 12. – pp. 2275-2281.

137. Lobanov L., Pivtorak V., Savitsky V., Tkachuk G. (2014). Technology and Equipment for Determination of Residual Stresses in Welded Structures Based on the Application of Electron Speckle-Interferometry // Materials Science Forum, Vol. 768. – pp. 166-173.

138. Lord J. D., Penn D., Whitehead P. (2008). The application of digital image correlation for measuring residual stress by incremental hole drilling // Appl. Mech. Mater. Vol. 13–14. – pp. 65–73.

139. Baldi A. (2013). Residual stress measurement using hole drilling and integrated digital image correlation techniques // ExpMech. Vol. 54, No. 3. – pp. 379–391.

140. Dannemann, K.A., Bigger, R.P., Scott, N.L. et al. (2016). Application of Digital Image Correlation for Comparison of Deformation Response in Fusion and Friction Stir Welds // J. dynamic behavior mater. Vol. 2. – pp. 347–364. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40870-016-0070-6>

141. Lyubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Eremin A.V., Sunder R. (2019). Development of the digital image correlation method to study deformation and fracture processes of structural materials // PNRPU Mechanics Bulletin, Vol. 1. – P. 88-109. DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.1.08>

142. Sutton M.A., McNeill S.R., Helm J.D., Chao Y.J. (2000). Advances in Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision // Photomechanics. Topics in Applied Physics, Vol. 77. Springer, Berlin, Heidelberg. – P. 323-372. DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-48800-6\\_10](https://doi.org/10.1007/3-540-48800-6_10)

143. Hild F., Roux S. (2006). Digital Image Correlation: from Displacement Measurement to Identification of Elastic Properties – a Review // Strain, Vol. 42, Is. 2. – P. 69-80. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2006.00258.x>

144. Pan B., Asundi A., Xie H., Gao J. (2009). Digital image correlation using iterative least squares and pointwise least squares for displacement field and strain field measurements // Optics and Lasers in Engineering, Vol. 47, Is. 7-8. – P. 865-874. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.10.014>

145. Jandjsek I., Vavrik D. (2016). Experimental Measurement of Elastic-Plastic Fracture Parameters Using Digital Image Correlation Method // Applied Mechanics and Materials, Vol. 821. – P. 442-449. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.821.442>

146. Jandjsek I., Gajdoš L., Šperl M., Vavrik D. (2017). Analysis of standard fracture toughness test based on digital image correlation data // Engineering Fracture Mechanics, Vol. 182. – P. 607-620. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.045>

## ДОДАТОК А

### Список публікацій здобувача за темою дисертації

1. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Fialko N., Berdnikova O., Illiashenko Ye., Yuhui Yao (2022). Comparison of the features of the formation of joints of aluminum alloy 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) by laser, microplasma, and laser-microplasma welding // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, V.1/12 (115). – P. 38–47. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378> (**Scopus, Q2**).

Автору належать підготовка зразків, планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

2. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Савицький В. В., Ключков І. М., Квасницький В.В., Перепічай А. О., **Пелешенко С. І.**, Гринюк А. А., Альошин А. О., & Шуткевич О. П. (2022). Розрахунково-експериментальна методика визначення зварювальних деформацій та напружень на основі застосування методу цифрової кореляції зображень. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(1(119)), P. 44–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265767> (**Scopus, Q2**).

Автору належать підготовка зразків, проведення дослідів, визначення деформацій та напружень у зварених зразках.

3. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskyi V., Illiashenko Y. (2023). An Approach to Calculate Features of Laser Radiation Absorption in Beryllium and Aluminum Alloys for Smart Welding Processes. In: Arsenyeva, O., Romanova, T., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y. (eds) Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 536. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_40) (**Scopus, WoS**).

Автору належить виконання розрахунків поглинальної здатності алюмінієвих сплавів.

4. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В., **Пелешенко С.І.**, Гринюк А.А., Бабич О.А., Альошин А.О., Войтенко О.М. (2023). Гібридне лазерно-плазмове зварювання: ефективність і нові можливості (Огляд) // Автоматичне

зварювання, № 12. – С. 24-33. <https://doi.org/10.37434/as2023.12.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать вибір параметрів режимів зварювання, планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

5. **Пелешенко С.І.**, Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Квасницький В.В., Гринюк А.А., Клочков І.М., Чунлін Дун, Альошин А.О. (2022). Особливості зварювання висококонцентрованими джерелами нагрівання міцних сплавів на основі алюмінію і берилію (Огляд) // Автоматичне зварювання, № 12. – С. 9-19. <https://doi.org/10.37434/as2022.12.02> (**Фахове видання України**).

Автору належать відбір літературних джерел та їх аналіз.

6. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., **Пелешенко С.І.**, Yuhui Yao, Григоренко С.Г., Щерецький В.О., Кушнарьова О.С. (2022). Зварювання алюмінієвих сплавів серії 7xxx (Al–Zn–Mg–Cu) ненаскрізними швами випромінюванням волоконного лазера. // Автоматичне зварювання, № 4, С. 19-25. <https://doi.org/10.37434/as2022.04.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать планування і проведення дослідів, вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

7. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., **Пелешенко С.І.**, Гринюк А.А., Chunlin Dong, Ілляшенко Є.В., Yuhui Yao. (2022). Вибір параметрів лазерного зварювання тонкостінних виробів із легких сплавів з ненаскрізним проплавленням. // Автоматичне зварювання, № 5, С. 22–32. <https://doi.org/10.37434/as2022.05.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать планування і проведення дослідів, вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

8. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Ілляшенко Є.В., Бернацький А.В., **Пелешенко С.І.** (2021) Особливості лазерно-плазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера / В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, А.В. Бернацький, С.І. Пелешенко // Автоматичне зварювання, № 12, С. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.04> (**Фахове видання України**).

Автору належать вибір параметрів режимів, обробка і аналіз отриманих результатів.

9. **Peleshenko S.** (2022). Main problems in laser welding of thin-walled structures from aluminum and beryllium alloys (review). *Sciences of Europe*, 103, P. 78–89. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7247723>

Автору належать планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

10. **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Khaskin V., Korzhyk V., Illyashenko Ye., Lepilina K., & Alosyn A. (2022). Features of physical and metallurgical processes during welding of thin-walled aluminum alloy structures using laser radiation. *Danish Scientific Journal*, 65, P. 50–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7271299>

Автору належать підготовка зразків, виконання зварювання алюмінієвих сплавів, аналіз отриманих результатів.

11. Korzhyk V., Kvasnytskyi V., **Peleshenko Sv.**, Khaskin V., Illyashenko Ye., Lepilina K., Alosyn A., & Alosyn A. (2022). Development of technological equipment for welding high-precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, 95, P. 73–77. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7258962>

Автору належать підготовка зразків, виконання зварювання алюмінієвих сплавів, аналіз отриманих результатів.

12. Korzhyk V., **Peleshenko S.**, Kvasnytskyi V., Khaskin V., Illyashenko Ye., Lepilina K., Alosyn A., Alosyn A. (2022). Technological processes of welding high precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source // *International scientific journal "Internauka"*, 12, P. 47–53. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-12-8306>

Автору належать планування і проведення дослідів, обробка і аналіз отриманих результатів.

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskyi V., Illiashenko Y. (2022). An Approach to Calculate Features of Laser Radiation Absorption in Beryllium

and Aluminum Alloys for Smart Welding Processes // International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE-2022), Kharkiv, Ukraine, June 9-11, 2022.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, виконання розрахунків, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

14. Korzhyk V., Khaskin V., Chunlin Dong, Illyashenko Y., **Peleshenko S.**, Grynyuk A., Yuhui Yao, Al'oshin A., Al'oshin A.A. (2022). Laser welding of thin-sheet stainless steel joints with variable size of gap between cracks. // [3rd ISPC «Scientific Paradigm in the Context of Technologies and Society Development» \(July 26-28, 2022; Geneva, Switzerland\)](#). No. 118, P. 292-297.

Автору належать проведення експериментальних досліджень, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

15. Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Shcheretskiy V., Hos I., Illiashenko Ye., Voitenko O., Konoreva O. (2022). Estimation of influence of duration of current flow at direct and inverse polarity on quality of formation and geometrical parameters of seams // The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 705 p. – P. 185-190.

Автору належать результати щодо проведення досліджень, їх аналіз, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

16. Korzhyk V., Khaskin V., **Peleshenko S.**, Grynyuk A., Hos I., Ganushchak O., Babych O., Strogonov D. (2021). Overview of some perspective technical solutions on laser brazing with filler wires // The 3rd International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (November 4-6, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 848 p. – P. 242-253.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, їх виконання та аналіз, підготовка презентації доповіді.

17. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., **Peleshenko S.**, Ganushchak O., Shevchenko V. (2021). Application of laser welding technologies in

the automotive industry (review) // The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany, 686 p. – P.175-182.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

18. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Illiashenko Ye., Shcheretskiy V., Ganushchak O. (2021). Achievements of the E.O. Paton electric welding institute in the field of welding thin sheet alloys for automotive applications // The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects” (October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany, 686 p. – P.167-174.

Автору належать літературний пошук та аналіз літературних джерел, оформлення презентаційного матеріалу доповіді.

19. Коржик В. М., Щерецький В. О., Строгонов Д. В., Пашин М. О., **Пелешенко С. І.** (2021). Дослідження закономірностей впливу нанорозмірних та ультрадисперсних модифікаторів із металів та тугоплавких сполук на кристалізацію алюмінієвих сплавів для моделювання структури зварних з'єднань в умовах зварювання плавленням // Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку: тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції, (Краматорськ, 19–20 жовтень 2021 р.), 75с. – С. 40-42.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, виконання розрахунків, оформлення матеріалів доповіді.

20. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Peleshenko S.**, Babych O., Illiashenko Ye., Oleinychenko T., Ganushchak O., Popov Ye. (2021). Application of laser recovery surface // The 3rd International scientific and practical conference “Topical issues of modern science, society and education” (October 3-5, 2021) SPC “Sciconf.com.ua”, Kharkiv, Ukraine, 1096 p. – P. 229-232.

Автору належать обґрунтування і внесення пропозиції щодо проведення досліджень.

21. Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Гринюк А. А., Ілляшенко Є. В., **Пелешенко С. І.**, Квасніцький В. В., Щерецький В. О. (2021). Дослідження процесу лазерного зварювання тонколистових високоміцних алюмінієвих сплавів // X Міжнародна конференція “Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів” (6-10 вересня 2021 р., м. Одеса). Тези доповідей, 32 с. – С. 18-19.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, їх аналіз, оформлення матеріалів доповіді.

22. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., Oleinychenko T., Babych O., **Peleshenko S.**, Ganushchak O. (2021). Hybrid laser-mig welding of aluminum alloys Al-MgMn, Al-Cu-Mg and Al-Mg-Li systems // The 3rd International scientific and practical conference “Modern directions of scientific research development” (September 1-3, 2021) BoScience Publisher, Chicago, USA, 491 p. – P. 125-132.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, їх аналіз.

23. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., **Peleshenko S.**, Babych O., Ganushchak O. (2021). Hybrid plasma-MIG welding of aluminum alloys AlMg system // The 6th International scientific and practical conference – Results of modern scientific research and development (August 22-24, 2021) Barca Academy Publishing, Madrid, Spain, 517 p. – P. 120-125.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, аналіз отриманих результатів, оформлення доповіді.

24. Krivtsun, V. Korzhyk V., Feng Changgen, Khaskin V., **Peleshenko S.**, Ilyashenko E. (2020). Creation of scientific foundations and development of hybrid welding processes with the use of laser radiation // Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, October 20-21, Hangzhou, China. – P. 340-355.

Автору належать результати проведення експериментальних досліджень, оформлення матеріалів доповіді.

25. Changgen Feng, Korzhyk V., Grinyuk A., **Peleshenko S.**, Klochkov I., Voitenko O. (2020). Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding structures from high-strength steels and aluminium alloys // Proceedings of Papers From the 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology “Application and Innovation of Modern Welding Technology”, 2021, October 20-21, Hangzhou, China. – P. 355-373.

Автору належать створення концепції обладнання, результати проведення експериментальних досліджень, оформлення матеріалів доповіді.

Патенти, які відображають практичні результати дисертації:

26. Спосіб лазерно-дугового зварювання металевих деталей підвищених товщин: пат. 122817 Україна; В23К 26/348; В23К 26/046 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Ю., Бабич О. А., Войтенко О. М., **Пелешенко С. І.**, Гос І. Д. – № а 201810556; заявл. 26.10.2018; опубл. 06.01.2021, Бюл. №1. – 11 с.

Автору належать проведення досліджень, формулювання формули винаходу, виконання креслень.

27. Спосіб гібридного лазерно-плазмового різання і зварювання: пат. 121907 Україна; В23К9/067; В23К 26/348; В23К 35/02 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Бабич О. А., **Пелешенко С. І.**, Войтенко О. М., Ткачук В. І. – № а 201805898; заявл. 29.05.2018; опубл. 10.08.2020, Бюл. №15. – 12 с.

Автору належать планування та проведення досліджень, формулювання формули винаходу.

28. Спосіб багатопрхідного лазерно-дугового зварювання: пат. 139275 Україна; В23К 9/167; В23К 26/00 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., **Пелешенко С. І.**, Ілляшенко Є. В. – № u 201906901; заявл. 20.06.2019; опубл. 26.12.2019, Бюл. №24. – 7 с.

Автору належать патентний пошук, формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу, виконання креслень.

29. Method of hybrid laser-microplasma welding: Pat: ZL 201610092501.6. Chinese. / Khaskin V., Korzhyk V., Detao Cai, Krivtsun I., **Peleshenko S.**, Shanguohan, Ziyiluo, Xinxinwang. 03.08.2019.

Автору належать формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

30. Пристрій для лазерного зварювання металевих деталей підвищених товщин, що нещільно прилягають: пат. 120131 Україна; В23К 26/04; В23К 26/082; В23К 26/24; В23К 26/14 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Є., **Пелешенко С. І.**, Войтенко О. М. – № а 201713004; заявл. 28.12.2017; опубл. 10.10.2019, Бюл. №19. – 13 с.

Автору належать формулювання формули винаходу, виконання креслень.

31. Спосіб лазерного зварювання металевих деталей підвищених товщин: пат. 120122 Україна; В23К 26/04; В23К 26/24 / Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Шевченко В. Є., **Пелешенко С. І.** – № а 201711377; заявл. 20.11.2017; опубл. 10.10.2019, Бюл. №19. – 9 с.

Автору належать патентний пошук, формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

32. Спосіб зварювання кореневого шва із скануванням: пат. 118455 Україна: В23К 9/022; В23К 26/082; В23К 10/02 / Кривцун І. В., Коржик В. М., Хаскін В. Ю., Гринюк А. А., **Пелешенко С. І.**, Шевченко В. Є. Ткачук В. І., Бабич О. А. – № а 201604206; заявл. 18.04.2016; опубл. 15.01.2019, Бюл. №2. – 8 с.

Автору належать формулювання порівняльних характеристик та формули винаходу.

33. Способ гибридной лазерно-микроплазменной сварки: пат. ZL201610092501.6 КНР / Khaskin V., Detao Cai, Korzhyk V, Krivtsun I., **Peleshenko S.**, Shanguo Han, Ziyi Luo, Xinxin Wang. 2018.03.08.

Автору належать патентний пошук, виконання креслень.