

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТУ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 621.791

ІЛЛЯШЕНКО ЄВГЕНІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**ГІБРИДНЕ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ
ПЛАЗМОВОЇ ДУГИ ТА ВИПРОМІНЮВАННЯ ВОЛОКОННОГО
ЛАЗЕРА**

Спеціальність – 132 Матеріалознавство

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



Є.В. Ілляшенко

Науковий керівник:

член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор
В.М. Коржик

Київ – 2023

АНОТАЦІЯ

Ілляшенко Є.В. Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ – 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі дослідження особливостей процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання сталей з використанням волоконного джерела лазерного випромінювання. Впливу його застосування на проявлення синергетичного ефекту та ефективність процесу зварювання. А також особливостей структуроутворення, зміни механічних властивостей зварних з'єднань та характеру напружено-деформованого стану. В роботі проведено експериментальні дослідження особливостей передачі енергії при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазерного випромінювання на основі чого розвинено уявлення про механізм утворення синергетичного ефекту у випадку використання волоконного лазера. Виконано мікроструктурні дослідження та проведено порівняльний аналіз результатів з особливостями структури при лазерному та плазмовому зварюванні. Експериментально-дослідними методами визначено характер залишкового напруженого стану в зварних з'єднаннях. А також розроблено наукові засади для розробки та виготовлення промислово-дослідних зразків обладнання для лазерно-плазмового зварювання на базі проведених технологічних експериментів.

Об'єкт дослідження - спільна дія випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги та технологічні процеси лазерно-плазмового зварювання низьковуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей.

Предмет дослідження – формування зварного з'єднання при застосуванні гібридного лазерно-плазмового процесу.

Мета роботи – дослідження спільного впливу випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги на ефективність передачі тепла від джерела енергії, особливості структуро-утворення зварних швів, особливості формування та розподілу напружено-деформованого стану та визначення фізико-механічних властивостей отриманих зварних з'єднань і розробка на їх основі базових технологічних прийомів лазерно-плазмового зварювання, та обладнання для їх реалізації.

До наукової новизни відносяться наступні положення:

1. Вперше встановлено, що в процесі зварювання нелегованих і легованих (нержавіючих) сталей при використанні плазмової дуги і випромінювання волоконного лазера, в порівнянні із плазмовим зварюванням, має місце зростання напруги на дузі на величину 1-3 В, а також збільшення поглинутої металом енергії на 6% відносно суми окремої дії складових, при цьому спостерігається збільшення в 2,06-2,25 рази площі поперечного перерізу провару порівняно із сумою площ перерізів лазерного і плазмового проварів, а також підвищення глибини проплавлення на 20-30% відносно лазерного зварювання.

2. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив типу лазерного випромінювання на ефективність процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання, а саме показано, що використання випромінювання волоконного лазера при потужності лазера і плазми по ~2 кВт глибина провару нержавіючої сталі збільшується, порівняно із застосуванням діодного лазера – на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO₂-лазера – на 40%.

3. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості формування структури зварних з'єднань, отриманих з використанням волоконного лазера, а саме – на прикладі нержавіючої сталі показано, що при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні в металі шва, по лінії сплавлення і в зоні термічного впливу формується зеренна структура, близька до

лазерного зварювання із розмірами в 2-3 рази меншими, ніж при плазмовому зварюванні, при цьому для гібридного процесу в зварному шві спостерігається видовження зерен (в $\sim 1,7$ раз) та підвищення мікротвердості (на 20...40%) порівняно із лазерним зварюванням.

4. Одержало подальший розвиток уявлення про структуроутворення при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі, зокрема виявлено формування субзеренної структури в зварному шві з розмірами субзерен меншими порівняно із лазерним (в 1,6 разів) та плазмовим (в 2 рази) зварюванням, при цьому у всіх зонах зварного з'єднання, отриманого лазерно-плазмовим способом, спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівноосної форми, а при лазерному зварюванні в металі шва формуються субструктури подовженої форми.

Отримало подальший розвиток уявлення про особливості протікання термодетформаційних процесів при формуванні зварних швів із використанням концентрованих джерел енергії, а саме встановлено, що в стикових з'єднаннях із нержавіючої сталі товщиною 2 мм характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному зварюванні, при цьому пікові значення напружень сконцентровані зоні термічного впливу і в більшій мірі залежать від погонних енергій зварювання, ніж від максимальної температури нагріву зварювальної ванни.

Практичне значення отриманих результатів.

Виявлені в роботі особливості та закономірності лазерно-плазмового зварювання дозволили розширити уявлення про процес гібридного зварювання і на основі цього розробити рекомендації по проектуванню зварювальних головок та плазмотронів для лазерно-плазмових процесів та передового зварювального обладнання, розробити та оптимізувати технологічні параметри лазерно-плазмового зварювання сталей. За результатами роботи оптимізовано технології лазерно-плазмового зварювання низьковуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей товщиною 2-6 мм

за критерієм якісного формування швів при мінімальному вкладанні погонної енергії.

Було розроблено технологічні прийоми гібридного лазерно-плазмового зварювання, які дозволяють отримувати зварні з'єднання з нержавіючих сталей в діапазоні 2...6 мм, з міцністю до 97% від міцності основного металу.

Розроблено технологію двостороннього лазерно-плазмового зварювання сталі AISI 304 товщиною 10 мм в інтервалі потужності лазерного випромінювання до 2 кВт.

Модернізовано та розроблено нові дослідно-промислові конструкції плазмотронів для гібридного-лазерно плазмового зварювання сталей.

Розроблено два зразка дослідно-промислових установок блочно-модульного типу для автоматичного гібридного лазерно-плазмового зварювання, які в залежності від потреб виробництва, можуть базуватися на зварювальних маніпуляторах та антропоморфних роботах.

У першому розділі проведено критичний аналіз сучасного стану лазерних, плазмових та гібридних технологій. За результатами огляду поточного стану об'єму дослідження лазерно-плазмових процесів сформульована мета і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі приведено опис обраних методик для дослідження процесів зварювання та ефективності передачі енергії при поєднанні лазерного випромінювання з плазмовою дугою. Вказані матеріали, що застосовувалися під час досліджень. Приведено опис обраного лабораторного зварювального обладнання; методик для дослідження мікроструктури, механічних властивостей, термічних циклів при зварюванні, методики прогнозування напружено-деформованого стану та верифікації отриманих результатів.

У третьому розділі проведено експериментальну оцінку ефективності процесу лазерно-плазмового зварювання з використанням волоконного джерела випромінювання, з точки зору ефективності передачі енергії від джерела нагріву. На основі чого, отримано подальший розвиток уявлень про механізм протікання гібридного процесу при використанні волоконного

лазерного випромінювання. Висвітлено головні відмінності у проявленні синергетичного ефекту при зварюванні нержавіючих сталей різних товщин з використанням волоконного лазера. А також, розглянуто ефективність застосування різних типів джерел лазерного випромінювання в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу умов лазерно-плазмового зварювання на структуру і властивості зварних з'єднань зі сталей. Визначено особливості формування мікроструктури та субструктури зварних швів їх вплив на розподіли мікротвердості та характер руйнування і показники механічних характеристик зварних з'єднань. Проведено порівняльний аналіз для трьох технологій: гібридного, лазерного та плазмового зварювання. Виконано моделювання методом скінченних елементів показників залишкового напружено-деформованого стану та порівняно розрахункові результати з даними отримані експериментальним методом вимірювання.

У п'ятому розділі, приведено опис технологічних особливостей лазерно-плазмового зварювання та розробленої технології двостороннього гібридного зварювання нержавіючої сталі товщиною 10 мм, та виявлені закономірності під час виконання технологічних експериментів. Оцінено можливість застосування лазерно-плазмового процесу в режимі різання, та висвітлено основні складнощі для його реалізації. Наведено базові технологічні прийоми лазерно-плазмового зварювання та розробки дослідно промислового обладнання для лазерно-плазмового зварювання з використанням різних потужностей лазерних та плазмових джерел.

Ключові слова: зварювальна дуга, лазерне випромінювання, плазма, гібрид, сталь, зварні з'єднання, термічний цикл, зона термічного впливу, мікроструктура, залишкові напруження, механічні властивості.

ABSTRACT

Ye. Illiashenko. Hybrid welding of steels using plasma arc and fiber laser radiation. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 132 Materials Science. - E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation is devoted to solving the scientific and technical problem of researching the peculiarities of the process of hybrid laser-plasma welding of steels using a fiber source of laser radiation. The influence of its application on the manifestation of the synergistic effect and the efficiency of the welding process. And also, features of structural formation, changes in the mechanical properties of welded joints and the nature of the stress-strain state. In the work, experimental studies of the features of energy transfer during hybrid welding using fiber laser radiation were carried out, on the basis of which an idea about the mechanism of the formation of a synergistic effect in the case of using a fiber laser, was developed. Microstructural researches and a comparative analysis of the results with structural features during laser and plasma welding was carried out. The nature of the residual stress state in welded joints is determined by experimental methods. Also, scientific principles for the development and production of industrial-research of equipment for laser-plasma welding have been developed on the basis of technological experiments.

Object of research - joint action of fiber laser radiation and plasma arc and technological processes of laser-plasma welding of low-carbon, low-alloy and stainless steels.

Subject of research – formation of a welded joint during a hybrid laser-plasma process.

The purpose of the work – research of the joint effect of fiber laser radiation and plasma arc on the efficiency of heat transfer from the energy source, features of the structure and formation of welds, features of the formation and distribution of the stress-strain state and determination of the physical and mechanical properties of

the welded joints and the development of basic technological methods of laser-plasma welding based on them, and equipment for their implementation.

Scientific novelty includes the following provisions:

1. It was established for the first time that in the process of welding unalloyed and alloyed (stainless) steels when using a plasma arc and fiber laser radiation, in comparison with plasma welding, there is an increase in the arc voltage by 1-3 V, as well as an increase in the energy absorbed by the metal by 6 % relative to the sum of the individual actions of the components, while an increase in the cross-sectional area of the weld by 2.06-2.25 times is observed compared to the sum of the cross-sectional areas of laser and plasma welds, as well as an increase in the depth of penetration by 20-30% compared to laser welding.

2. The idea of the influence of the type of laser radiation on the efficiency of the hybrid laser-plasma welding process was further developed, namely, it was shown that the use of fiber laser radiation at a laser and plasma power of ~2 kW increases the depth of penetration of stainless steel, compared to the use of a diode laser, by 60 %, Nd:YAG laser – by 30%, CO2 laser – by 40%.

3. The idea of the peculiarities of the formation of the structure of welded joints obtained using a fiber laser received further development, namely, on the example of stainless steel, it was shown that during hybrid laser-plasma welding in the weld metal, along the fusion line and in the thermally affected zone, a grain structure is formed, close to laser welding with dimensions 2-3 times smaller than in plasma welding, while for the hybrid process in the weld there is an elongation of the grains (by ~1.7 times) and an increase in microhardness (by 20...40%) compared to laser welding.

4. The idea of structure formation during hybrid laser-plasma welding of stainless steel was further developed, in particular, the formation of a sub-granular structure in the weld with sub-grain sizes smaller compared to laser (by 1.6 times) and plasma (by 2 times) welding was revealed, while in all in the zones of the welded joint obtained by the laser-plasma method, the formation of gradient-free cellular

structures of mostly equiaxed shape is observed, and during laser welding, elongated substructures are formed in the weld metal.

5. The idea of the peculiarities of thermo-deformation processes during the formation of welds with the use of concentrated energy sources was further developed, namely, it was established that in butt joints made of stainless steel with a thickness of 2 mm, the nature of the distribution of stresses during laser-plasma welding is close to the distribution during laser welding, at the same time, the peak stress values are concentrated in the heat affected zone and depend to a greater extent on the linear welding energies than on the maximum heating temperature of the welding bath.

Practical significance of the obtained results.

The features and regularities of laser-plasma welding revealed in the work made it possible to expand the understanding of the hybrid welding process and, based on this, to develop recommendations for the design of welding heads and plasma torches for laser-plasma processes and advanced welding equipment, to develop and optimize the technological parameters of laser-plasma welding of steels. According to the results of the work, the technology of laser-plasma welding of low-carbon, low-alloy and stainless steels with a thickness of 2-6 mm was optimized according to the criterion of high-quality formation of seams with minimal input of linear energy.

Technological methods of hybrid laser-plasma welding were developed, which allow to obtain welded joints from stainless steels in the range of 2...6 mm, with a strength of up to 97% of the strength of the base metal.

The technology of double-sided laser-plasma welding of AISI 304 steel with a thickness of 10 mm in the range of laser radiation power up to 2 kW has been developed.

New research and industrial designs of plasma torches for hybrid-laser plasma welding of steels have been modernized and developed.

Two samples of experimental and industrial plants of the block-module type for automatic hybrid laser-plasma welding have been developed, which, depending on production needs, can be based on welding manipulators and anthropomorphic robots.

In the first chapter, a critical analysis of the current state of laser, plasma and hybrid technologies is carried out. According to the results of the review of the current state of the volume of research of laser-plasma processes, the goal and objectives of the dissertation work are formulated.

The second chapter provides a description of selected methods for researching welding processes and the efficiency of energy transfer when combining laser radiation with a plasma arc. The materials used during the research are specified. A description of the selected laboratory welding equipment is given; methods for investigations the microstructure, mechanical properties, thermal cycles during welding, methods for predicting the stress-strain state and verification of the obtained results.

In the third chapter, an experimental evaluation of the efficiency of the laser-plasma welding process using a fiber source of radiation was carried out, from the point of view of the efficiency of energy transfer from the heating source. On the basis of this, the further development of ideas about the mechanism of the hybrid process when using fiber laser radiation was obtained. The main differences in the manifestation of the synergistic effect when welding stainless steels of different thicknesses using a fiber laser are highlighted. Also, the efficiency of using different types of laser radiation sources in the process of hybrid laser-plasma welding is considered.

The fourth chapter is devoted to the research of the influence of laser-plasma welding conditions on the structure and properties of welded joints. The peculiarities of the formation of the microstructure and substructure of welds, their influence on the distribution of microhardness and the nature of destruction, and indicators of the mechanical characteristics of welded joints are determined. A comparative analysis was carried out for three technologies: hybrid, laser and plasma welding. Simulation

of residual stress-strain state indicators was performed using the finite element method, and the calculated results were compared with the data obtained by the experimental measurement method.

In the fifth chapter, there is a description of the technological features of laser-plasma welding and the developed technology of two-sided hybrid welding of stainless steel with a thickness of 10 mm, and the revealed regularities during the execution of technological experiments. The possibility of using the laser-plasma process in the cutting mode is evaluated, and the main difficulties for its implementation are highlighted. The basic technological methods of laser-plasma welding and the development of experimental industrial equipment for laser-plasma welding using different powers of laser and plasma sources are presented.

Keywords: welding arc, laser radiation, plasma, hybrid, steel, welded joints, thermal cycle, heat affected zone, microstructure, residual stresses, mechanical properties.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus:

1. Forecasting the results of hybrid laser-plasma cutting of carbon steel/ Korzhyk V., Khaskin V., Perepychay A., **Illiashenko. E.**, Peleshenko S.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 21 (104), 2020. – P. 6-14.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199830>

2. Comparison of the features of the formation of joints of aluminum alloy 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) by laser, microplasma, and laser - microplasma welding/ Volodymyr Korzhyk, Vladyslav Khaskin, Andrii Grynyuk, Sviatoslav Peleshenko, Viktor Kvasnytskyi, Nataliia Fialko, Olena Berdnikova, **Illiashenko Yevhenii**, Volodymyr Shcheretskiy, Yuhui Yao // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, №12 (115), 2022, - P. 38-47. DOI: [10.15587/1729-4061.2022.253378](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378)

3. An Approach to Calculate Features of Laser Radiation Absorption in Beryllium and Aluminum Alloys for Smart Welding Processes/ V. Korzhyk, V. Khaskin, S. Peleshenko, V. Shcheretskiy, **Illiashenko Yevhenii**// International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE-2022), Kharkiv, Ukraine, June 9-11, 2022.

4. Features of structure formation when surfacing steel (iron) on titanium with plasma sprayed coatings in the technology of obtaining butt joint of bimetallic plates “titanium – steel”/ Volodymyr Korzhyk, Vladyslav Khaskin, Oleg Ganushchak, Dmytro Strohonov, **Yevhenii Illiashenko**, Chunfu Guo, Andrii Grynyuk, Sviatoslav Peleshenko, Andrii Aloshyn//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies № 2/12 (122), 2023 – P. 6-16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275510>

Статті у наукових фахових виданнях України:

5. Підвищення ефективності лазерного зварювання шляхом зворотнопоступального переміщення фокуса/ В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, Ch. Dong, **Є.В. Ілляшенко**// Автоматичне зварювання №1, 2020 – Р. 57-63. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.01.08>

6. Особливості прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі SUS304 з використанням випромінювання дискового лазера/ В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, А.В. Бернацький, А.М. Войтенко, **Є.В. Ілляшенко**, Д. Cai// Журнал «Автоматичне зварювання», № 4, 2020, – Р. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.04.04>

7. Підвищення ефективності роботизованого виготовлення сталевих фермових зварних конструкцій/Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., **Ілляшенко Є.В.**, Клочков І.М., Ганущак О.В., Yu Xuefen, Liuyi Huang// Журнал «Автоматичне зварювання», № 5, 2021, – Р. 15-20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.02>

8. 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// Журнал «Автоматичне зварювання», № 12, 2021, – Р. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.12.02>

9. Вибір параметрів лазерного зварювання тонкостінних виробів із легких сплавів з ненаскрізним проплавленням/ В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, С.І. Пелешенко, А.А. Гринюк, Dong Chunlin, **Є.В. Ілляшенко**, Yao Yuhui// Журнал «Автоматичне зварювання», №5, 2022 – Р. 22-32. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.05.04>

10. Technological processes of welding high precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source/ Korzhyk Volodymyr, Peleshenko Sviatoslav, Kvasnytskyi Viktor, Khaskin Vladyslav, **Illiashenko Yevhenii**, Lepilina Kseniya, Aloshyn Andrii.// Міжнародний науковий журнал «Інтернаука» International Scientific Journal «Internauka» № 12 (131), 2022 – P. 47-54. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-12>

Статті у науково періодичних виданнях інших держав:

11. Laser cutting of thin sheet carbon steel for automotive industry/Khaskin V., Korzhyk V., Han S., Luo Z., Cai D., **Ilyashenko E.** // Colloquium-journal №8 (32), 2019 – P. 54-59.

12. Analysis of the main mechanisms and regularities of the synergistic effect in hybrid laser-arc processes/Krivtsun I., Khaskin V., Korzhyk V., **Ilyashenko E.**, Dong Chunlin, Luo Ziyi.//Colloquium-journal №18 (42), 2019 – P. 10-21. DOI: [10.24411/2520-6990-2019-10596](https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10596)

13. Development of technological equipment for welding high-precision thin-walled products from aluminum alloys using a laser heating source/ Korzhyk V., Kvasnytskyi V., Peleshenko Sv., Khaskin V., **Illiashenko Ye.**, Lepilina K., Aloshyn A., Aloshyn A.// Norwegian Journal of development of the International Science №95, 2022 – P. 73-77. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7258962>

14. Features of physical and metallurgical processes during welding of thin-walled aluminum alloy structures using laser radiation/Peleshenko S., Kvasnytskyi V., Khaskin V., Korzhyk V., **Illiashenko Ye.**, Lepilina K., Aloshyn A.//Danish scientific journal №65/2022 – P. 50-59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7271299>

15. Equipment for plasma-arc and hybrid welding, 3d printing and coating technologies/Strohonov D., **Ilyashenko Y.**, Voytenko O., Skachkov I., Korzhyk V., Khaskin V., Aloshyn A., Ganushchak O., Peleshenko S., Dolyanivska O.//Science of the Europe № 112, 2023 – P. 56-62. DOI: 10.5281/zenodo.7708524

Патенти:

16. Спосіб багатопрохідного лазерно-дугового зварювання/ Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Пелешенко С. І., **Ілляшенко Є.В.** // Патент України на корисну модель UA 139275 від 26.12.2019.

17. Спосіб одержання тривимірних металевих фермових виробів/ Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Пелешенко С. І., **Ілляшенко Є.В.** // Патент України на винахід UA 127109 від 26.04.2023.

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

18. Гибридная лазерно-микро-плазменная сварка нержавеющей сталей/ Кривцун И.В., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Ло З., **Илляшенко Е.В.** // IX Міжнародна конференція Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів, 2019, – Р. 49-55.

19. Повышение эффективности лазерных сварочных процессов путем сканирования фокуса излучения/ Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Донг Ч **Илляшенко Е.В.** / IX Міжнародна конференція Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів, 2019, – Р. 103-109.

20. Устранение хампинг-эффекта при лазерно-дуговой сварке сталей повышенной прочности / Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Цай Д., Хан Ш. **Илляшенко Е.В.** // IX Міжнародна конференція Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів, 2019, – Р. 110-114.

21. Creation of scientific foundations and development of hybrid welding processes with the use of laser radiation /I. Krivtsun, V. Korzhyk, Feng Changgen, V. Khaskin, S. Peleshenko, **E. Ilyashenko** // 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 – Р. 340-355.

22. Розробка підходів до створення плазмотронів для гібридного лазерно-плазмового різання/ **Ілляшенко Є.В.**, Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Гос І.Д., Бабич О.А., Попов Є.В. // Міжнародна конференція

«Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні» КПІ імені Ігоря Сікорського», 2021 – Р. 33-38.

23. Optimization of laser and hybrid laser-GMAW welding of high-strength steels by strength characteristics / Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Babych O., **Iliashenko Ye.**, Oleinychenko T., Ganushchak O., Popov Ye. // The 11th International scientific and practical conference “European scientific discussions”, 2021 – Р. 61-63.

24. Дослідження процесу лазерного зварювання тонколистових високоміцних алюмінієвих сплавів / Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., **Ілляшенко Є.В.**, Пелешенко С.І., Квасницький В.В., Щерецький В.О. // X Міжнародна конференція Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів, 2021, – Р. 18-19.

25. Особливості формоутворення зварних швів при лазерно-плазмовому зварюванні / Коржик В.М. Хаскін В.Ю. Гринюк А.А. **Ілляшенко Є.В.**, Строгонов Д.В. Гос І.Д. // X Міжнародна конференція Променеві технології в зварюванні і обробці матеріалів, 2021– Р. 19-20.

26. Application of laser recovery surface / Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Peleshenko S., Babych O., **Iliashenko Ye.**, Oleinychenko T., Ganushchak O., Popov Ye. // The 3 rd International scientific and practical conference — Topical issues of modern science, society and education. Kharkiv, Ukraine, 2021, – Р. 229-232.

27. Achievements of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of welding thin sheet alloys for automotive applications / Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Peleshenko S., **Iliashenko Ye.**, Shcheretskiy V., Ganushchak O. // The 5th International scientific and practical conference “Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects”, MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2021 – Р. 167-174.

28. Estimation of influence of duration of current flow at direct and inverse polarity on quality of formation and geometrical parameters of seams / Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., Peleshenko S., Shcheretskiy V., Hos I., **Iliashenko Ye.**,

Voitenko O., Konoreva O. // The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 2022 – P. 185-190.

29. Development of equipment for research of hybrid laser-arc welding processes of pipe steel/Korzhyk V., Khaskin V., Peleshenko S., Grynyuk A., Dong Chunlin, **Ilyashenko Y.** // The 10th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (June 25-27, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 2022, – P. 94-98.

30. Laser welding of thin-sheet stainless steel joints with variable size of gap between cracks / Korzhyk V., Khaskin V., Chunlin Dong, **Ilyashenko Y.**, Peleshenko S., Grynyuk A., Yuhui Yao, Al’oshin A., Al’oshin A.A. // SCIENTIFIC COLLECTION «INTERCONF», ENERGETICS, №118. - P. 292-297.

31. Одержання тонколистових конструкцій зі сталей та алюмінієвих сплавів лазерним зварюванням із супутнім плазмовим підігрівом / Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Гринюк А.А., Пелешенко С.І., **Ілляшенко Є.В.**, Тунік А.Ю., Альошин А.О.// Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України, 2022. – P. 40.

32. Development of plasma-arc welding, 3d printing and coating technologies for the construction and development of the industry of Ukraine / **Ilyashenko Yevhenii**, Voytenko Oleksandr, Strogonov Dmytryi, Skachkov Ihor, Korzhyk Volodymyr // The 8th International scientific and practical conference “Trends, theories and ways of improving science” (February 28 – March 03, 2023) Madrid, Spain. International Science Group, 2023 – P. 484-488.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ..... | 22 |
| ВСТУП..... | 23 |
| Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЛАЗЕРНИХ І ПЛАЗМОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ | |
| 1.1. Сучасний стан лазерного зварювання і споріднених технологій.. | 30 |
| 1.2. Сучасний стан плазмового зварювання і споріднених технологій..... | 36 |
| 1.3. Виникнення і реалізація синергічного ефекту при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні та споріднених технологіях..... | 38 |
| 1.4. Критичний аналіз існуючих розробок і напрямки перспективних досліджень по лазерно-плазмовим зварювальним технологіям..... | 51 |
| 1.5. Висновки по розділу 1, постановка мети і завдань дослідження..... | 54 |
| Розділ 2. МЕТОДИКИ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ | |
| 2.1. Загальна методика дослідження процесів зварювання і поглинання енергії лазерного випромінювання з додаванням плазмової дуги..... | 64 |
| 2.2. Лабораторний комплекс обладнання для технологічних досліджень лазерно-плазмових зварювальних процесів..... | 65 |
| 2.3. Матеріали, що використовувались в дослідженнях, та їх характеристики | 61 |
| 2.4. Методика експериментальної оцінки ефективності процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання волоконного лазера..... | 62 |

2.5. Методика визначення термічних циклів при лазерному, плазмовому та гібридному лазерно-плазмовому зварюванні.....65

2.6. Методики та апаратура для досліджень структури і фізико-механічних властивостей матеріалів і зварних з'єднань.....68

2.7. Методика та обладнання для експериментального дослідження напружено-деформованого стану.....72

2.8. Висновки по розділу 2.....73

Розділ 3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЯВЛЕННЯ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

3.1. Оцінка ефективності поглинання енергії та проплавлення при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні з використанням випромінювання волоконного лазера.....74

3.2. Відмінності в реалізації синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі різних товщин із використанням волоконного лазера.....83

3.3. Особливості проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні тонколистової нержавіючої сталі різними типами лазерного випромінювання.....88

3.4. Висновки по розділу 3.....95

Розділ 4. ВПЛИВ УМОВ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

4.1. Особливості формування та відмінності структури зварних швів із нержавіючої сталі при лазерно-плазмовому процесі, в порівнянні із лазерним та плазмовим зварюванням.....97

| | |
|--|-----|
| 4.1.1. Дослідження мікроструктури та мікротвердості з'єднань AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих лазерним, плазмовим та гібридним зварюванням..... | 97 |
| 4.1.2. Дослідження мікроструктури та мікротвердості з'єднань AISI 304 товщиною 6 мм, отриманих лазерним, плазмовим та гібридним зварюванням..... | 107 |
| 4.1.3. Порівняльний аналіз структурних змін в металі з'єднань сталі AISI 304 в залежності від способу зварювання..... | 116 |
| 4.1.4. Порівняльний аналіз структурних змін в металі з'єднань сталі AISI 304 при лазерному, плазмовому, гібридному лазерно-плазмовому зварюванні в залежності від товщини зварювального металу (2 мм та 6 мм)..... | 122 |
| 4.1.5. Дослідження мікроструктури методом СЕМ в металі зварних з'єднань сталі AISI 304, отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням | 125 |
| 4.2. Моделювання впливу умов технології і способу зварювання (лазерне, плазмове, гібридне лазерно-плазмове) на напружено-деформований стан зварних з'єднань..... | 149 |
| 4.3. Експериментальна оцінка залишкових напружень в зварних з'єднаннях та верифікація результатів теоретичних досліджень..... | 164 |
| 4.4. Вплив умов технології і способу зварювання на фізико-механічні властивості зварних з'єднань..... | 168 |
| 4.5. Висновки по розділу 4..... | 174 |

Розділ 5. ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

| | |
|--|------------|
| 5.1. Технологічні експерименти та формування зварних швів при двосторонньому лазерно-плазмовому зварюванні стал..... | 177 |
| 5.2. Оцінка можливості застосування лазерно-плазмового процесу в режимі різання..... | 185 |
| 5.3. Розробка дослідно-промислового обладнання для реалізації гібридного лазерно-плазмового зварювання і споріднених процесів | 188 |
| 5.3.1. Установка для гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистових з'єднань (до 1,5 кВт потужності лазерного випромінювання і 50 А струму плазмової дуги)..... | 188 |
| 5.3.2. Установка для гібридного лазерно-плазмового зварювання при підвищеній потужності лазерного випромінювання (до 6 кВт) і плазмової дуги (до 320 А)..... | 193 |
| 5.4. Висновки по розділу 5..... | 200 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 201 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 204 |
| Додаток А. Довідки про впровадження результатів роботи в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР»..... | 217 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЗТВ – зона термічного впливу

ЛС – лінія сплавлення

ОШЗ – околошовна зона

ОМ – основний метал

α – коефіцієнт форми зерна

Dз – розмір зерна, мкм

HV – мікротвердість за Віккерсом

η_{en} - ефективність передачі енергії

Q – енергія поглинута металом, Дж

P – вихідна потужність, Вт

t – час дії лазерного випромінювання, с

P_л – потужність лазерного випромінювання, Вт

I_{зв} – зварювальний струм, А

U_д – напруга на дузі, В

ККД – коефіцієнт корисної дії

δ – товщина металу, мм

q – погонна енергія зварювання, Дж/мм

λ – довжина хвилі лазерного випромінювання, мкм

φ – показник ефективності гібридного зварювання

A – площа проплавлення, мм²

СЕМ – скануюча електронна мікроскопія

d_с – розмір субзерна, мкм

h_{дв} – ширина двійників, мкм

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні нормальні напруження, МПа

ВСТУП

Поєднання лазерного випромінювання зі зварювальною дугою вже досить довгий час є відомою технологією, однак гібридні процеси зварювання отримали не досить широке розповсюдження в промисловості, не зважаючи на великий науково-технічний інтерес. До прикладу, для найбільш розповсюдженого конструкційного матеріалу – сталей, в останні роки частка досліджень в площині лазерно-плазмового процесу з використанням волоконних джерел лазерного випромінювання, що своєю нижчою вартістю та вищою ефективністю, витісняють з ринку CO₂ та Nd: YAG, становить близько 25...30%. В сфері наукових досліджень гібридного зварювання з використанням лазерного випромінювання та електричної дуги Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона має вагому частку в формуванні уявлень про природу синергетичного ефекту на базі досліджень процесів поєднання TIG+ CO₂ лазера, і не тільки, однак більшість досліджень лазерно-плазмових процесів в ІЕЗ проводилися із застосуванням випромінювання CO₂ та Nd: YAG лазерів.

В останні роки кількість публікацій в світі по лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконних лазерів зростає, але ці дослідження в цілому є недосить систематизовані, поодинокі дані висвітлюються по механічним властивостям зварних з'єднань отриманих лазерно-плазмовим зварюванням, впливу процесу зварювання на структуроутворення в сталях в тому числі в нержавіючих. А особливості впливу, саме волоконного джерела лазерного випромінювання на синергетичний ефект залишається малодослідженими.

Тому, для розширення уявлень про особливості лазерно-плазмового зварювання та поглиблення наукових основ, актуальним є завдання проведення комплексних досліджень закономірностей впливу лазерно-плазмового зварювання з використанням волоконного лазерного випромінювання на структуру в зварних швах, її взаємозв'язок з механічними

характеристиками зварних з'єднань, та порівняльної оцінки напружено-деформованого стану з близькими технологічними варіантами.

Об'єкт дослідження - спільна дія випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги та технологічні процеси лазерно-плазмового зварювання низьковуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей.

Предмет дослідження – формування зварного з'єднання при застосуванні гібридного лазерно-плазмового процесу.

Мета роботи – дослідження спільного впливу випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги на ефективність передачі тепла від джерела енергії, особливості структуро-утворення зварних швів, особливості формування та розподілу напружено-деформованого стану та визначення фізико-механічних властивостей отриманих зварних з'єднань і розробка на їх основі базових технологічних прийомів лазерно-плазмового зварювання, та обладнання для їх реалізації.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Критичний аналіз сучасного стану розвитку гібридних лазерно-дугових і лазерно-плазмових зварювальних технологій. Постановка мети та задач дослідження.
2. Вибір методики і обладнання для проведення досліджень.
3. Вивчення особливостей проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталей з використанням випромінювання волоконного лазера.
4. Дослідження структури і властивостей зварних з'єднань із сталей отриманих при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазерного випромінювання в порівнянні з лазерним і плазмовим зварюванням.
5. Розробка базових технологічних прийомів та обладнання для лазерно-плазмового зварювання.

У першому розділі проведено критичний аналіз сучасного стану лазерних, плазмових та гібридних технологій. За результатами огляду

поточного стану об'єму дослідження лазерно-плазмових процесів сформульована мета і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі приведено опис обраних методик для дослідження процесів зварювання та ефективності передачі енергії при поєднанні лазерного випромінювання з плазмовою дугою. Вказані матеріали, що застосовувалися під час досліджень. Приведено опис обраного лабораторного зварювального обладнання; методик для дослідження мікроструктури, механічних властивостей, термічних циклів при зварюванні, методики прогнозування напружено-деформованого стану та верифікації отриманих результатів.

У третьому розділі проведено експериментальну оцінку ефективності процесу лазерно-плазмового зварювання з використанням волоконного джерела випромінювання, з точки зору ефективності передачі енергії від джерела нагріву. На основі чого, отримано подальший розвиток уявлень про механізм протікання гібридного процесу при використанні волоконного лазерного випромінювання. Висвітлено головні відмінності у проявленні синергетичного ефекту при зварюванні нержавіючих сталей різних товщин з використанням волоконного лазера. А також, розглянуто ефективність застосування різних типів джерел лазерного випромінювання в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання.

Четвертий розділ присвячено дослідженню впливу умов лазерно-плазмового зварювання на структуру і властивості зварних з'єднань зі сталей. Визначено особливості формування мікроструктури та субструктури зварних швів їх вплив на розподіли мікротвердості та характер руйнування і показники механічних характеристик зварних з'єднань. Проведено порівняльний аналіз для трьох технологій: гібридного, лазерного та плазмового зварювання. Виконано моделювання методом скінченних елементів показників залишкового напружено-деформованого стану та порівняно розрахункові результати з даними отримані експериментальним методом вимірювання.

У п'ятому розділі, приведено опис технологічних особливостей лазерно-плазмового зварювання та розробленої технології двостороннього

гібридного зварювання нержавіючої сталі товщиною 10 мм, та виявлені закономірності під час виконання технологічних експериментів. Оцінено можливість застосування лазерно-плазмового процесу в режимі різання, та висвітлено основні складнощі для його реалізації. Наведено базові технологічні прийоми лазерно-плазмового зварювання та розробки дослідно промислового обладнання для лазерно-плазмового зварювання з використанням різних потужностей лазерних та плазмових джерел.

В результаті проведених досліджень отримані наступні результати, що мають **наукову новизну і практичну цінність**.

Наукова новизна отриманих результатів:

5. Вперше встановлено, що в процесі зварювання нелегованих і легованих (нержавіючих) сталей при використанні плазмової дуги і випромінювання волоконного лазера, в порівнянні із плазмовим зварюванням, має місце зростання напруги на дузі на величину 1-3 В, а також збільшення поглинутої металом енергії на 6% відносно суми окремої дії складових, при цьому спостерігається збільшення в 2,06-2,25 рази площі поперечного перерізу провару порівняно із сумою площ перерізів лазерного і плазмового проварів, а також підвищення глибини проплавлення на 20-30% відносно лазерного зварювання.

6. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив типу лазерного випромінювання на ефективність процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання, а саме показано, що використання випромінювання волоконного лазера при потужності лазера і плазми по ~2 кВт глибина провару нержавіючої сталі збільшується, порівняно із застосуванням діодного лазера – на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO₂-лазера – на 40%.

7. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості формування структури зварних з'єднань, отриманих з використанням волоконного лазера, а саме – на прикладі нержавіючої сталі показано, що при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні в металі шва, по лінії сплавлення і в зоні термічного впливу формується зеренна структура, близька до

лазерного зварювання із розмірами в 2-3 рази меншими, ніж при плазмовому зварюванні, при цьому для гібридного процесу в зварному шві спостерігається видовження зерен (в $\sim 1,7$ раз) та підвищення мікротвердості (на 20...40%) порівняно із лазерним зварюванням.

8. Одержало подальший розвиток уявлення про структуроутворення при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі, зокрема виявлено формування субзеренної структури в зварному шві з розмірами субзерен меншими порівняно із лазерним (в 1,6 разів) та плазмовим (в 2 рази) зварюванням, при цьому у всіх зонах зварного з'єднання, отриманого лазерно-плазмовим способом, спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівноосної форми, а при лазерному зварюванні в металі шва формуються субструктури подовженої форми.

9. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості протікання термодеоформаційних процесів при формуванні зварних швів із використанням концентрованих джерел енергії, а саме встановлено, що в стикових з'єднаннях із нержавіючої сталі товщиною 2 мм характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному зварюванні, при цьому пікові значення напружень сконцентровані зоні термічного впливу і в більшій мірі залежать від погонних енергій зварювання, ніж від максимальної температури нагріву зварювальної ванни.

Практичне значення отриманих результатів.

Виявлені в роботі особливості та закономірності лазерно-плазмового зварювання дозволили розширити уявлення про процес гібридного зварювання і на основі цього розробити рекомендації по проектуванню зварювальних головок та плазмотронів для лазерно-плазмових процесів та передового зварювального обладнання, розробити та оптимізувати технологічні параметри лазерно-плазмового зварювання сталей.

Практична цінність роботи полягає у наступному:

1. За результатами роботи оптимізовано технології лазерно-плазмового зварювання низьковуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей товщиною 2-6 мм за критерієм якісного формування швів при мінімальному вкладанні погонної енергії.
2. Було розроблено технологічні прийоми гібридного лазерно-плазмового зварювання, які дозволяють отримувати зварні з'єднання з нержавіючих сталей в діапазоні 2...6 мм, з міцністю до 97% від міцності основного металу.
3. Розроблено технологію двостороннього лазерно-плазмового зварювання сталі AISI 304 товщиною 10 мм в інтервалі потужності лазерного випромінювання до 2 кВт.
4. Модернізовано та розроблено нові дослідно-промислові конструкції плазмотронів для гібридного-лазерно плазмового зварювання сталей.
5. Розроблено два зразка дослідно-промислових установок блочно-модульного типу для автоматичного гібридного лазерно-плазмового зварювання, які в залежності від потреб виробництва, можуть базуватися на зварювальних маніпуляторах та антропоморфних роботах.

Особистий внесок здобувача. При безпосередній участі автора отримані результати досліджень та проведено їх аналіз, на основі чого сформульовано положення наукової новизни, згідно відображеним в дисертаційній роботі матеріалами. Автором спільно з науковим керівником сформульовано мету роботи, поставлені задачі для проведення досліджень та прийнято методики їх вирішення. Автором виконано аналітичний огляд, узагальнено результати та сформульовано основні висновки. За участю автора були організовані та проведені експериментальні та теоретичні та дослідження процесів ефективності передачі енергії при гібридному, лазерному та плазмовому зварюванні, розвинено уявлення про механізм синергетичного ефекту при використанні волоконного лазера в гібридному процесі, визначено особливості його проявлення при зварюванні різних товщин. Здобувачем

самостійно було проведено дослідження термічних циклів при зварюванні та на основі цього розроблено розрахункову методику прогнозування напружено-деформованого стану зварних з'єднань. Автор провів проектування універсальних головок для лазерно-плазмових процесів та модернізацію пристосувань для газового захисту зварних швів. При особистій участі автора було розроблено та впроваджено два комплекси для гібридного лазерно-плазмового зварювання тонколистових з'єднань (до 1,5 кВт потужності лазерного випромінювання і 50 А струму плазмової дуги) та при підвищеній потужності лазерного випромінювання (до 6 кВт) і плазмової дуги (до 320 А).

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних та вітчизняних науково-технічних конференціях: International Institute of Welding. The 75th IIW Annual Assembly and International Conference (Tokyo, Japan, 2022), V Міжнародна науково-технічна конференція «Зварювання та споріднені технології» (Краматорськ, 2021), International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering (STUE-2022), (Kharkiv, Ukraine, 2022), «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України» (м. Київ, Україна, 2022 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 32 роботи, з них 4 статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 6 статей у фахових виданнях України, 5 статей у науково періодичних виданнях інших держав, 15 публікації у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій, отримано 1 патент України на корисну модель та 1 патент України на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 219 сторінках і складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури. Обсяг основного тексту складає 150 сторінку машинописного тексту, містить 134 рисунки, 29 таблиць, список літератури із 115 найменувань на 13 сторінках та 1 додатку.

Розділ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЛАЗЕРНИХ І ПЛАЗМОВИХ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сталі різної товщини застосовують у багатьох галузях сучасної промисловості. Так, тонколистові вуглецеві сталі використовують для задач виробництва автомобілів, вагонів, приладів, побутової техніки тощо [1]. З тонколистових нержавіючих сталей виготовляють прилади хімічної та харчової промисловості [2]. Тонколистові нержавіючі сталі застосовують також в авіаційній і ракетобудівній промисловості [3, 4].

Переважає більшість зазначених промислових завдань зводиться до виготовлення нероз'ємних конструкцій шляхом застосування процесів зварювання [5]. Через те, що такі конструкції повинні мати якомога меншу вагу, а також через необхідність мінімізації залишкових зварювальних деформацій, для зварювання доцільно застосовувати висококонцентровані джерела енергії, такі як дугова плазма, лазерне випромінювання, електронний промінь тощо [6]. В останні десятиріччя для розв'язання вказаних задач застосовують гібридні процеси, в яких за рахунок сполучення двох або більше джерел енергії досягають покращення якості одержуваних з'єднань і/або продуктивності їх виконання [7]. Тому в даній роботі розглядатимуться лазерні, плазмові та гібридні лазерно-плазмові процеси зварювання.

1.1. Сучасний стан лазерного зварювання і споріднених технологій.

Відомо, що процеси лазерного зварювання характеризуються мінімальним тепловкладанням порівняно з іншими методами зварювання [8]. Тому застосування лазерних технологій повинно бути доцільним як з позицій залишкових напружень і деформацій, так і з позицій зменшення розмірів зони розміщення в термічнозміцнених сплавах. Поява потужних волоконних лазерів відкрила нові можливості в обробці матеріалів. Під час лазерного цей лазер продемонстрував високу ефективність порівняно з домінуючим на ринку

в попередній час CO_2 -лазером. Для підвищення якості обробки волоконним лазером в статті [9] запропоновано використовувати одномодові волоконні лазери. В роботі [10] проведено порівняння результатів використання лазерів малої та високої потужності при лазерній обробці. Було зроблено висновок, що на якість обробки найбільш значимо впливають величини швидкості процесу і потужності випромінювання.

На сьогодні у сфері лазерної обробки матеріалів найбільш значну роль відіграє лазерне різання [11]. Висока якість пучку (нижче 2,5 мм мрад) при довжині хвилі близько 1,06 мкм (що забезпечує високу поглинальну здатність) і велика потужність лазера (до кількох кВт) відкривають нові можливості у лазерній обробці, зокрема, є найважливішими факторами для досягнення високих швидкостей різання у поєднанні з високою якістю ріжучої кромки. Найбільший потенціал має саме волоконний лазер [12]. Дослідження Фраунгоферова Інституту (Fraunhofer IWS) показали, що зварювання та різання за допомогою волоконних лазерів є перспективним для досягнення високої швидкості та якості [13].

Процес лазерного зварювання плавленням металів і сплавів має низку особливостей, які пов'язані застосуванням тих чи інших технологічних прийомів і режимів, а також із властивостями зварюваних матеріалів [14]. Металургійні особливості лазерного зварювання, як і будь-якого зварювання плавленням, визначаються взаємодією зварюваних металів із газами навколишнього середовища, інтенсивністю випаровування легуючих елементів, а також особливостями кристалізації в умовах зварювального процесу [15]. У зв'язку з цим при розробці технологій лазерного зварювання потрібно реалізовувати ретельний захист шва від впливу навколишнього середовища. Для захисту зварного шва від окислення доцільно використовувати різні захисні гази – He, Ar, CO_2 , а також їх суміші [16]. З точки зору газового захисту у зоні лазерного випромінювання доцільно застосовувати гази з високим потенціалом іонізації. У літературі для зварювання CO_2 -лазером рекомендується використовувати для захисту

зварювальної ванни та поверхні шва He з витратою 8-10 л/хв, а кореня – Ar (5-8 л/хв).

Крім цього, можливий флюсовий захист поверхні та кореня шва. Для цього флюси спеціального складу наносять на поверхню стика та на його кореневу частину перед зварюванням.

Однією з основних особливостей лазерного зварювання є утворення у процесі зварювання парогазового каналу проплавлення («keyhole»). В роботі [14] детально описані ці питання. Зокрема, зазначено, що на передній стінці парогазового каналу існує шар розплавленого металу, що зазнає постійних «збурень», у вигляді утворення викривлення у вигляді сходинок, яка періодично переміщається по висоті каналу (рис. 1.1). При цьому видалення матеріалу з передньої стінки здійснюється пошарово під час переміщення сходинок зверху донизу.

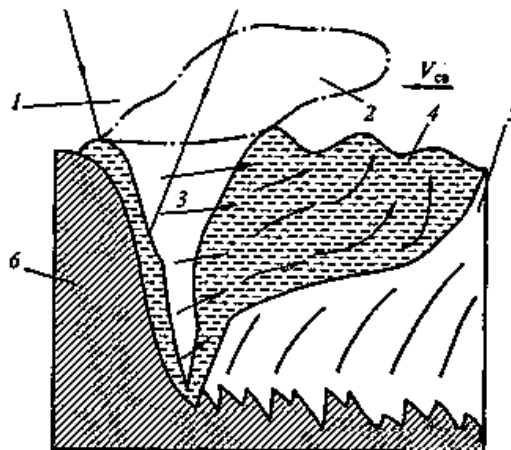


Рис. 1.1. Схема зварювальної ванни при лазерному зварюванні [14]: 1 – лазерний промінь; 2 – плазмовий факел; 3 – парогазовий канал; 4 – хвостова частина ванни; 5 – метал шва; 6 – метал, що зварюють; $V_{зв}$ – напрям зварювання.

Дослідження парогазового каналу проводили і в інших роботах [17]. Так, в роботі [18] використали замкнену систему керування на основі камери з використанням алгоритму обробки зображень для ідентифікації отвору каналу з повним проплавленням і дійшли висновку, що конкретний підхід можна

адаптувати до процесів зварювання частковим проплавленням. У іншому підході в роботі [19] описується коаксіальна система моніторингу, яка інтегрувала камеру зображення, освітлення та фільтри. Таку систему було застосовано для дистанційного лазерного зварювання (рис.1.2). Площі парогозового каналу та отвору з повним проплавленням були розраховані за допомогою обробки зображень, а їх поведінка була досліджена за різних умов зварювання. Цікавий підхід представлений в роботах [20, 21], де дві високошвидкісні камери використовувалися для вимірювання швидкості та потоку рідини всередині парогозового каналу. В результаті автори змогли продемонструвати вплив на динаміку рідини всередині каналу потужності лазера, швидкості зварювання та зазору між двома оцинкованими сталевими листами.

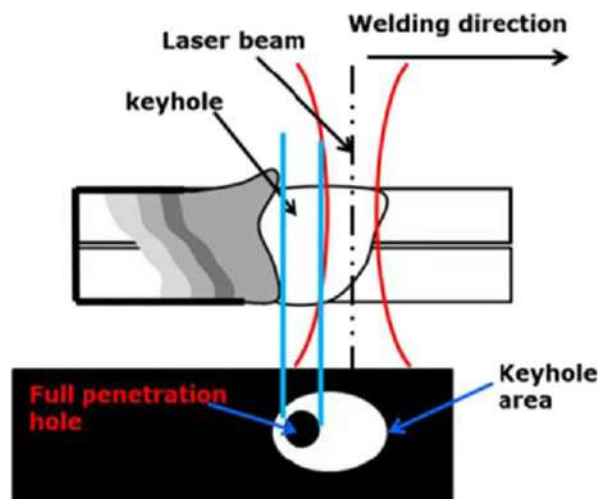


Рис. 1.2. Схема лазерного зварювання з наявністю парогозового каналу [19].

Відомо, що частина енергії випромінювання поглинається металом, що зварюється, а частина — відбивається від нього. Частка поглиненого випромінювання залежить як від довжини хвилі лазерного випромінювання, так і від температури поглинаючої поверхні [22]. Ця частка тим більша, чим вище температура металу, що обробляється. Специфіка зварювання металів і сплавів частково пов'язана з різницею температур плавлення їх самих та їх оксидних плівок [23]. Потрібно застосовувати спеціальні прийоми для усунення такої плівки і для захисту металу від окислення.

Висока швидкість охолодження металу шва при лазерному зварюванні сприяє утворенню метастабільних мікроструктур, які впливають на остаточні механічні властивості зварного шва [24]. Тому характеристика мікроструктури є важливою для визначення якості зварного шва [25, 26]. В роботі [27] це описано з використанням значення теплового градієнта (G) (зазвичай $100 \dots 1000 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$) та швидкості переміщення межі рідина – тверде тіло (R) (зазвичай $10 \dots 10^3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Можливі чотири режими кристалізації: плоский (високий G і низький R), стільниковий, стовпчастий дендритний і рівновісний дендритний (низький G і високий R). Відношення G до R визначає механізм кристалізації. Добуток G і R вказує на швидкість охолодження, тому ці два параметри визначають мікроструктуру (рис.1.3). Кристалізація ванни розплаву може відбуватися епітаксійним або неепітаксійним способом, залежно від складу металу зварного шва [28].

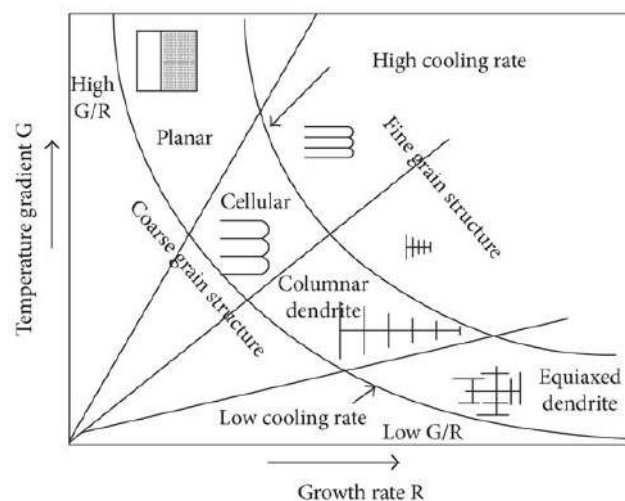


Рис. 1.3. Вплив градієнта температури (G) і швидкості росту (R) на режим кристалізації і структуру зерна [27].

У разі зварювання нержавіючих сталей різних класів одна з одною на структуроутворення впливає різниця у наявності структурних складових цих сталей [29]. В роботі [30] було розглянуто лазерне зварювання дуплексної нержавіючої сталі 2205 і аустенітної нержавіючої сталі AISI 304 для завдань автомобільної промисловості (рис.1.4).

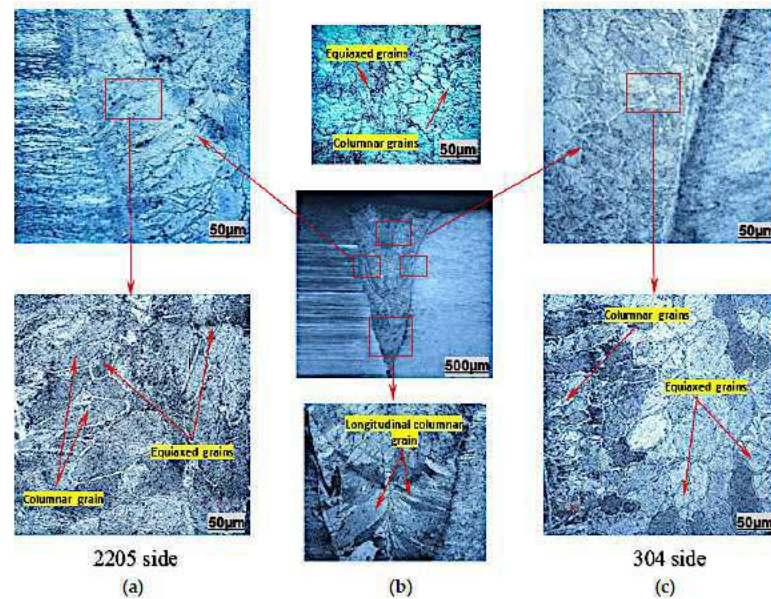


Рис. 1.4. Лазерне зварювання дуплексної нержавіючої сталі 2205 та аустенітної нержавіючої сталі 304: (a) – сторона сталі 2205; (b) – центральна лінія зони плавлення; (c) – сторона сталі 304 [30].

Виконані за допомогою скануючого електронного мікроскопу дослідження показують утворення дельта-фериту в зоні плавлення зварених лазером AISI 304 і DSS 2205. Це відбувається через значну швидкість охолодження під час зварювання волоконним лазером. Зменшення аустенітної фази спостерігалось на стороні основного металу AISI 304, а мікроструктура в основному складалася з феритних фаз. Що стосується сторони 2205, затвердіння фази аустеніту призвело до широкого діапазону морфології аустеніту та фериту. Завдяки швидкому охолодженню одержана на сталі 2205 мікроструктура була більш вдосконаленою та тоншою, ніж початкова подвійна фаза. Поздовжні стовпчасті зерна були розкидані по вертикалі в металі шва близько зони сплавлення. В області центральної зони шва були впорядковані та рівновісні.

Як слідує з низки робіт (наприклад, [31,32]), для отримання кращих результатів лазерного зварювання тонколистових металів його доцільно здійснювати на швидкостях, максимально можливих для наявної потужності. Окрім безпосередньо показника потужності слід враховувати зварюваний

метал. Так, завдяки дуже низькій теплопровідності титан і його сплави добре розплавляються порівняно невеликою потужністю випромінювання [33]. Завдяки низькому значенню модуля пружності та високому значенню коефіцієнта лінійного розширення легкі сплави при зварюванні характеризуються значними залишковими деформаціями, що перевершують деформації зварних конструкцій зі сталей [34].

Для отримання якісного зварного з'єднання насамперед потрібна ретельна підготовка поверхні під лазерне зварювання. Така підготовка поверхні дозволяє уникнути утворення дефектів при зварюванні, насамперед пористості та оксидних включень [35].

Сприятлива форма шва з мінімальним розміром розплавленої зони забезпечується оптимізацією режимів лазерного зварювання. При цьому потрібно отримати необхідну геометрію шва [14]: заниження k і провисання k_1 (не більше 10% товщини матеріалу), ширину верхньої і кореневої b_1 частин шва (повинні бути близькими). При лазерному зварюванні така форма шва забезпечується на швидкостях зварювання >22 мм/с.

В якості промислових джерел для лазерного зварювання зазвичай використовуються чотири основних типи лазерів: волоконні та дискові лазери, потужні твердотільні лазери на основі Nd:YAG-кристалів та швидкопроточні газові CO₂-лазери [36]. В даний час одними з найперспективніших промислових лазерів визнані волоконні. Зокрема, їх ефективність доказана одержанням високих механічних характеристик з'єднань високоміцних сталей [37].

1.2. Сучасний стан плазмового зварювання і споріднених технологій.

При плазмовому і мікроплазмовому зварюванні в якості джерела тепла використовується стиснена електрична дуга, що створює стабільний ламінарний струмінь плазми прямої або непрямої дії [38].

На рис.1.5 показано схему процесу мікроплазмового зварювання металів [39]. Неплавкий вольфрамовий електрод розміщений концентрично осі водоохолоджуваного сопла; глибина занурення електрода всередину сопла менша або дорівнює діаметру сопла. У пальник подається плазмоутворюючий газ (аргон), що витікає з отвору каналу сопла [40]. Між електродом і соплом чергова дуга і горить безперервно в потоці плазмоутворюючого газу, який видуває з отвору плазмовий струмінь [41].

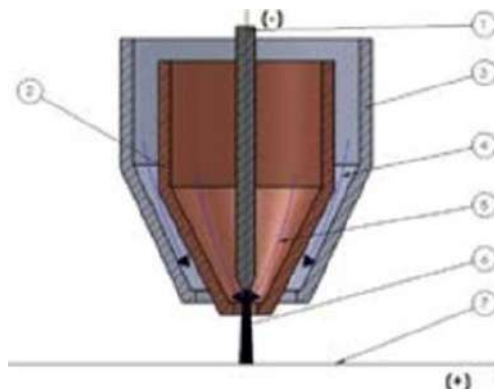


Рис. 1.5. Принципова схема зварювального плазмотрону [39]: 1 – неплавкий електрод; 2 – плазмоутворююче сопло; 3 – захисне сопло; 4 – захисний газ; 5 – плазмоутворюючий газ; 6 – плазмова дуга; 7 – виріб.

Для запобігання взаємодії зварювальної ванни та зони термічного впливу з атмосферою подається захисний газ тип захисту залежить від металу, що зварюється [42]. Роль захисного газу не обмежується функцією захисту шва від окиснення. Застосовувані захисні гази сприяють отриманню стійкого стовпа плазмової дуги [43].

Висока щільність струму в стовпі дуги при мікроплазмовому зварюванні забезпечує отримання вузького шва при достатньому проплавленні і малій зоні термічного впливу і в результаті менших, ніж при аргонодуговому зварюванні, деформації металу [44]. Шов, виконаний мікроплазмовим зварюванням, вужче отриманого аргонодуговим, але ширше отриманого лазерним. При зварюванні різнополярними імпульсами, імпульс прямої полярності забезпечує проплавлення, а імпульс зворотної – очищення зварюваного металу

від окисної плівки. Тому зазвичай струм її в кілька разів (2-3 рази) менший за струм прямої полярності [45].

Робочу довжину дуги рекомендується обирати 2-3 мм [46]. Рекомендована глибина занурення вольфрамового електрода всередину сопла щодо зрізу сопла – 0,5...1,2 мм. Рекомендовані діаметри сопел – 0,8...1,5 мм.

Мікроплазмове зварювання потребує ретельного збирання під зварювання. Як правило, у разі зварювання без присаджувального дроту зазори та депланація кромek у стикових з'єднаннях не повинні бути більше 10...15% товщини матеріалу, що зварюється, у торцевих – 20...30%. При неможливості забезпечити це, є необхідним застосування присадного матеріалу [47].

Витрати захисного газу вибираються з умови якісного захисту розплавленого металу від окислення і, таким чином, залежить від типу з'єднання та умов відведення тепла, а також від захисного газу [48].

Для запобігання утворення дефектів типу оксидних включень та пор необхідно виключити попадання забруднень у зварювальну ванну шляхом очищення крайок, що з'єднуються [49]. В роботах [38, 50] встановлено, що зі збільшенням струму прямої полярності глибина та ширина проплавлення шва підвищуються.

1.3. Виникнення і реалізація синергетичного ефекту при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні та споріднених технологіях.

Розвиток лазерно-дугових (лазерно-плазмових) процесів розпочалося наприкінці 1970-х років. Ідея спільно використовувати лазерний промінь та електричну дугу для зварювання таким чином, щоб обидва джерела тепла вплинули на виріб в межах однієї зони нагріву, належить англійському вченому Стіну (W. M. Steen), який захистив свій винахід рядом патентів (наприклад, [51, 53]). Він запропонував способи зварювання та обробки поверхні, при яких на оброблюваний виріб подають лазерний промінь і

одночасно в зоні теплового впливу лазерного випромінювання запалюється дуга між електродом та виробом. Спільно з іншими вченими він також виконав перші експериментальні дослідження ефектів лазерно-дугового (лазерно-плазмового) впливу на оброблюваний метал [53-55] та вперше промислово застосував гібридне зварювання [56].

Було встановлено, що ефекти «прив'язки» анодної плями дуги та стабілізації її горіння в гібридному процесі навіть за малих струмів дозволяють значно збільшити швидкість зварювання порівняно не лише з дуговим, а й із лазерним процесами. Надалі це явище було названо *«гібридним ефектом»* або *«синергетичним ефектом»*. В роботі [57] встановлено, що при високошвидкісному гібридному зварюванні відсутні підрізи, характерні для дугового зварювання.

У роботах [55, 57] показано, що взаємодія лазерного випромінювання з прианодною дуговою плазмою, яка підвищує електропровідність навколишнього газу при гібридному зварюванні, призводить до підвищення температури дугової плазми, отже її електропровідності. Крім того, у цих роботах констатується, що ефект «прив'язування» анодної області дугового розряду до плями лазерного нагріву проявляється при малих та середніх струмах дуги (до 300 А).

У роботах [55, 57, 60] описано ефект відбиття лазерного випромінювання плазмою, який спостерігається при підвищенні щільності електронів у приповерхневій плазмі вище критичного значення ($n_e \approx 10^{19} \text{ см}^{-3}$ для повного відбиття плазмою випромінювання CO_2 -лазера) і призводить до обмеження тепловкладання в оброблюваний метал. Автори зазначених робіт вважають цей ефект є несуттєвим при струмах дуги менше ніж 300 А.

У роботах [59, 60] показано, що гібридний ефект лазерно-плазмового зварювання сталей та алюмінієвих сплавів виявляється у збільшенні глибини провару порівняно із сумою глибин лазерного та плазмового проварів (при близьких погонних енергіях процесів). При застосуванні CO_2 -лазера такий гібридний ефект забезпечив приріст глибини проплавлення 50-150% (і

більше), при використанні діодного – 25-30%, в порівнянні з лазерним зварюванням за допомогою цих джерел випромінювання. При цьому важливою перевагою лазерно-плазмового зварювання перед лазерним є катодне очищення поверхні алюмінієвих сплавів від окисної плівки [61, 62]. У роботах [63, 64] показано, що при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючих сталей (товщиною до 4 мм) як аустенітного, так і феритного класу, за рахунок прояву гібридного ефекту при близьких показниках енерговкладання швидкість процесу може в 2-3 рази перевищувати швидкість лазерного зварювання та до 4 разів швидкість плазмового.

Синергетичний ефект взаємодії лазерного випромінювання та електричної дуги в одній зварювальній ванні призводить до збільшення швидкості зварювання та глибини проплавлення разом із покращенням здатності до перекриття зазору та стабільності процесу [65].

У роботі [66] досліджено гібридне лазерно-дугове зварювання Nd:YAG лазером потужністю 500 Вт у поєднанні зі стандартним обладнанням для TIG-зварювання. Результати показують, що взаємодія лазера та дуги не призводить до помітної зміни ефективності теплопередачі, але призводить до значного збільшення ефективності плавлення.

У роботі [69] досліджено основний принцип синергетичного ефекту та його вплив на процес зварювання за допомогою спектрального аналізу гібридного плазмового факелу та аналізу високошвидкісної фотозйомки процесу зварювання. Встановлено, що принцип ефекту полягає у такій взаємодії лазера з дугою, яка переводить енергію електронів на більш високий рівень і створює умови до квантового переходу. Завдяки цьому випромінюється більше фотонів, які посилюють надходження тепла до матеріалів зварювання. Синергетичний ефект кількісно визначається спектральною інтенсивністю. Він збільшується із збільшенням потужності лазера та зменшується з ростом струму та збільшенням відстані лазер – дуга. Ефект є пропорційним поперечному перерізу зварного шва, особливо його верхній частині.

В роботі [68] запропоновано схему лазерно-плазмового зварювання (рис.1.6), згідно якій проведено низку досліджень. Зокрема, запропоновано ефективність зварювання η_w визначати як відношення теоретичної величини потужності P_{FZ} , необхідної для розплавлення матеріалу зони плавлення (індекс FZ), до загальної поданої зварювальної потужності P_w відповідно до

$$\eta_w = \frac{P_{FZ}}{P_w} = \frac{\rho \cdot w_{ch} \cdot A_{FZ} \cdot \Delta h_{FZ}}{P_w} \quad (1.1)$$

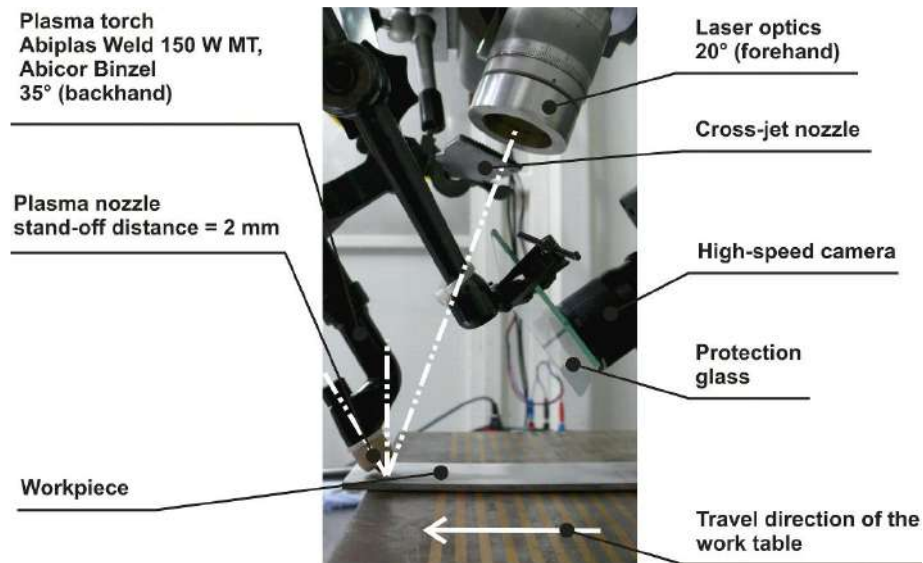


Рис. 1.6. Експериментальна установка з роздільним розташуванням плазмотрона та лазерного променя [68].

де ρ — густина матеріалу, що зварюється, w_{ch} — швидкість зварювання, A_{FZ} — площа поперечного перерізу зони плавлення, а Δh_{FZ} — необхідне збільшення питомої ентальпії для плавлення. Співвідношення (1.1) можна розглядати як основу для визначення відносної ефективності зварювання, яка порівнює ефективність комбінованого лазерно-плазмового процесу з ефективністю окремих процесів. В такому разі отримуємо:

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{PL}}{\eta_{P+L}} = \frac{\rho \cdot A_{FZ,PL} \cdot \Delta h_{FZ} \cdot w_{ch}}{P_P + P_L} \cdot \frac{P_P + P_L}{\rho \cdot (A_{FZ,P} + A_{FZ,L}) \cdot \Delta h_{FZ} \cdot w_{ch}} = \frac{A_{FZ,PL}}{A_{FZ,P} + A_{FZ,L}} \quad (1.2)$$

У цьому відношенні $A_{FZ,PL}$ позначає площу поперечного перерізу лазерно-плазмового процесу, а $A_{FZ,P}$ і $A_{FZ,L}$ є площею поперечного перерізу

окремо виконуваних процесів зварювання плазмовою дугою та лазерним променем. Розраховані значення вимірюваних площ поперечного перерізу та відповідні відносні ефективності підсумовані в таблиці 1.1 для досліджуваних матеріалів середньовуглецева сталі, нержавіючої сталі та алюмінієвого сплаву 6082.

Таблиця 1.1. Площі поперечного перерізу зварювального шва A_{FZ} і результуюча відносна ефективність η_w плазмового, лазерного та лазерно-плазмового зварювання пластини з різних матеріалів при потужності лазера 600 Вт і струмі дуги 100 А: (1) середньовуглецева сталь ASTM A284, товщина 10 мм, швидкість зварювання 0,5 м/хв. (2) нержавіюча сталь AISI 304, товщина 1,5 мм, швидкість зварювання 1,5 м/хв. (3) алюмінієвий сплав 6082, товщина 2,5 мм, швидкість зварювання 1,5 м/хв [68].

| № п/п | Матеріал | $A_{FZ,P} / \text{мм}^2$ | $A_{FZ,L} / \text{мм}^2$ | $A_{FZ,PL} / \text{мм}^2$ | $\eta_w / -$ |
|-------|-----------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
| (1) | ASTM A284 | 0,4 | 1,5 | 3,3 | 1,74 |
| (2) | AISI 304 | 0,1 | 0,7 | 1,9 | 2,38 |
| (3) | 6082 | 2,2 | 1,8 | 6,0 | 1,50 |

Причини досягнутого підвищення ефективності процесу лазерно-плазмового зварювання порівняно з окремими процесами неочевидні.

Згідно роботам [68-70], термічна ефективність або загальна ефективність процесу η_T відповідає відношенню потужності P_U , яка необхідна для розплавлення зварного матеріалу за одиницю часу до загальної прикладеної потужності P_A . Цю величину можна розділити відповідно до рівняння (1.3) на ефективність плавлення η_M (використання енергії всередині основного матеріалу) та ефективність передачі енергії η_C (надходження енергії від джерел тепла) за допомогою потужності P_T , яка передається від джерел тепла до заготовки [71]:

$$\eta_T = \frac{P_U}{P_A} = \eta_M \times \eta_C = \frac{P_U}{P_T} \times \frac{P_T}{P_A} \quad (1.3)$$

Ефективність передачі енергії η_C обернено обчислюють за залежними від часу профілями температур, виміряних під час зварювання та охолодження. Для визначення значення термічної ефективності η_T використовують оцінені поперечні перерізи зварного шва в поєднанні з рівнянням (1.4) [69]:

$$\eta_T = \frac{P_U}{P_A} = \frac{v_x \cdot A_S \cdot \rho \cdot (c_p \cdot (\vartheta_s - \vartheta_\infty) + h_s)}{U_{Arc} \cdot I_{Arc} + P_L} \quad (1.4)$$

де v_x — швидкість зварювання, A_S — площа зварного шва, c_p — питома теплоємність, ϑ_s і ϑ_∞ — температура плавлення та навколишнього середовища, h_s — ентальпія плавлення, P_L — потужність лазера, U_{Arc} і I_{Arc} — напруга та струм дуги відповідно.

Метод визначення ефективності та використана обчислювальна модель були застосовані в роботі [70]. У той час як лазерний промінь потужністю 200 Вт і діаметром точки фокусування 200 мкм ледь розплавляє матеріал, процес плазмового зварювання з потужністю дуги близько 2 кВт досягає проплавлення зварного шва приблизно на 2/3 товщини заготовки для застосованої сукупності параметрів (рис.1.7). Поєднання обох процесів дає зварювання з повним проплавленням. У той час як ефективність передачі енергії η_C лише помірно підвищується приблизно на 10% порівняно з арифметичною ефективністю сполучення енергії η_C окремих процесів, ефективність плавлення η_M комбінованого процесу приблизно в 1,5 рази вища, ніж ефективність плавлення η_M плазмово-дугового процесу. Можна зробити припущення, що тепловий потік всередині зварювальної ванни, керований кондуктивним і/або конвективним механізмами передачі, вигідно змінюється для створення результуючого поперечного перерізу зварного шва з підвищеним проникненням завдяки більш сприятливим термічним і/або гідродинамічним граничним умовам. Крім того, авторами роботи [70] пропонується вважати явним доказом гіпотези про те, що вторинні, тобто термічні, ефекти відповідають за переваги продуктивності лазерно-дугової обробки.

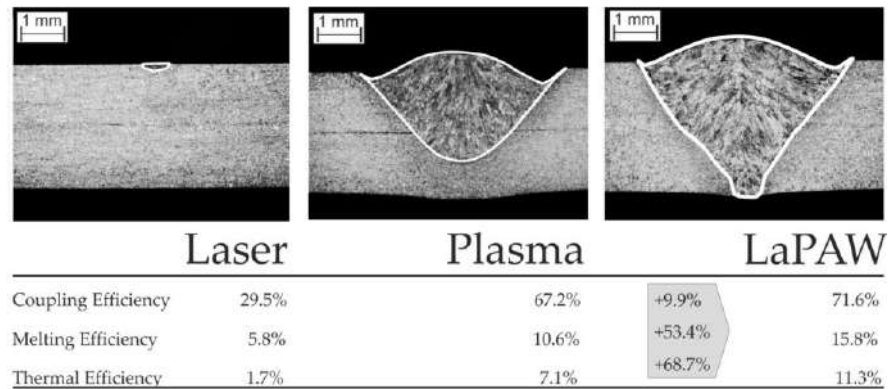


Рис. 1.7. Поперечні перерізи сталі AISI 304 ($\delta=1$ мм) отримані лазерним ($P_L = 200$ Вт), плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням ($P_L = 200$ Вт;) із відповідними значеннями ефективності [70].

В роботі [71] для кількісної оцінки синергічного ефекту при лазерно-дуговому гібридному зварюванні використовувався безрозмірний параметр приросту енергії плавлення (ψ). Чим більше значення ψ , тим кращий синергетичний ефект. Було розраховано та порівняно ψ при різних параметрах гібридного зварювання лазер-TIG та лазер-MIG. Можна очікувати, що у разі використання в гібридному процесі дугової плазми (тобто стисненої електричної дуги) синергетичний ефект буде ще більшим, ніж при лазер-TIG зварюванні [72]. Так, оцінити даний ефект для лазерно-плазмового зварювання можна за шліфами поперечних перетинів, наведених на рис.1.8, 1.9, відповідно зазначених параметрів режимів.

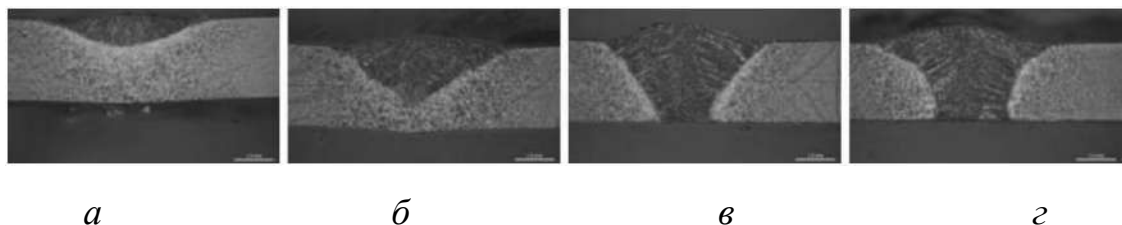


Рис. 1.8. Формування проплавлення в листах сталі S235JR товщиною 3 мм, зумовлене зміною потужності лазерного випромінювання (а) 0 Вт; (б) 220 Вт; (в) 330 Вт; (г) 440 Вт (незмінні параметри: зварювальний струм 150 А; швидкість зварювання 1 м/хв; витрата плазмоутворюючого газу 0,8 л/хв, кут нахилу осі випромінювання Nd:YAG-лазера 3°) [72].

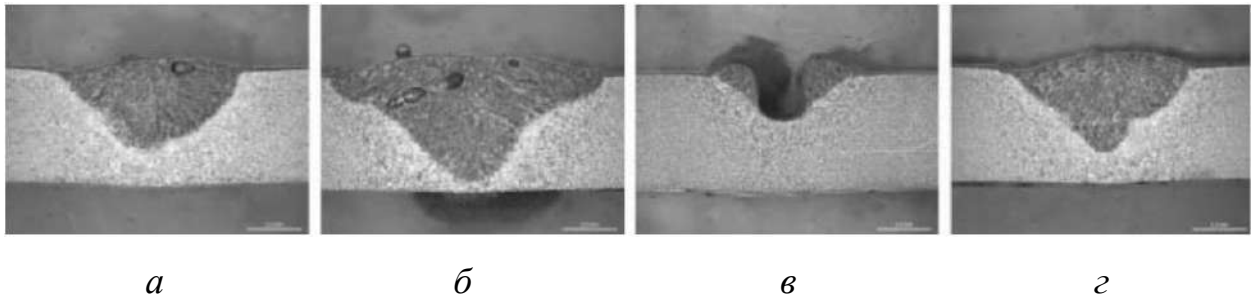


Рис. 1.9. Формування проплавлення в листах сталі S235JR товщиною 4 мм за рахунок зміни потужності лазерного випромінювання (а) 0 Вт; (б) 440 Вт; (в) 0 Вт; (г) 440 Вт і швидкість подачі: а), б) 0,2 м/хв, в), г) 0,25 м/хв (незмінні параметри: зварювальний струм 150 А; витрата плазмоутворюючого газу 0,4 л/хв, кут нахилу осі випромінювання Nd:YAG-лазера 19°) [74].

Для реалізації процесів лазерно-плазмового зварювання сфокусований лазерний пучок краще спрямовувати в зону дії дуги перпендикулярно до поверхні виробу, що зварюється (рис.1.10) (наприклад, [73, 74]), однак в деяких випадках, обумовлених конструкцією головок, випромінювання подається під певним кутом (рис.1.11) (наприклад, [75]). Лазерно-плазмова зварювальна головка може складатися з окремих елементів – лазерної фокусуючої системи та плазмотрона (рис.1.11,а), або бути інтегрованою у загальному корпусі (рис.1.11,б). Плазмотрон зазвичай нахилений під мінімально можливим кутом до осі сфокусованого лазерного випромінювання (рис.1.12) [76]. Можливе зварювання з присадним дротом та без нього. Також, в якості присаджувальних матеріалів можуть використовуватися порошки металів і сплавів [77].

Для посилення ефекту взаємодії лазерного випромінювання із дуговою плазмою їх доцільно підводити до деталей, що зварюються, через спільне сопло. При цьому параксіальне розташування лазерного пучку відносно плазми (рис.1.11) дозволяє розміщувати його ззаду або спереду по ходу зварювання [78]. При використанні параксіальної схеми (у варіанті виконання. рис.1.11) виникає імовірність відбиття випромінювання та його потрапляння

на деталі зварювальних головок, що може призвести до виведення їх з ладу [79]. Одним із способів усунення цього недоліку є використання коаксіальної схеми розташування випромінювання в інтегрованому плазмотроні (рис.1.10).

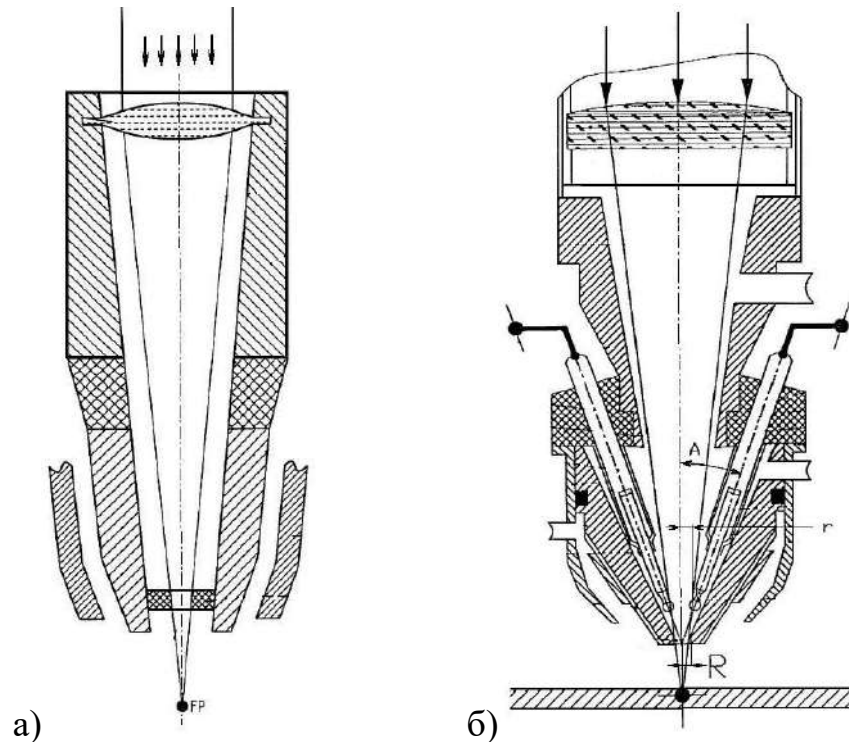


Рис. 1.10. Конструкції інтегрованих плазмотронів на базі коаксіальної схеми: а) – з кільцевим катодом [73]; б) – з стандартними неплавкими електродами, що розміщені в корпусі плазмотрону під кутом до випромінювання [74].

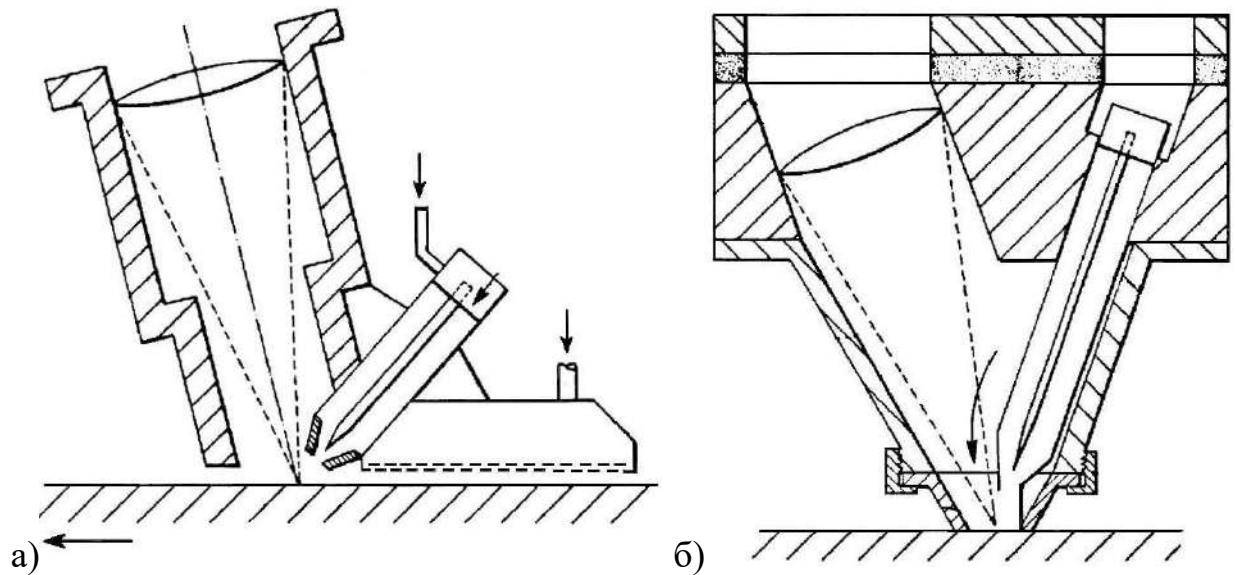


Рис. 1.11. Конструкції гібридних лазерно-плазмових зварювальних головок, у яких лазерна фокусуюча система і плазмовий пальник: а) – використовуються окремо, або б) – інтегруються у загальному корпусі [75].

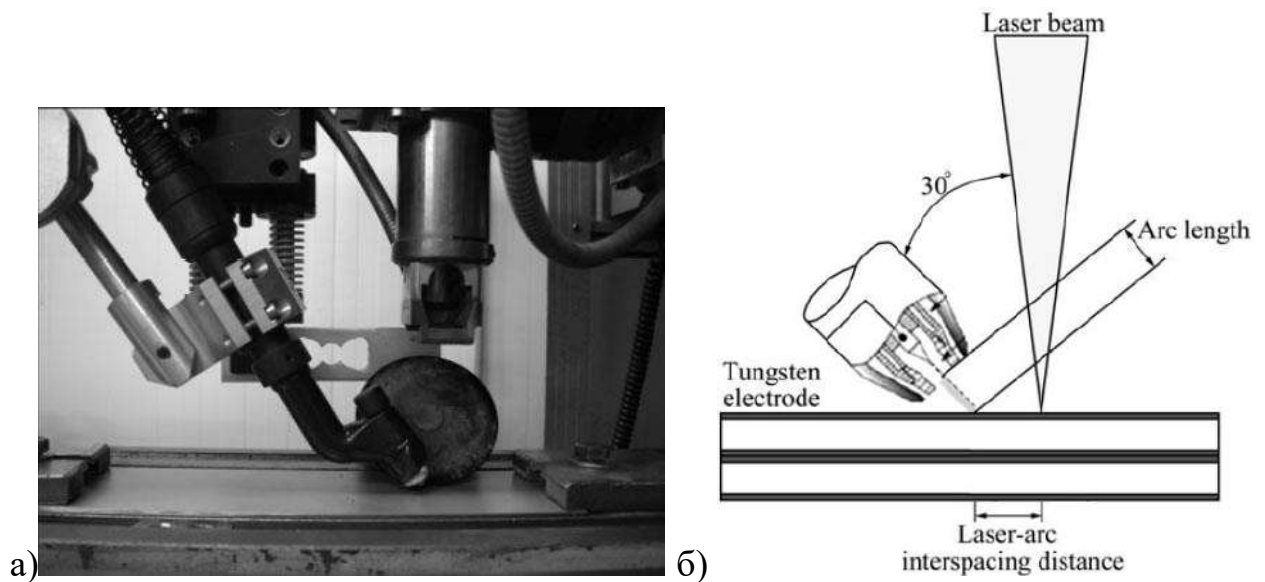


Рис. 1.12. Процес гібридного лазерно-плазмового зварювання з похилим розташуванням плазмотрону, що дозволяє змінювати відстань між плазмою та лазерним випромінюванням [76]: а) – зовнішній вигляд гібридної плазмотрону; б) – технологічна схема процесу.

Одним із важливих факторів, які сприяють мінімізації або повному усунення таких недоліків, як утворення підрізів, провисання шва, несиметричність його формування та утворення внутрішніх пор, може бути заміна параксіальної технологічної схеми (описаної у [80, 81]) на коаксіальну [82].

При лазерно-плазмовому зварюванні в якості присаджувального матеріалу можуть використовуватися порошки металів і сплавів (рис.1.13) [83]. Основні конструктивні параметри схеми лазерно-плазмового зварювання наведені на рис.1.14. В роботі [83] показано, що одним з найважливіших технологічних факторів є відстань між оброблюваною заготовкою і зварювальною головкою (рис.1.15).

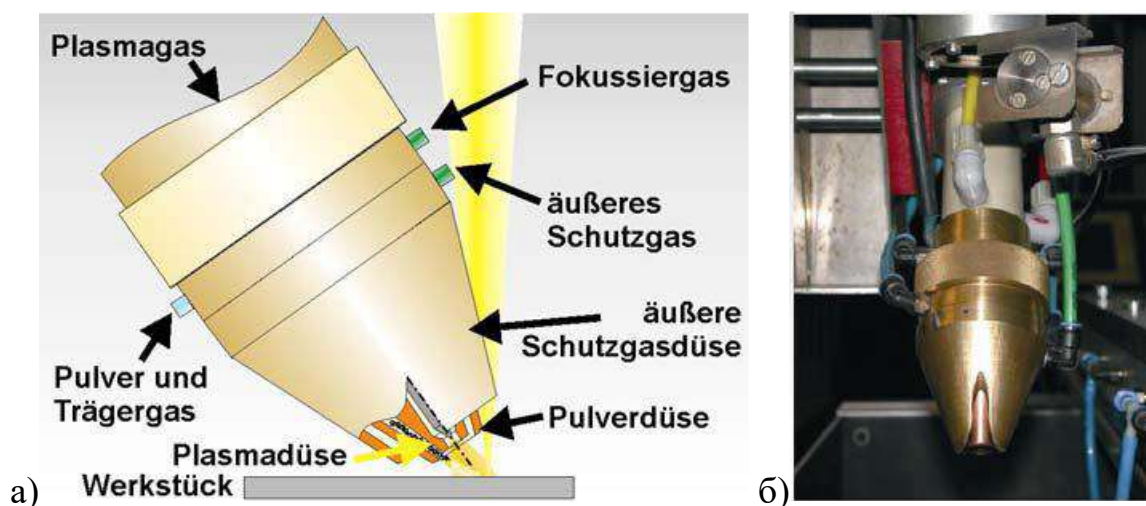


Рис. 1.13. Схема (а) і зварювальна головка (б) для лазерно-плазмового зварювання із використанням присаджувальних порошкових матеріалів [83].

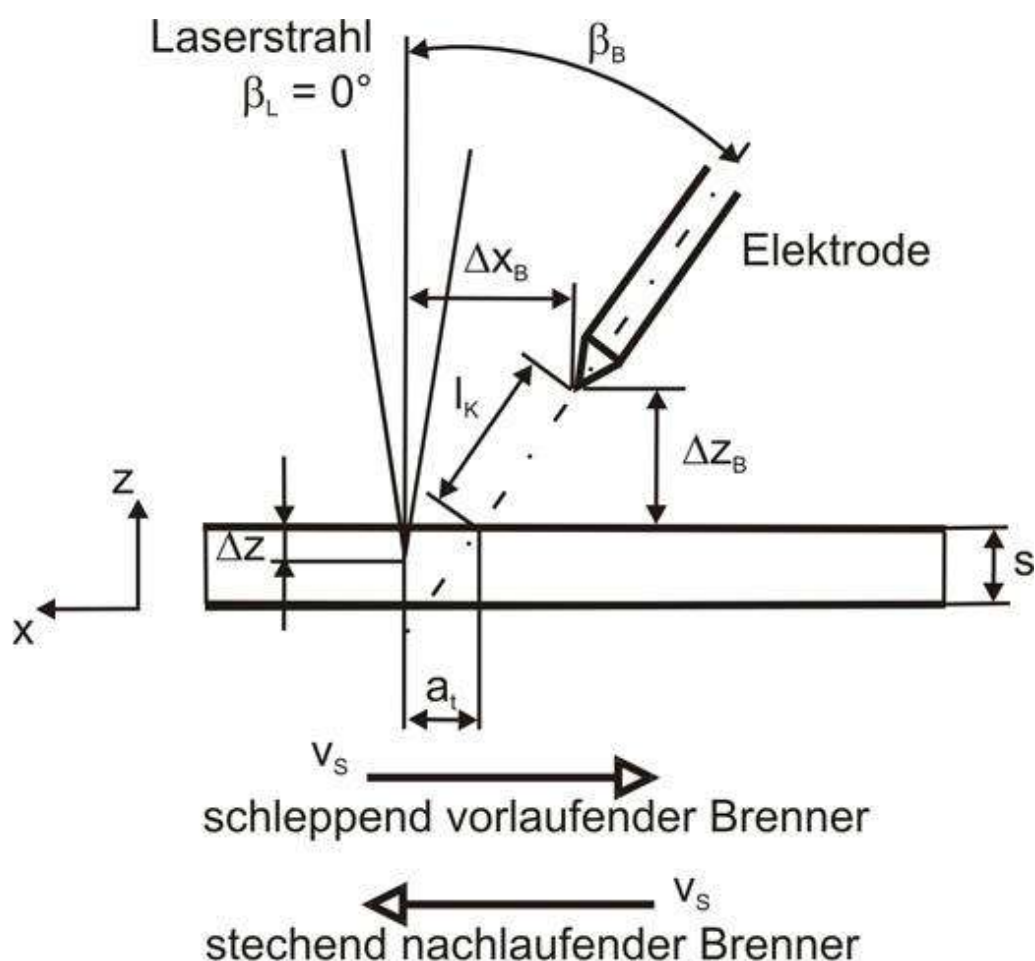


Рис. 1.14. Технологічна схема лазерно-плазмового зварювання [83].

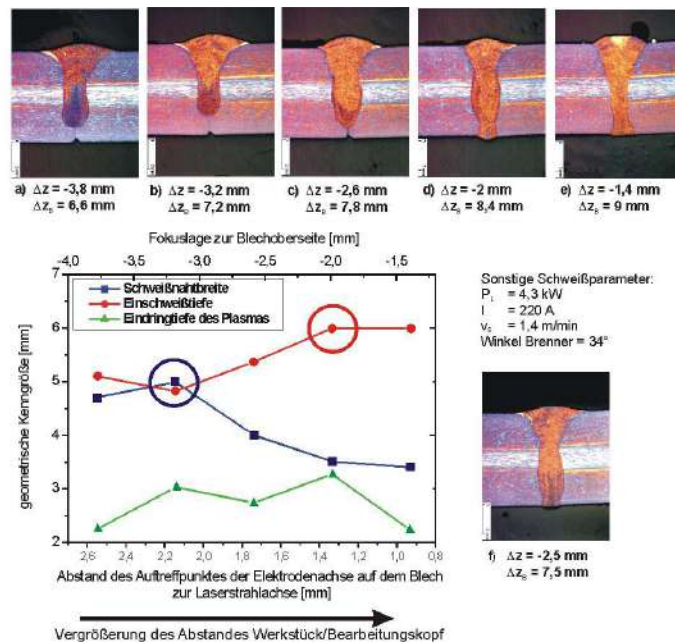


Рис. 1.15. Вплив зміни відстані між оброблюваною заготовкою та лазерно-плазмовою голівкою на геометрію зварного шва при використанні порошкового присаджувального матеріалу [83].

В роботі [84] показано, що прийнятні зварні шви можна отримати шляхом застосування лазерно-плазмового зварювання у вертикальному положенні з використанням порошків в якості присадних матеріалів. Така технологія зацікавила дослідників з метою впровадження її у суднобудуванні [85]. Лазерно-плазмове зварювання без застосування присаджувальних матеріалів активно використовується у виробництві автомобільної техніки [86]. Ще одним прикладом промислового застосування лазерно-плазмового зварювання без присаджувальних матеріалів є лазерно-плазмове зварювання нержавіючих труб малого діаметра [87].

Майбутнє лазерно-плазмового зварювання як незалежного процесу пов'язано із створенням інтегрованої голівки, яка поєднує два джерела енергії за коаксіальною схемою, що згідно роботі [88] забезпечує високу продуктивність зварювання і більш компактну конструктивну реалізацію. Прикладом може бути коаксіальна голівка, розроблена у Бременському Інституті Зварювання (Німеччина) (рис.1.16) [89]. На рис.1.17 показано вигляд цієї голівки з позиціонером присаджувального дроту [90].

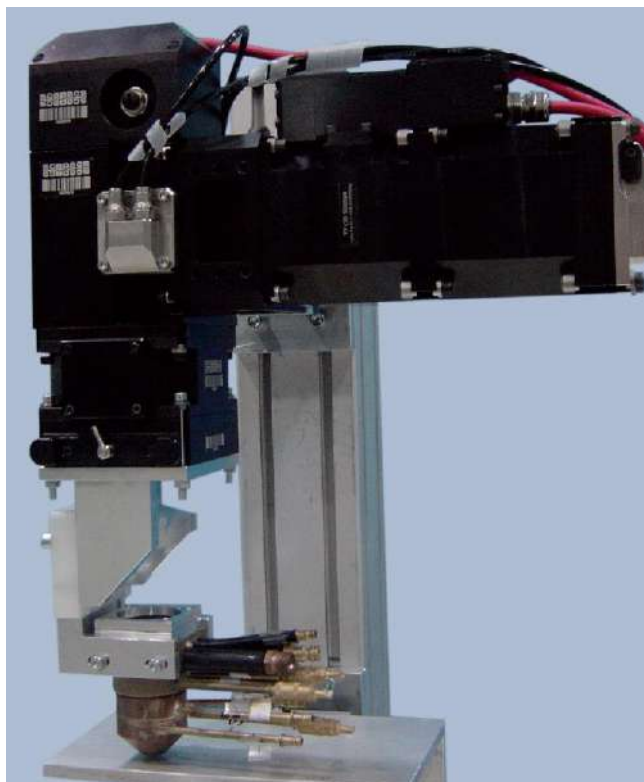


Рис. 1.16. Інтегрована головка для лазерно-плазмового зварювання [89].

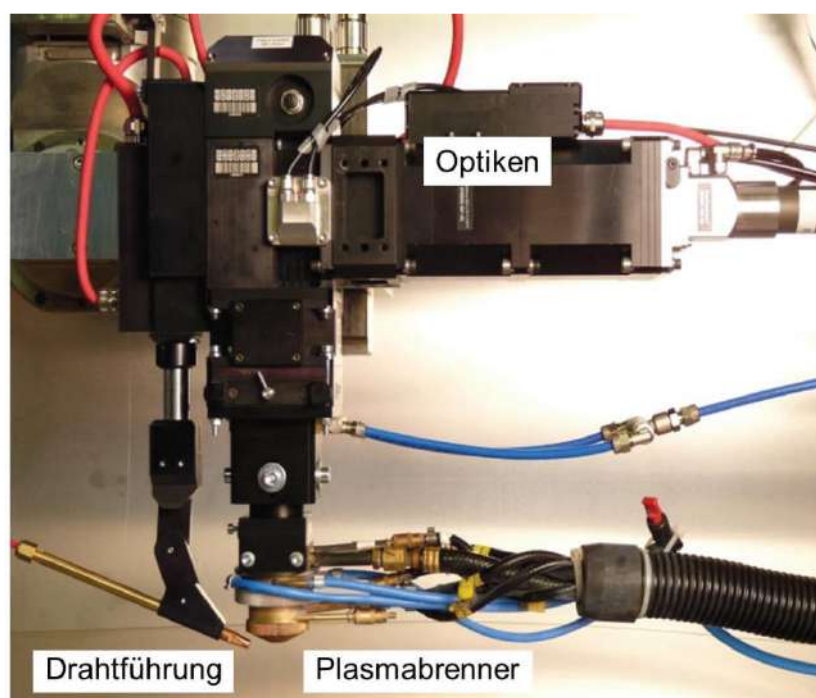


Рис. 1.17. Інтегрована головка для лазерно-плазмового зварювання із системою подачі присаджувального дроту [90].

Для отримання найбільшого ефекту від спільного використання лазера та плазми фахівці з Institute of Manufacturing Technology спільно з Fraunhofer IWS Dresden (Dresden, Germany) розробили гібридну лазерно-плазмову головку (рис.1.17) [91-94]. Вона розрахована на потужність лазерного випромінювання до 100 Вт та зварювальний струм до 40 А.

Окрім процесів зварювання лазерно-плазмовий процес може застосовуватися для обробки матеріалів: термічного модифікування поверхонь, зокрема, легування. Так, в роботі [95] показано, що режими лазерно-плазмового легування сприяють збільшенню характеристик міцності (в середньому на 20%) в порівнянні з легуванням з використанням лазерного випромінювання. В роботі [96] показано, що при дії джерела лазерного нагрівання на поверхню пластини в розплавленій зоні формується інтенсивне приповерхнєве перемішування розплаву, що обумовлено домінуючою дією термокапілярної сили, яка виникає за рахунок високого градієнта температури (~ 7000 °C/см) на вільній поверхні ванни. Ця течія, спрямована від осьової частини ванни у бік фронту плавлення, інтенсифікує перенесення енергії з перегрітого металу в осьовій частині ванни в її периферійну область та сприяє збільшенню ширини зони плавлення. Використання комбінованого лазерно-мікроплазмового джерела енергії для наплавлення порошковими матеріалами дозволяє збільшити ширину наплавленого валика в порівнянні з лазерним наплавленням, а також підвищити продуктивність процесу наплавлення.

1.4. Критичний аналіз існуючих розробок і напрямки перспективних досліджень по лазерно-плазмовим зварювальним технологіям.

Проведений аналіз літературних даних дозволяє сформулювати наступні основні переваги лазерно-плазмових процесів в порівнянні з лазерними:

- спільне використання енергії лазера та плазми дозволяє зменшити лазерну потужність та знизити вартість обладнання;

- плазмова складова лазерно-плазмового зварювання дозволяє знизити вимоги до збирання з'єднання під зварювання;
- підвищення продуктивності за рахунок збільшення ефективності процесу;
- зміна гідродінамічних потоків у зварювальній ванні, які допомагають збільшити ширину наплавленого шару при лазерно-плазмовому наплавленні і збільшити глибину проплавлення при зварюванні.

Для розробки шляхів подальшого розвитку процесів лазерно-плазмового зварювання сталей є низка проблемних питань, не достатньо вивчених на сьогоднішній день. А саме:

- 1) Мінімізація загального тепловкладення у зварювану конструкцію за рахунок зниження потужності плазми для забезпечення максимально можливого поглинання лазерного випромінювання зварюваним металом.
- 2) Застосування випромінювання лазерів із максимальним ККД (тобто волоконних) і створення для цього необхідних зварювальних головок (плазмотронів).
- 3) Підвищення механічних характеристик з'єднань, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням, порівняно із лазерним і плазмовим зварюванням.
- 4) Зниження залишкового напружено-деформованого стану конструкції виконаних лазерно-плазмовим зварюванням порівняно з лазерним і плазмовим зварюванням.

На даний час дослідження лазерно-плазмових процесів активно проводяться багатьма дослідниками у світі. Однак, частка досліджень для сталей в площині лазерно-плазмового процесу з використанням волоконних джерел лазерного випромінювання, що своєю нижчою вартістю та вищою ефективністю, витісняють з ринку CO₂ та Nd: YAG, становить близько 25...30%.

Спостерігається недостатня кількість або відсутність результатів досліджень процесів лазерно-плазмових зварювання сталей із використанням волоконного лазера, в тому числі щодо: виявлення можливості та ступеню взаємодії випромінювання волоконного лазера із стисненою дуговою плазмою і порівняння такої взаємодії для інших типів лазерного випромінювання; встановлення особливостей структуроутворення зварних з'єднань в результаті спільної дії лазерного випромінювання і плазмової дуги; дослідження особливостей протікання термодеоформаційних процесів, формування рівня і розподілу залишкових напружень та визначення фізико-механічних властивостей одержуваних з'єднань.

Розширення уявлень про особливості лазерно-плазмового зварювання та поглиблення наукових основ лазерно-плазмового зварювання з використанням волоконного лазерного випромінювання, а також розробка передових дослідно-промислових зразків зварювального обладнання, матиме сприятливий ефект на те, щоб лазерно-плазмові процеси в повному обсязі зайняли свою нішу в сучасній індустрії, що є передумовою актуальності проведення досліджень. На основі вище зазначеного було сформульовано мету дисертаційної роботи - дослідження спільного впливу випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги на ефективність передачі тепла від джерела енергії, особливості структуро-утворення зварних швів, особливості формування та розподілу напружено-деформованого стану та визначення фізико-механічних властивостей отриманих зварних з'єднань і розробка на їх основі базових технологічних прийомів лазерно-плазмового зварювання, та обладнання для їх реалізації.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Критичний аналіз сучасного стану розвитку гібридних лазерно-дугових і лазерно-плазмових зварювальних технологій. Постановка мети та задач дослідження.
2. Вибір методики і обладнання для проведення досліджень.

3. Вивчення особливостей проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталей з використанням випромінювання волоконного лазера.
4. Дослідження структури і властивостей зварних з'єднань із сталей отриманих при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазерного випромінювання в порівнянні з лазерним і плазмовим зварюванням.
5. Розробка базових технологічних прийомів та обладнання для лазерно-плазмового зварювання.

1.5. Висновки по розділу 1.

1. Утворення синергетичного ефекту при зварюванні сталей пов'язано з тепловим потоком всередині зварювальної ванни, керованим кондуктивним та/або конвективним механізмами передачі. На сьогодні однозначно не встановлена провідна роль термічних або гідродинамічних умов створення синергетичного ефекту в тому числі з використанням випромінювання волоконного лазера.

2. Спільне використання енергії лазера та плазми дозволяє зменшити лазерну потужність та знизити вартість обладнання. Лазерно-плазмове зварювання дозволяє підвищити продуктивність процесу в порівнянні з його складовими. Знизити чутливість процесу лазерно-плазмового зварювання до якості збирання. Що робить перспективними подальші дослідження в напрямі лазерно-плазмових процесів.

3. Лазерно-плазмове зварювання викликає великий науково-технічний інтерес, а недостатність досліджень процесу з використанням волоконних джерел лазерного-випромінювання (що інтенсивно заповнюють ринок лазерного обладнання), що спостерігаються на сьогоднішній час, обмежує темпи впровадження лазерно-плазмового зварювання у промисловість.

Розділ 2. МЕТОДИКИ І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Загальна методика дослідження процесів зварювання і поглинання енергії лазерного випромінювання з додаванням плазмової дуги.

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

- підготовка зразків з вуглецевих і нержавіючих сталей, для проведення експериментів зі зварювання і дослідження ефективності передачі енергії товщиною до 10 мм;
- створення лабораторного стенду для проведення технологічних досліджень;
- експериментально-розрахункове визначення ефективності процесів лазерного, плазмового і лазерно-плазмового зварювання вуглецевих і нержавіючих сталей;
- проведення металографічних досліджень зразків зварних з'єднань, визначення наявності характерних дефектів та шляхів їх усунення, внесення необхідних коректив у розробку зварювальних технологій;
- зварювання зразків стикових з'єднань для проведення механічних випробувань і визначення механічних характеристик, притаманних для досліджуваних способів зварювання;
- зварювання зразків стикових з'єднань і проведення з їх застосуванням експериментально-розрахункового визначення напружено-деформованого стану, характерного для застосованих способів зварювання;
- дослідження впливу довжини хвилі і особливостей фокусування лазерного випромінювання на глибину проплавлення при лазерно-плазмовому зварюванні;
- створення базових технологічних рекомендацій щодо лазерно-плазмового зварювання вуглецевих і нержавіючих сталей;

- розробка зварювальних головок для реалізації процесів лазерно-плазмового зварювання із використанням лазера із довжиною хвилі 1,03-1,07 мкм з потужністю до 1,5 і до 6,0 кВт;
- проектування комплексів дослідно-промислового обладнання для лазерно-плазмового зварювання сталей і сплавів.
- проведення технологічних випробувань і впровадження дослідно-промислового обладнання для лазерно-плазмового зварювання сталей і сплавів.

Згідно цієї методики проводитиметься низка досліджень, в яких буде задіяно як лабораторне технологічне обладнання, так і різноманітне діагностичне та дослідне обладнання. Детальний опис застосованого обладнання наведено нижче.

2.2. Лабораторний комплекс обладнання для технологічних досліджень лазерно-плазмових зварювальних процесів.

При розробці лабораторного комплексу обладнання для проведення досліджень з гібридного лазерно-плазмового зварювання було прийнято компонування, показане на блок-схемі рис. 2.1. Лабораторна гібридна головка, розміщена на маніпуляторі та складається з двох основних вузлів : лазерної головки, до якої по оптоволокну підводиться випромінювання від джерела лазерного випромінювання та гібридного плазмотрону. Що може бути укомплектований пристроєм для додаткового газового захисту зварного з'єднання («чобітком»). До плазмотрону від плазмової установки підводяться силові та основні газові комунікації. Плазмова установка складається з джерела живлення для плазмового зварювання; плазмового модуля, що слугує джерелом живлення чергової дуги та блоку автономного охолодження. Який забезпечує подачу охолоджуючої рідини до плазмотрону та складально-зварювальної оснастки, в якій збирається зразок під зварювання. Блок підготовки газів забезпечує подачу захисного газу до «чобітка» та до оснастки, для захисту кореня зварного шва. Механізм подачі дроту, укомплектований

направляючою та позиціонером присадного дроту, що розміщений з гібридною головкою та «чобітком» на одному кронштейні, забезпечує можливість застосування присадних дротів при зварюванні. Обладнання комплексу управляється за допомогою системи керування, що має зворотні зв'язки. Це дає можливість фіксувати та контролювати параметри режимів в процесі зварювання.

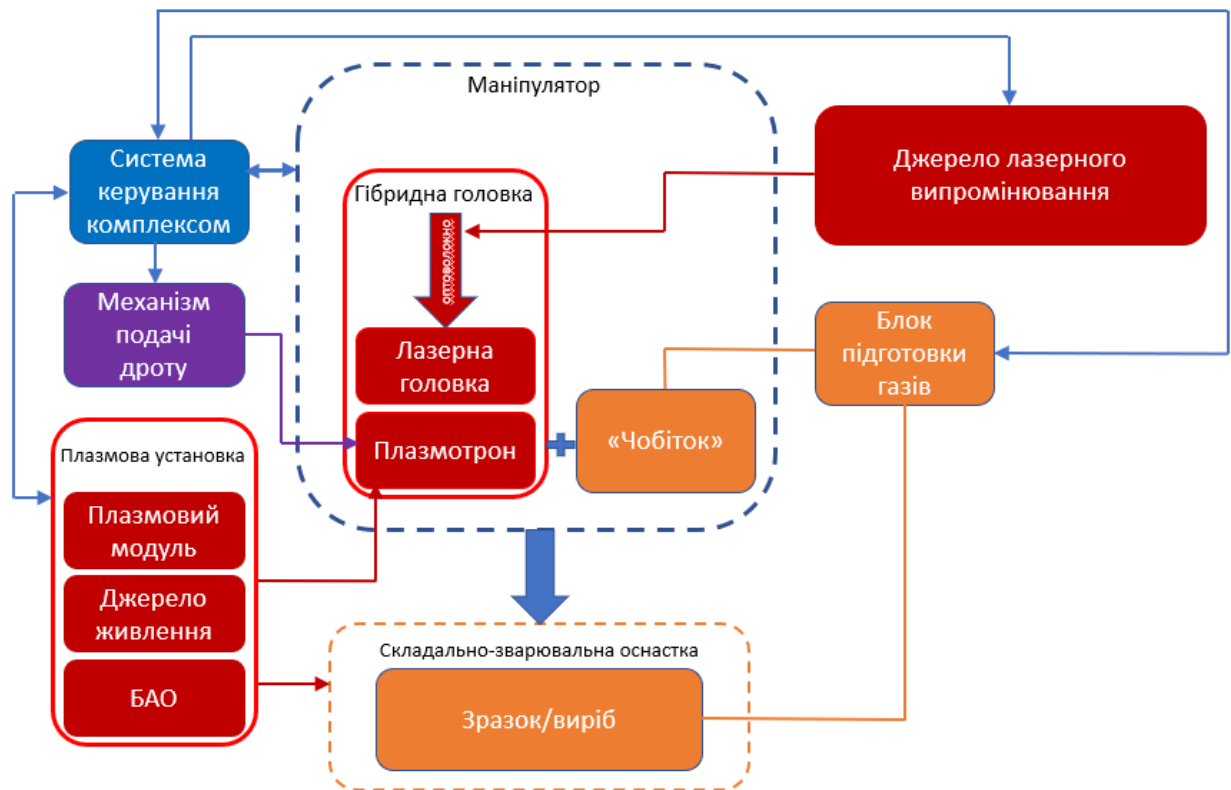


Рис. 2.1. Блок-схема лабораторного комплексу для дослідження гібридного лазерно-плазмового зварювання.

Згідно схеми рис. 2.1 було створено комплекс для лабораторних досліджень, показаний на рис. 2.2. Для даного комплексу було спроектовано та виготовлено гібридну лазерно-плазмову головку, яка дозволяла виконувати дослідження трьох способів зварювання: лазерного (із потужністю до 2,0 кВт), плазмового (при струмі до 100 А) і гібридного лазерно-плазмового (рис.2.3). У розробленій гібридній головці для фокусування лазерного випромінювання у пляму $\sim 0,2$ мм використовували лінзу із фокусною відстанню близько 270 мм.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд комплексу для лабораторних досліджень процесів лазерно-плазмового зварювання.

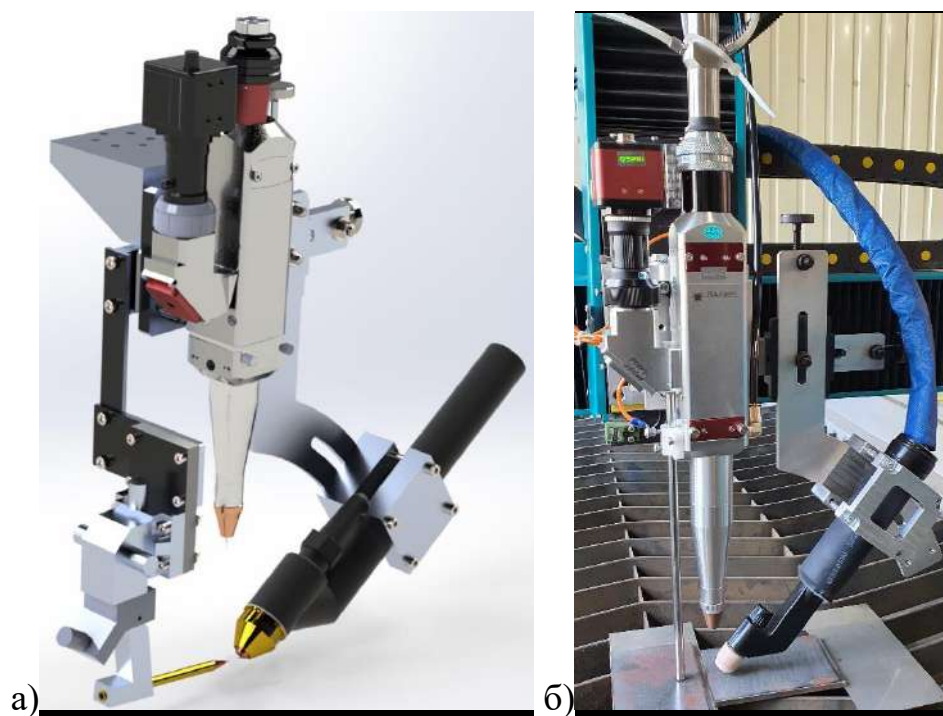


Рис. 2.3. Лабораторна головка: а) – 3D-модель; б) – зовнішній вигляд.

Для дослідження процесів зварювання застосовували наступне обладнання:

1. Волоконний лазер моделі MFSC 2000W (виробник MAX Photonics, Китай) з довжиною хвилі 1080 нм (діаметр фокальної плями 100...200 мкм) та потужністю випромінювання до 2,0 кВт (рис. 2.4);
2. Джерело живлення для плазмового зварювання Sebora TIG AC-DC Evo 450/T Robot укомплектоване плазмовим модулем PW30 з максимальним значенням зварювального струму 320 А і блок автономного охолодження плазмотрону (рис. 2.5);
3. Механізм подачі присадного дроту (рис. 2.6);
4. Трьох-координатний маніпулятор (рис. 2.7).



Рис. 2.4. Волоконний лазер моделі MFSC 2000W (потужність до 2,0 кВт).



Рис. 2.5. Джерело живлення Cebora TIG AC-DC Evo 450/T Robot із плазмовим модулем PW30 (а) і блок автономного охолодження (б) для плазмового зварювання.



Рис. 2.6. Механізм подачі присадного дроту.



Рис. 2.7. Трьох-координатний маніпулятор.

Крім вказаного обладнання додатково було задіяно таке технологічне устаткування: дисковий лазер моделі TruDisk 10002 фірми TRUMPF, Німеччина (потужність до 10,0 кВт, пляма фокусування випромінювання $\sim 0,4$ мм); антропоморфний робот-маніпулятор KR30HA фірми KUKA, Німеччина (виліт руки до 2,0 м, робоче навантаження до 30 кг); лазерно-плазмова головка із коаксіальним фокусуванням лазерного випромінювання; стандартний зварювальний плазмотрон тощо.

2.3. Матеріали, що використовувались в дослідженнях, та їх характеристики.

У багатьох галузях промисловості для створення зварних конструкцій використовують вуглецеві та нержавіючі сталі. Так, значного поширення вуглецеві сталі отримали для створення корпусів автомобілів, залізничних вагонів, малогабаритного судового транспорту, корпусів приладів тощо. Для створення більшості обладнання хімічної та харчової промисловості використовують нержавіючі сталі. Це лише порівняно невеликий перелік прикладів застосування вуглецевих і нержавіючих сталей при виготовленні

зварних конструкцій. Взагалі, переважна більшість таких конструкцій виготовляється саме з таких матеріалів.

Для проведення експериментів в роботі використовували листові зразки нержавіючої AISI 304 і вуглецевої сталей 09Г2С (Q235) (табл. 2.1). Розмір зразків обирали в межах (100...200)×(100...200) мм при товщині до 10 мм.

Таблиця 2.1. Вміст хімічних елементів (мас. %) у використаних в дослідженнях сталях.

| Матеріал / призначення | Склад елементів, мас. % | | | | | | | | |
|---|-------------------------|---------------|---------------|--------------|------|-------|---------|--------|--------|
| | Fe | C | Si | Mn | Ni | Cr | Cu | P | S |
| Сталь Q235 / зразок | основа | 0.14- 0.22 | 0.05- 0.15 | 0.4- 0.65 | <0.3 | <0.3 | <0.3 | <0.04 | <0,05 |
| Сталь AISI 304 / зразок | основа | 0.08 | 0.8 | - | 8-10 | 18-20 | 0.5-1.0 | 0.045 | 0.03 |
| ER308LSi / присадний дріт (Ø1,2 мм) | основа | ≤0.06 | 0.5-1.0 | 1.0-2.0 | 8-10 | 18-20 | | ≤0.025 | ≤0.015 |

2.4. Методика експериментальної оцінки ефективності процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання волоконного лазера

Для оцінки зміни поглинання лазерного випромінювання при додатковій дії плазмового джерела нагріву, використовували наступну методику: Проводилося визначення ефективності передачі енергії для лазерного, плазмового і лазерно-плазмового зварювання, з використанням волоконного джерела лазерного випромінювання. Ефективність передачі енергії $\eta_{ен}$ визначалася за допомогою формули (2.1), запропонованою Р. Уночіч та Дж. ДюПонт [97].

$$\eta_{ен} = \frac{Q}{P t} \quad (2.1)$$

де, Q – енергія поглинута металом, Дж; P – вихідна потужність лазерного випромінювання, Вт; t – час дії лазерного випромінювання, с.

Кількість поглинутої енергії металом Q , визначали за допомогою методу калориметрування. Для цього безпосередньо після зварювання зразок швидко переміщували до теплоізовьованого калориметра з водою (рис. 2.8). Температуру води вимірювали спиртовим термометром та термопарою.

Для підвищення точності вимірювань об'єм води становив 500 мл, час зварювання зразка становив не менше 10 с, швидкість зварювання – 10 мм/с.

Для виконання експериментів по калориметруванню застосовали наступне устаткування (рис. 2.8) ємність-калориметр 1 з подвійною стінкою та тепло-ізолюючим матеріалом між стінками. Температуру води вимірювали за допомогою спиртового термометра 2. Для контролю температури застосовувалася термопара 3.

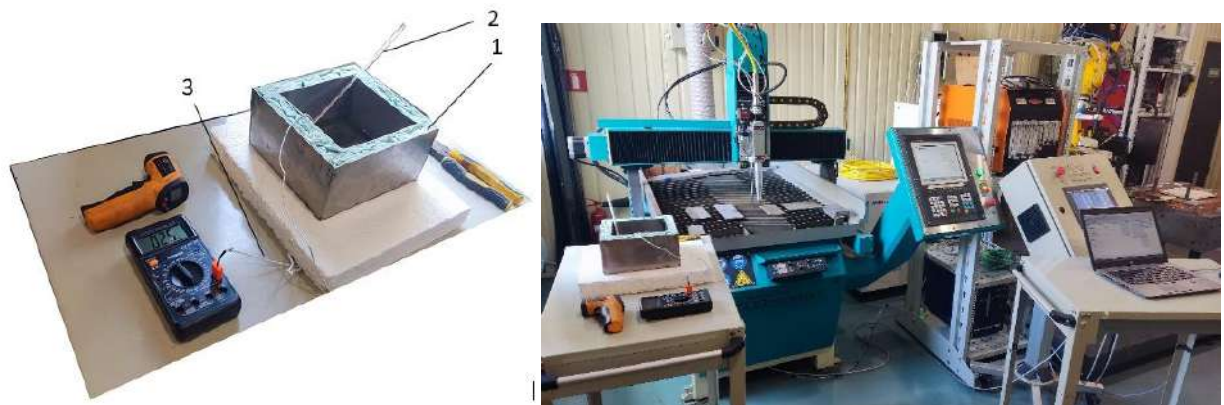


Рис. 2.8. Обладнання та лабораторний стенд для проведення калориметрування.

1- ємність-калориметр; 2 - спиртовий термометр; 3- термопара.

Поглинута енергія Q розраховувалася за формулою (2.2):

$$Q = (c_v m_v + c_{mk} m_{mk}) \times (T_2 - T_1) \quad (2.2)$$

де, c_v – теплоємність води, кДж/кг*К; m_v – маса води, кг; c_{mk} – теплоємність матеріалу з якого виготовлено калориметр, кДж/кг*К; m_{mk} – маса калориметру, кг; T_1 - початкова температура води, К; T_2 - кінцева температура води, К.

Поглинута потужність, кВт:

$$P_{\text{пог}} = \frac{Q}{t} \quad (2.3)$$

де, t – час дії джерела нагріву, с.

Ефективність передачі енергії визначалася за (2.4) :

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{P_{\text{пог}}}{P} \quad (2.4)$$

де, P – вихідна потужність, кВт

Ефективність передачі енергії в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання $\eta_h^{\text{ен}}$ визначали за формулою (2.5), детальніше див п.3.2:

$$\eta_h^{\text{ен}} = \frac{P_l \times \eta_{\text{ен}}^l + P_p \times \eta_{\text{ен}}^p + 0.06 \times P_h^{\text{пог}}}{P_l + P_p} \quad (2.5)$$

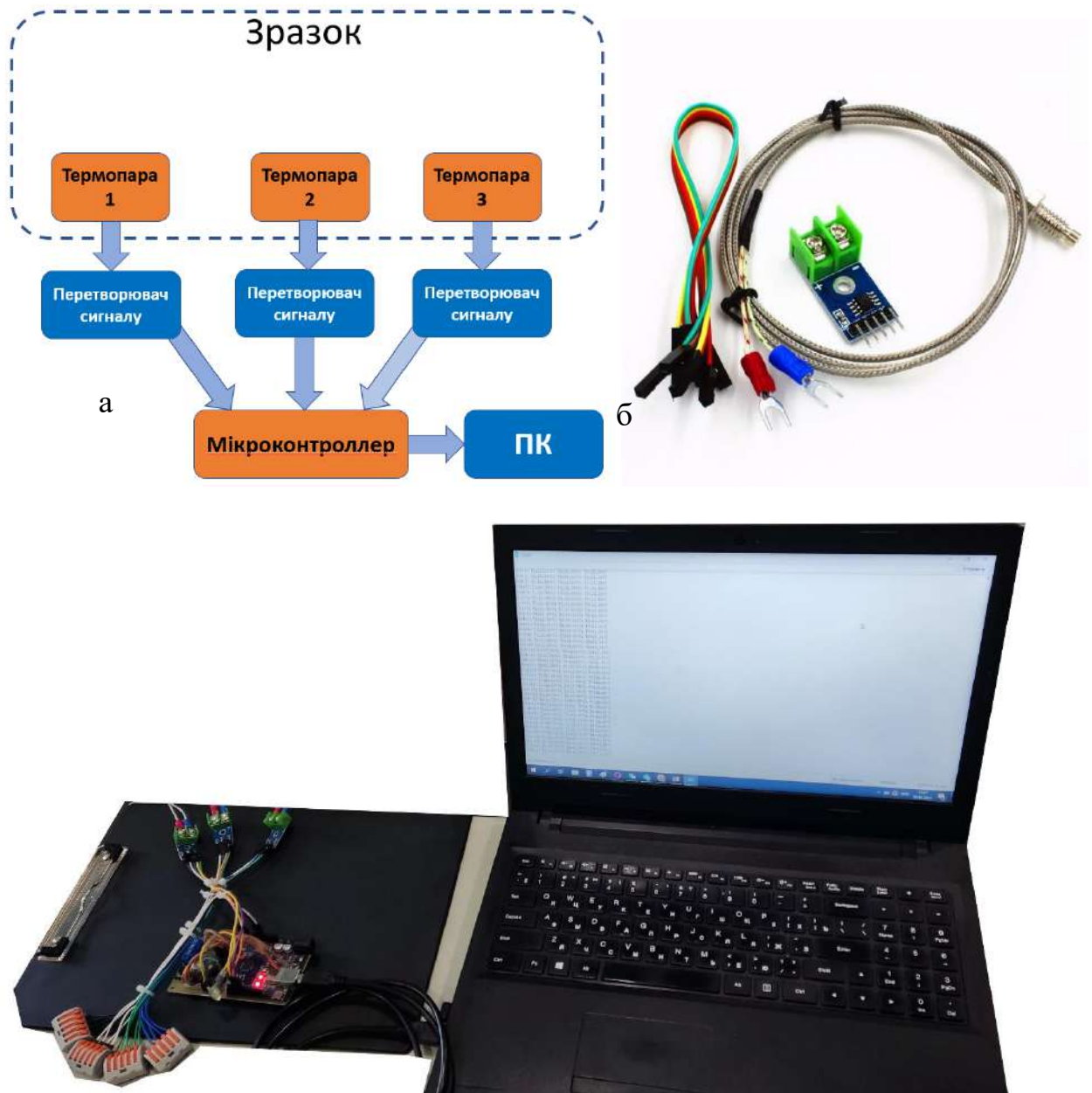
Оцінку ефективність гібридного процесу в порівнянні із його складовими, з точки зору ефективності проплавлення матеріалу, проводили за допомогою формули (2.6) наведеної в роботі [98], де фактор φ порівняльний коефіцієнт ефективності гібридного зварювання представлений, як співвідношення площ проплавів, отриманих гібридним зварюванням до суми площ розплавленого металу при лазерному і плазмовому зварюванні.

$$\varphi = \frac{A_H}{A_P + A_L} \quad (2.6)$$

де, A_H - площа проплавлення отримана гібридним зварюванням; A_P - площа проплавлення отримана плазмовим зварюванням; A_L - площа проплавлення отримана лазерним зварюванням;

2.5. Методика визначення термічних циклів при лазерному, плазмовому та гібридному лазерно-плазмовому зварюванні.

Визначення термічних циклів при зварюванні проводили за допомогою фіксації температури в реальному часі під час виконання лазерного, плазмового та гібридного зварювання, відповідно до схеми рис. 2.9, а.



в

Рис. 2.9. Принципова схема зняття показань температури в процесі зварювання (а); термопара МАХ6675 (б); фото вимірювального стенду (в)



Рис. 2.11. Фото лабораторного стану та зібраного зразка перед експериментом по зняттю термічного циклу зварювання.

Підключення вимірювальної системи відбувалося після завершення роботи осцилятора та запалювання чергової дуги, в момент пуску «основної» дуги. Показники температури фіксувалися від початку зварювання та до повного остигання зразка до кімнатної температури. За отриманими даними будувалися експериментальні залежності термічних циклів в точці. Які в подальшому порівнювалися з розрахунковими термічними циклами, що були отримані при моделюванні теплових процесів при лазерному; плазмовому та лазерно-плазмовому зварюванні.

2.6. Методики та апаратура для досліджень структури і фізико-механічних властивостей матеріалів і зварних з'єднань.

Мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань досліджували в наступних зонах: шов; лінія сплавлення (ЛС); околошовна зона (ОШЗ) або зона термічного впливу (ЗТВ) та основний метал (ОМ). Досліджено структурні параметри: ширину (h) та довжину (l) кристалітів, коефіцієнт форми зерна ($\alpha = l / h$), розмір зерен (D_z).

Структурні зміни у металі швів та зонах термічного впливу вивчали методом світлової мікроскопії (мікроскоп Neophot-32 рис. 2.12, а). Мікротвердість металу вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,1 кг (рис. 2.12, б).



Рис. 2.12. Зовнішній вигляд оптичного мікроскопу Neophot-32 (а) і мікротвердоміру ПМТ-3 (б).

Проведення досліджень мікроструктури методом растрової електронної мікроскопії проводили допомогою мікроскопу Mira 3 LMU (Tescan) рис. 2.13. При дослідженні використовувались детектор пружньовідбитих електронів (позначення BSE на електронному знімку).



Рис. 2.13. Зовнішній вигляд аналітичного растрового електронного мікроскопу Mira 3 LMU (Tescan) [2.3]

Місця для аналізу обирались з умови відображення типового вигляду структурних та морфологічних особливостей, для кожного зразка було досліджено не менше ніж три місця на поверхні темплету. Для кожного місця аналізу було зафіксовано вигляд поверхні при різних збільшеннях. Основні параметри зйомки приведені на кожному мікрознімку (SEM HV-прискорююча напруга, ЦВ-фокусна відстань, View field – поле зору, Det-детектор що було використано для побудови знімку, SEM MAG- збільшення).

Механічні випробування проводили на універсальному сервогідравлічному випробувальному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН (рис. 2.14, а). Даний комплекс забезпечує жорстке навантаження зразка, що особливо актуально при визначенні модуля пружності та границі плинності. Контроль параметрів при випробуваннях здійснювався за допомогою стандартного програмного забезпечення TestWorks 4 системи MTS 318.25. Дане спеціалізоване ліцензійне програмне забезпечення дає можливість відслідковувати в реальному часі обрані параметри експерименту і отримувати в електронному форматі значення стандартних характеристик, що описують поведінку матеріалу в процесі деформування. Для більш точного визначення умовної границі плинності основного металу застосовували екстензометричний датчик MTS 634.25F-24 з

базою вимірювання деформації 50 мм і точністю вимірювання 0,001 мм (рис. 2.14, б).



а)



б)

Рис. 2.14. Універсальний сервогідравлічний випробовуваний комплекс MTS 318.25 (США, Material Test System) (а) і екстензометричний датчик MTS 634.25F-24 з базою вимірювання 25 мм (б).

Механічні випробування зварних з'єднань на статичне одновісне розтягнення проводили згідно вимог ГОСТ 6996-66. Міцність зварних з'єднань оцінювали за результатами випробувань трьох зразків з кожного з'єднання в умовах одновісного розтягнення. Зразки вирізали таким чином, щоб поздовжня вісь симетрії зразка розташовувалася перпендикулярно до напрямку прокату. Ескіз зразка для визначення межі міцності, межі текучості, відносного видовження основного металу при одновісному розтягненні приведено на рис. 2.15 для товщин металу 2 та 6 мм.

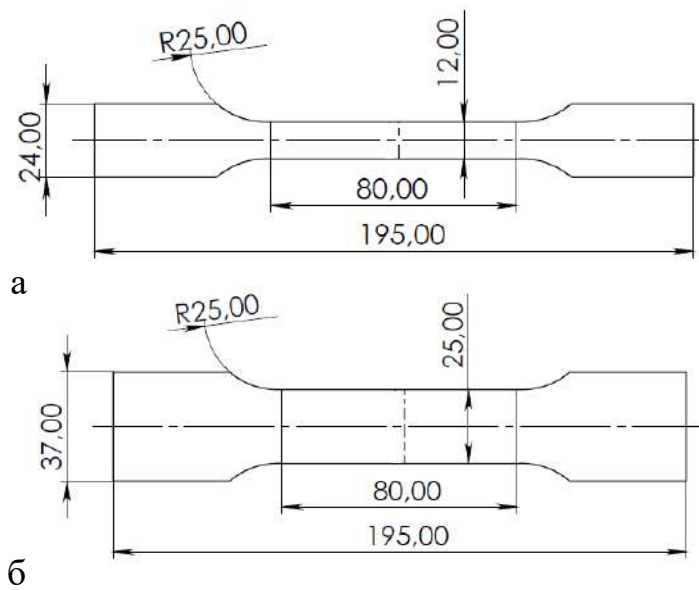


Рис. 2.15. Ескізи зразків для випробування на одновісне розтягнення основного металу товщиною 2 мм (а) та 6 мм (б).

Визначення межі міцності зварних з'єднань проводили на зразках з не видаленою опуклістю, вирізаних зі зварних з'єднань (рис. 2.16). Зразок вирізали так, щоб вісь шва розташовувалася перпендикулярно напрямку розтягнення.

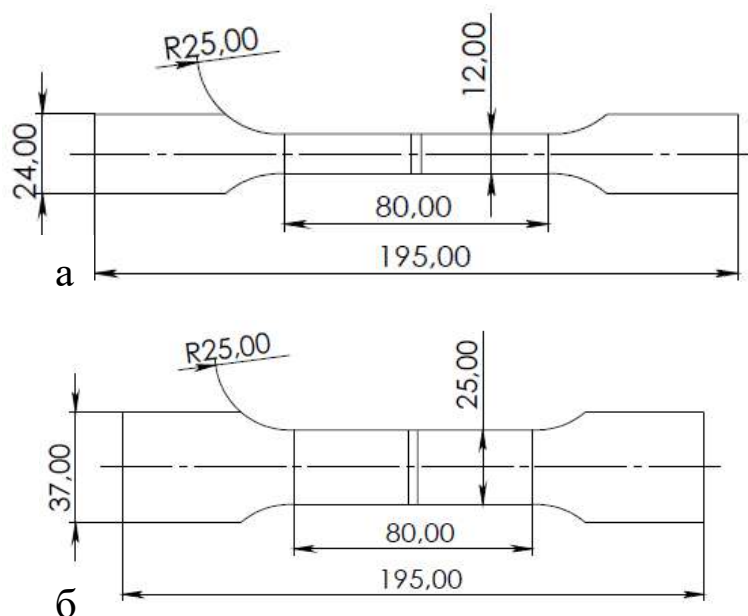


Рис. 2.16. Ескіз зразків для випробування на одновісне розтягнення з опуклістю шва для визначення міцності зварного з'єднання товщиною, а – для товщини 2 мм, б – для товщина 6 мм

2.7. Методика та обладнання для експериментального дослідження напружено-деформованого стану.

В роботі вивчався характер розподілення залишкових зварювальних деформацій та напружень при лазерному, плазмовому і гібридному лазерно-плазмовому зварюванні.

Напружений стан зразків зварних з'єднань вимірювали методом електронної спекл-інтерферометрії. Цей метод заснований на вимірюванні переміщень при пружному розвантаженні об'єму металу в досліджуваних точках на поверхні зразка, викликаних свердленням ненаскрізних отворів діаметром близько 1-го мм з використанням спеціалізованого пристрою 2 для свердлення (рис. 2.17) [100].

В оптичній системі інтерферометра 1, в якій досліджувана ділянка зразка освітлювалася лазерним випромінюванням під однаковим кутом з двох напрямів. Таким чином, завдяки порівнянню зареєстрованих даних, визначали компоненти вектору переміщень, що характеризують деформацію зразка в площині. Величина кута між нормаллю до точки досліджуваної поверхні і напрямом випромінювання складала 57° . Вибір методу обумовлений необхідністю збереження цілісності зразка під час та після дослідження.



Рис. 2.17. Вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії на стикових зварних з'єднаннях, де 1 – інтерферометр, 2 – пристрій для свердлення, 3 – зварне з'єднання.

Для реєстрації напруженого стану стикового з'єднання використовувався малогабаритний інтерферометр, який встановлювався на поверхню досліджуваного зразка (рис. 2.17). До складу приладу входили: спекл-інтерферометр, CCD-камера, світловід, станина приладу з трьома опорами.

2.8. Висновки по розділу 2.

1. Для вивчення особливостей лазерно-плазмового зварювання вуглецевих і нержавіючих сталей була прийнята методика проведення досліджень, яка включає проведення експериментів та вивчення їх результатів на макро- та мікрорівнях. Для реалізації цієї методики було обрано тип та матеріали зразків, підібрано необхідні прилади та обладнання, розроблено лабораторний стенд для проведення технологічних досліджень.

2. Вибране дослідне обладнання дозволяє з достатньою точністю вивчити результати запланованих технологічних досліджень, у тому числі, характерні структурні особливості одержуваних з'єднань, їх механічні властивості, напружено-деформований стан, ефективність процесу зварювання, впливу технологічних факторів на синергетичний ефект при лазерно-плазмовому зварюванні.

Розділ 3. ОСОБЛИВОСТІ ПРОЯВЛЕННЯ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ПРИ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОМУ ЗВАРЮВАННІ СТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИПРОМІНЮВАННЯ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

3.1. Оцінка ефективності поглинання енергії та проплавлення при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні з використанням випромінювання волоконного лазера.

Для перевірки розрахункових даних провели наступні дослідження. Лазерним, плазмовим і лазерно-плазмовим способами виконували зварювання (проплавлення) у зразках сталей Q235 (09Г2С) і AISI304 із наступним калориметруванням, для визначення частки теплової енергії, вкладеної у зразок. Отримані дані співставляли потужностями лазерного та плазмового процесу, що дозволило оцінити ефективність передачі енергії при розглядуваних способах зварювання.

Ефективність лазерної обробки матеріалів напряму залежить від здатності оброблюваного матеріалу поглинати лазерне випромінювання певної довжини хвилі. Так для випадку застосування CO₂ – лазерів кількість поглиненого випромінювання низьковуглецевою сталлю оцінюється в 10-15%, нержавіючими сталями – близько 5% рис. 3.1.

Застосування широко-розповсюджених волоконних джерел лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1069 нм, дозволяє отримати не тільки переваги в технологічності обладнання, зменшити енергозатрати та вартість кіловату потужності вихідного випромінювання, а й підвищити ефективність процесу обробки матеріалів за рахунок збільшення поглинутої енергії металом, що обробляється.

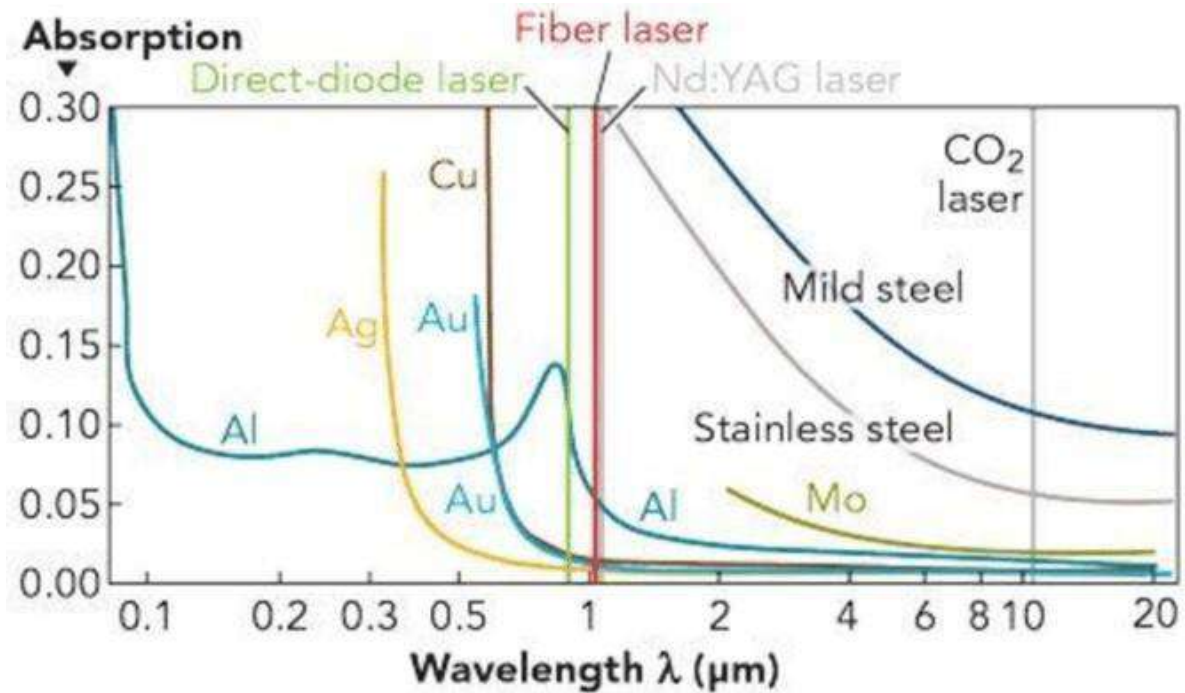


Рис. 3.1. Залежність поглинаючої здатності різних матеріалів від довжини хвилі лазерного випромінювання [101]

Ефективність поглинання лазерного випромінювання металом можна охарактеризувати за допомогою ефективності передачі енергії $\eta_{\text{ен}}$, що описується формулою (3.1), запропонованою Р. Уночіч та Дж. ДюПонт [97].

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{Q}{P t} \quad (3.1)$$

де, Q – енергія поглинута металом, Дж; P – вихідна потужність лазерного випромінювання, Вт; t – час дії лазерного випромінювання, с.

Для близького за довжиною хвилі до волоконного лазеру, Nd-YAG лазерного випромінювання ряд дослідників оцінює енергетичний ККД лазерного зварювання $\eta_{\text{ен}}$ в 0,5...0,7 [97], [102].

Попередні дослідження [103] показали, що додавання плазмової складової в гібридному лазерно-плазмовому зварюванні дозволить підвищити ступінь поглинання випромінювання та як результат підвищити ефективність процесу зварювання.

Експериментальну перевірку зміни поглинання лазерного випромінювання при додатковій, одночасній, дії плазмового джерела нагріву

проводилася шляхом визначення ефективності передачі енергії лазерного, плазмового та гібридного лазерно-плазмового зварювання, з використанням волоконного джерела лазерного випромінювання. За допомогою методу калориметрування визначалася кількість поглинутої енергії металом Q .

Для визначення поглинутої металом енергії, визначалася початкова та кінцева (після розміщення обробленого зразка в калориметра) температура води в калориметрі. Поглинута енергія Q розраховувалася за формулою (3.2):

$$Q = (c_v m_v + c_{mk} m_{mk}) \times (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

де, c_v – теплоємність води, кДж/кг*К; m_v – маса води, кг; c_{mk} – теплоємність матеріалу з якого виготовлено калориметр, кДж/кг*К; m_{mk} – маса калориметру, кг; T_1 – початкова температура води, К; T_2 – кінцева температура води, К.

Поглинута потужність, кВт:

$$P_{\text{пог}} = \frac{Q}{t} \quad (3.3)$$

де, t – час дії джерела нагріву, с.

Ефективність передачі енергії, можна представити у вигляді формули (3.4):

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{P_{\text{пог}}}{P} \quad (3.4)$$

де, P – вихідна потужність, кВт

Визначені значення поглинутих енергій, параметри режимів та розрахункові показники енергетичної ефективності процесів зварювання приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Параметри режимів зварювання та визначені ефективності передачі енергії процесів лазерного та плазмового зварювання (при швидкості зварювання 0,6 м/хв).

| Матеріал | Спосіб | $P_{\text{л}}, \text{кВт}$ | $I_{\text{зв}}, \text{А}$ | $U_{\text{д}}, \text{В}$ | $T_1, ^\circ\text{C}$ | $T_2, ^\circ\text{C}$ | $Q, \text{кДж}$ | $P_{\text{полг}}, \text{кВт}$ | $\eta_{\text{ен}}, \%$ |
|----------|--------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------|------------------------|
| 09Г2с | Лазер | 0,8 | - | - | 22,9 | 25,8 | 7,202 | 0,6262 | 78,28 |
| | Плазма | - | 80 | 24,1 | 20 | 25 | 12,418 | 1,0798 | 56,0 |
| | Лазер-плазма | 0,8 | 80 | 26 | 22,8 | 31,2 | 20,862 | 1,814 | - |
| AISI 304 | Лазер | 0,8 | - | - | 22 | 25 | 7,451 | 0,6479 | 80,9 |
| | Плазма | - | 80 | 24,5 | 22 | 27 | 12,418 | 1,0798 | 55,1 |
| | Лазер-плазма | 0,8 | 80 | 26,3 | 22,4 | 30 | 21,11 | 1.836 | - |

На гістограмі рис. 3.2, представлено порівняння поглинутих енергій при гібридному, лазерному, плазмовому зварюванні та алгебраїчної суми енергій лазерного та плазмового зварювання.

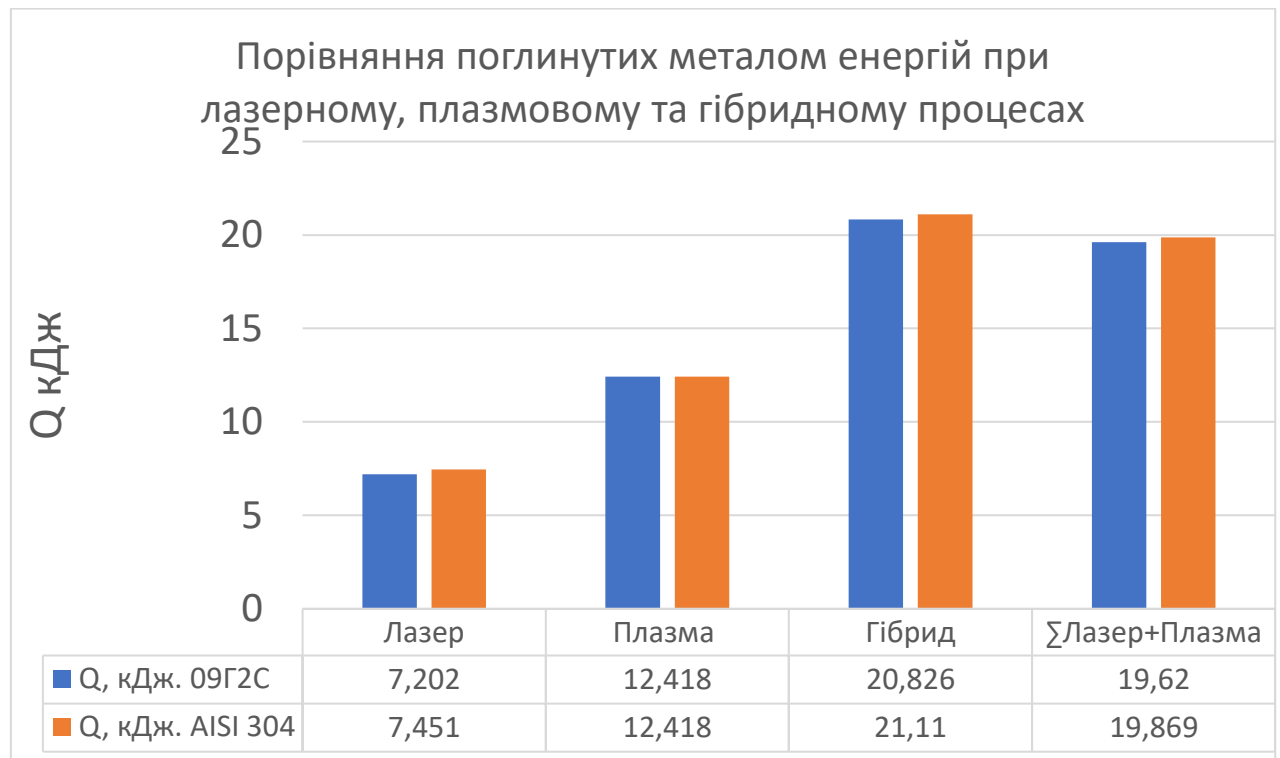


Рис. 3.2. Порівняння поглинутих енергій при лазерному, плазмовому та гібридному процесах для сталі 09Г2С.

З порівняльного аналізу отриманих даних видно, що фактична поглинута енергія металом в процесі гібридного зварювання перевищує алгебраїчну суму поглинутих енергій лазера та плазми на 6%.

При чому, площа провару, отримана гібридним зварюванням, на прикладі сталі AISI 304 становить $6,33 \text{ мм}^2$, що на 52% більше за суму площ лазерного $3,08 \text{ мм}^2$ та плазмового $1,08 \text{ мм}^2$ проплавів рис. 3.5-3.6, Табл. 3.2.



Рис.3.3. Порівняльна діаграма площ проплавів, отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням.

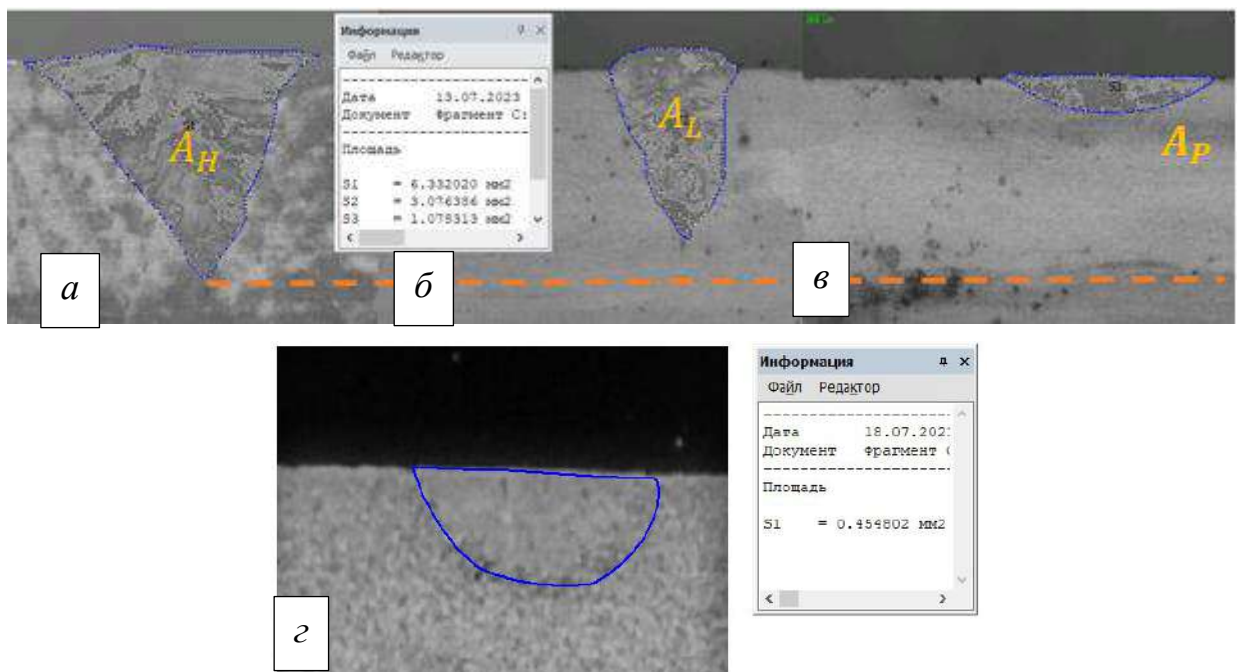


Рис.3.4. Площі проплавів, отриманих гібридним (а), лазерним із глибоким проплавленням (б), плазмовим (в) і лазером із теплопровіднісним проплавленням (г) на сталі AISI 304.

Таблиця 3.2. Площі проплавлення отримані розглядуваними способами зварювання.

| Матеріал | Спосіб | A, мм ² |
|----------|---|--------------------|
| 09Г2С | Лазерне зварювання із глибоким проплавленням | 2 |
| | Лазерне зварювання із теплопровіднісним проплавленням | 0,675 |
| | Плазмове зварювання | 2 |
| | Гібридне зварювання | 9 |
| AISI 304 | Лазерне зварювання із глибоким проплавленням | 3,08 |
| | Лазерне зварювання із теплопровіднісним проплавленням | 0,45 |
| | Плазмове зварювання | 1,08 |
| | Гібридне зварювання | 6,33 |

Це явище пояснюється інтенсифікацією гідродинамічних процесів в зварювальній ванні. В роботі [104] отримано подібні результати для гібридного лазер-ТІГ зварювання, з використанням CO₂ лазера.

Отримані результати, підтверджують зазначене в роботі [104], що збільшення проплавлення відбувається за через підвищення густини струму, що обумовлено взаємодією сфокусованого випромінювання з дуговою плазмою, що в свою чергу викликає збільшення електромагнітної сили, що переносить розплавлений метал від поверхні в низ зварювальної ванни, чим підвищує ефективність конвекційного переносу тепла в глибину ванни. Беручи до уваги зазначене вище, можна стверджувати, що природа синергетичного ефекту при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні не залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання.

В свою чергу приріст поглинутої енергії в гібридному процесі зварювання, може бути пояснений за рахунок виявленої особливості гібридного зварювання сталей з використанням випромінювання волоконного

лазеру, що полягає у підвищенні напруги на дузі в порівнянні з напругою при плазмовим зварюванням.

Збільшення напруги в гібридному процесі зварювання, може бути пояснено заглибленням дуги в розплав зварювальної ванни. Що приводить до збільшення довжини дуги, та як результат до збільшення значення напруги на дузі.

Для оцінки впливу напруги на приріст поглинутої енергії в гібридному процесі зварювання за рахунок збільшення напруги на дузі визначимо через приріст поглинутої потужності за допомогою формул (3.5) та (3.6):

Приріст поглинутої енергії ΔQ , кДж:

$$\Delta Q = Q_h - (Q_l + Q_p) \quad (3.5)$$

де, Q_h - поглинута енергія гібридного процесу, кДж; Q_l - поглинута енергія лазерного процесу, кДж; Q_p - поглинута енергія плазмового процесу, кДж.

Приріст поглинутої потужності ΔP , Вт:

$$\Delta P = \frac{\Delta Q}{t} \times 10^3 \quad (3.6)$$

де, t – час дії джерела нагріву.

Щоб оцінити частку приросту поглинутої потужності в гібридному процесі зварювання, спричинену ростом напруги на дузі визначимо розрахункове значення зміни напруги ΔU_c , та порівняємо з фактичним ΔU_f , що представляє собою різницю значень напруги при гібридному U_h та плазмовому зварюванні U_p .

Розрахунковий приріст напруги, В:

$$\Delta U_c = \frac{\Delta P}{I_{зв}} \quad (3.7)$$

де, $I_{зв}$ – зварювальний струм, А.

Фактичний приріст напруги на дузі в гібридному процесі зварювання, В:

$$\Delta U_f = U_h - U_p \quad (3.8)$$

де, U_h – напруга на дузі при гібридному зварюванні, В; U_p – напруга на дузі при плазмовому зварюванні, В;

Результати проведених розрахунків приведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3. Порівняння поглинутих енергій при лазерному, плазмовому та гібридному зварюванні.

| Матеріал | Ql, кДж | Qp, кДж | Ql+p, кДж | Qh, кДж | Uh, В | Up, В | ΔQ , кДж | ΔQ , % | ΔP , Вт | ΔU_c , В | ΔU_f , В | ΔU_d ,В |
|----------|------------|------------|--------------|------------|----------|----------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| 09Г2С | 7,20 | 12,42 | 19,62 | 20,86 | 26 | 24,1 | 1,242 | 6 | 108 | 1,35 | 1,9 | 0,55 |
| AISI 304 | 7,45 | 12,42 | 19,87 | 21,11 | 26,3 | 24,5 | 1,241 | 5,9 | 107,9 | 1,3 | 1,8 | 0,45 |

Розбіжність фактичних та розрахункових значень зміни напруги ΔU_d становить близько 0.5 В, це може пояснюватися неточністю визначення фактичного значення напруги на дузі. Враховуючи, що розбіжність ΔU_d , відповідає значенням енергії 36...44 Дж, що становить 2...2,4% від значення загальної поглинутої енергії, що дає змогу припускати, що збільшення поглинутої енергії на 6% в процесі гібридного зварювання, обумовлено головним чином ростом напруги на дузі.

Базуючись на твердженні, що тепловкладення в метал при гібридному зварюванні близьке до алгебраїчної суми тепловкладень окремих компонентів, для подальшої оцінки ефективності гібридного зварювання. Щоб визначити ефективність передачі енергії процесу гібридного зварювання виразимо поглинуту потужність при гібридному зварюванні як суму вкладених потужностей лазера та плазми помножених на енергетичні ККД лазерного та плазмового процесів, відповідно, та 6% поглинутої потужності при гібридному зварюванні.

Отримане рівняння (3.9) матиме вигляд:

$$P_h^{\text{пог}} = P_l \times \eta_{\text{ен}}^l + P_p \times \eta_{\text{ен}}^p + 0.06 \times P_h^{\text{пог}} \quad (3.9)$$

де, $P_h^{\text{пог}}$ – поглинута потужність в процесі гібридного зварювання, кВт;

де, P_l – вихідна потужність лазерного випромінювання, кВт; $P_p = I_{\text{зв}} \times U_h$ –

вихідна потужність плазмової дуги, кВт; $\eta_{\text{ен}}^l$ та $\eta_{\text{ен}}^p$ –ефективність передачі енергії лазерного та плазмового зварювання, відповідно.

Ефективність передачі енергії в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання $\eta_h^{\text{ен}}$ визначимо за формулою (3.10):

$$\eta_h^{\text{ен}} = \frac{P_l \times \eta_{\text{ен}}^l + P_p \times \eta_{\text{ен}}^p + 0.06 \times P_h^{\text{пог}}}{P_l + P_p} \quad (3.10)$$

Отримані розрахункові ефективності перенесення енергії гібридного процесу зварювання (табл. 3.4) займають проміжне значення між показниками лазерного та плазмового зварювання, це підтверджує твердження, що механізм утворення синергетичного ефекту є незалежним від енергетики процесу.

Таблиця 3.4. Ефективність передачі енергії при лазерному, плазмовому та гібридному зварюванні.

| Матеріал | Спосіб | $\eta_{\text{ен}}, \%$ |
|----------|--|------------------------|
| 09Г2С | Лазер із глибоким проплавленням | 78,3 |
| | Лазер із теплопровіднісним проплавленням | 32,4 |
| | Гібрид | 66,5 |
| | Плазма | 56 |
| AISI 304 | Лазер із глибоким проплавленням | 81 |
| | Лазер із теплопровіднісним проплавленням | 43,2 |
| | Гібрид | 66,6 |
| | Плазма | 55,1 |

Отже, щоб оцінити ефективність гібридного процесу в порівнянні із його складовими, оцінку доцільно проводити з точки зору ефективності проплавлення матеріалу. Це можна виконати за допомогою наведеної в роботі [98] формули (3.11), що виражає фактор φ який становить відношення площі

поперечного перерізу гібридного провару A_H до суми окремих площ поперечних перерізів плазмового (A_P) і лазерного (A_L) проварів

$$\varphi = \frac{A_H}{A_P + A_L} \quad (3.11)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. Відносний коефіцієнт ефективності гібридного лазерно-плазмово зварювання.

| Матеріал | φ |
|----------|-----------|
| 09Г2с | 2,25 |
| AISI 304 | 2,06 |

3.2. Відмінності в реалізації синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі різних товщин із використанням волоконного лазера.

Для врахування збільшення площі поперечного перерізу провару при гібридному зварюванні в роботі [98] запропоновано використання фактору φ , який становить відношення площі поперечного перерізу гібридного провару A_H до суми окремих площ поперечних перерізів TIG (A_T) і лазерного (A_L) проварів. Крім того, для оцінки формуванню швів запропоновано використання параметрів геометрії зварного шва K ($K=D/W$, де D – глибина проплавлення, W – ширина шва) і глибини проникнення Φ ($\Phi=D/T$, де D – глибина проплавлення, T – товщина). Для виконання оцінки результатів лазерно-плазмового зварювання була проведена низка експериментів із зварювання зразків зі сталі AISI 304 (товщиною 2, 4, 6 і 10 мм) лазерним, плазмовим і лазерно-плазмовим способами.

Проведені експерименти дозволили встановити швидкості зварювання і потужності теплових джерел, при яких спостерігається якісне формування зварних стикових з'єднань (табл. 3.6). Також було встановлено, що при зварюванні волоконним лазером листів товщиною до 6 мм використання

присаджувального дроту для покращення формування верхнього валика і кореня шву не є обов'язковим. Проте, зі збільшенням товщини зварюваних листів формування верхнього валика може погіршуватися за рахунок утворення підрізів.

При гібридному зварюванні в діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв із потужністю волоконного лазера до 2 кВт і струмом зварювання до 100 А було встановлено прямо пропорційний вплив потужності лазерного випромінювання на глибину проплавлення і плазмової потужності – на його ширину. Крім того, плазмова складова гібридного процесу сприяла покращенню формування поверхні зварних швів та знижувала імовірність утворення підрізів при зварюванні товщин 4-10 мм (рис. 3.5). Це дозволяє досягати якісного формування швів у всьому діапазоні досліджуваних товщин без застосування присаджувального дроту.

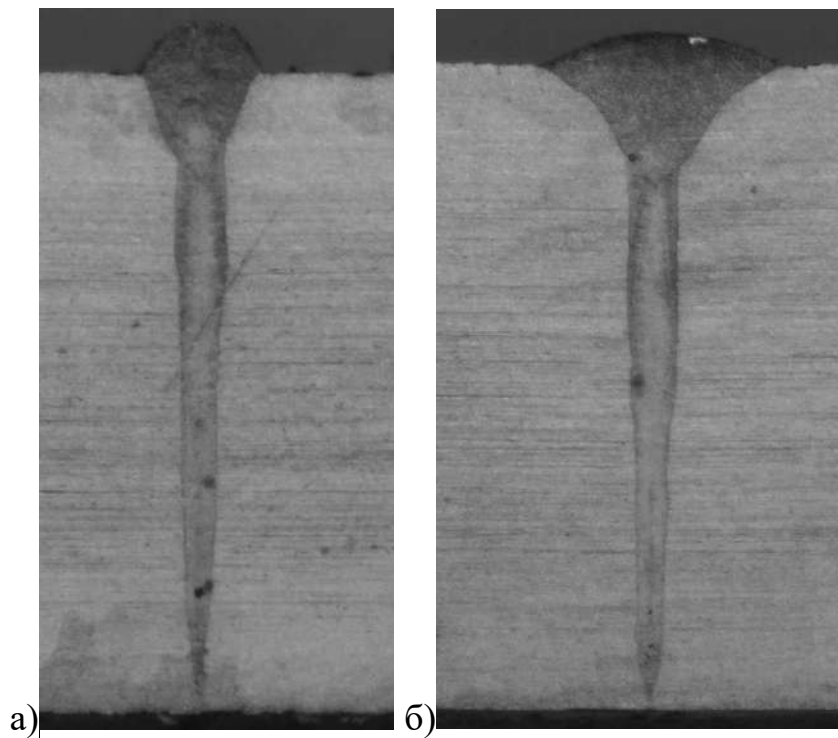


Рис. 3.5. Поперечні перетини проварів в пластині AISI304 ($\delta=4$ мм), виконані лазерним (а) і гібридним (б) способами зі швидкістю 4 м/хв.

Для визначення наявності синергетичного ефекту, характерного для лазерно-плазмового зварювання, порівнювалися площі поперечного перетину проварів, виконаних в пластині AISI304, товщиною 4 мм, трьома досліджуваними способами на швидкостях 2 і 4 м/хв (рис. 3.6). При цьому енергетика кожного з цих способів була незмінною і становила: $P=1,6$ кВт, $I=80$ А при напрузі на дузі 24 В. Площу A_H поперечного перерізу гібридного провару порівнювали із сумою площ A_L і A_P лазерного і плазмового проварів. У разі зварювання зі швидкістю 4 м/хв плазмовий процес практично не створював розплаву зварювальної ванни. Було встановлено, що при швидкості 2 м/хв площа $S_1=3,121$ мм² гібридного провару перевищує суму площин $A_L + A_P = 2,383 + 0,046$ мм² майже на 30%, а при швидкості 4 м/хв (гібрид 1,653 мм², лазер 1,32 мм², плазмове проплавлення відсутнє) – на ~20%. Це свідчить про безумовну наявність синергетичного ефекту при гібридному зварюванні.

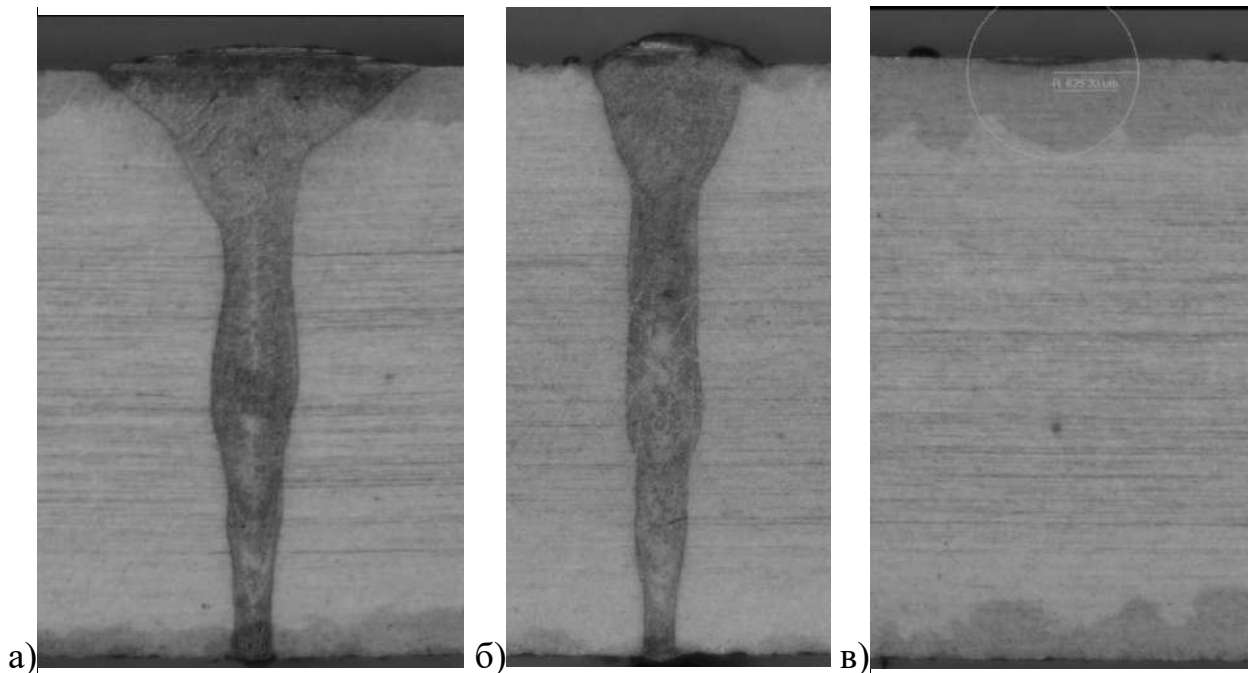


Рис. 3.6. Порівняння площ поперечного перерізу проварів, виконаних зі швидкістю 2 м/хв в пластині AISI304 ($\delta=4$ мм) гібридним (а), лазерним (б) і плазмовим (в) способами.

Для порівняння ефективності досліджених лазерного, плазмового і гібридного зварювальних процесів використали значення їхніх погонних енергій q_{las} , q_{pl} і q_{Σ} , Дж/мм. Дані показники визначали як відношення потужності зварювального джерела до швидкості зварювання, помножене на повний ККД відповідного процесу. Значення ККД брали з попередніх досліджень. Спираючись на виконані дослідження процесів лазерного, плазмового і гібридного зварювання були одержані данні, внесені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6. Порівняння ефективності різних способів зварювання сталі AISI 304 за критерієм погонної енергії (q , Дж/мм).

| № п/п | Спосіб зварювання / кількість проходів | Товщи на листа δ , мм | Потужність $P (P_{las} + P_{pl})$, кВт | Струм I , А | Напруга на дузі U , В | Швидкість зварювання V , м/хв. | $q_{las} + q_{pl}$, Дж/мм | q_{Σ} , Дж/мм |
|-------|--|------------------------------|---|---------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 1. | Лазер / 1 | 2 | 0,8 | - | - | 1,0 | 36 | 36 |
| 2. | Плазма / 1 | 2 | 2,2 | 80 | 28 | 0,3 | 336 | 336 |
| 3. | Гібрид / 1 | 2 | 0,8 + 2,2 | 80 | 28 | 1,5 | 24 + 68 | 92 |
| 4. | Лазер / 1 | 4 | 1,6 | - | - | 1,0 | 72 | 72 |
| 5. | Гібрид / 1 | 4 | 1,6 + 2,2 | 80 | 28 | 1,5 | 48 + 66 | 114 |
| 6. | Гібрид / 1 | 4 | 1,5 + 2,9 | 95 | 30 | 1,5 | 45 + 87 | 132 |
| 7. | Гібрид / 1 | 4 | 1,8 + 2,0 | 83 | 25 | 1,5 | 54 + 60 | 114 |
| 8. | Лазер / 1 | 6 | 1,8 | - | - | 0,8 | 104 | 104 |
| 9. | Гібрид / 1 | 6 | 1,8 + 2,0 | 80 | 25 | 1,2 | 71 + 82 | 153 |
| 10. | Лазер / 2 | 10 | 1,8 | - | - | 0,75 | 108*2 | 108*2 |
| 11. | Гібрид / 2 | 10 | 1,8 + 2,0 | 80 | 25 | 1,0 | (81+90)*2 | 171*2 |

Виконані дослідження показали, що при зварюванні зразків товщиною 2 мм процес не вимагає наявності присаджувальних матеріалів. При підвищенні товщини зразків до 4 мм і більше формування швів переходить в кинджальне. Для підвищення глибини проплавлення спробували зменшити швидкість зварювання.

Порівняння погонних енергій лазерного і гібридного процесів зварювання нержавіючої сталі показало, що різниця між ними дещо зменшується із збільшенням товщини зварюваних зразків. Так, при зварюванні AISI304 товщиною 2 мм погонна енергія гібридного процесу

приблизно вдвічі перевищує енергію лазерного (табл. 3.6, режими №1 і №3), для $\delta=4$ мм ця різниця складає приблизно 60% (табл. 3.6, режими №6 і №7), а для $\delta=6$ мм знаходиться на рівні 50% (табл. 3.6, режими №10 і №11). Подальше збільшення глибини проплавлення (наприклад, до 8 мм) призводить до збільшення цієї різниці до 60% (рис. 3.7).

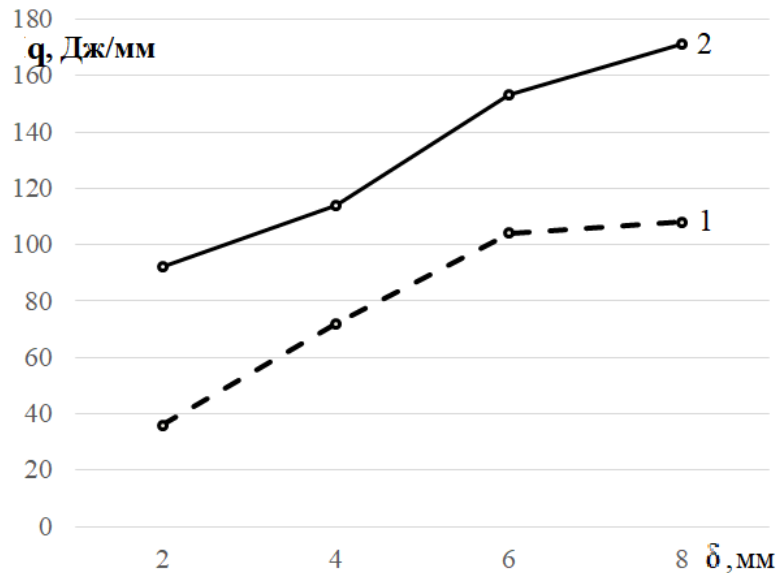


Рис. 3.7. Залежності погонної енергії q [Дж/мм] зварювання від товщини зразка δ [мм] зі сталі AISI304: 1 – лазерне зварювання; 2 – гібридне зварювання.

Дослідження показують, що як при лазерному та лазерно-плазмовому зварюванні фіксована лазерна потужність дозволяє отримати фіксованої глибини проплавлення. При цьому зниження швидкості менше певного, для окремої потужності випромінювання, значення не дозволяє збільшувати глибину проплавлення. Для її підвищення необхідно підвищувати лазерну потужність.

Для випадків гібридного процесу з параметрами режиму $P=1,8$ кВт, $I=80$ А, $U=25$ В при використанні волоконного лазера було побудовано графіки залежностей рекомендованих в роботі [98] параметрів геометрії шва від швидкості зварювання (рис. 3.8). Характер цих залежностей дозволяє стверджувати, що доцільним є підвищення швидкості зварювання від 1,5 до

2,0 м/хв. Подальше підвищення швидкості дещо погіршує проявлення синергетичного ефекту лазерно-плазмового процесу. Проте, при продовженні підвищення швидкості до 4,0 м/хв. спостерігається збільшення параметру геометрії зварного шва K , хоча й не таке інтенсивне, як до того, а зменшення фактору φ не є надто стрімким. Це дозволяє стверджувати, що в розглянутому випадку лазерно-плазмового зварювання діапазон швидкостей 1,5-2,0 м/хв. є найбільш прийнятним.

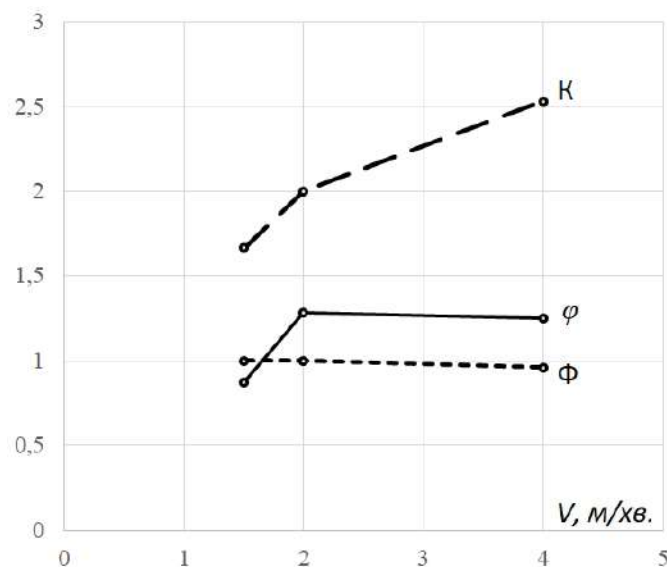


Рис. 3.8. Залежність фактору відношення площин φ , геометрії зварного шва K і глибини проникнення Φ від швидкості гібридного зварювання V [м/хв] сталі AISI304.

3.3. Особливості проявлення синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі різними типами лазерного випромінювання.

Різні довжини хвилі лазерного випромінювання ініціюють різні механізми стабілізації зварювальної дуги, що призводить до різниці в одержуваних результатах. Це пов'язано зі значною залежністю коефіцієнта об'ємного поглинання (κ_0) лазерного випромінювання в дуговій плазмі від довжини його хвилі (λ).

В роботі [104] відмічається, що при використанні в гібридному процесі короткохвильового ($\lambda \approx 1$ мкм) випромінювання твердотільних (Nd:YAG або

волоконних) лазерів поглинання лазерного пучка в дугового плазмі є малоістотним ($\kappa_{\omega} \sim 1 \text{ м}^{-1}$). В цьому випадку під впливом висококонцентрованого джерела лазерного нагріву відбувається інтенсивне випаровування металу з поверхні зварювальної ванни, яке значно впливає на склад, теплові, газодинамічні та електромагнітні характеристики плазми дуги і, як наслідок, призводить до зміни її теплової і динамічної взаємодії зі зварюваним металом. Переважно це стабілізує стовп дуги, сприяє подоланню збурень, викликаних зовнішніми силами, та покращує формування зварного шва.

При використанні в гібридних процесах випромінювання CO_2 -лазерів ($\lambda=10,6 \text{ мкм}$) істотними виявляються два механізми взаємодії випромінювання із дугою, а саме: поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги ($\kappa_{\omega} \sim 100 \text{ м}^{-1}$ [105]) і випаровування металу з поверхні розплаву під впливом сфокусованого лазерного випромінювання. В роботі [106] показано, що взаємодія сфокусованого пучка випромінювання CO_2 -лазера з плазмою дуги неплавкого електроду призводить до певного зменшення потужності випромінювання, яка доходить до зварюваного металу, в результаті часткового поглинання лазерного випромінювання в плазмі стовпа дуги. При цьому рефракція пучка в неоднорідній дуговій плазмі виявляється малоістотною. Потужність, що вкладається в зварюваний метал лазерним променем при гібридному CO_2 -лазер + TIG зварюванні, може бути як більше, так і менше потужності, що вводиться в метал при лазерному зварюванні – в залежності від умов поглинання лазерного випромінювання. Наприклад, формування в зварювальній ванні парогазового каналу сприяє більш ефективному поглинанню лазерного випромінювання, ніж порівняно плоска поверхня розплаву.

Високошвидкісне відеоспостереження показало, що випромінювання із довжиною хвилі $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$ (Nd:YAG-, дисковий, волоконний лазери) не впливає на електричну дугу так само, як у випадку CO_2 -лазера ($\lambda=10,6 \text{ мкм}$) [107].

В роботі [98] було встановлено, що зміна напруги на електричній дузі пов'язана із типом лазерного випромінювання, яке використовується при гібридному зварюванні. Використання CO₂-лазера супроводжується більшим впливом на зміну напруги, який характеризується в її падінні. Також встановлено, що збільшення потужності лазера значно полегшує зміну напруги. При використанні випромінювання CO₂- і Nd:YAG-лазерів помічено практично однакове збільшення площі поперечного перерізу проплавлення при гібридному зварюванні – щонайменше в 1,8 рази порівняно з сумою окремих площ лазерного і дугового проварів.

Як показали проведені дослідження, прояв синергетичного ефекту в гібридних лазерно-плазмових процесах не завжди може давати очікуваний позитивний результат, який виражається в збільшенні глибини проплавлення, або підвищенні швидкості зварювання. Це робить актуальним вивчення питання результативності синергетичного ефекту і стабільності його впливу на збільшення глибини проплавлення.

Для визначення ефективності проявлення синергетичного ефекту в процесі гібридного лазерно-плазмового зварювання виконували провари та зварювання стикових з'єднань пластин товщиною 3,0 мм зі сталі AISI304.

Технологічні дослідження процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання проводилися з використанням дискового і волоконного лазерів з довжинами хвилі випромінювання $\lambda=1,03$ і $1,07$ мкм, відповідно, потужності яких змінювали в межах $0,3...1,4$ кВт. Діаметри фокальної плями становили, відповідно, близько $0,4$ і $0,2$ мм. Потужність стиснутої дуги становила до $2,3$ кВт при зварювальному струмі до 80 А. Заглиблення точки фокусування лазерного випромінювання була на глибині близько $0,5$ мм від поверхні металу. В якості зразків використовували листи сталі AISI 304 розміром $200 \times 100 \times 3$ мм. Було виконано ряд лазерних, плазмових і лазерно-плазмових проварів в пластині зі сталі AISI304 (рис. 3.9). Та зварені стикові зварні з'єднання (рис.3.10). За глибиною і формою проплавлення, отриманою з макрошліфів (рис. 3.11) визначався характер прояву синергетичного ефекту.

Параметри режимів зварювання наведені в табл. 3.7.

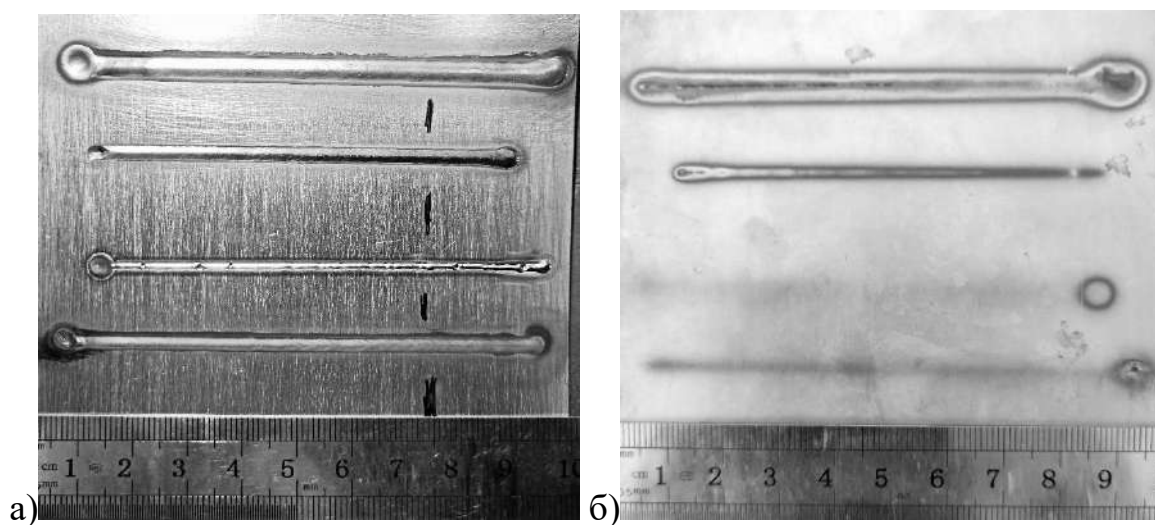


Рис. 3.9. Зовнішній вигляд проварів в пластині сталі AISI304 товщиною $\delta=3,0$ мм: а) – верхня сторона; б) – зворотна сторона.

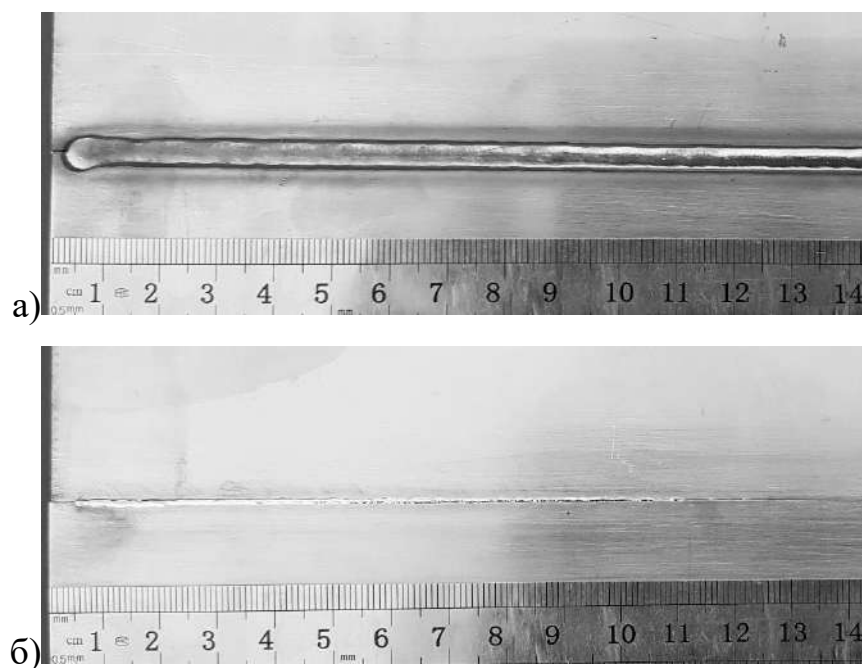


Рис. 3.10. Зовнішній вигляд стикового з'єднання сталі AISI304 $\delta=3,0$ мм: а) – верхня сторона; б) – корінь шва.

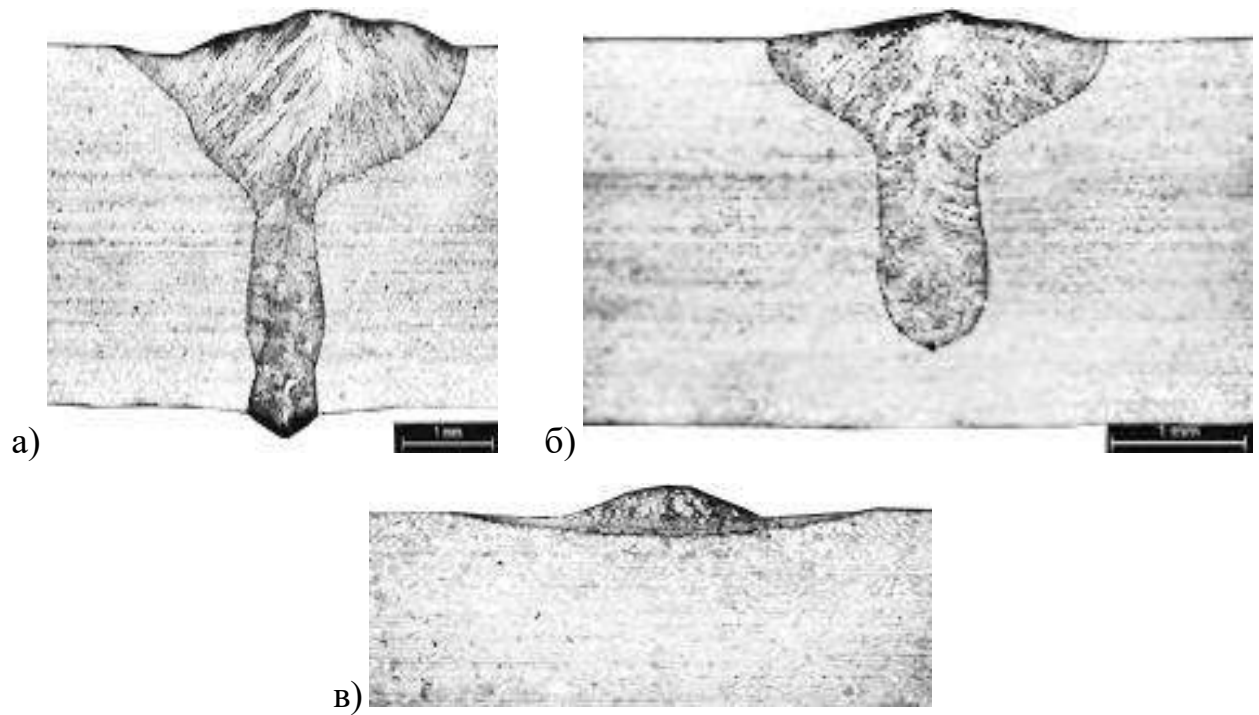


Рис. 3.11. Зовнішній вигляд макрошліфів проварів, виконаних на сталі AISI 304 товщиною 3 мм: а) – гібридним зварюванням (зразок 1); б) – лазерним зварюванням (зразок 2); в) – плазмовим зварюванням (зразок 3)

Таблиця 3.7. Параметри режимів зварювання і геометричні розміри проварів в сталі AISI 304 ($\delta=3,0$ мм), і швидкість зварювання 1,0 м/хв.

| № зразка | Спосіб зварювання | Потужність випромінювання, кВт | Зварювальний струм, А | Ширина шва, мм | Глибина проплавлення, мм | Коефіцієнт форми шва |
|----------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|----------------------|
| 1 | Лазерно-плазмове | 1,4 | 80 | 3,94 | 3,46 | 1,2 |
| 2 | Лазерне | 1,4 | - | 2,55 | 2,55 | 1,0 |
| 3 | Плазмове | - | 80 | 1,83 | 0,25 | 7,3 |

Таблиця 3.8. Параметри лазерного випромінювання генерованого різними типами лазерів.

| Тип лазера | Довжина хвилі, мкм | Діаметр плями фокусування, мм | Орієнтовна щільність потужності, Вт/см ² |
|-----------------|--------------------|-------------------------------|---|
| Волоконний | 1,07 | 0,2 | $1 \cdot 10^8$ |
| Діодний | 0,808...0,97 | близько 1 | $2 \cdot 10^5$ |
| Nd:YAG | 1,06 | 0,4 | $3 \cdot 10^6$ |
| CO ₂ | 10,6 | 0,1...0,3 | $1 \cdot 10^7$ |

В ході проведення експериментів була встановлена висока стабільність прояву синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні сталі AISI 304 в обраному діапазоні потужностей лазерної і плазмової складових за умови дотримання співвідношення цих потужностей близьким до 1:1,0...1:1,5. При зниженні потужності лазерного випромінювання з 1,4 кВт до 0,3...0,4 кВт з одночасним збереженням зварювального струму на рівні 80 А (потужність плазмової складової – близько 2,3 кВт), тобто при співвідношенні потужностей порядку 1:6, спостерігалось зменшення глибини проплавлення з одночасним збільшенням ширини шва. Форма поперечного перерізу шва при цьому наближалася до форми характерної плазмовому зварюванню, що дозволило зробити висновок про зниження ефективності прояву синергетичного ефекту.

Як впливає з табл. 3.7, сума глибин лазерного (зразок 2) і плазмового (зразок 3) проварів становить 2,8 мм, тобто близько 80 % від глибини гібридного лазерно-плазмового провару (зразок 1).

Порівняння вище наведених даних із одержаними раніше результатами лазерно-плазмового зварювання з використанням випромінювання діодного і CO₂-лазера (наприклад, [108]) показує наступне. Випромінювання діодного лазера фокусувалося в пляму відносно великого діаметра (близько 1,0 мм), через що щільність його потужності становила до $2,5 \cdot 10^5$ Вт/см². Менший діаметр плями фокусування випромінювання волоконного лазера (близько 0,05...0,2 мм) дозволяє отримувати більшу щільність потужності (до 10^8 Вт/см²) і значно підвищити глибину проплавлення порівняно із діодним. В усьому іншому вплив обох типів лазерного випромінювання на гібридний процес є подібним. Аналогічна ситуація спостерігалася у разі використання випромінювання Nd:YAG-лазера, що фокусувалося в діаметр близько 0,4 мм (щільність потужності до $3,5 \cdot 10^6$ Вт/см²). Зниження глибини проплавлення при лазерному, лазерно-плазмовому зварюванні з використанням випромінювання Nd:YAG-лазера обумовлено меншим коефіцієнтом поглинання випромінювання (близько 50%).

У разі використання випромінювання CO₂-лазера наявний принципово інший механізм його впливу на гібридний процес. Значна доля такого випромінювання поглинається дуговою плазмою та перегріває її. Через це синергетичний ефект лазерно-плазмового процесу при використанні випромінювання CO₂-лазера більш чітко виражений і збільшує площу поперечного перетину швів до 50% порівняно із сумою площ зварних швів, одержаних окремо лазерною і плазмовою складовими. Проте через менші значення густини потужності випромінювання (до 10⁷ Вт/см²) і коефіцієнт його поглинання глибина проплавлення є меншою, порівняно з використанням волоконного лазера, як при лазерному, так і при гібридному зварюванні.

Дослідження показали [63, 81, 96], що у разі близьких показників енергії, яку підводять до зварюваного зразка (потужності випромінювання і плазми ~2 кВт кожна при швидкості процесу порядку 1,5 м/хв), використання випромінювання діодного лазера у гібридному процесі дозволяє зварювати листи нержавіючої сталі товщиною 2 мм, використання Nd:YAG-лазера – до 3,5 мм, для CO₂-лазерів 3 мм, а використання випромінювання волоконного лазера – понад 4...5 мм. У разі лазерного зварювання на тієї ж швидкості із потужністю 2 кВт глибини провару складуть: для випромінювання діодного лазера – до 1 мм, для Nd:YAG-лазера – до 3 мм, для CO₂-лазера – до 2 мм, а для волоконного лазера – понад 4 мм (орієнтовно 4,8 мм).

Ефективність використання волоконного лазера в лазерно-плазмовому процесі перевершує ефективність використання діодного лазера на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO₂-лазера – на 40% (рис. 3.12). Тому загальний результат застосування випромінювання волоконного лазера у лазерно-плазмовому зварюванні можна вважати найбільш ефективним з позицій глибини проплавлення і підвищення ефективності процесу.

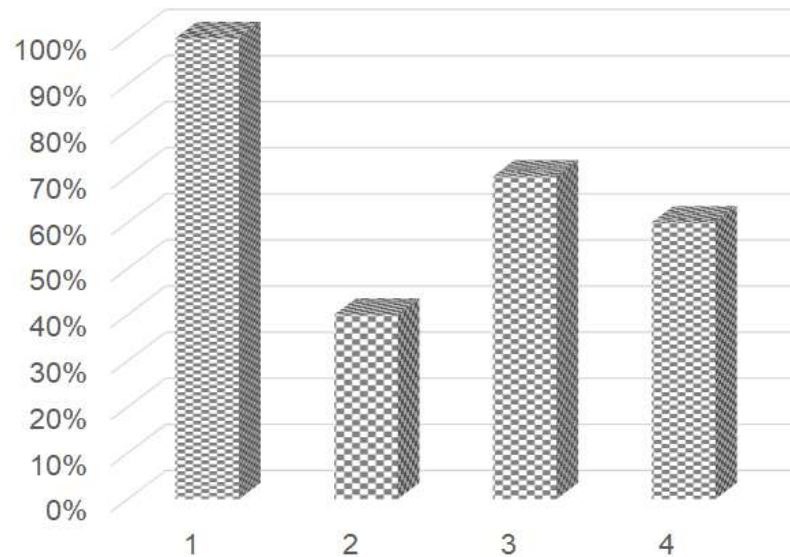


Рис. 3.12. Зміна глибини проплавлення (%) в гібридному процесі зварювання сталі AISI 304 при використанні лазерів: 1 – волоконного; 2 – діодного; 3 – Nd:YAG; 4 – CO₂ (потужність лазера і плазми по ~2 кВт при швидкості ~1,5 м/хв.).

3.4. Висновки по розділу 3.

1. Встановлено, що в процесі лазерно-плазмового зварювання сталей, з використанням випромінювання волоконного лазера, поглинута металом енергія є близькою до арифметичної суми поглинутих енергій при окремій дії лазерного випромінювання та плазмової дуги. Цей показник для лазерно-плазмового зварювання є на 6% вищим від суми показників для окремих складових процесу. Це в основному обумовлено підвищенням напруги на дузі в процесі лазерно-плазмового зварювання в порівнянні з плазмовим.

2. Проведені дослідження показали, що найбільше вкладення теплової енергії у зварюваний зразок відбувається при лазерно-плазмовому зварюванні. Енергія, що поглинута металом, при лазерно-плазмовому зварюванні, на 1-3 кДж перевищує суму енергій лазерної та плазмової складових, при окремій їх дії. Ефективність передачі енергії при лазерно-плазмовому зварюванні становить 66-67%, що перевищує аналогічні показники плазмового та теплопровіднісного лазерного зварювання. При чому ефективність передачі

енергії при лазерному зварюванні з утворенням «кейхолу» є вищою, через покращені умови поглинання випромінювання в «кейхолі». А реалізація синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні в т.ч. з використанням волоконного лазерного випромінювання відбувається головним чином за рахунок гібродинамічних процесів в зварювальній ванні.

3. Підтверджено наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера шляхом порівняння площ поперечних перерізу проварів, виконаних в пластині із нержавіючої сталі AISI304 лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням. Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання. При чому в залежності від швидкості зварювання показник ефективності гібридного процесу φ може бути в діапазоні від 1,2 до 2.25.

4. На відміну від гібридного зварювання з використанням випромінювання CO₂-лазера, при гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера, плазмова складова незначно впливає на глибину проплавлення, однак вона сприяє усуненню таких характерних для лазерного зварювання дефектів формування поверхні зварного шва, як підрізи та гребінь, а також підвищує ефективність процесу зварювання. В діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при потужності випромінювання волоконного лазера від 0,8 до 2,0 кВт та зварювальному струмі до 100 А має місце прямо пропорційне збільшення глибини проплавлення від 2 до 8 мм (залежно від лазерної потужності).

5. Встановлено, що лазерно-плазмові зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера відрізняється від аналогічних процесів з використанням випромінювання діодного, Nd:YAG-, CO₂-лазерів, а саме, – дозволяє збільшити глибину пролавлення. Так, при використанні потужності лазера і плазми по ~2 кВт при швидкості ~1,5 м/хв. глибина провару з використанням волоконного лазера в гібридному процесі збільшується порівняно з використанням діодного лазера на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO₂-лазера – на 40%.

Розділ 4. ВПЛИВ УМОВ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СТАЛЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ.

В розділі описуються мікроструктурні дослідження зварних з'єднань зі сталі AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням. Параметри режимів зварювання розглядуваних способів наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1. Параметри режимів зварювання сталі AISI 304

| № реж. | δ, мм | Спосіб | P, кВт | Iзв, А | Uд, В | Vзв, м/хв | Заглиблення фокусу | q, Дж/мм |
|-----------|-------|------------------|-----------|--------|-------|--------------|-----------------------|---|
| 18 | 2 | Лазерно-плазмове | 0,8 | 80 | 27,2 | 1,5 | 0,7 | $32^{Лаз} + 87^{Плазм} = 119$ |
| 23 | 2 | Лазерне | 0,8 | - | - | 1 | 0,7 | 48* |
| 30 | 2 | Плазмове | - | 80 | 20,8 | 0,3 | - | 332,8** |
| 70 | 6 | Лазерно-плазмове | 1,8 | 80 | 25,2 | 1,17 | 2 | $92,3^{Лаз} + 103,4^{Плазм} = 195,7$ *** |
| 67 | 6 | Лазерне | 1,8 | - | - | 0,81 | 2 | 133,3 |
| 89 | 6 | Плазмове | - | 215 | 25,3 | 0,2 | - | 1632**** |

* - в шві ↓ HV; ** - в ЗТВ ↓ HV; *** - в шві ↑↑ HV; **** - крупнокристалічна структура.

4.1. Особливості формування та відмінності структури зварних швів із нержавіючої сталі при лазерно-плазмовому процесі, в порівнянні із лазерним та плазмовим зварюванням.

4.1.1. Дослідження мікроструктури та мікротвердості з'єднань AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих лазерним, плазмовим та гібридним зварюванням.

Структура основного металу сталі AISI 304 товщиною 2 мм аустенітна з розміром зерен $D_z = 5...20$ мкм при мікротвердості HV=202...253 (2 мм), рис. 4.1 (а, б).

Дослідженнями зварних з'єднань сталі AISI 304 (товщиною 2 мм), отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням показано наступне, табл. 4.2, рис. 4.1 – 4.6.

Таблиця 4.2. Структурні параметри металу зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням.

| Параметри | Зони | | | |
|-----------------------------------|-------------------|---|-----------|--|
| | Шов | ЛС | ОПЗ (ЗТВ) | ОМ |
| Лазерно-плазмові зварювання, 2 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 10...15×40...150 | 8...15×80...170 | - | - |
| α (l / h) | 4...10 | 10...11 | - | - |
| Dз, мкм | - | 8...17 ^{Шов} 5...15 (20) ^{ЗТВ} | 5...15 | 5...18 |
| HV | 232 | 238 | 212 | 232 ^{ОМ1} 225 ^{ОМ2} 202 ^{ОМ3} |
| Лазерне зварювання, 2 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 8...15×30...80 | 5...10×50...100 | - | - |
| α (l / h) | 3,8...5,3 | 10 | - | - |
| Dз, мкм | - | 8...16 ^{Шов} 4...12 ^{ЗТВ} | 5...15 | 5...18 |
| HV | 190 | 253 | 237 | 232 ^{ОМ1} 238 ^{ОМ2} 253 ^{ОМ3} |
| Плазмові зварювання, 2 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 10...50×100...300 | 10...20×60...200 ^{Шов} 5...20×30...100 ^{ЗТВ} | - | - |
| α (l / h) | 6...10 | 6...10 ^{Шов} 5...6 ^{ЗТВ} | - | - |
| Dз, мкм | - | 10...20 ^{Шов} 10...15 ^{ЗТВ} | 10...30 | 5...20 |
| HV | 248 | 220 | 208 | 237 ^{ОМ1} 237 ^{ОМ2} 220 ^{ОМ3} |

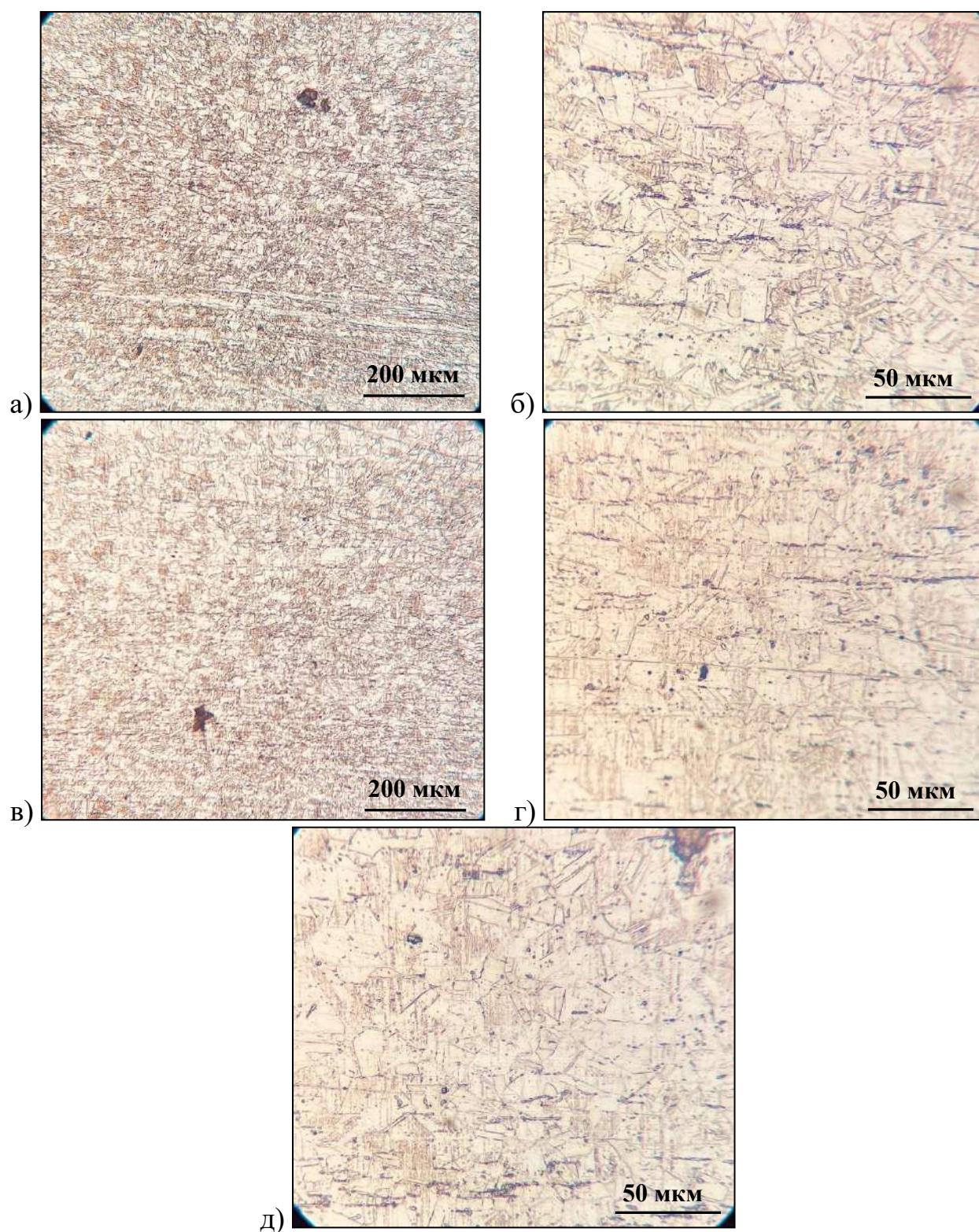
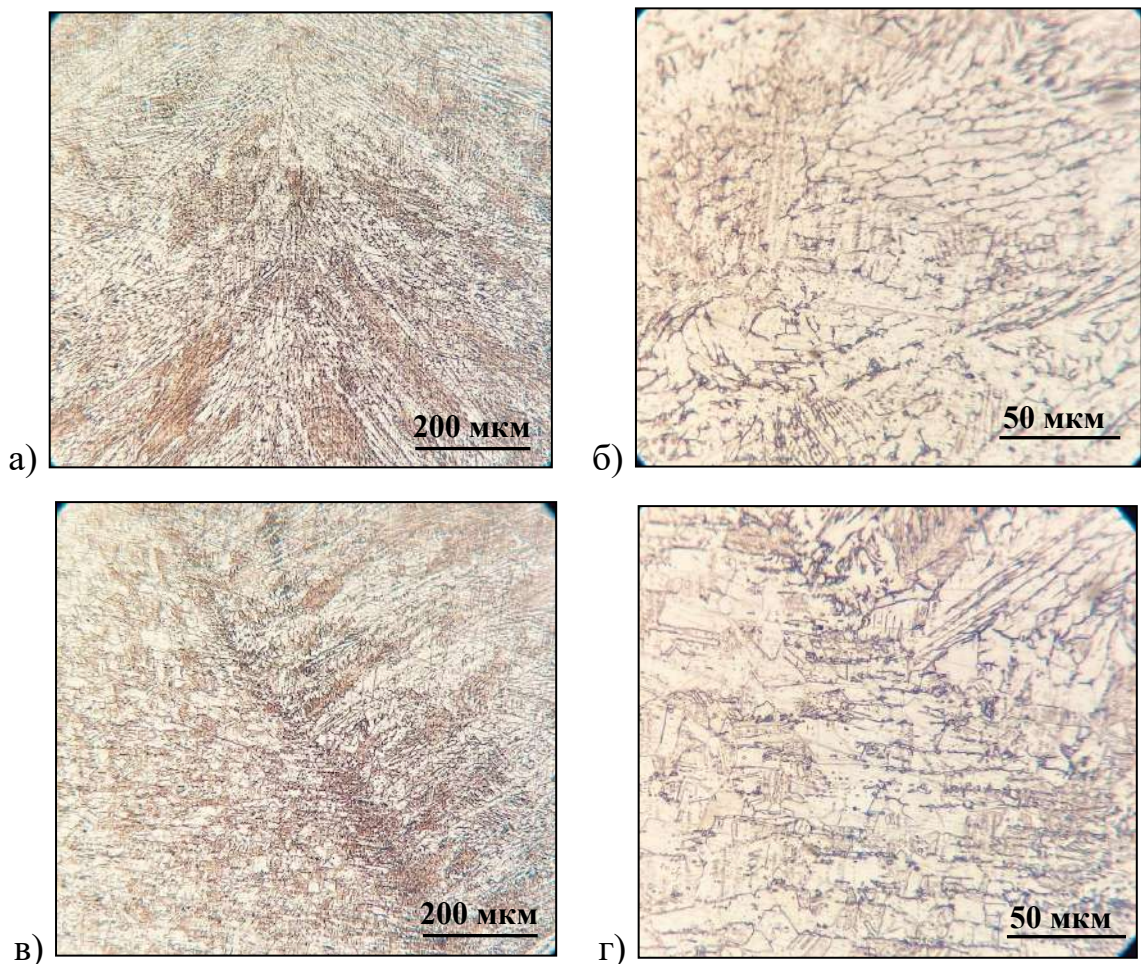


Рис. 4.1. Мікроструктура основного металу зварних з'єднань (2мм): а), б) – лазерно-плазмове зварювання; в), г) – лазерне зварювання; д) – плазмове зварювання (а, в - $\times 100$; б, г, д - $\times 400$).

У зварному з'єднанні, що отримано **лазерно-плазмовим зварюванням** у металі шва розмір кристалітів $h \times l = 10 \dots 15 \times 40 \dots 170$ мкм при мікротвердості $HV=232$ (табл. 4.2, рис. 4.2, а, б), схематичне зображення приведено на рис. 4.2, є. При переході до лінії сплавлення з боку шва довжина кристалітів збільшується ($h \times l = 8 \dots 15 \times 80 \dots 150$ мкм) при зростанні коефіцієнту форми зерна у середньому від $\alpha = 7$ (шов) до $\alpha = 11$ (ЛС) (рис. 4.2, в, г). При цьому незначно збільшується мікротвердість ($HV=238$), табл. 4.2. По лінії сплавлення спостерігаються формування зерен рівновісної форми як з боку шва ($D_z = 8 \dots 17$ мкм), так і з боку ЗТВ ($D_z = 5 \dots 15$ мкм). В металі ЗТВ розмір зерен $D_z = 5 \dots 15$ мкм при незначному зменшенні мікротвердості у порівнянні з металом шва на 9%, лінією сплавлення на 11% та основним металом на 9%, табл.4.2, рис. 4.2 (д, е), рис. 4.6 (а). Зварному з'єднанню, характерний відносно рівномірний рівень мікротвердості при формуванні однорідної дендритної структури в металі шва та дрібнозернистої структури в металі ЗТВ (рис. 4.5, а; рис. 4.6, а).

У зварному з'єднанні, що отримано **лазерним зварюванням** у металі шва розмір кристалітів $h \times l = 8 \dots 15 \times 30 \dots 80$ мкм при мікротвердості $HV=190$ (табл.4.2, рис. 4.3, а, б) схематичне зображення приведено на рис. 4.3, є. При переході до лінії сплавлення з боку шва довжина кристалітів незначно збільшується ($h \times l = 5 \dots 10 \times 50 \dots 100$ мкм) при зростанні коефіцієнту форми зерна в середньому від $\alpha = 4,6$ (шов) до $\alpha = 10$ (ЛС), рис. 4.3, в, г. При цьому помітно зростає (на 33%) мікротвердість ($HV=253$). По лінії сплавлення також спостерігається формування зерен рівноосної форми як з боку шва ($D_z = 8 \dots 16$ мкм), так і з боку ЗТВ ($D_z = 4 \dots 12$ мкм). В металі ЗТВ розмір зерен $D_z = 5 \dots 15$ мкм при незначному зменшенні мікротвердості (на 6%) у порівнянні ЛС та ОМ, рис. 4.3 (д, е), рис. 4.6 (б). При чому зварному з'єднанню характерний не рівномірний рівень мікротвердості. В металі шва мікротвердість знижується у 1,3 рази відносно лінії сплавлення, ЗТВ та основного метала (рис. 4.6, б). Однак значних градієнтів в металі шва по розмірам кристалітів не спостерігається (рис. 4.5, б). У ЗТВ формується дрібнозерниста структура.

У зварному з'єднанні, що отримано **плазмовим зварюванням** (рис. 4.1, в) у металі шва розмір кристалітів $h \times l = 10 \dots 50 \times 100 \dots 300$ мкм при мікротвердості $HV=248$ (табл. 4.2, рис. 4.4, а, б), схематичне зображення приведено на рис. 4.4, є.. При переході до лінії сплавлення з боку шва довжина кристалітів зменшується ($h \times l = 10 \dots 30 \times 60 \dots 200$ мкм) при формуванні зеренної структури розміром $D_z = 10 \dots 20$ мкм (рис. 4.4, в-г). Коефіцієнт форми зерна не змінюється ($\alpha = 6 \dots 10$). З боку ЗТВ незначно, на 11%, зменшується мікротвердість ($HV=220$), табл. 4.2. В металі ЗТВ по лінії сплавлення присутні як кристаліти ($h \times l = 5 \dots 20 \times 30 \dots 100$ мкм, $\alpha = 5 \dots 6$), так і дрібні зерна ($D_z = 10 \dots 15$ мкм). У ЗТВ розмір зерен $D = 10 \dots 30$ мкм при зменшенні мікротвердості у порівнянні з металом шва на 6 %, лінією сплавлення на 5 % та основним металом на 12%, рис. 4.4 (е), рис. 4.6. З'єднанню характерне формування в металі шва крупнокристалічної дендритної структури (рис. 4.5, в) при незначному зниженні мікротвердості у металі ЗТВ (рис. 4.6, в).



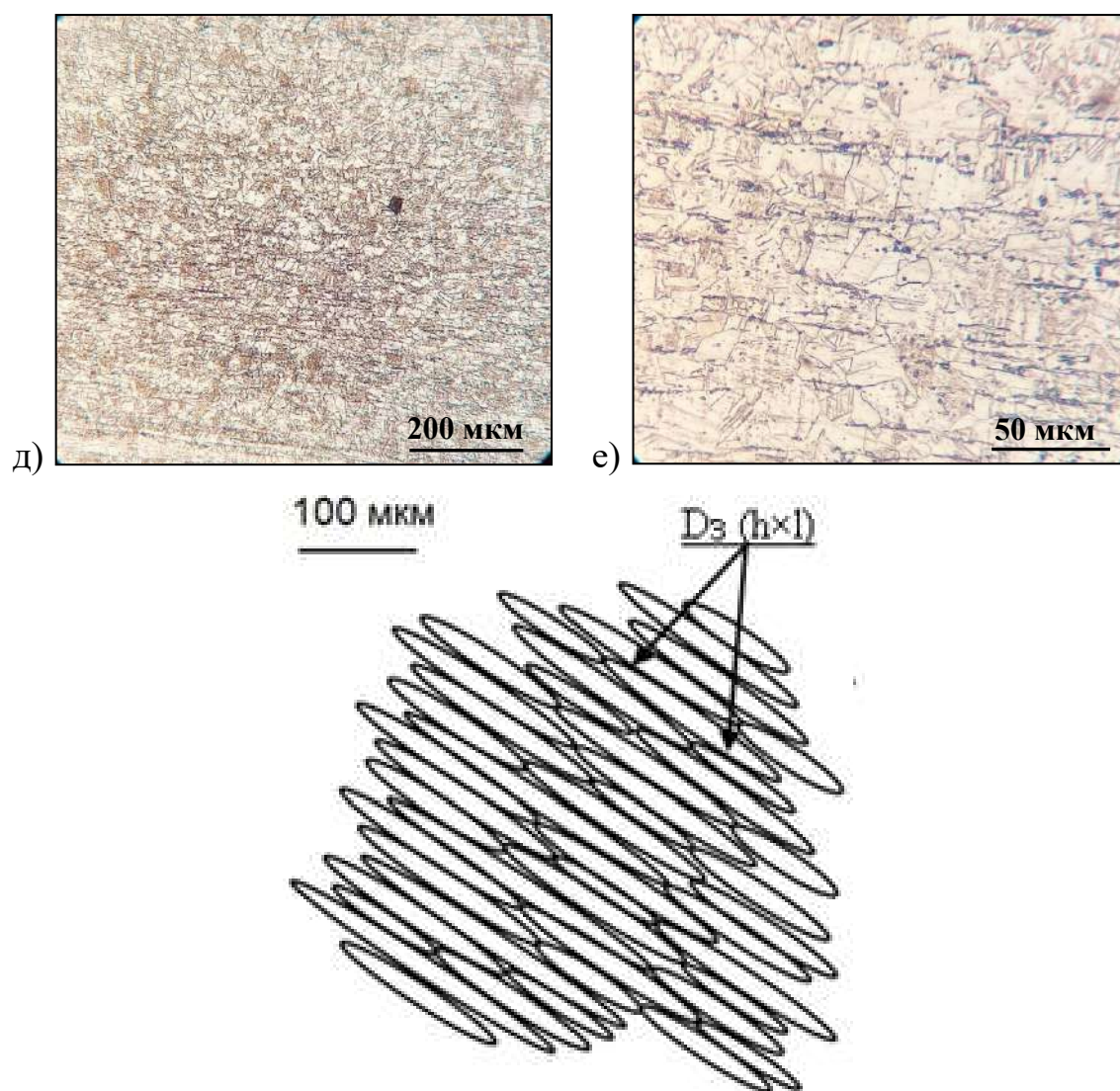
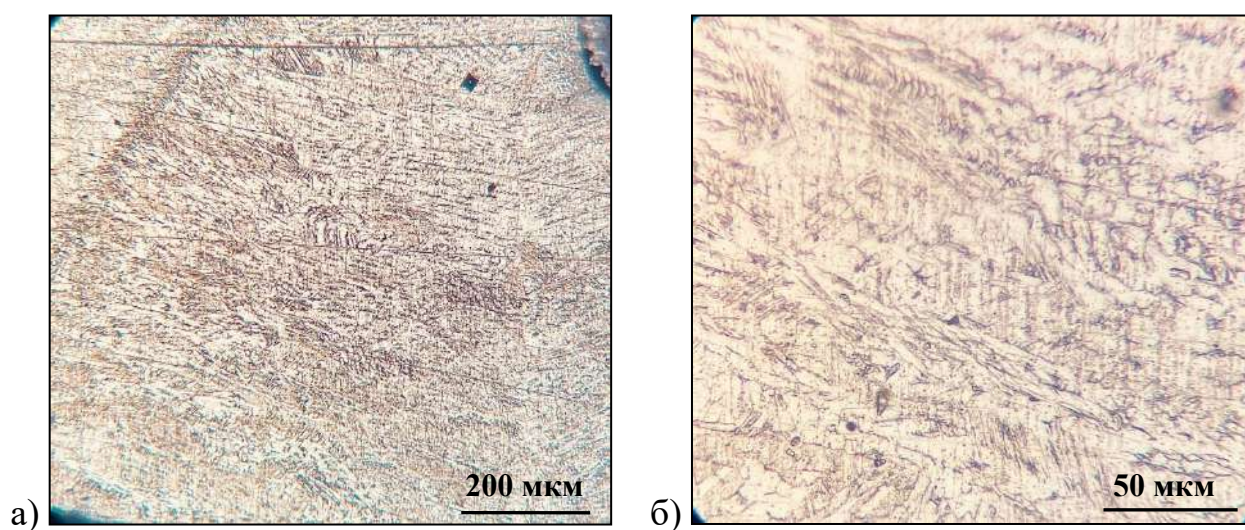


Рис. 4.2. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2 мм), що отримане лазерно-плазмовим зварюванням: а), б) – метал шва; в), г) – ЛС; д), е) – ЗТВ (а, в, д - $\times 100$; б, г, е - $\times 400$).



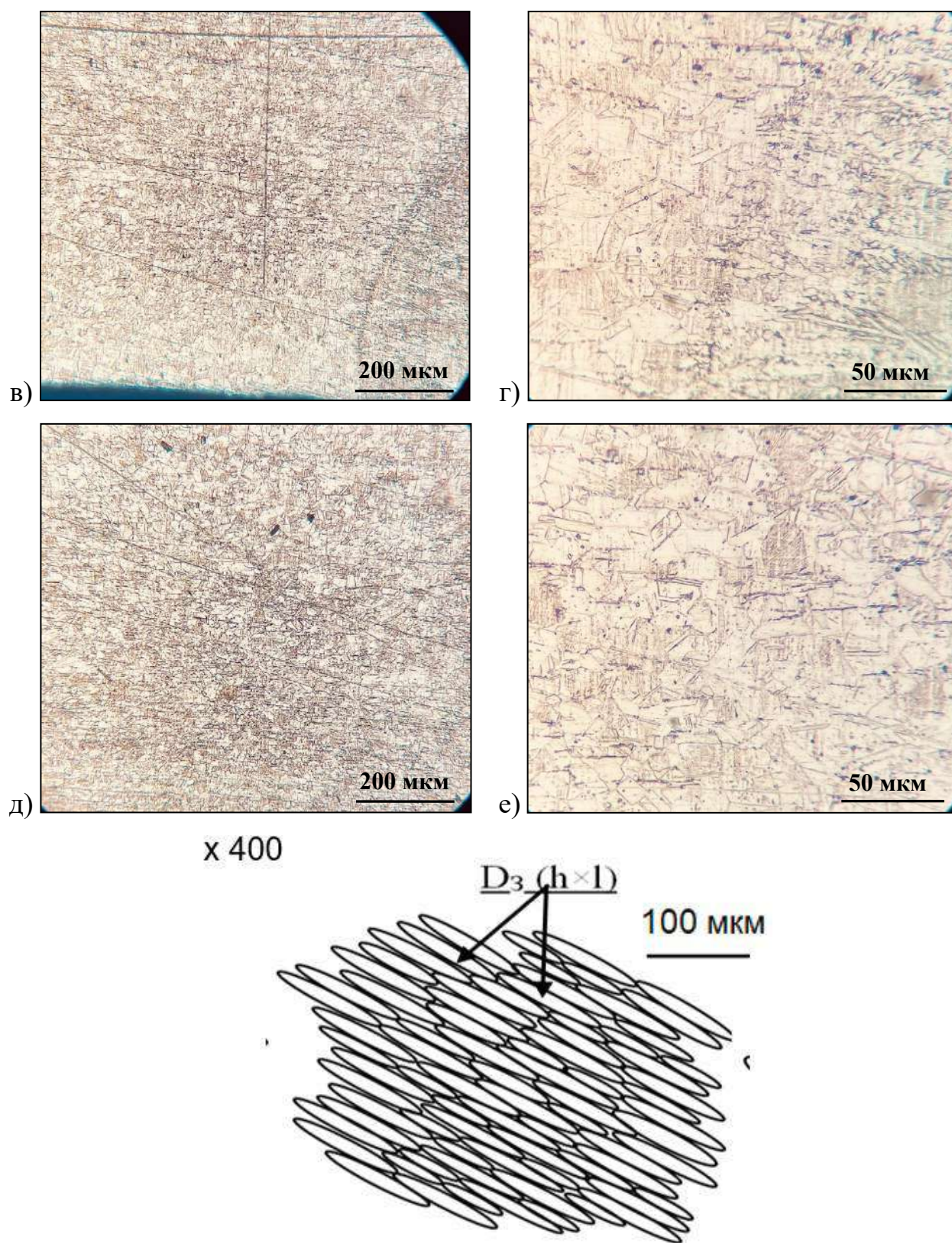
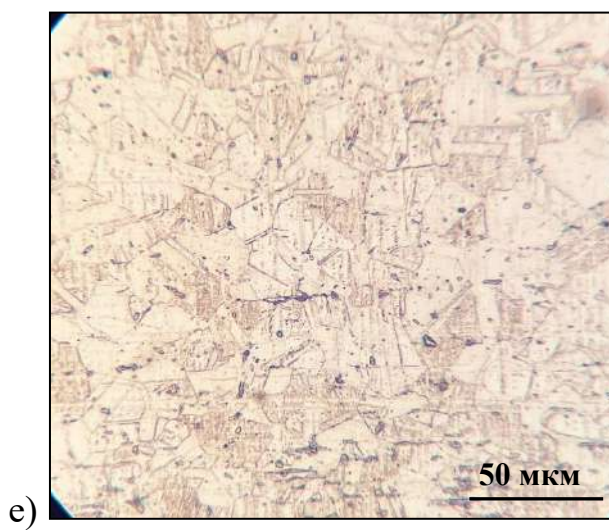
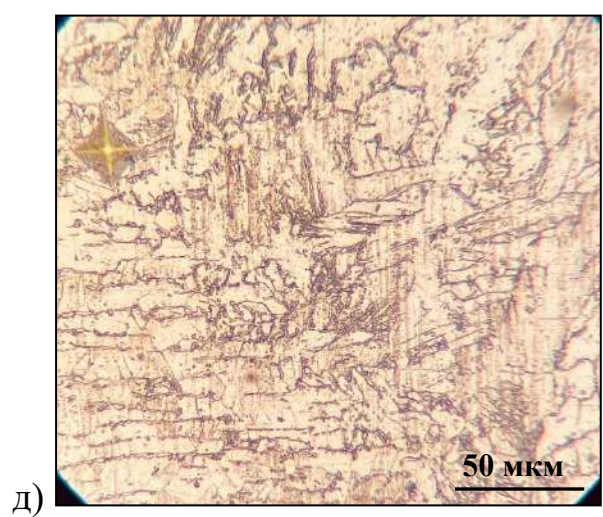
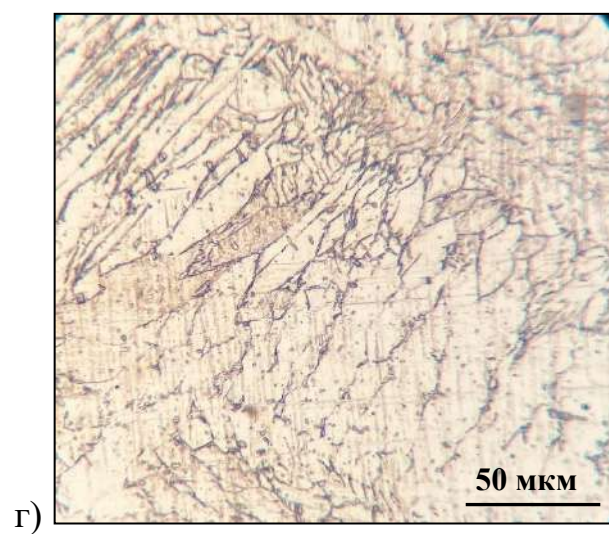
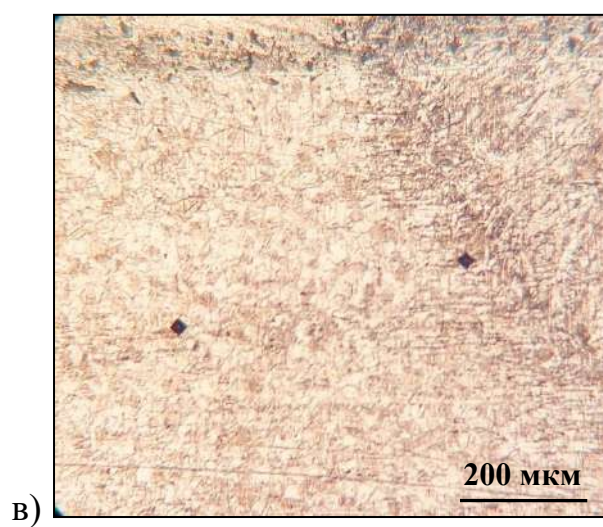
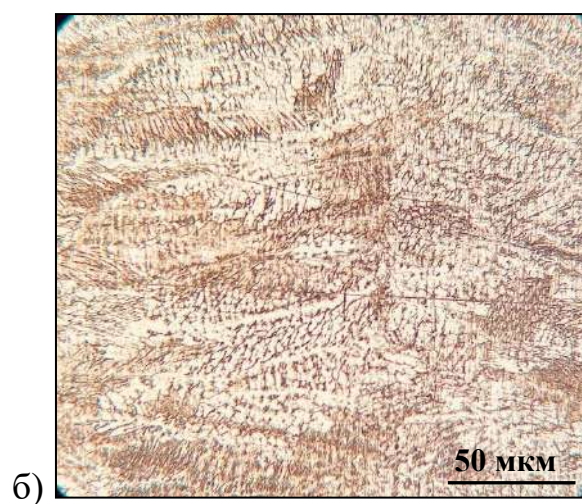
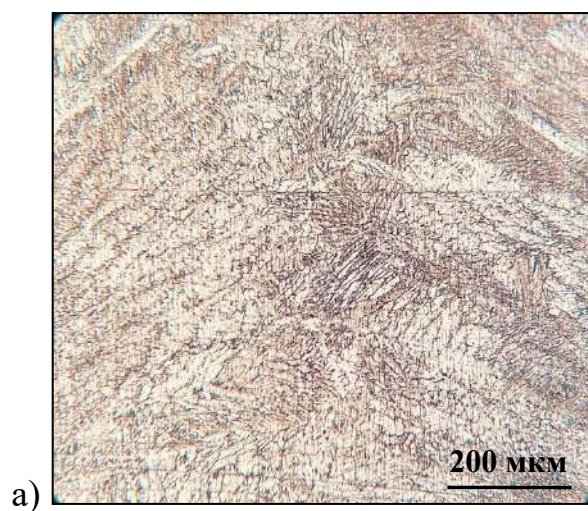


Рис. 4.3. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2 мм), що отримане лазерним зварюванням: а), б) – метал шва; в), г) – ЛС; д), е) – ЗТВ; є) – схематичне зображення мікроструктури зварного шва.

(а, в, д - $\times 100$; б, г, е - $\times 400$).



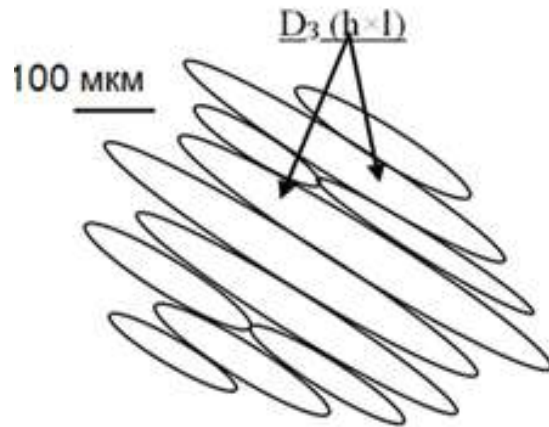


Рис. 4.4. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2 мм), що отримане плазмовим зварюванням: а), б) – метал шва; в), г), д) – ЛС; е) – ЗТВ; є) – схематичне зображення мікроструктури зварного шва (а, в - $\times 100$; б, г, д, е - $\times 400$).

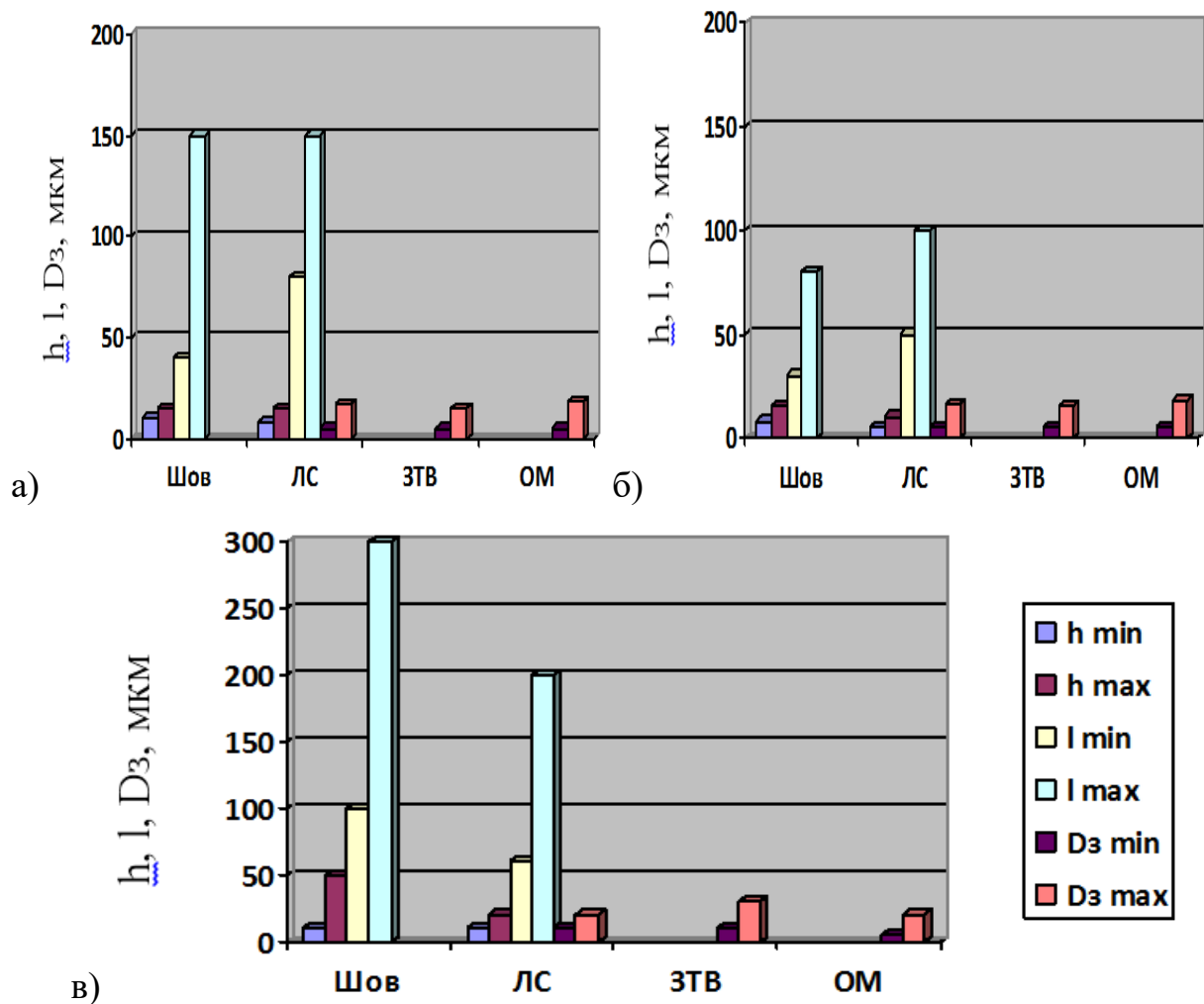


Рис. 4.5. Зміна структурних параметрів в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих гібридним лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

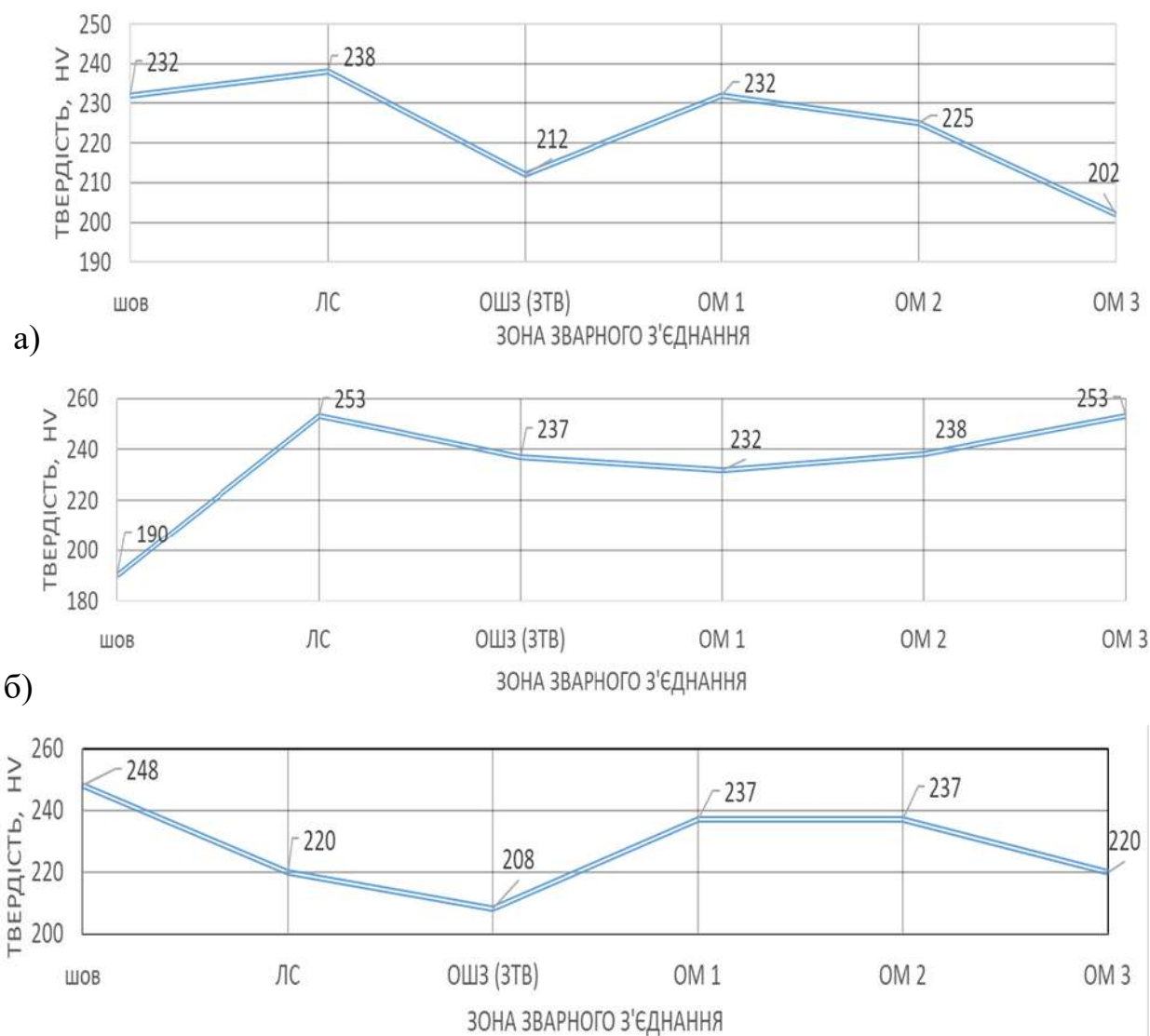


Рис. 4.6. Розподіл мікротвердості по перерізу зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих гібридним лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

4.1.2. Дослідження мікроструктури та мікротвердості з'єднань AISI 304 товщиною 6 мм, отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням.

Дослідженнями зварних з'єднань сталі AISI 304 (товщиною 6 мм), отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням показано наступне, табл. 4.3, рис. 4.7 – 4.14.

Таблиця 4.3. Структурні параметри металу зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 6 мм отриманих лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням.

| Параметри | Зони | | | |
|-----------------------------------|------------------|--|-----------|--|
| | Шов | ЛС | ОШЗ (ЗТВ) | ОМ |
| Лазерно-плазмові зварювання, 6 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 5...20×40...150 | 8...10×30...120 ^{Шов} | - | - |
| α (l / h) | 6...8 | 3...12 | - | - |
| Дз, мкм | - | 12...50 ^{ЗТВ} | 12...50 | 12...70 |
| HV | 384 | 278 | 268 | 225 ^{ОМ1} 238 ^{ОМ2} 212 ^{ОМ3} |
| Лазерне зварювання, 6 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 10...15×50...100 | 8...10×50...100 ^{Шов} | - | - |
| α (l / h) | 5...6,7 | 6,3...10 | - | - |
| Дз, мкм | - | 15...50 ^{ЗТВ} | 10...30 | 10...50 |
| HV | 268 | 220 | 253 | 225 ^{ОМ1} 237 ^{ОМ2} 202 ^{ОМ3} |
| Плазмові зварювання, 6 мм | | | | |
| $h \times l$, мкм | 10...30×20...200 | - | - | - |
| α (l / h) | 2...6,7 | - | - | - |
| Дз, мкм | 50...150 | 10...50 ^{Шов} 30...80 ^{ЗТВ} | 30...100 | 5...30 |
| HV | 197 | 220 | 197 | 237 ^{ОМ1} 225 ^{ОМ2} 232 ^{ОМ3} |

Структура основного металу сталі AISI 304 аустенітна з розміром зерен $D_z = 5...70$ мкм при мікротвердості $HV=202...238$ (рис. 4.14).

У зварному з'єднанні, що отримано **лазерно-плазмовим зварюванням** у металі шва розмір кристалітів $h \times l = 5...20 \times 40...120$ мкм при мікротвердості $HV=384$ (табл. 4.3, рис. 4.8, а - г). При переході до лінії сплавлення з боку шва довжина кристалітів збільшується ($h \times l = 8...10 \times 30...120$ мкм) при зростанні коефіцієнту форми зерна в середньому від $\alpha = 7$ (шов) до $\alpha = 7,5$ (ЛС), табл.4.3, рис. 4.7, д, е). При цьому на 27% зменшується мікротвердість ($HV=278$). По лінії сплавлення з боку ЗТВ спостерігається формування зерен рівноосної форми ($D_z = 10...50$ мкм), рис. 4.9 (а, б). В металі ЗТВ розмір зерен $D_z = 12...50$ мкм (рис. 4.9, в, г) при подальшому зменшенні мікротвердості у порівнянні з металом шва на 30% та лінією сплавлення на 4%. В основному металі $HV=225...237$ (табл. 4.3, рис. 4.13, а, рис. 4.14, а).

Зварному з'єднанню характерне формування однорідної дендритної структури в металі шва та дрібнозернистої структури в металі ЗТВ при відносно рівномірному рівні мікротвердості по зонах ЛС, ЗТВ та ОМ (рис. 4.13, а, рис. 4.14, а). Але в металі зварного шва мікротвердість помітно зростає відносно ЛС і ЗТВ в 1,4 рази, та ОМ в 1,7 разів.

У зварному з'єднанні, що отримано **лазерним зварюванням** (рис. 4.11, б) у металі шва розмір кристалітів $h \times l = 10...20 \times 50...100$ мкм при мікротвердості $HV=168$ (табл. 4.3, рис. 4.11, а – г). При переході до лінії сплавлення з боку шва розмір кристалітів $h \times l = 8...10 \times 50...100$ мкм при зростанні коефіцієнту форми зерна в середньому від $\alpha = 6$ (шов) до $\alpha = 8$ (ЛС), табл. 4.3, рис. 4.11 (д, е).

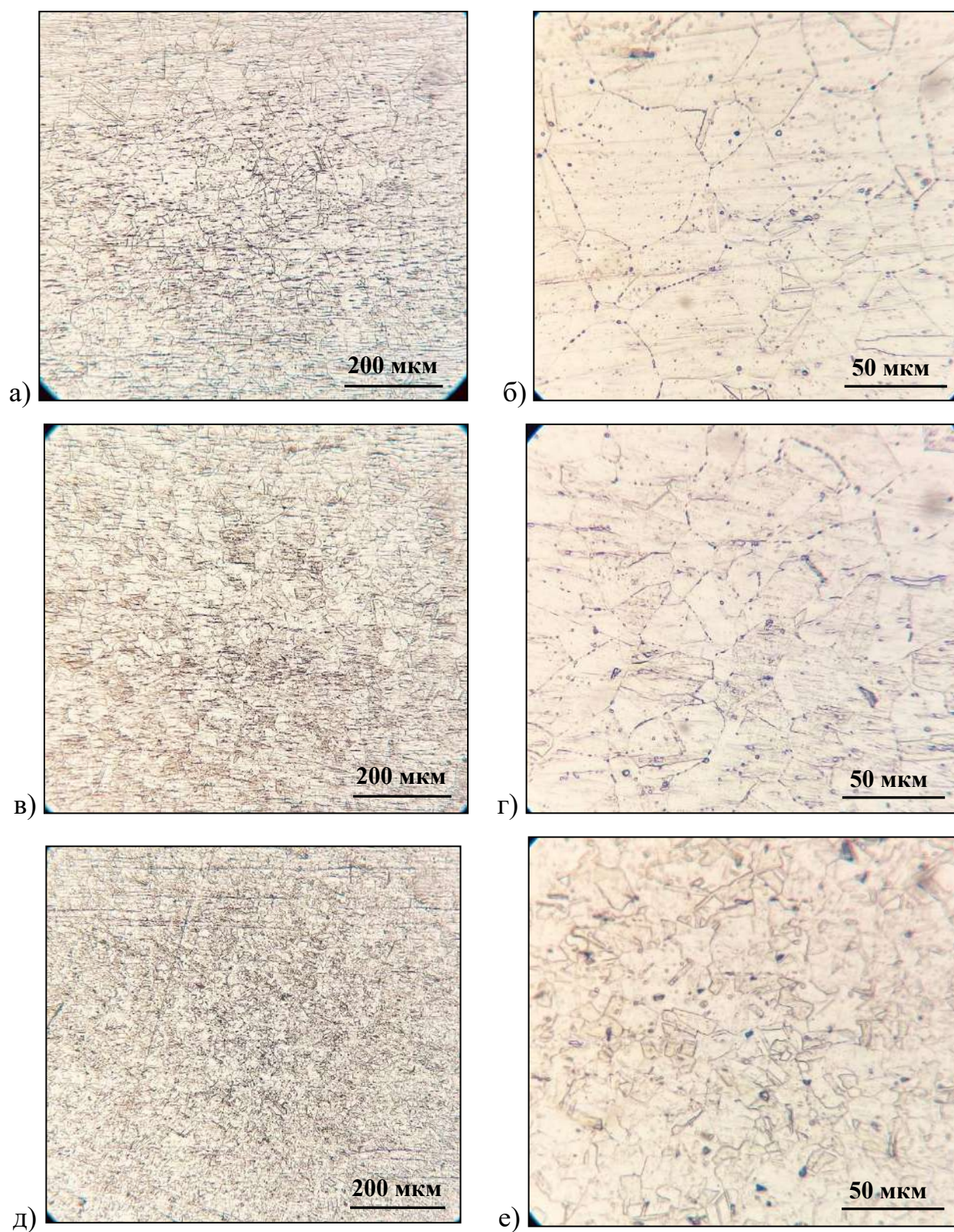


Рис. 4.7. Мікроструктура основного металу зварних з'єднань (6 мм): а), б) – лазерно-плазмове зварювання; в), г) – лазерне зварювання; д), е) – плазмове зварювання (а, в, д - $\times 100$; б, г, е - $\times 400$).

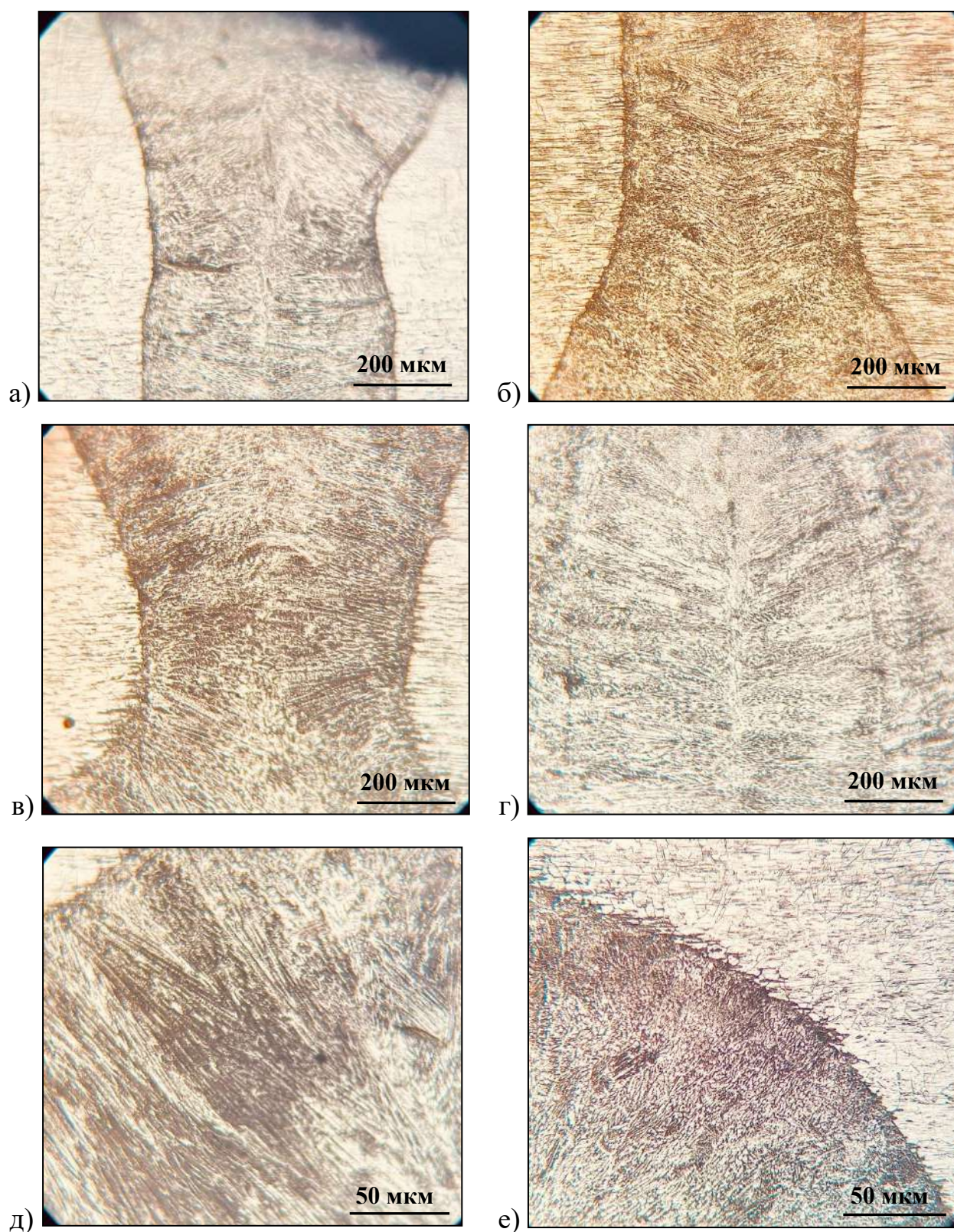


Рис. 4.8. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримане лазерно-плазмовим зварюванням: а), б), в), г) – зварний шов; д) – метал шва біля ЛС; е) – ЛС; (а – г - $\times 100$; б, д, е - $\times 400$).

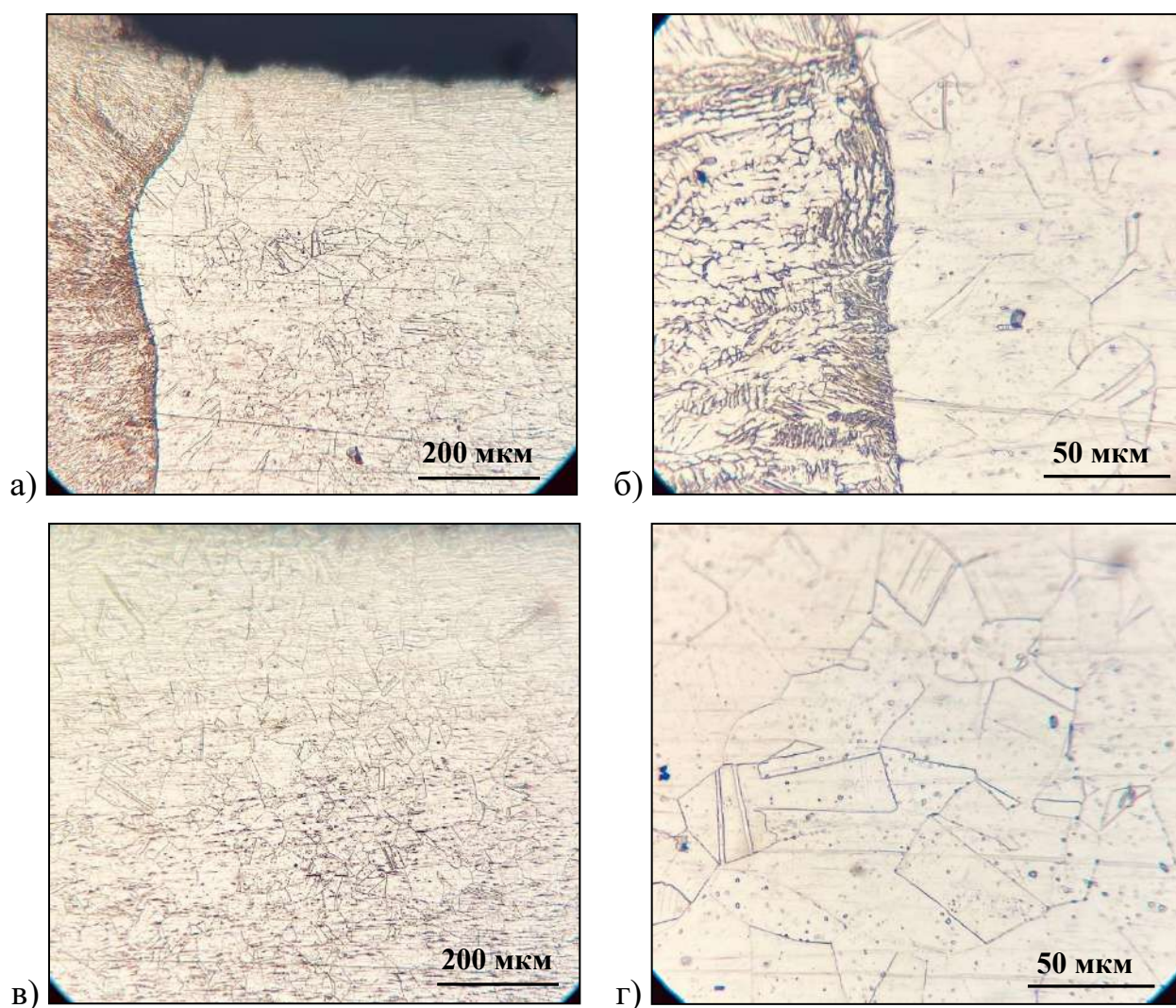
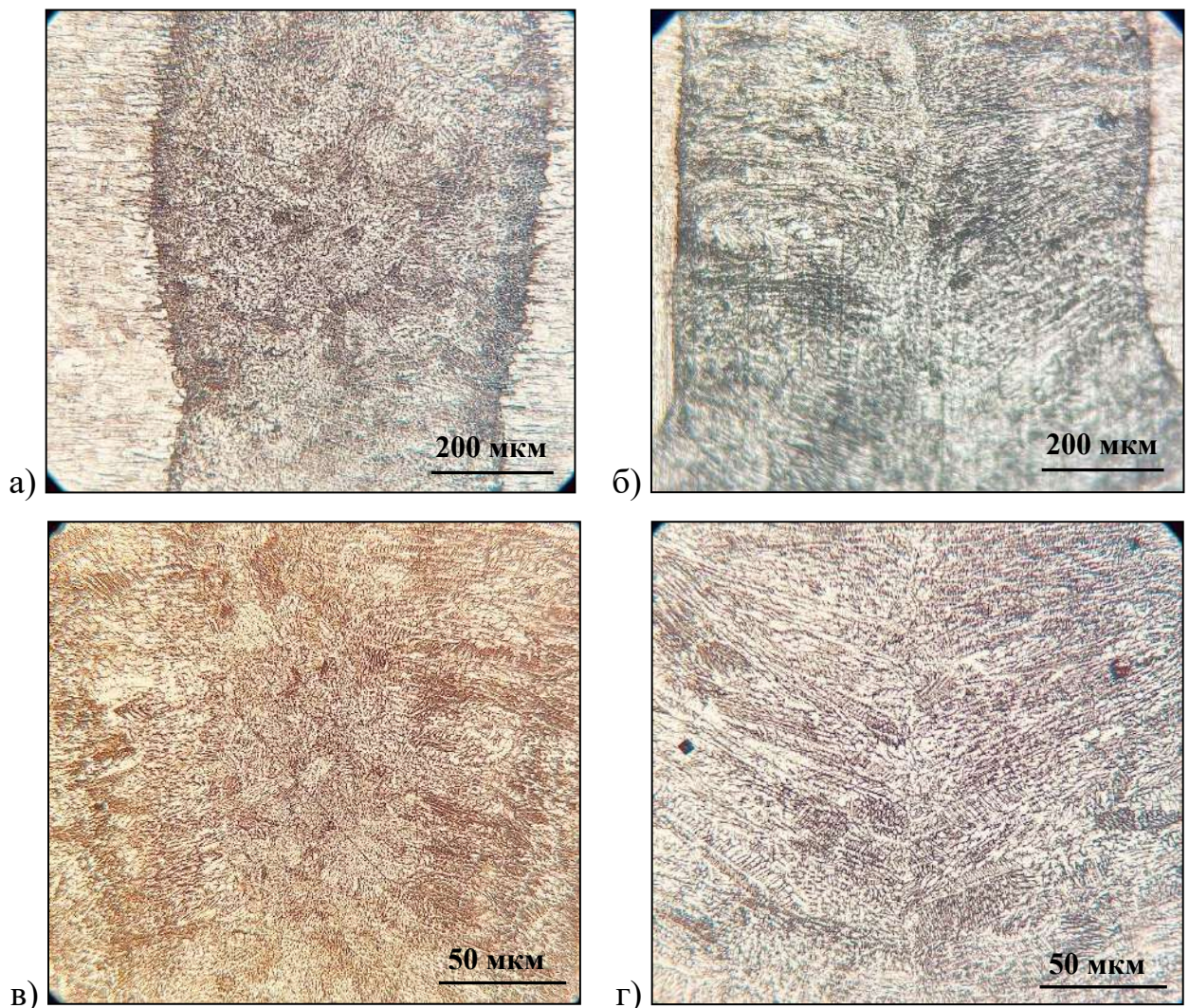


Рис. 4.9. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримане лазерно-плазмовим зварюванням: а), б) – ЛС; в), г) – ЗТВ (а, в, - $\times 100$; б, г- $\times 400$).

При переході до лінії сплавлення зменшується на 18% мікротвердість ($HV=220$), табл. 4.3. По лінії сплавлення з боку ЗТВ спостерігається формування зерен рівноосної форми ($D_z = 15 \dots 50 \text{ мкм}$). В металі ЗТВ розмір зерен $D_z = 10 \dots 30 \text{ мкм}$ (рис. 4.11, а, б) при збільшенні мікротвердості на 15 % у порівнянні лінією сплавлення та на 6% відносно основного металу, рис. 4.14 (б). А зварному з'єднанню характерний відносно рівномірний рівень мікротвердості, але в металі шва мікротвердість збільшується у 1,2 рази відносно лінії сплавлення та основного металу (рис. 4.14, б). Градієнтів в металі шва по розмірам кристалітів не спостерігається (рис. 4.9, б).

У зварному з'єднанні, що отримано **плазмовим зварюванням** у металі шва формується однорідна зеренна структура ($D_z = 50 \dots 150$ мкм) та дендритна з розміром кристалітів $h \times l = 10 \dots 30 \times 20 \dots 200$ мкм ($\alpha = 2 \dots 6,7$) при мікротвердості $HV = 197$ (табл. 4.3, рис. 4.12, а, б). При переході до лінії сплавлення спостерігається формування зерен рівновісної форми як з боку шва ($D_z = 10 \dots 50$ мкм), так і з боку ЗТВ ($D_z = 30 \dots 80$ мкм) при збільшенні мікротвердості ($HV = 220$) на 11% (табл. 4.3, рис. 4.12, в, г, рис. 4.14, в). В металі ЗТВ розмір зерен $D_z = 30 \dots 100$ мкм (рис. 4.12, д, е), мікротвердість у порівнянні з лінією сплавлення зменшується на 10% ($HV = 197$) та на 7% у порівнянні з основним металом, рис. 4.14 (в). Зварному з'єднанню характерне формування в металі шва та ЗТВ крупнокристалічної структури при незначному підвищенні мікротвердості по ЛС (рис. 4.13, в, рис. 4.14, в).



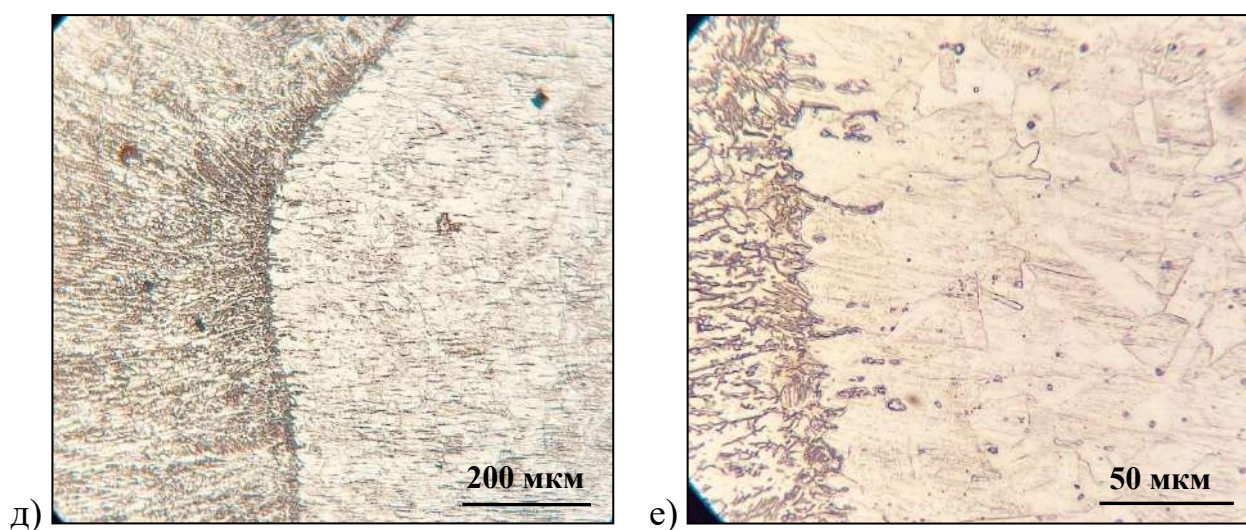


Рис. 4.10. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримане лазерним зварюванням: а) – г) – шов; д), е) – ЛС (а, б, д - $\times 100$; в, г, е - $\times 400$).

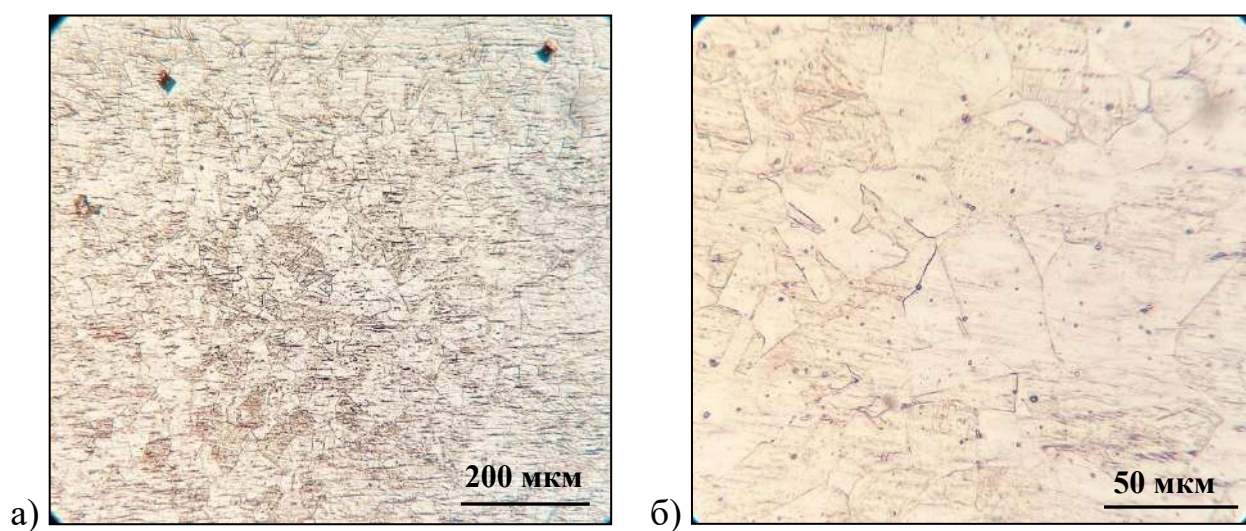


Рис. 4.11. Мікроструктура металу ЗТВ зварного з'єднання (6 мм), що отримане лазерним зварюванням (а, - $\times 100$; б - $\times 400$).

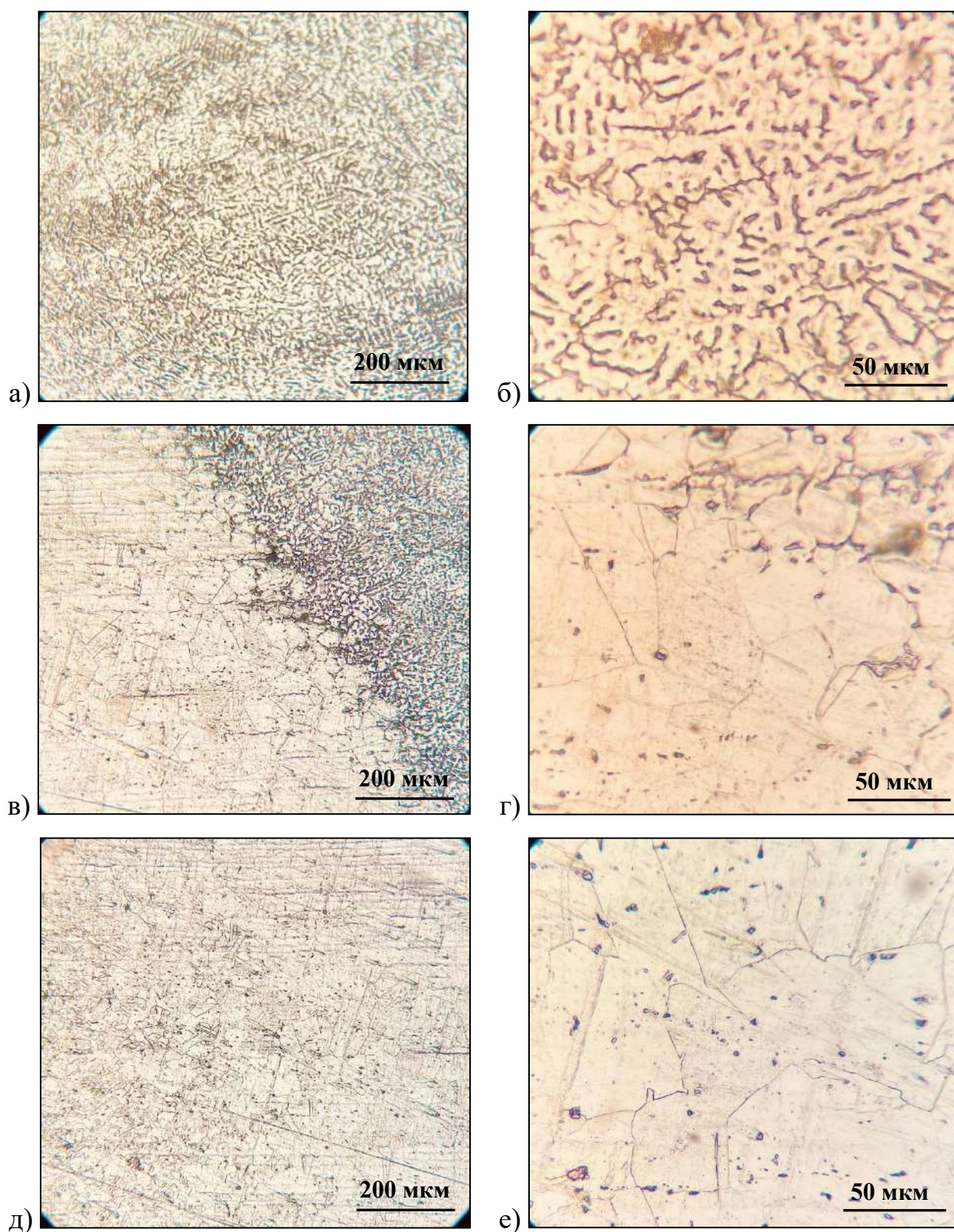


Рис. 4.12. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримане плазмовим зварюванням: а), б) – метал шву; в), г) – ЛС; д), е) – ЗТВ (а, в, д - $\times 100$; б, г, е - $\times 400$).

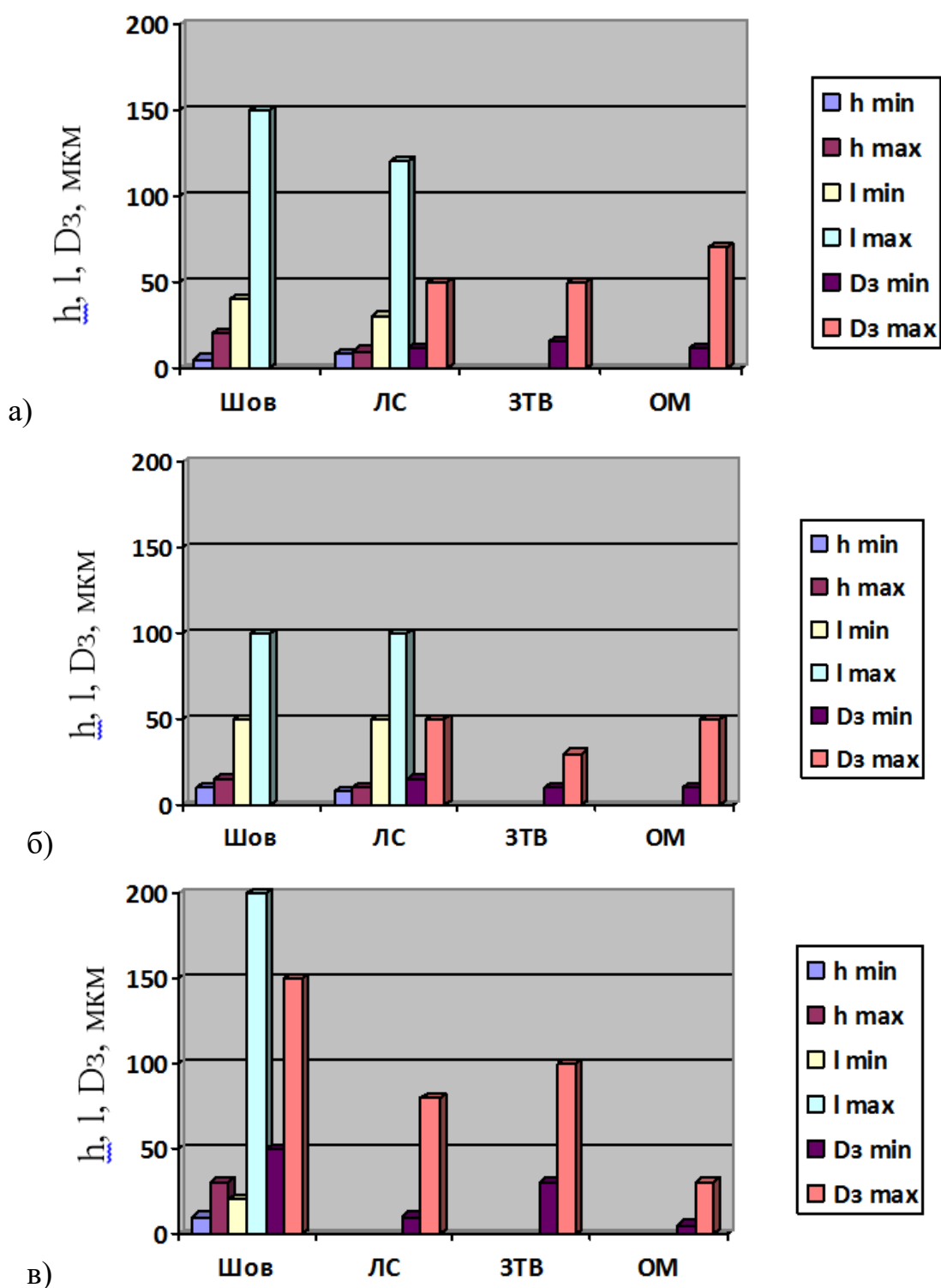


Рис. 4.13. Зміна структурних параметрів в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих гібридним лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

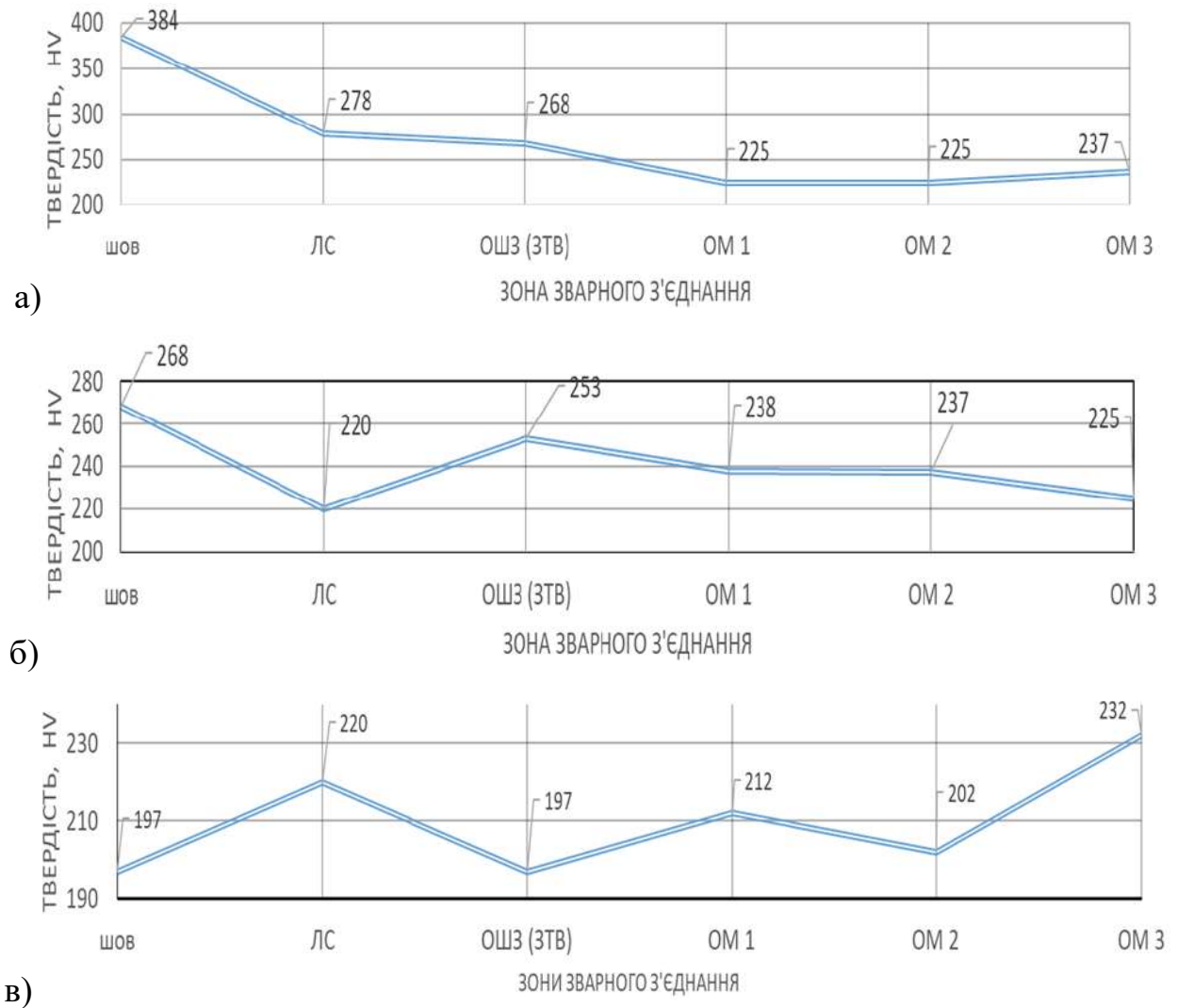


Рис. 4.14. Розподіл мікротвердості по перерізу зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим зв (в) зварюванням.

4.1.3. Порівняльний аналіз структурних змін в металі з'єднань сталі AISI 304 в залежності від способу зварювання.

При застосуванні розглядуваних способів зварювання відповідно до зміни товщини зварюваного металу змінювалася погонна енергія зварювання, табл. 4.1.

За результатами експериментальних досліджень зварних з'єднань сталі AISI 304 по зонах (метал швів, лінія сплавлення, ЗТВ) узагальнено зміни мікротвердості (HV) та структурних параметрів: ширини (h) та довжини (l) кристалітів, коефіцієнту форми зерна ($\alpha = l / h$), розміру зерен (D_z).

При порівнянні параметрів мікротвердості та зеренної структури, що формується в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих розглядуваними способами зварюванням з прив'язкою до параметрів режимів зварювання встановлено наступне (рис. 4.15, рис. 4.16).

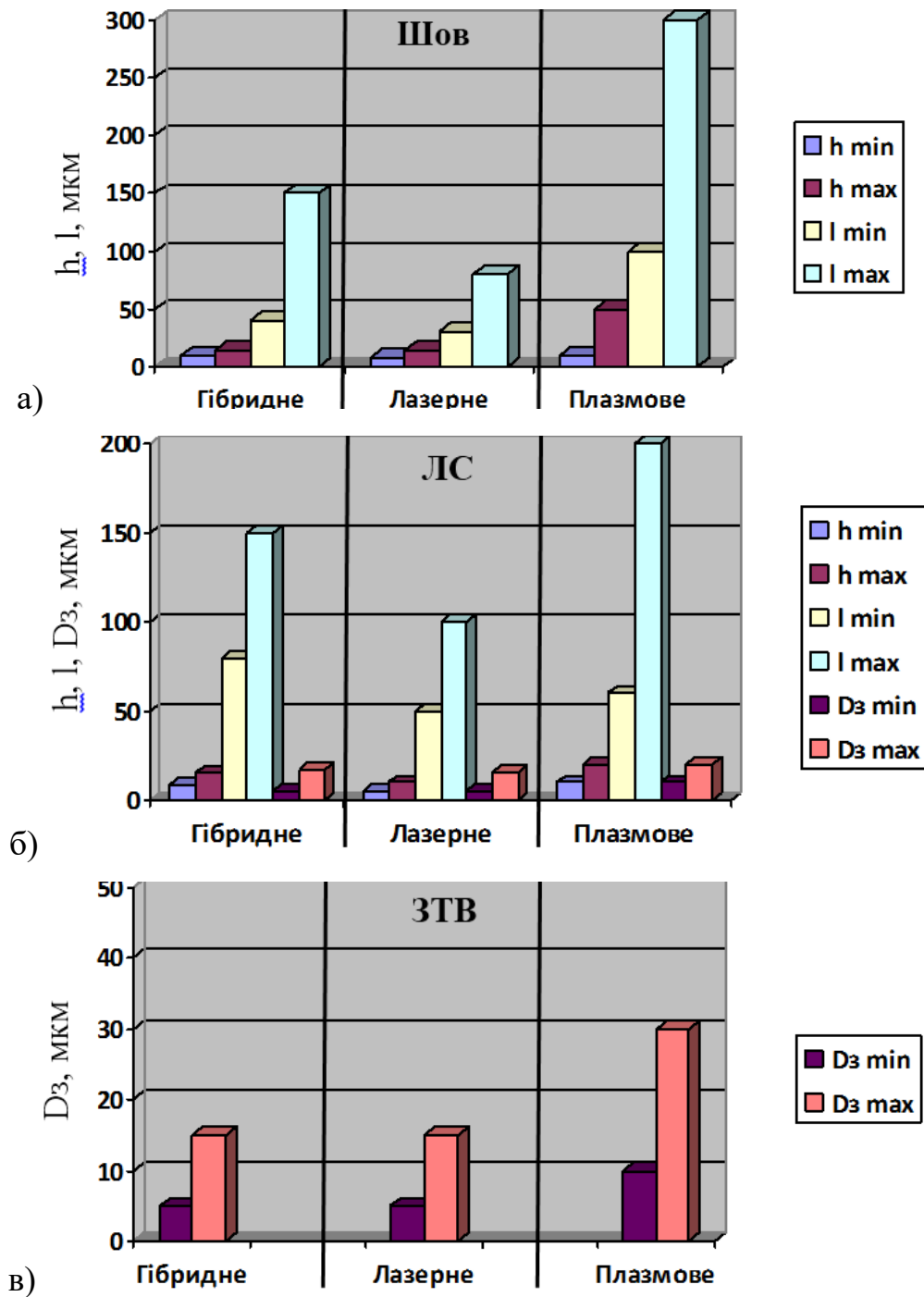


Рис. 4.15. Зміна структурних параметрів в металі зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням: а) – метал швів; б) – ЛС; в) – ЗТВ.



Рис. 4.16. Порівняльний розподіл мікротвердості по перерізу зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зв зварюванням.

У разі лазерного зварювання при $V_{зв} = 1$ м/хв розмір кристалітів в металі зварного шва найменший ($h \times l = 8...15 \times 30...80$ мкм) при мінімальному коефіцієнті форми зерна ($\alpha = 3,8...4,5$), табл. 4.3, рис. 4.15 (а). При лазерно-плазмовому зварюванні із $V_{зв} = 1,500$ м/хв при такій же потужності лазерного випромінювання ($P = 800$ Вт) ширина кристалітів приблизно однакова, але їх довжина збільшується в середньому у 1,7 рази ($h \times l = 8...15 \times 60...200$ мкм) при збільшенні α до 4...10. Біля лінії сплавлення спостерігається аналогічна тенденція, рис. 4.15 (б). При цьому в ЗТВ при лазерному та лазерно-плазмовому зварюванні формується однакова за розмірами зерен структура ($D_z = 5...15$ мкм), рис. 4.15 (в). При плазмовому зварюванні $V_{зв} = 0,3$ мм/хв структура укрупнюється у 2...3 рази як в металі зварного шву ($h \times l = 10...50 \times 100...300$ мкм), так і в ЗТВ ($D_z = 10...30$ мкм). Отримані результати зміни параметрів зеренної структури при лазерному та лазерно-плазмовому зварюванні можна зв'язати з високими швидкостями процесів, а саме швидкостями зварювання, та відповідно швидкостями охолодження, які значно прискорюють кристалізаційні процеси. Рівень тепловкладання (погонна енергія q) у разі лазерного зварювання складає $q = 48$ кДж/м, у разі лазерно-плазмового – $q = 119$ кДж/м, табл. 4.1. При плазмовому зварюванні низька швидкість зварювання $V_{зв} = 0,3$ мм/хв призводить до підвищення

тепловкладання ($q = 332,8$ кДж/м). Саме це сприяє утворенню крупнокристалічної зеренної структури.

Що стосується мікротвердості, найбільш рівномірний рівень по зонах зварних з'єднань спостерігається у металі зварних з'єднань, що отримані лазерно-плазмовим та плазмовим зварюванням (рис. 4.16). У разі лазерного зварювання рівень мікротвердості не рівномірний (рис. 4.16). В металі шва мікротвердість знижується у 1,2...1,3 рази відносно ЛС, ЗТВ та ОМ. Але в цьому випадку, як наведено вище, в металі шва формується найбільш дрібніша структура з найменшим коефіцієнтом форми зерна, табл. 4.3.

Таким чином, з точки зору структури та її параметрів найбільш сприятлива структура формується в металі зварного з'єднання, що отримано **лазерно-плазмовим зварюванням** (товщина 2 мм).

При порівнянні параметрів мікротвердості та зеренної структури, що формується в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 6 мм, отриманих розглядуваними способами зварюванням встановлено наступне. Для зварних з'єднань, що отримані лазерним та плазмовим зварюванням спостерігається переважно рівномірний рівень мікротвердості (рис. 4.17). Але у разі плазмового зварювання в металі шва, ЛС та ЗТВ утворюється найбільш крупнокристалічна структура (рис. 4.18).



Рис. 4.17. Порівняльний розподіл мікротвердості по перерізу зварних з'єднань сталі AISI 304 (товщиною 6 мм), отриманих гібридним лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням.

У разі лазерного зварювання при $V_{зв} = 0,81$ м/хв, табл. 4.1) розмір кристалітів в металі зварного шва найменший ($h \times l = 10 \dots 15 \times 50 \dots 100$ мкм) при коефіцієнті форми зерна ($\alpha = 5 \dots 6,7$), табл. 4.3, рис. 4.18 (а). При лазерно-плазмовому зварюванні при $V_{зв} = 1,17$ м/хв, табл. 4.1 при такій же потужності випромінювання ($P = 1,8$ кВт) ширина кристалітів в середньому приблизно однакова, але їх довжина збільшується у 1,3 рази ($h \times l = 5 \dots 20 \times 40 \dots 150$ мкм) при збільшенні α до $6 \dots 8$, рис. 4.18 (а). Біля ЛС спостерігається аналогічна тенденція, рис. 4.18 (б). При цьому в ЗТВ при лазерному зварюванні формується найбільш дрібна зеренна структура ($D_z = 10 \dots 30$ мкм), дрібніша за розмірами у 1,6 раза ($D_z = 12 \dots 50$ мкм) у порівнянні з лазерно-плазмовим зварюванням та у 2 рази ($D_z = 30 \dots 100$ мкм) у порівнянні із плазмовим, рис. 4.18 (в). При плазмовому зварюванні $V_{зв} = 0,2$ м/хв, табл. 4.1 в металі зварного шва формується рівновісна зеренна структура ($D_z = 50 \dots 150$ мкм) та комірчасто-дендритна з розміром кристалітів $h \times l = 10 \dots 30 \times 20 \dots 200$ мкм (рис. 4.18, а). У порівнянні із лазерним та гібридним зварюванням, дендритна структура укрупнюється (у $1,3 \dots 1,5$ рази) як в металі зварного шва, так і зеренна (у $1,6 \dots 2$ рази) в металі в ЗТВ, рис. 4.18 (а, в). Характер зеренної структури при лазерному та лазерно-плазмовому зварюванні у порівнянні з плазмовим зварюванням сталі AISI 304 товщиною **6 мм** пов'язані з високими швидкостями зварювання ($V_{зв} = 0,81$ м/хв - лазерне зварювання, $V_{зв} = 1,17$ м/хв – лазерно-плазмове зварювання) та, відповідно охолодження. Рівень тепловкладання у разі лазерного зварювання складає $q = 133,3$ кДж/м, лазерно-плазмового - $q = 195,7$ кДж/м, табл. 4.3. При плазмовому зварюванні низька швидкість зварювання ($V_{зв} = 0,2$ м/хв) при збільшенні зварювального струму ($I = 215$ А) сприяє підвищенню тепловкладання ($q = 1632$ кДж/м). Це призводить до утворення крупнокристалічної зеренної структури та зниження мікротвердості в металі зварного шву та ЗТВ.

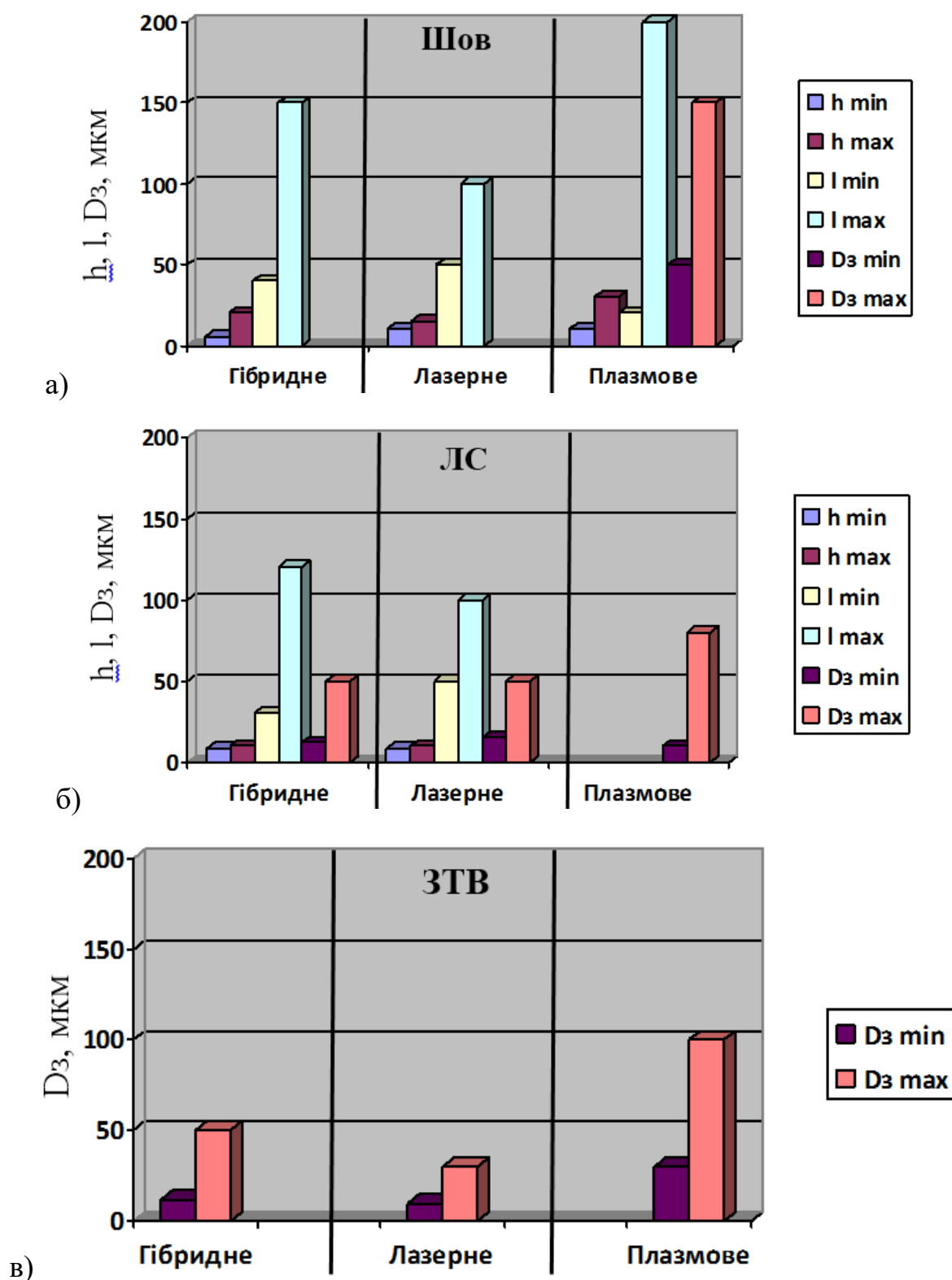


Рис. 4.18. Зміна структурних параметрів в металі зварних з'єднань AISI 304 товщиною 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням: а) – метал швів; б) – ЛС; в) – ЗТВ.

У разі лазерно-плазмового зварювання рівень мікротвердості в металі шва у 2 рази вище відносно зварного з'єднання, що отримане плазмовим, та у 1,4 рази – відносно лазерного (рис. 4.17). В металі шва ($HV=384$) спостерігається градієнт мікротвердості при переході від лінії сплавлення ($HV=278$) та ЗТВ ($HV=268$) при підвищенні HV у 1,4 рази.

4.1.4. Порівняльний аналіз структурних змін в металі з'єднань сталі AISI 304 при лазерному, плазмовому, гібридному лазерно-плазмовому зварюванні в залежності від товщини зварювального металу (2 мм та 6 мм).

Порівняльним аналізом параметрів зеренної структури (рис. 4.19, а) та мікротвердості (рис. 4.20, а), що формується в металі зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих **лазерно-плазмовим** зварюванням встановлено наступне. В металі зварних швів при лазерно-плазмовому зварюванні формується приблизно однакова за розмірами кристалітів структура, рис. 4.20 (а). В металі ЗТВ у разі товщини 2 мм структура дрібніша в середньому у 3 рази ($D_z=5...15$ мкм) ніж при товщині 6 мм. Укрупнення зерна в ЗТВ пов'язано з збільшенням тепловкладання від $q=118,4$ кДж/м (2мм) до $q=195$ кДж/м (6 мм), сповільненням процесу тепловідведення за рахунок збільшення об'єму розплавленого металу та, відповідно зменшенням швидкості охолодження.

У другому випадку (6 мм) в металі зварного з'єднання спостерігається загальне підвищення мікротвердості. В металі зварного шва мікротвердість підвищується в 1,7 рази від $HV=232$ МПа (2 мм) до $HV=384$ МПа (6 мм), по лінії сплавлення – у 1,2 рази від $HV=238$ МПа (2 мм) до $HV=278$ МПа (6 мм), у ЗТВ - 1,3 рази від $HV=212$ МПа (2 мм) до $HV=268$ МПа (6 мм), рис.4.20(а).

Порівняльним аналізом параметрів зеренної структури (рис. 4.19, б) та мікротвердості (рис. 4.20, б), що формується в металі зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих лазерним зварюванням встановлено наступне. В металі зварних швів зварюванні формується приблизно однакова

за розмірами кристалітів структура, рис. 4.19 (б). В металі ЗТВ у разі товщини 2 мм структура дрібніша в середньому у 2 рази ($D_3 = 5 \dots 15$ мкм) ніж при товщині 6 мм ($D_3 = 10 \dots 30$ мкм). Укрупнення зерна в ЗТВ пов'язано із зменшенням швидкості охолодження, збільшенням тепловкладання від $q=48$ кДж/м (2мм) до $q=132$ кДж/м (6 мм) та сповільненням процесу тепловідведення. У другому випадку (6 мм) в металі зварного шва спостерігається підвищення мікротвердості в 1,4 рази від $HV = 190$ МПа (2 мм) до $HV = 268$ МПа (6 мм), рис. 4.20 (б).

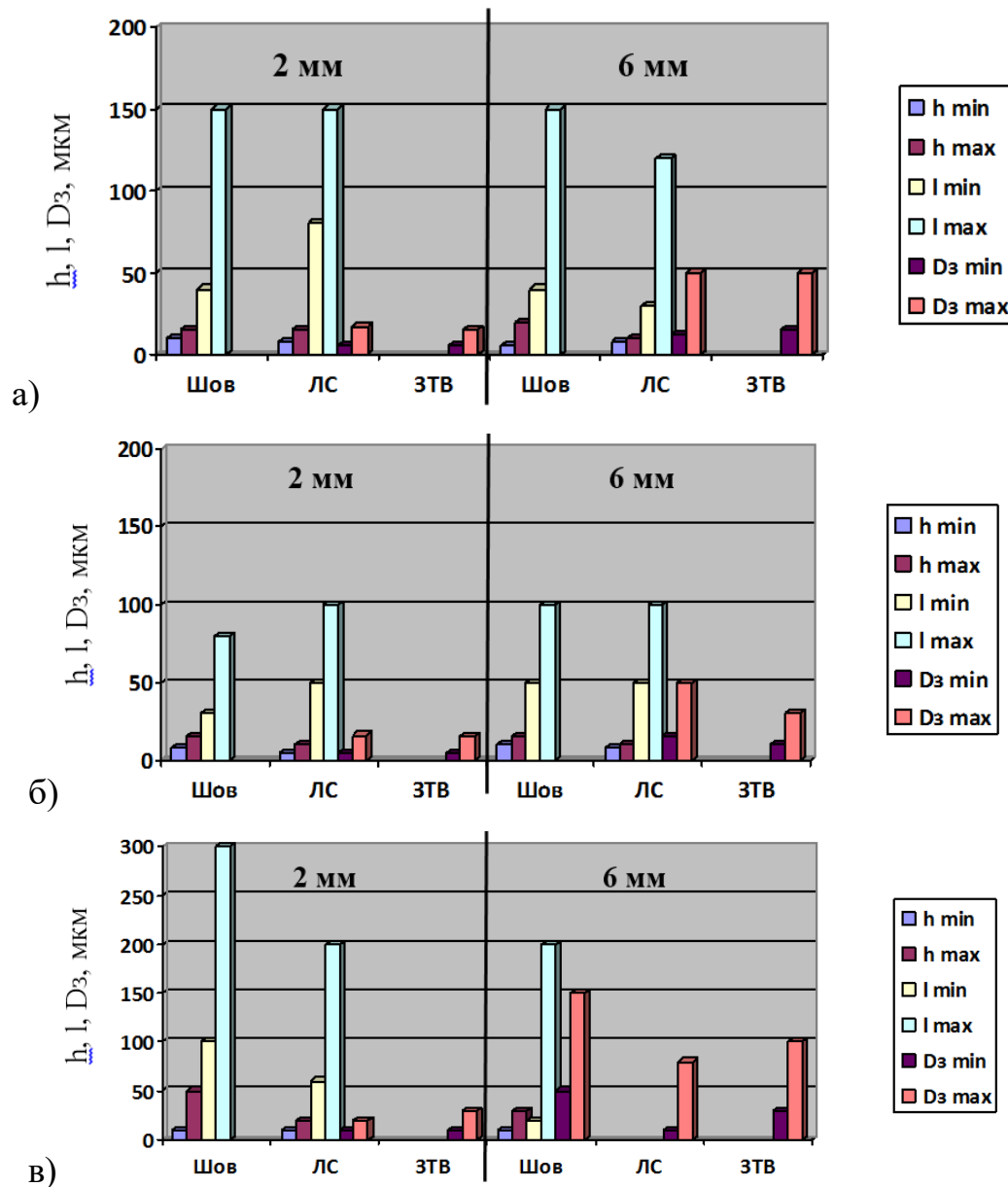


Рис. 4.19. Зміна структурних параметрів в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм та 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

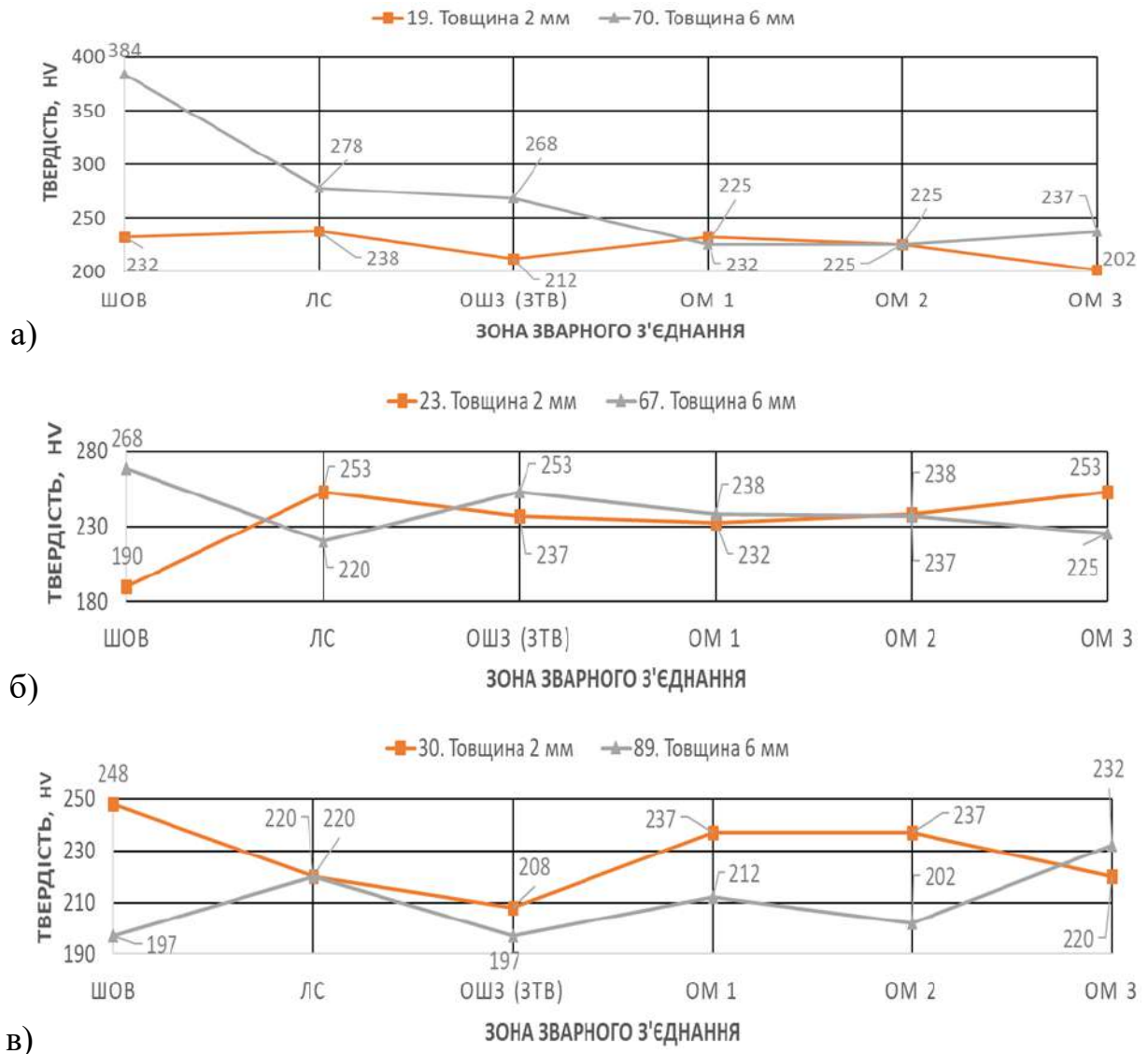


Рис. 4.20. Порівняльний розподіл мікротвердості по перерізу зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною 2 мм та 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

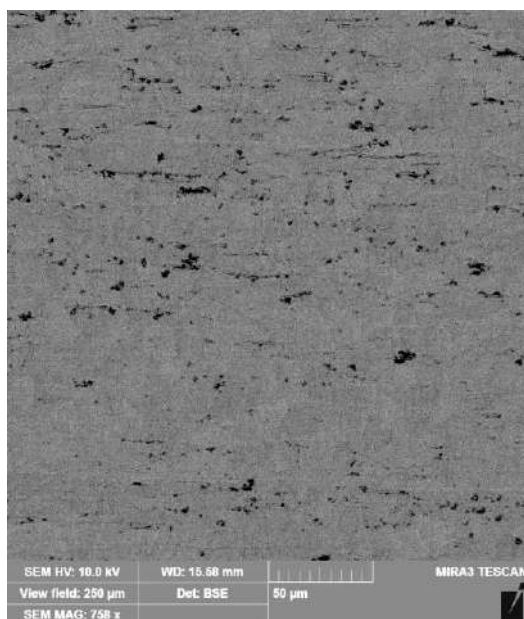
Порівняльним аналізом параметрів зеренної структури (рис. 4.19, в) та мікротвердості (рис. 4.20, в), що формується в металі зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих плазмовим зварюванням встановлено наступне. В металі зварного шва у разі товщини 2 мм при формуються протяжні кристаліти розміром $h \times l = 10 \dots 50 \times 100 \dots 300$ мкм з коефіцієнтом форми зерна $\alpha = 6 \dots 10$. У зварному шві у разі товщини 6 мм при підвищенні погонної енергії процесу в металі зварного шва та по лінії сплавлення

формується однорідна рівновісна зеренна структура (рис. 4.12, в) та дендритна (в металі шва) з розміром кристалітів $h \times l = 10 \dots 30 \times 20 \dots 200$ мкм при зменшенні коефіцієнту форми зерна до $\alpha = 2 \dots 6,7$ та зниженні мікротвердості (рис. 4.20, в). У ЗТВ зерно укрупнюється у три рази від $D_z = 10 \dots 30$ мкм (2 мм) до $D_z = 30 \dots 100$ мкм (6 мм). Укрупнення зерна в ЗТВ пов'язано із збільшенням тепловкладання та, відповідно сповільненням процесу тепловідведення.

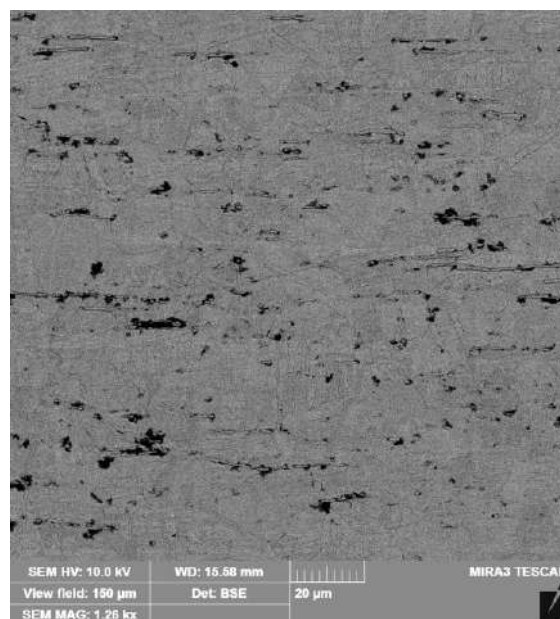
4.1.5. Дослідження мікроструктури методом СЕМ в металі зварних з'єднань сталі AISI 304, отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням.

Дослідженнями методом скануючої електронної мікроскопії СЕМ та металу зварного з'єднання сталі AISI 304 товщиною **2 мм**, що отримане лазерно-плазмовим зварюванням показано наступне (рис. 4.21. – 4.23).

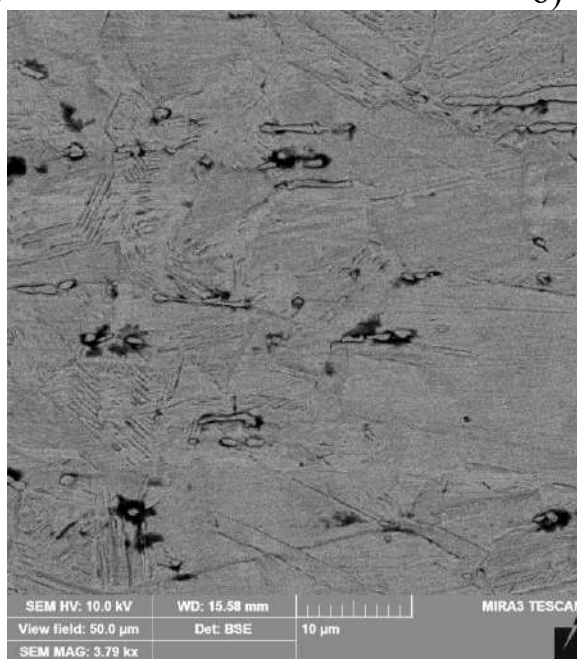
Дослідження методом СЕМ дозволили отримати більш детальну інформацію щодо мікроструктури металу зварних з'єднань. Структурі основного металу з розміром зерна $D_z = 5 \dots 18$ мкм (рис. 4.21.) характерно формування субструктури розміром $d_c = 3 \dots 4$ мкм та деякої кількості двійникових структур. Ширина двійників $h_{дв} = 0,1 \dots 0,3$ мкм (рис. 4.21., в) В металі зварного шва (рис. 4.22.) внутрішня структура кристалітів має комірчасту структуру з розмірами $d_c = 2 \dots 10$ мкм, ширина двійників $h_{дв} = 0,1 \dots 0,2$ мкм (рис. 4.22., г). Субструктура металу по лінії сплавлення однорідна, розміром $d_c = 2 \dots 10$ мкм (рис. 4.23.). По лінії сплавлення та у ЗТВ двійникової структури не виявлено.



а)

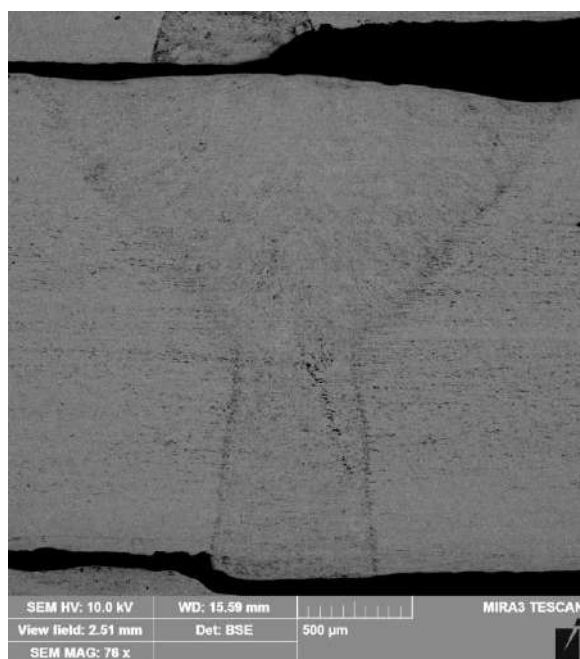


б)

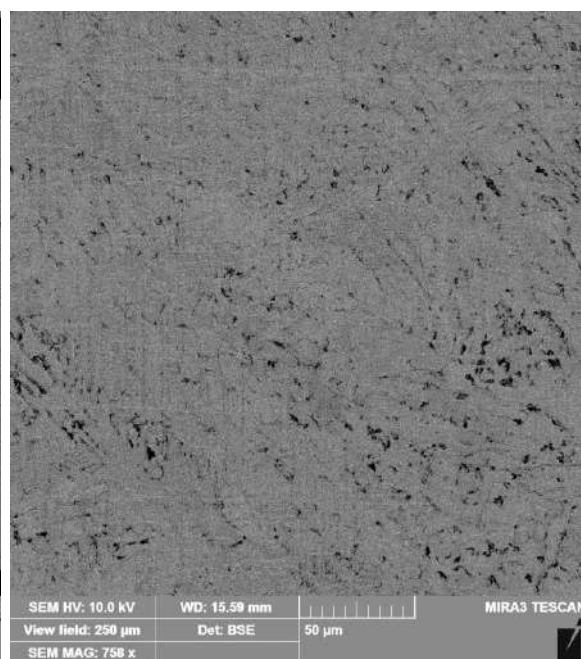


в)

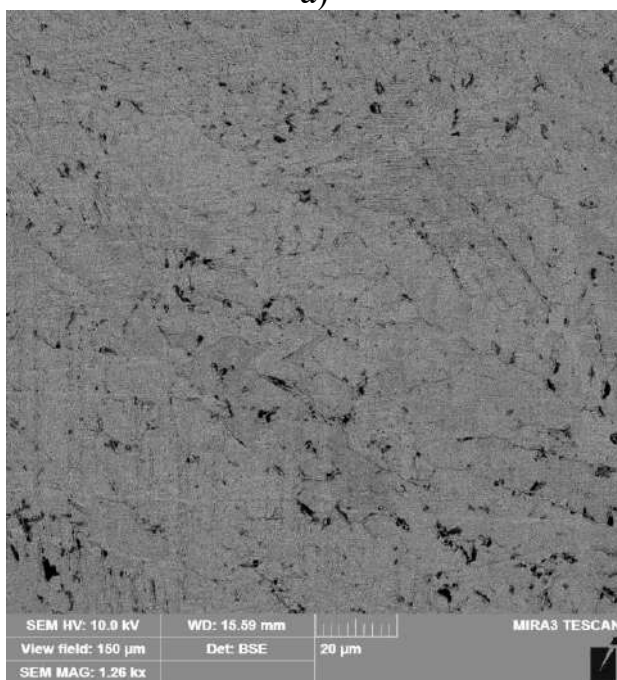
Рис. 4.21. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (2мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).



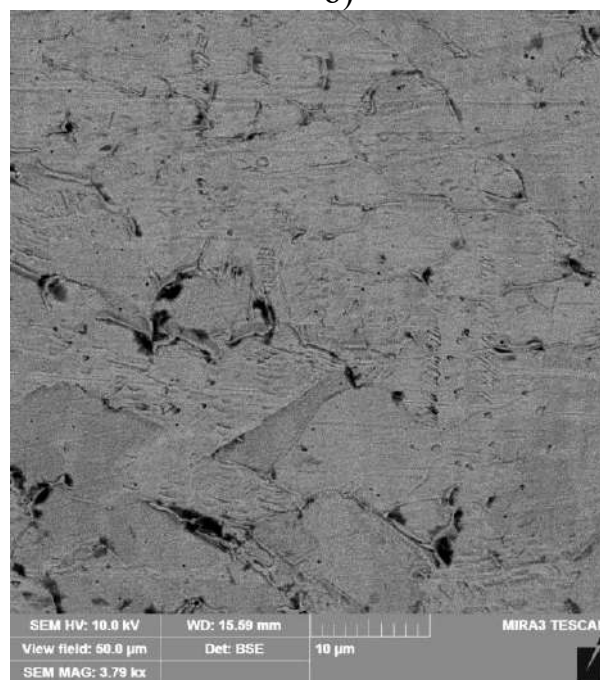
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.22. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2мм), що отримано гібридним лазерно-плазмовим зварюванням: а – загальний вигляд зварного шва; б-г – метал шва при різних збільшеннях.

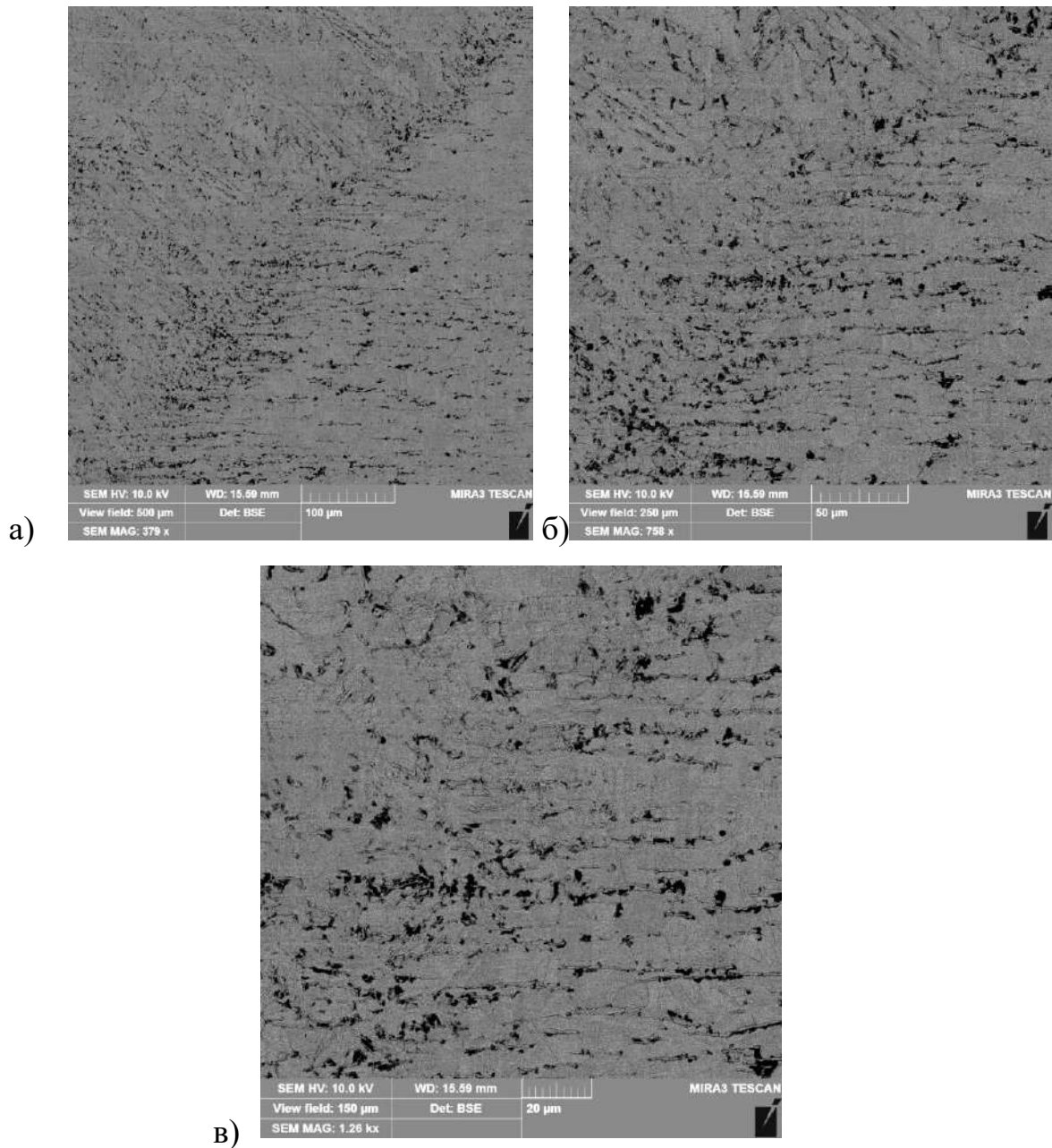


Рис. 4.23. Мікроструктура лінії сплавлення зварного з'єднання (2мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

Дослідженнями СЕМ зварного з'єднання AISI 304 товщиною 2 мм, що отримане лазерним зварюванням показано наступне (рис. 4.24 – 4.26). Структурі основного металу з розміром зерна $D_3=5...18$ мкм (рис. 4.24) характерна субструктура розміром $d_c = 3...4$ мкм з деякою кількістю двійників. Ширина двійників $h_{дв}=0,1...0,3$ мкм (рис. 4.24, в). В металі зварного шва на глибині 1,2...1,3 мм від верху шва спостерігається крупна пора розміром 500...700 мкм (рис. 4.25, а).

В металі зварного шва (рис. 4.25) формується внутрішня комірчаста структура подовженої форми з розмірами $d_c=2...4 \times 8...12$ мкм та глобулярної - $d_c=6...10$ мкм (рис. 4.25, в, г), двійники не спостерігаються. Субструктура металу по лінії сплавлення (рис. 22) однорідна та дисперсна, розміром $d_c=2...6$ мкм (рис. 4.26, г). З боку ЗТВ по лінії сплавлення комірчаста структура подовженої форми з розмірами $d_c=2...4 \times 5...20$ мкм. По лінії сплавлення та у ЗТВ двійникові структури не виявлено.

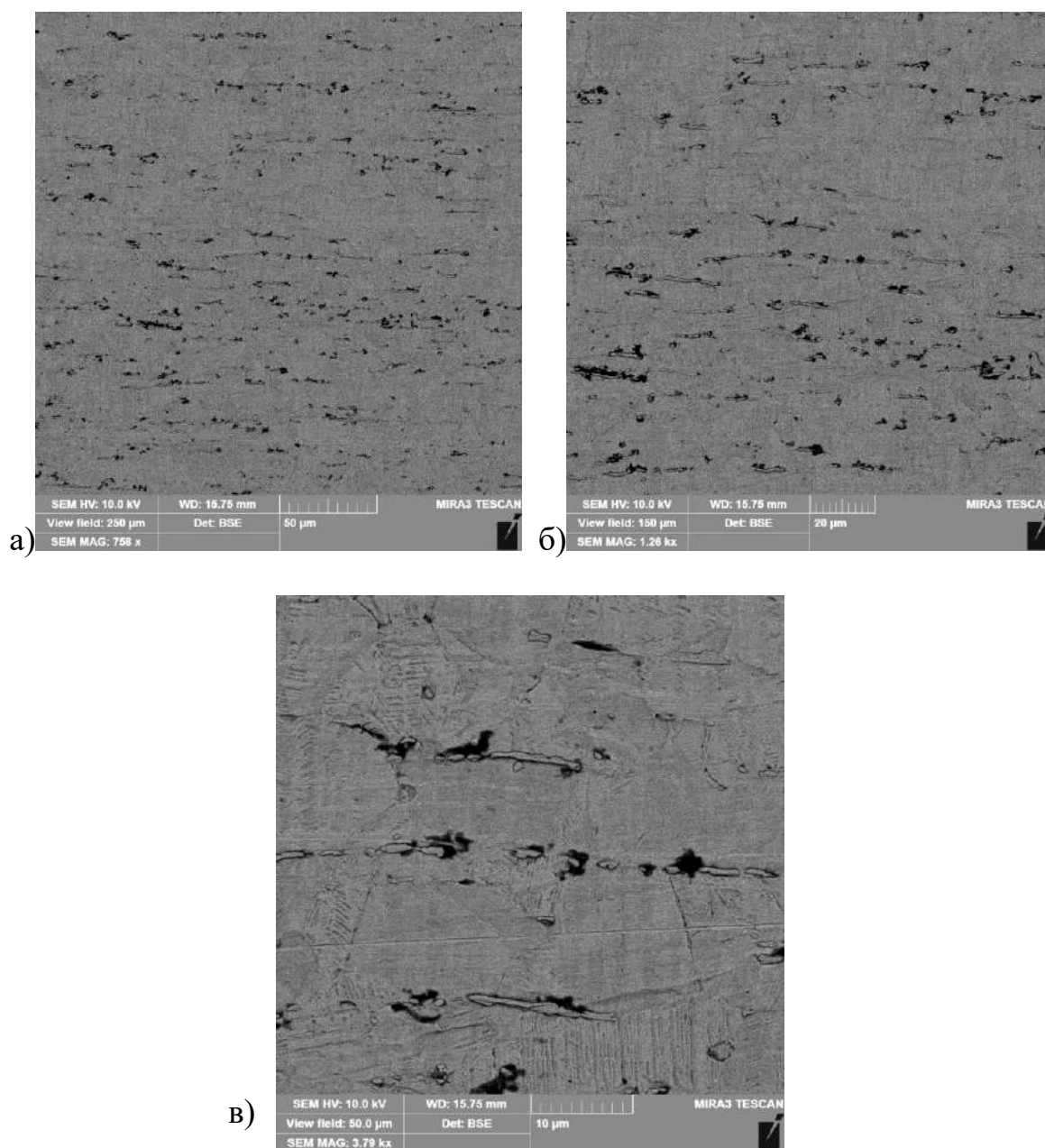


Рис. 4.24. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (2мм), що отримано лазерним зварюванням (при різних збільшеннях).

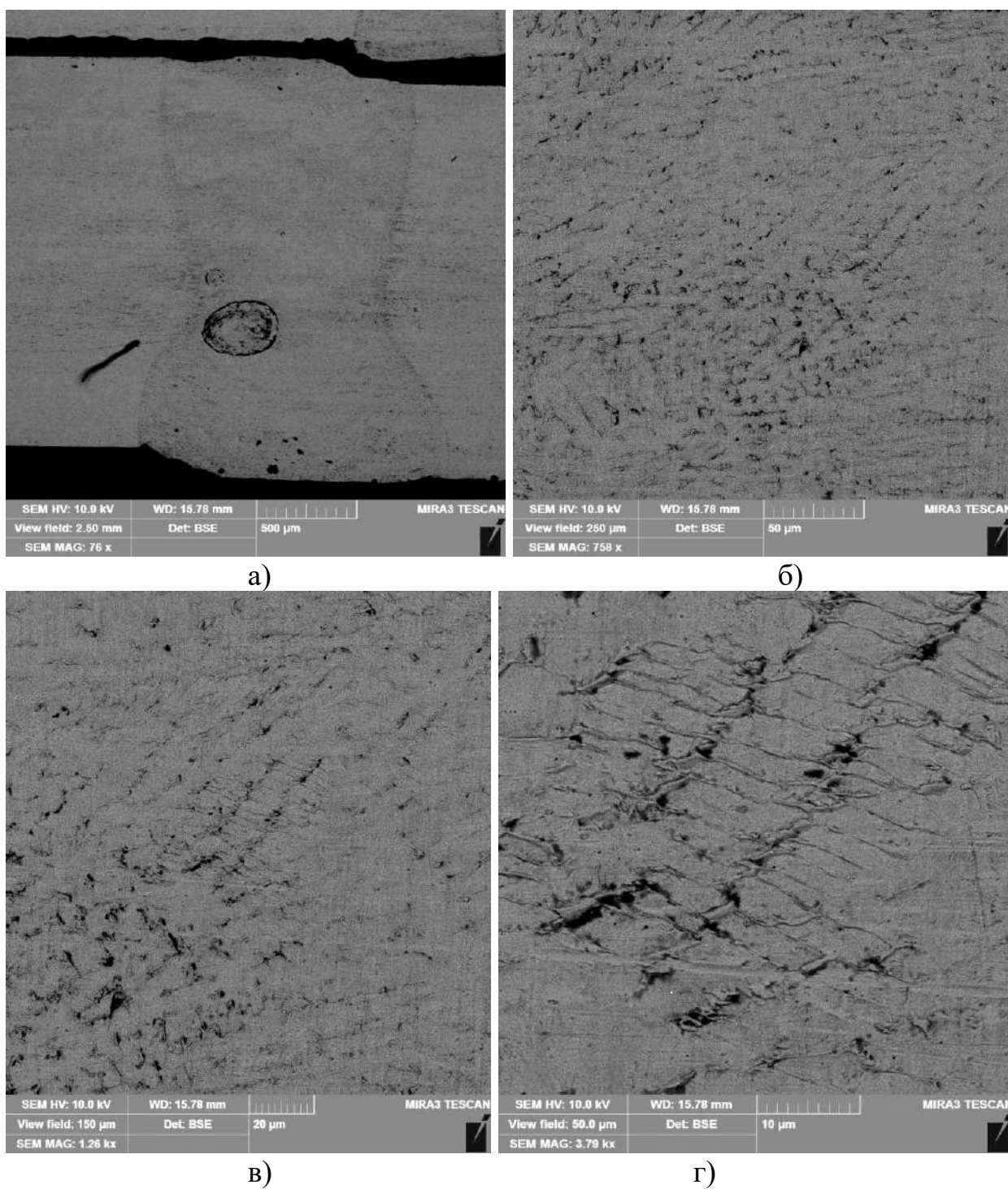


Рис. 4.25. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2мм), що отримано лазерним зварюванням: а – загальний вигляд зварного шва; б-г – метал шва при різних збільшеннях.

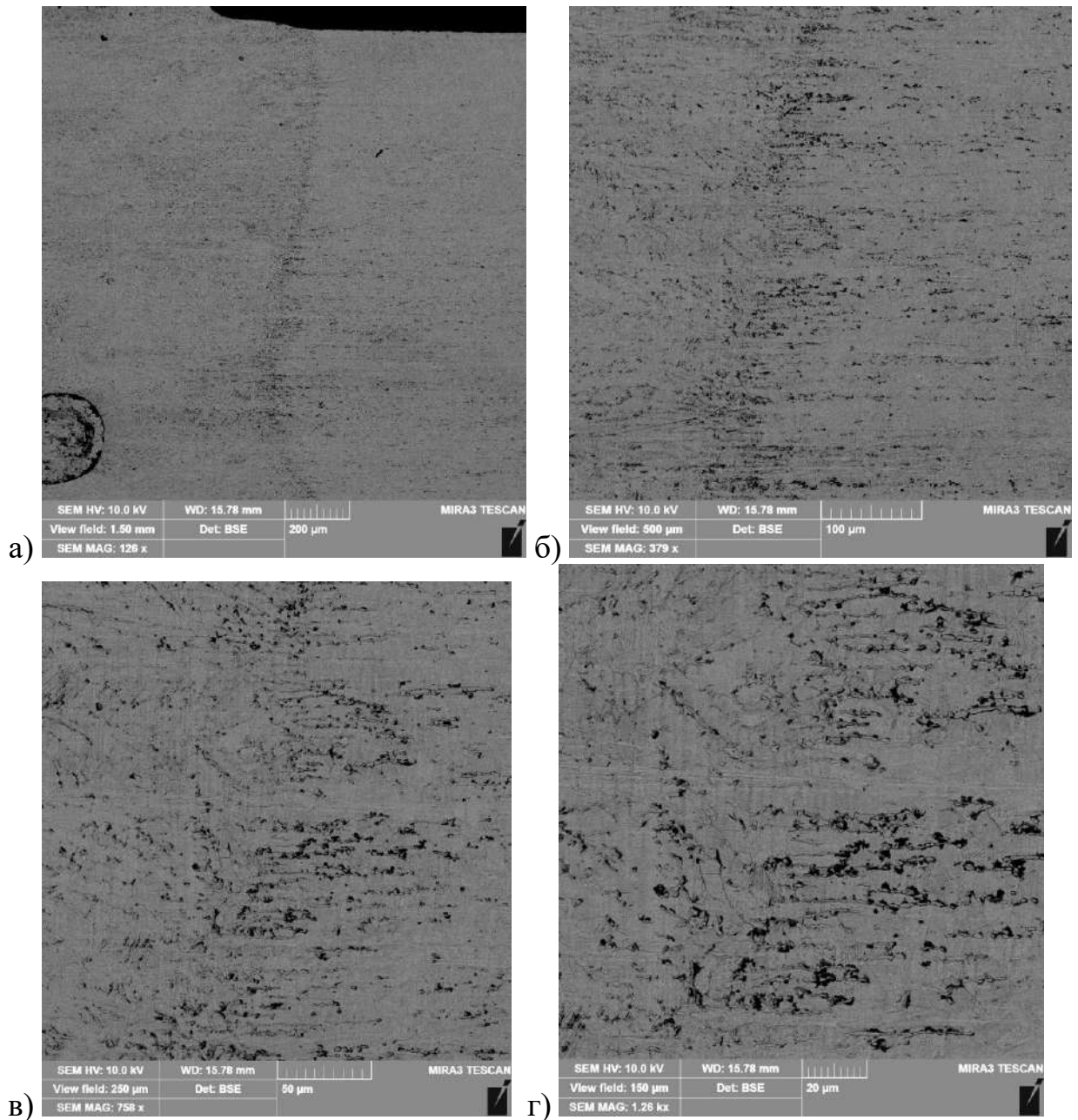


Рис. 4.26. Мікроструктура лінії сплавлення зварного з'єднання (2мм), що отримано гібридним лазерним зварюванням (при різних збільшеннях).

Дослідженнями методом СЕМ металу зварного з'єднання AISI 304 товщиною 2 мм, що отримане плазмовим зварюванням показано наступне (рис. 4.27 – 4.31). Структурі основного металу з розміром зерна $D_3=5...20$ мкм (рис. 4.27) характерна субструктура розміром $d_c=3...8$ мкм (рис. 4.27, в.) Ширина двійників $h_{дв} = 0,1...0,8$ мкм. В металі зварного шва (рис. 4.28) формується внутрішня комірчаста структура глобулярного типу з $d_c = 5...20$ мкм та подовженої форми з розмірами $d_c = 3...6 \times 10...20$ мкм та (рис. 4.28, в,

г), спостерігаються двійники шириною $h_{\text{дв}}=0,1\ldots0,5$ мкм. Субструктура металу по лінії сплавлення (рис. 29) однорідна з розміром $d_c=5\ldots10$ мкм (рис. 4.29, в г). З боку ЗТВ по лінії сплавлення комірчаста структура подовженої форми з розмірами $d_c=5\ldots7\times20\ldots40$ мкм. По лінії сплавлення та у ЗТВ двійникові структури не виявлено.

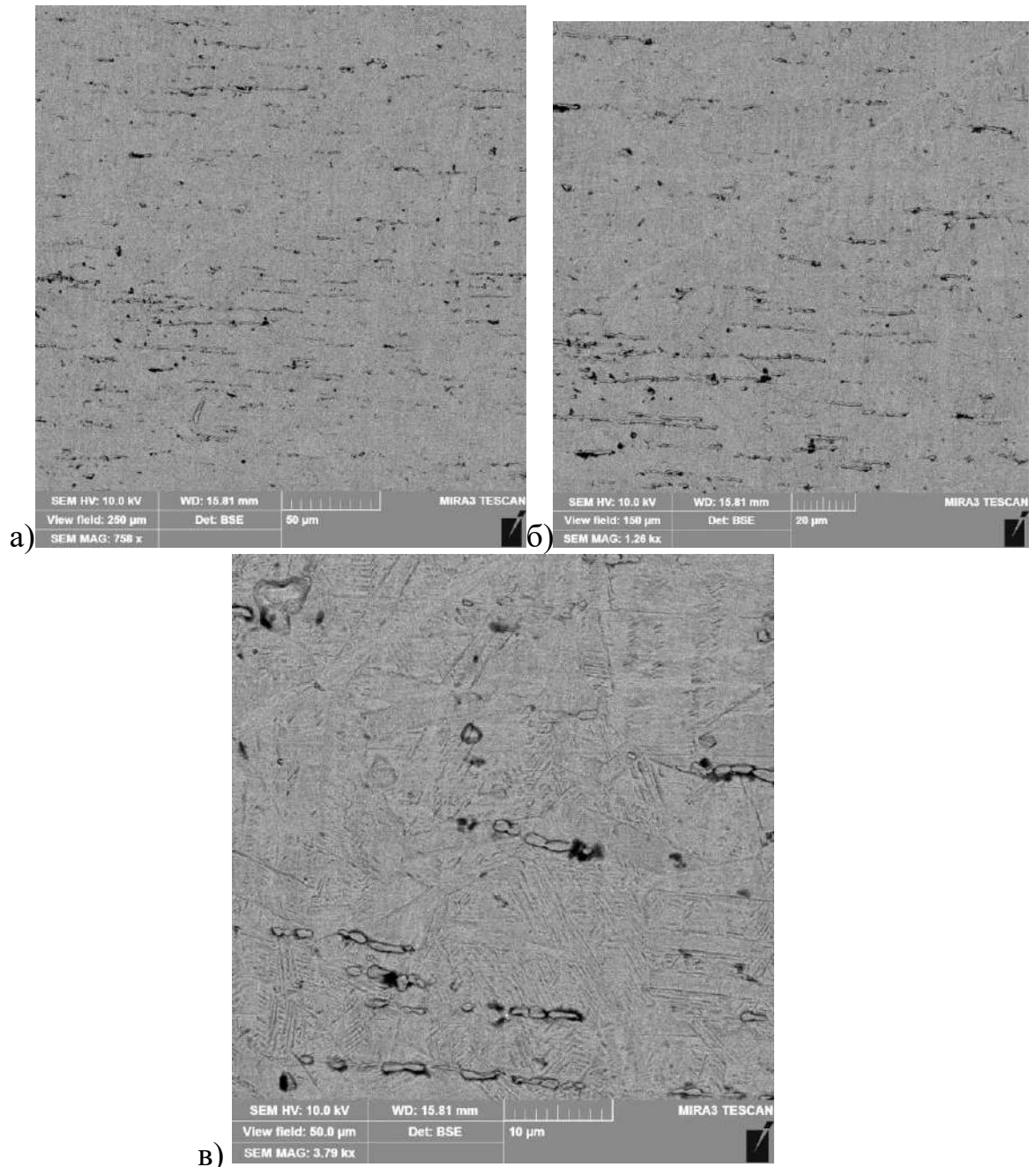


Рис. 4.27. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (2мм), що отримано плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

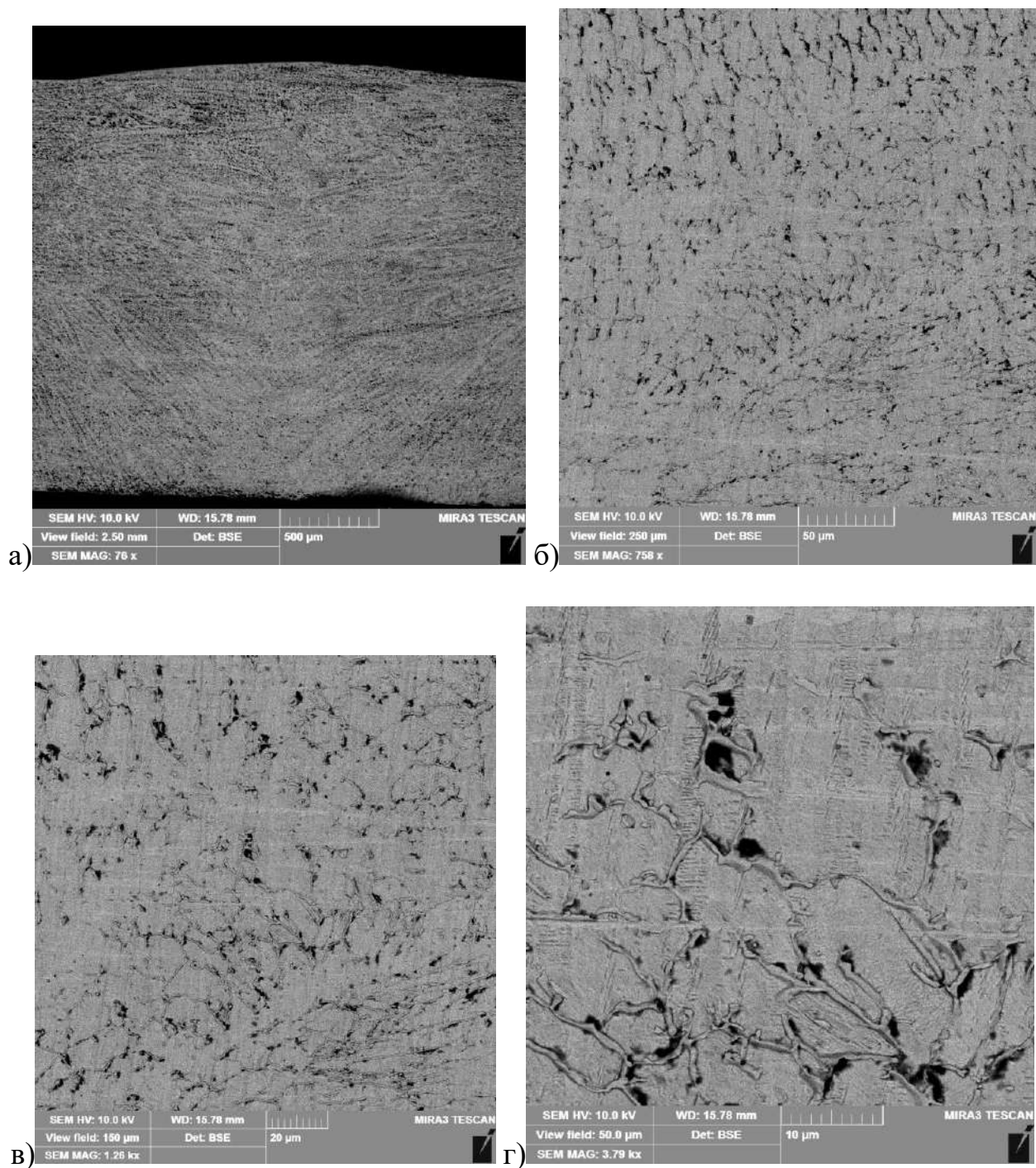


Рис. 4.28. Мікроструктура металу зварного з'єднання (2мм), що отримано плазмовим зварюванням: а – загальний вигляд зварного шва; б-г – метал шва при різних збільшеннях.

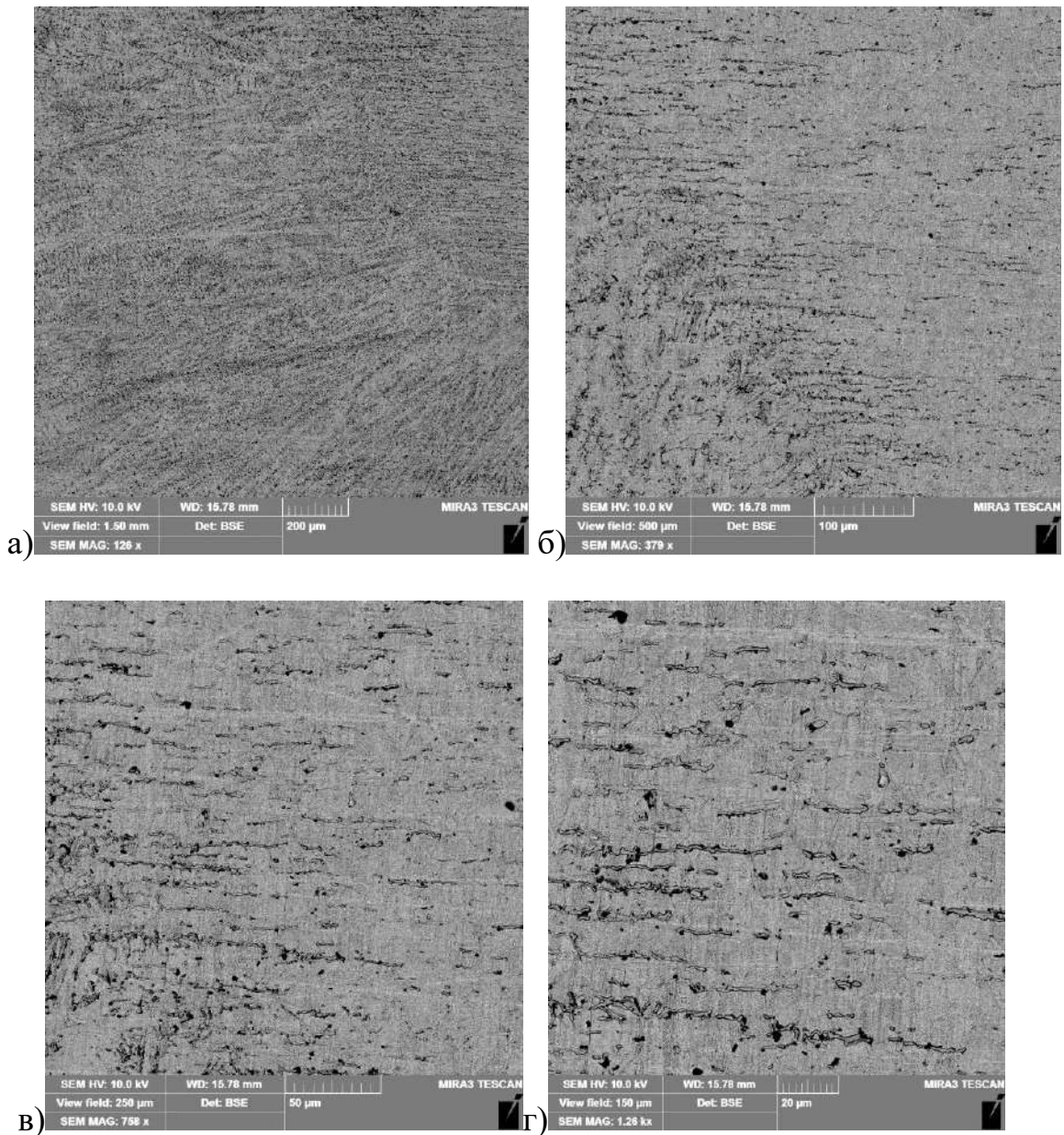


Рис. 4.29. Мікроструктура лінії сплавлення (а, б) та околошовної зони (ЗТВ) (в, г) зварного з'єднання (2мм), що отримано плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

Дослідженнями методом СЕМ мікроструктури у зварних з'єднаннях сталі AISI 304 товщиною 6 мм встановлено наступне (рис. 4.30 – 4.33).

Структурі основного металу з розміром зерна $D_3=12\ldots70$ мкм (рис. 4.30.) характерно формування субструктури розміром $d_c=3\ldots7$ мкм (рис. 4.30., в). В металі зварного шва (рис. 4.31., 4.32) внутрішня структура кристалітів має комірчасту структуру з розмірами $d_c=5\ldots9$ мкм та подовженого типу

$d_c=4...5 \times 8...25$ мкм (рис. 4.32., г). Мікроструктура металу по лінії сплавлення (рис. 4.33.) однорідна з розміром субзерен $d_c=2...10$ мкм та $d_c=4...5 \times 8...25$ мкм (рис. 4.33., в). У ЗТВ біля ЛС $d_c = 3...8$ мкм

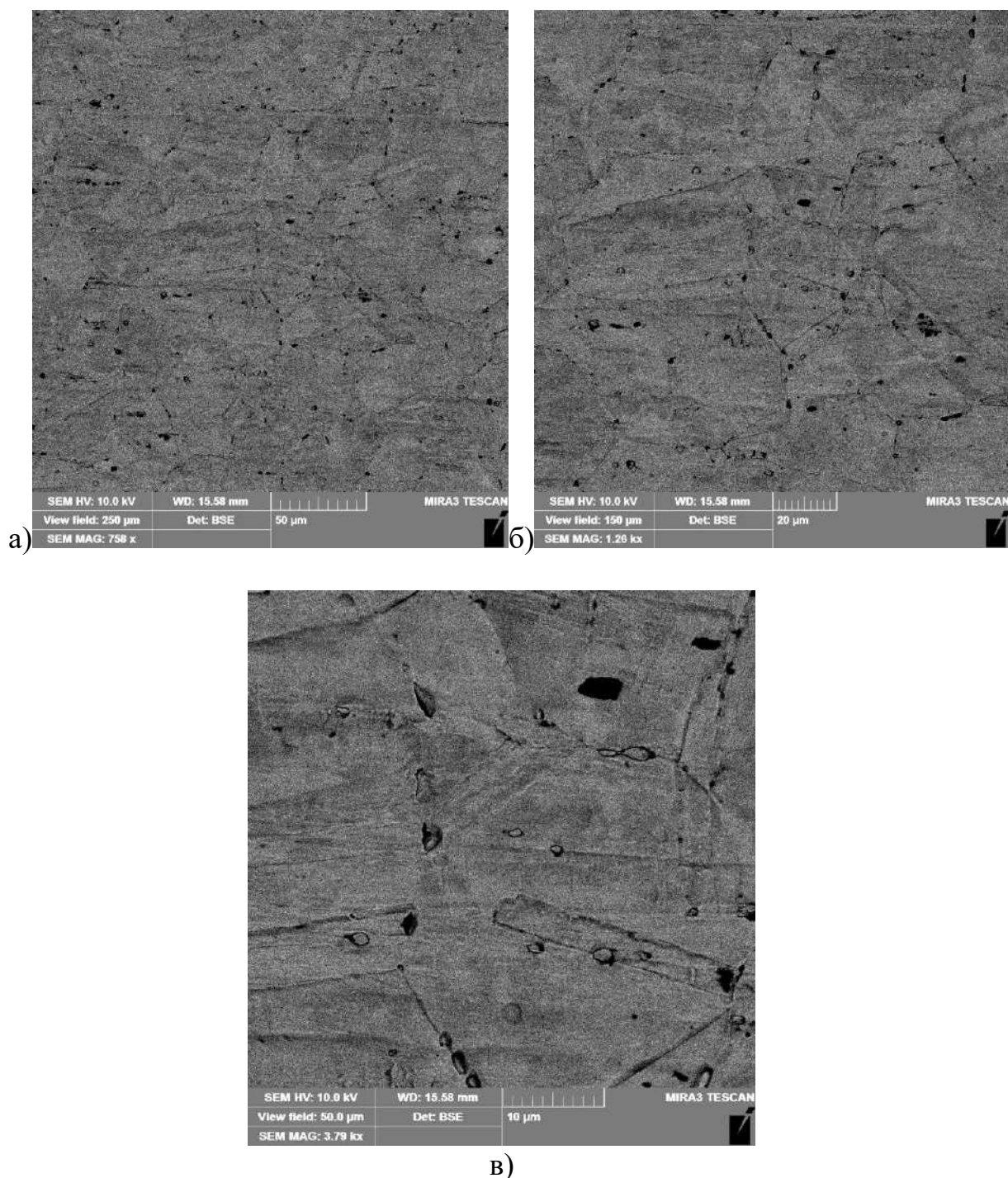


Рис. 4.30. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

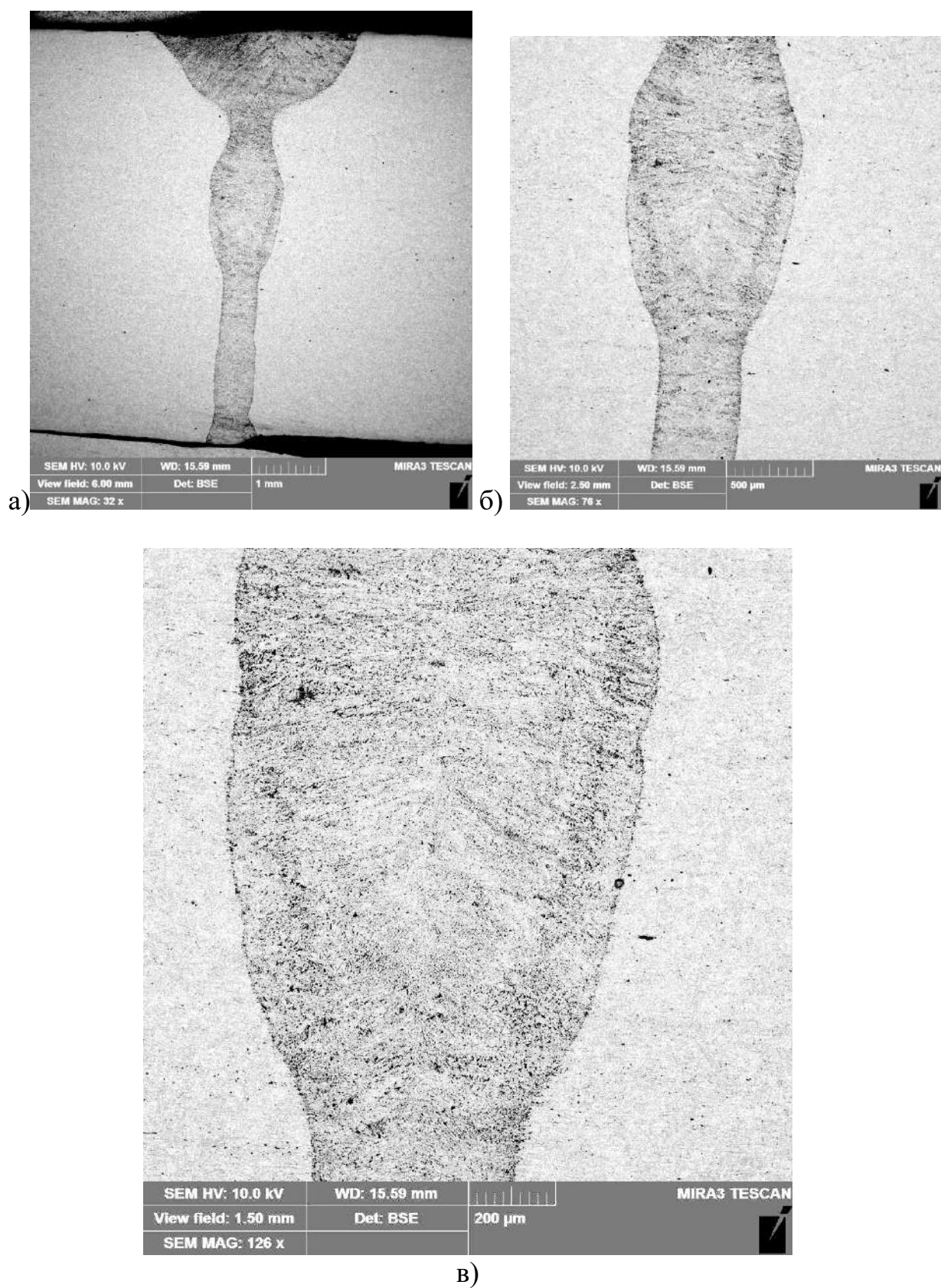
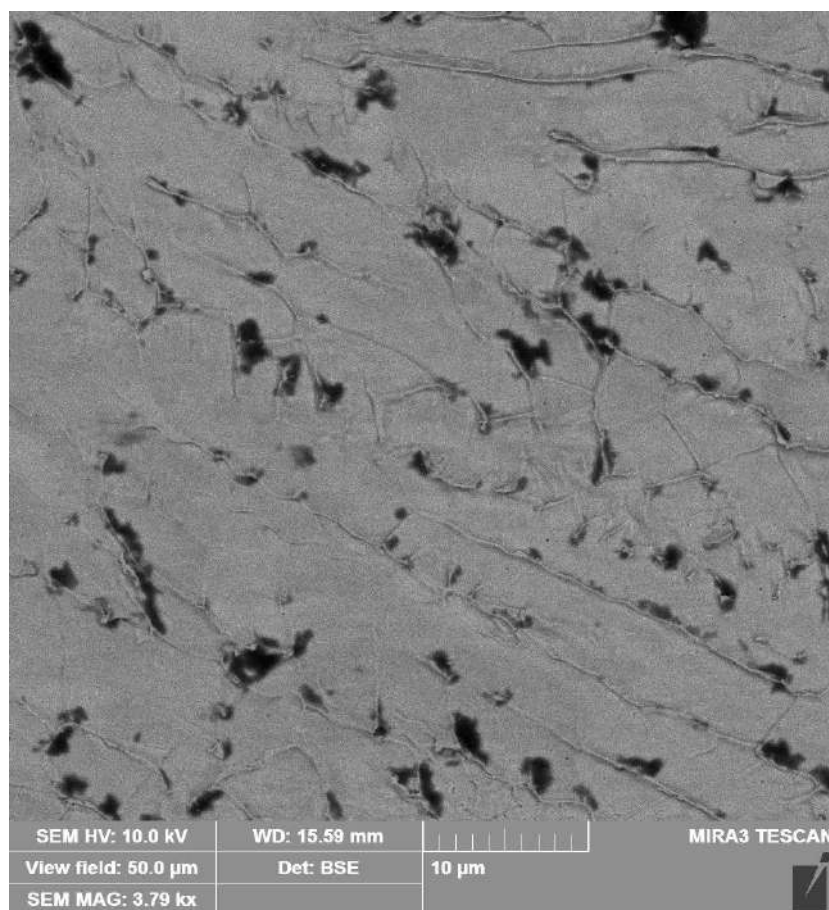
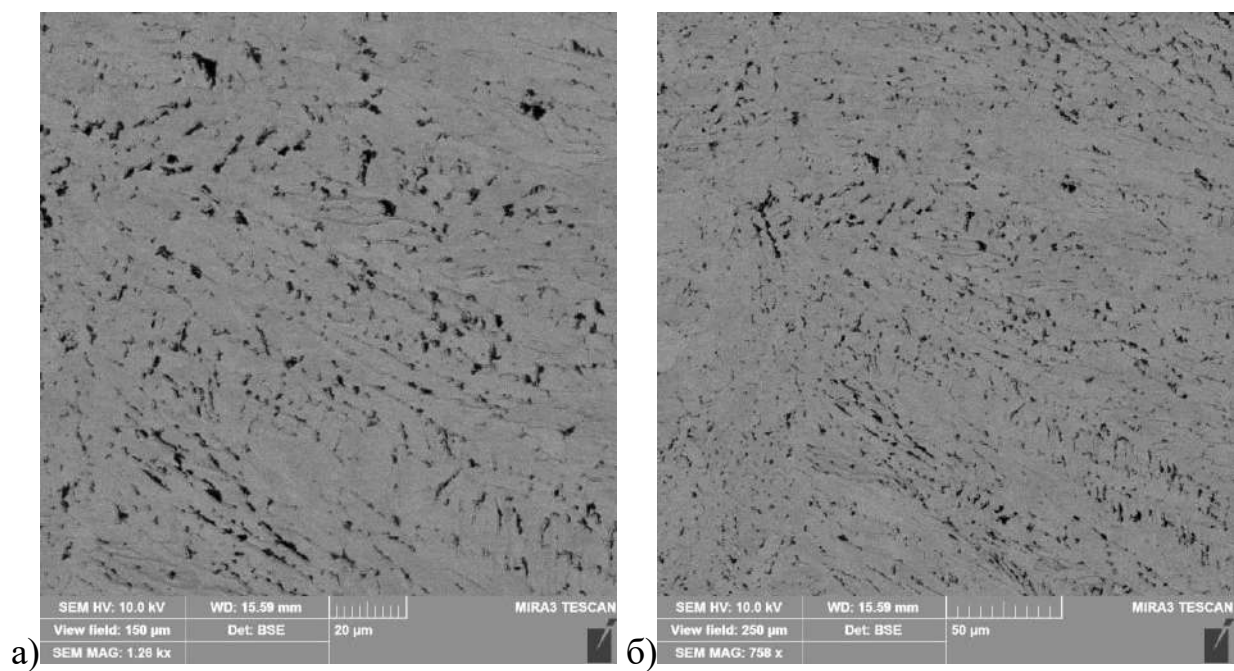


Рис. 4.31. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням: а – загальний вигляд зварного шва; б, в – середня частина шва при різних збільшеннях.



в)

Рис. 4.32. Мікроструктура металу зварного шва (6 мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

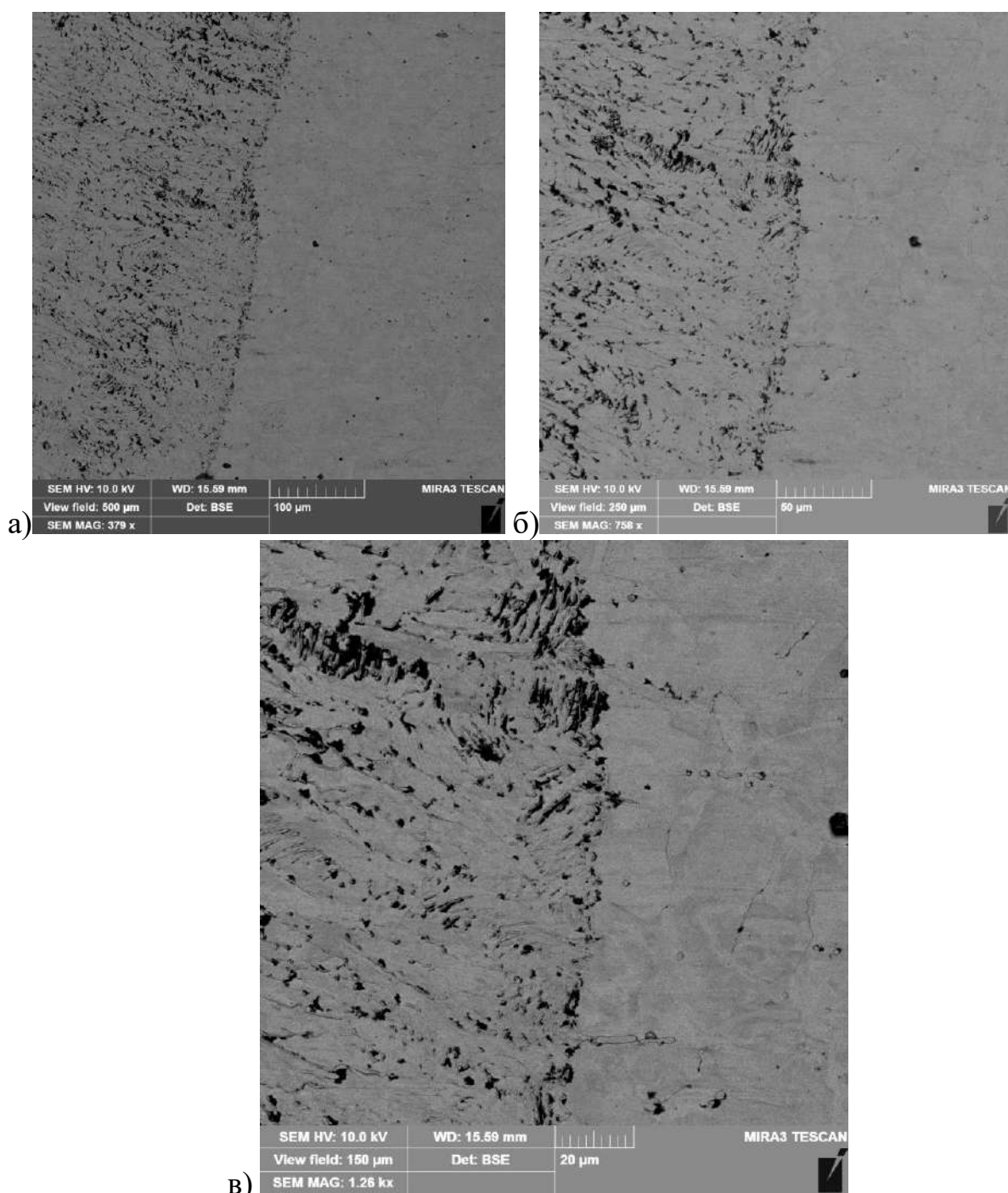


Рис. 4.33. Мікроструктура лінії сплавлення зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерно-плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

Дослідженнями СЕМ металу зварного з'єднання AISI 304 товщиною 6 мм, що отримане лазерним зварюванням показано наступне (рис. 4.34 – 4.37). Структурі основного металу з розміром зерна $D_3=10...50$ мкм (рис. 4.34) характерна субструктура розміром $d_c = 3...5$ мкм (рис. 4.34, в). В металі

зварного шва (рис. 4.35, 4.36) формується однорідна комірчаста структура з розмірами субзерен $d_C=3\ldots7$ мкм (рис. 4.36), двійники не спостерігаються.

Субструктура металу по лінії сплавлення (рис. 4.37) однорідна та дисперсна, розміром $d_C=2\ldots6$ мкм (рис. 4.37, г). З боку ЗТВ по лінії сплавлення комірчаста структура подовженої форми з розмірами $d_C=4\ldots4\times8\ldots20$ мкм. По лінії сплавлення та у ЗТВ двійникові структури не виявлено.

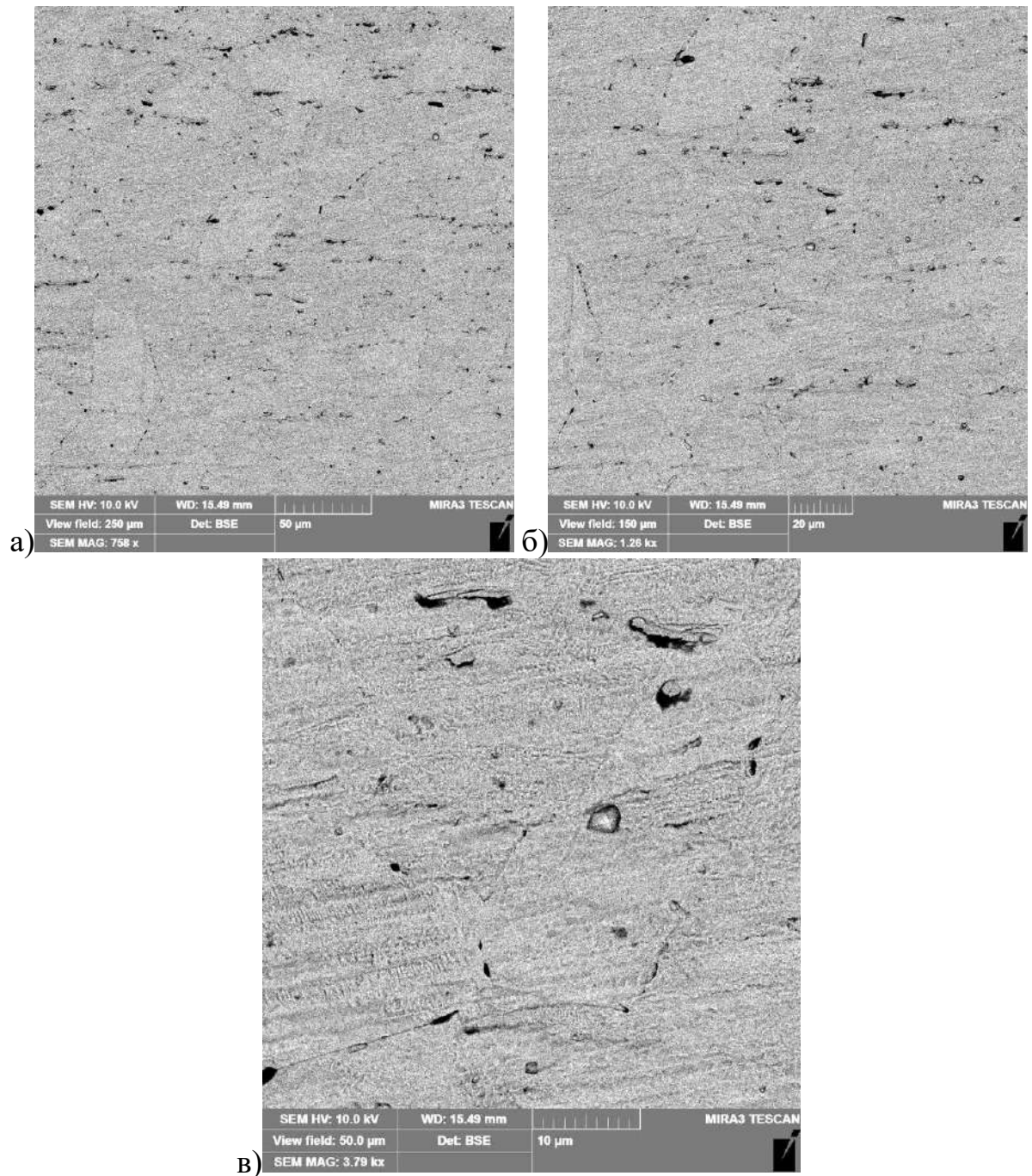


Рис. 4.34. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерним зварюванням (при різних збільшеннях).

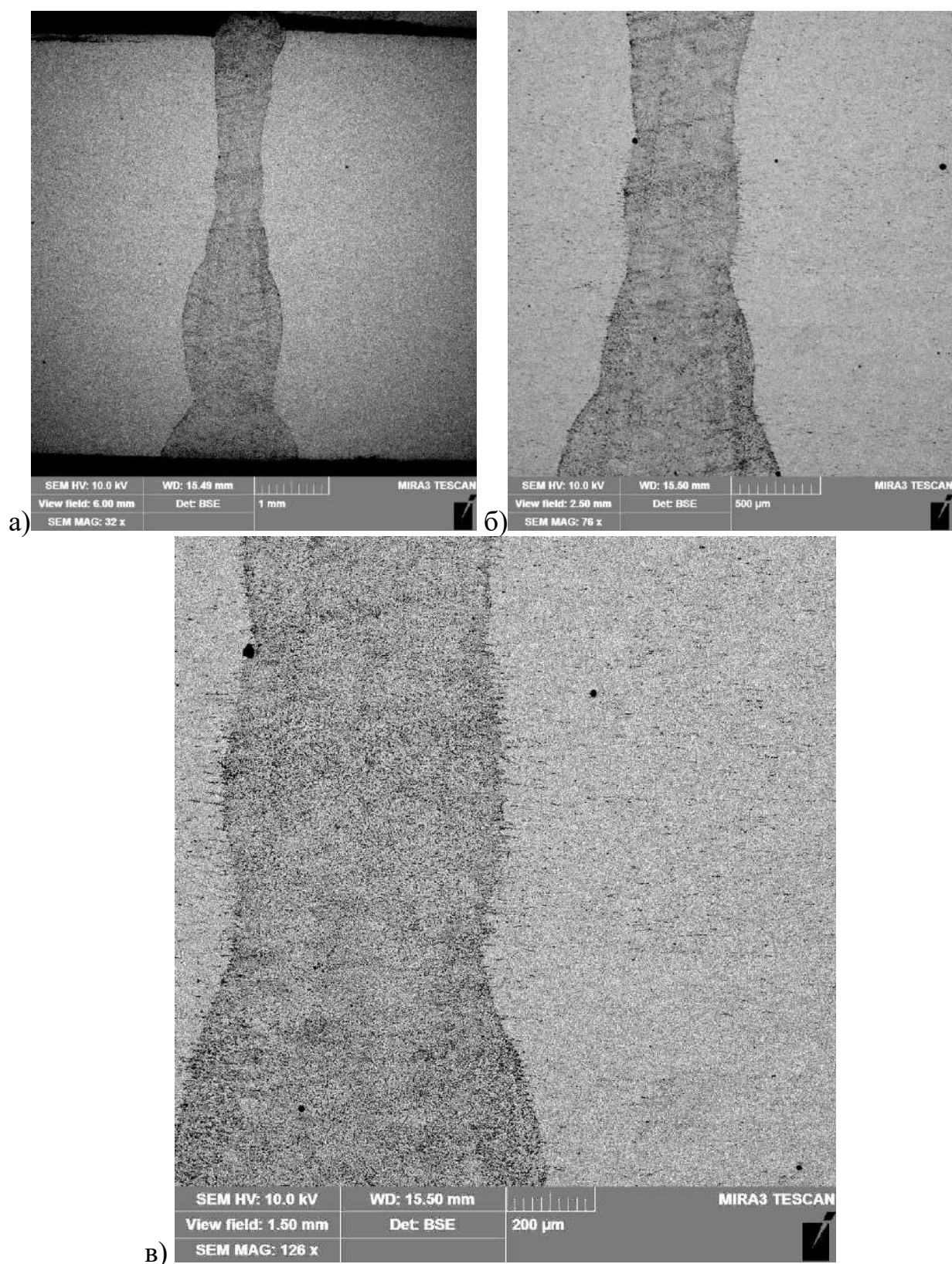


Рис. 4.35. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерним зварюванням: а – загальний вигляд зварного шва; б, в – середня частина шва при різних збільшеннях.

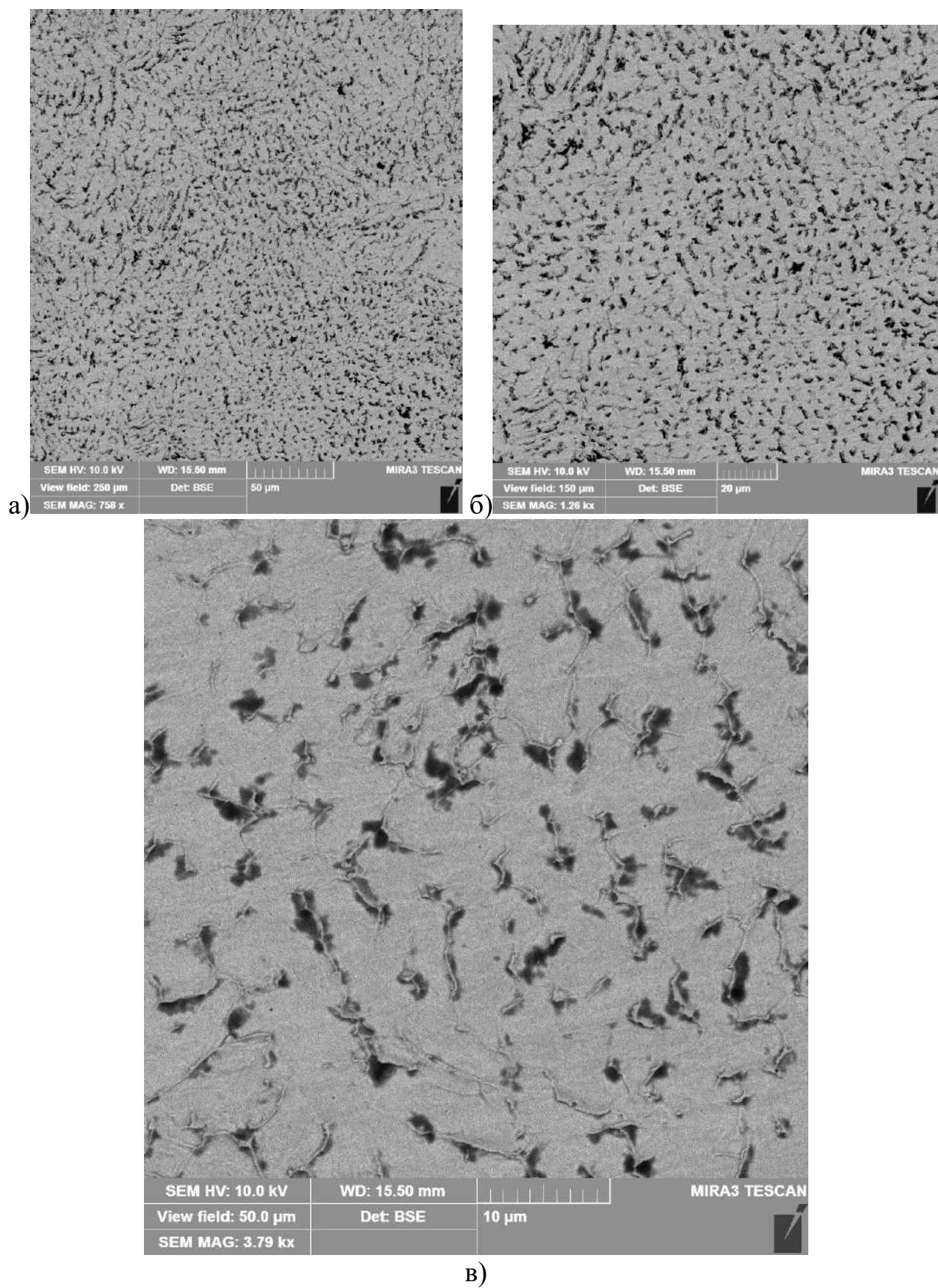


Рис. 4.36. Мікроструктура металу зварного шва (6 мм), що отримано лазерним зварюванням (при різних збільшеннях).

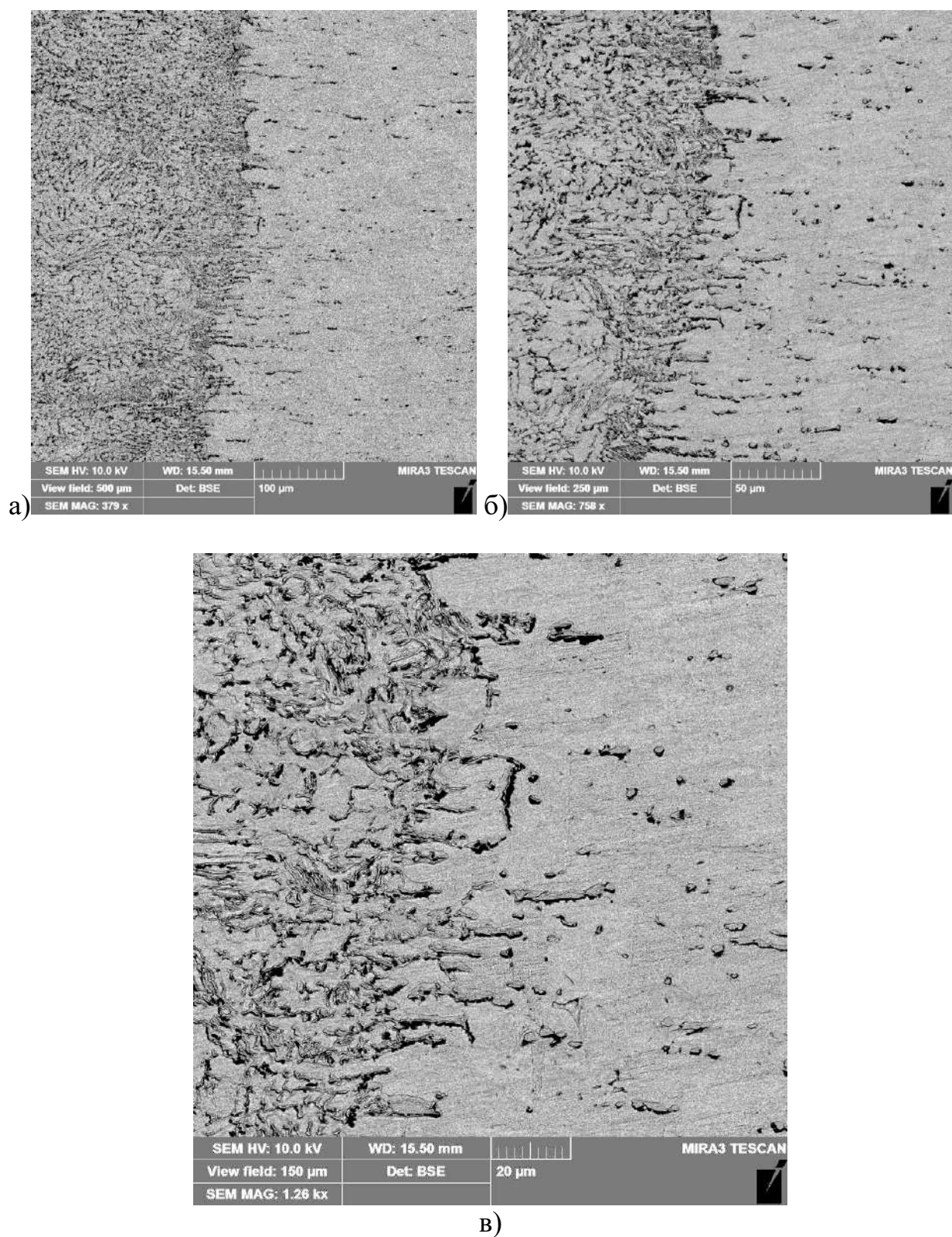


Рис. 4.37. Мікроструктура лінії сплавлення зварного з'єднання (6 мм), що отримано лазерним зварюванням (при різних збільшеннях).

Дослідженнями методом СЕМ металу зварного з'єднання AISI 304 товщиною 6 мм, що отримане плазмовим зварюванням показано наступне (рис. 4.38 – 4.40). Структурі основного металу з розміром зерна $D_3=5...30$ мкм (рис. 4.38) характерна субструктура розміром $d_c=3...8$ мкм (рис. 4.38, б)

В металі зварного шва (рис. 4.39) формується однорідна комірчаста структура з розміром субзерна $d_c = 10...40$ мкм (рис. 4.39, в, г). Субструктура металу по лінії сплавлення (рис. 4.40) також однорідна з розміром $d_c = 20...30$ мкм (рис. 4.40, в).

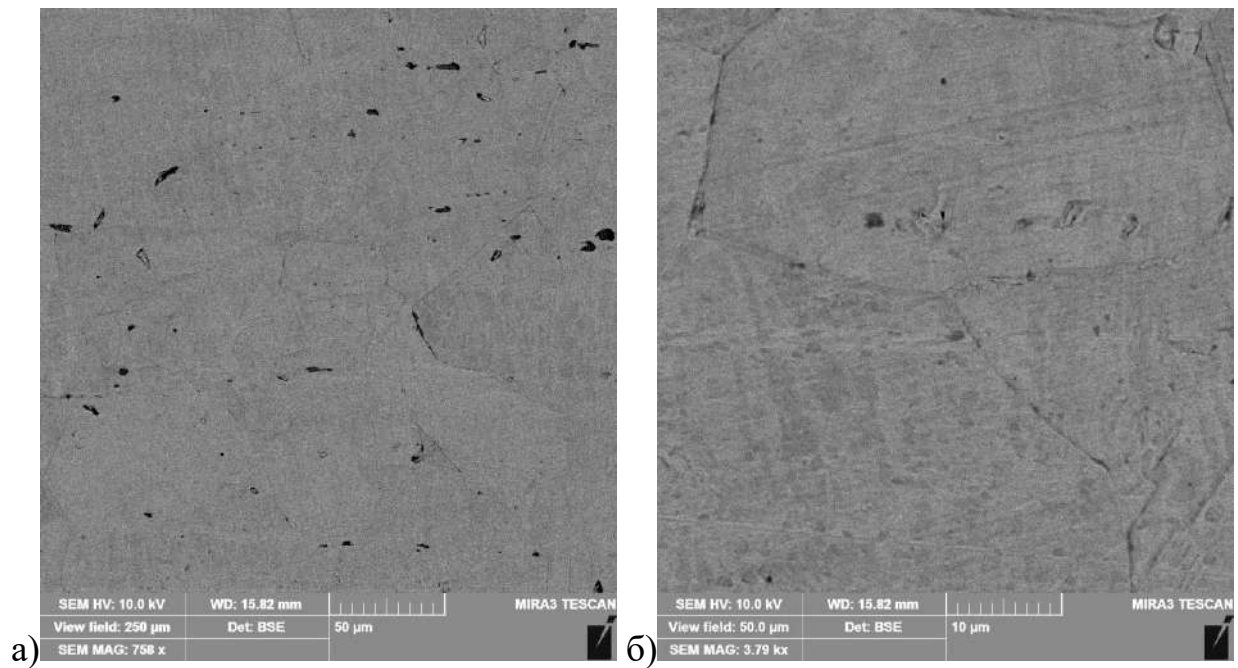


Рис. 4.38. Мікроструктура основного металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано плазмовим зварюванням (при різних збільшеннях).

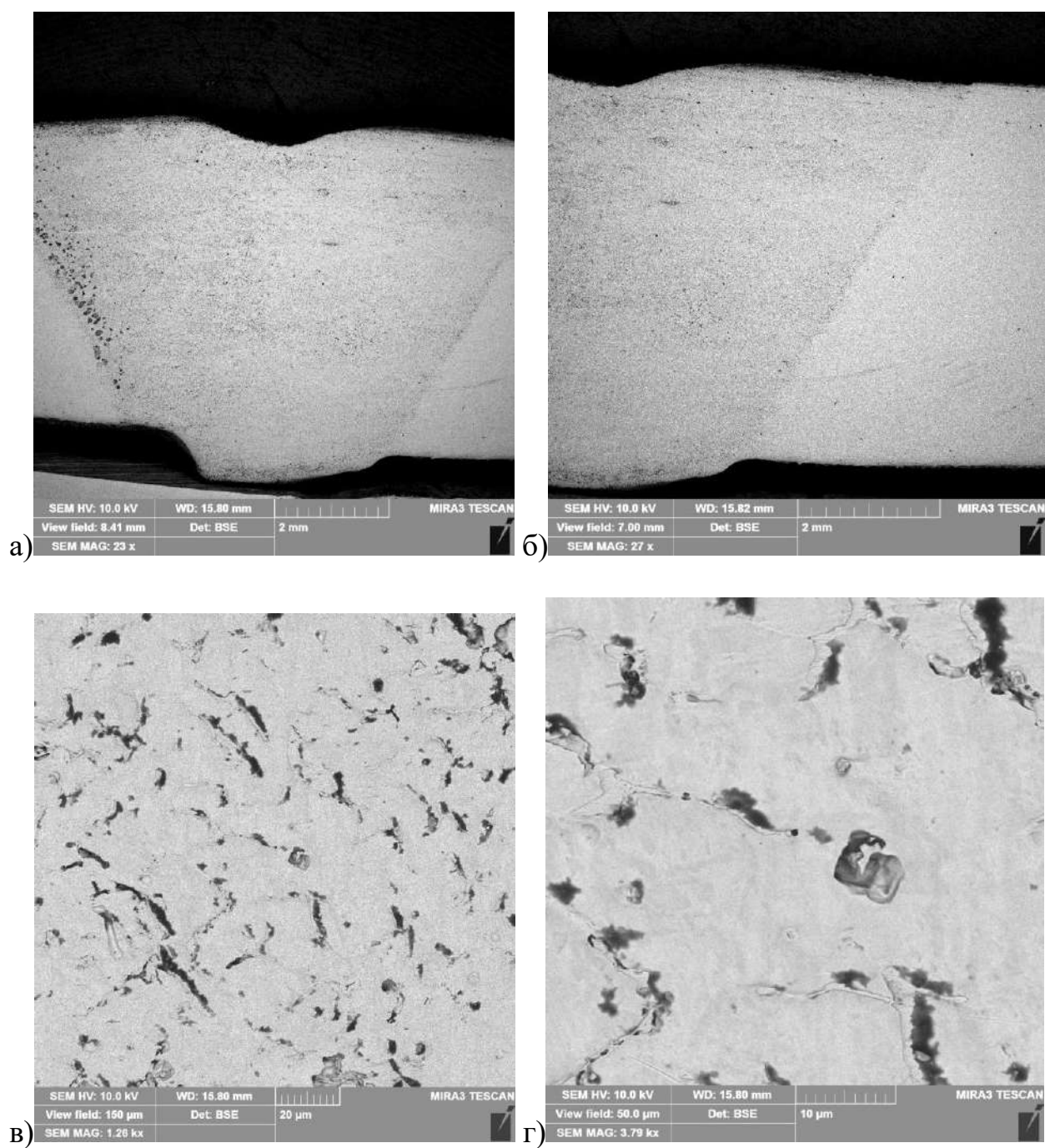


Рис. 4.39. Мікроструктура металу зварного з'єднання (6 мм), що отримано плазмовим зварюванням: а, б – загальний вигляд зварного шва; в, г – метал шва при різних збільшеннях.

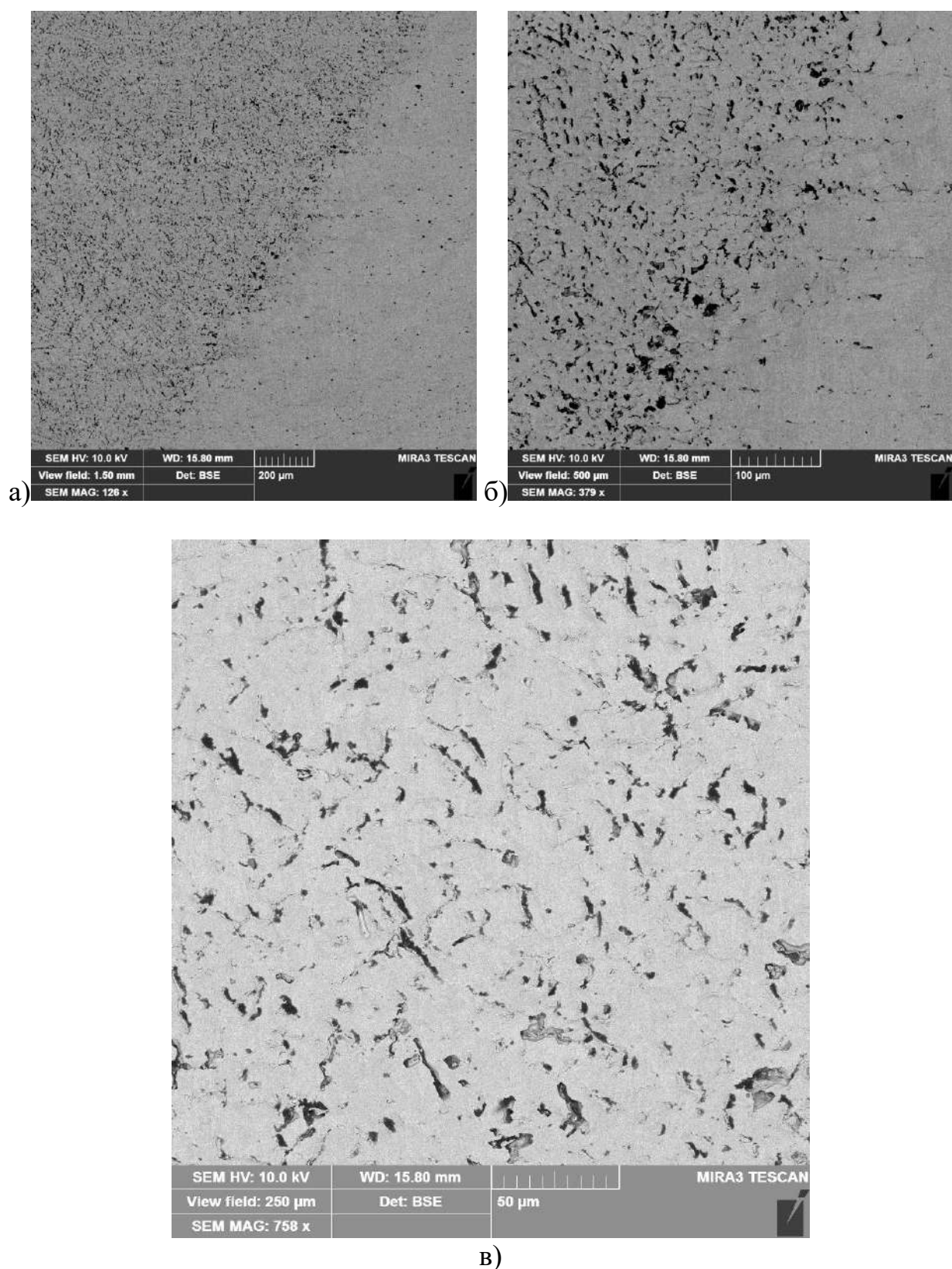


Рис. 4.40. Мікроструктура лінії сплавлення (а, б) та біляшовної зони (ЗТВ) (в) зварного з'єднання (6 мм), що отримано плазмовим зварюванням.

При порівнянні параметрів субструктури, що формується в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 товщиною **2 мм**, отриманих розглядуваними способами зварювання встановлено наступне (табл. 4.4).

Таблиця 4.4. Структурні параметри металу зварних з'єднань AISI 304 отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням, **2мм**

| Параметри | Зони | | | |
|--|-------------------------|-----------|---------------|-----------|
| | Шов | ЛС (шов) | ЛС(ЗТВ) | ОМ |
| Гібридне лазерно-плазмове зварювання, 2 мм | | | | |
| d_c , мкм | 2...10 | 2...10 | 5...15 | 3...5 |
| $h_{дв}$, мкм | 0,1...0,2 | 0,1...0,2 | - | 0,1...0,5 |
| Лазерне зварювання, 2 мм | | | | |
| d_c , мкм | 6...10 2...4×8...12 | 2...6 | 2...4×5...20 | 3...5 |
| $h_{дв}$, мкм | - | - | - | 0,1...0,8 |
| Плазмове зварювання, 2 мм | | | | |
| d_c , мкм | 5...20 3...6×10...20 | 5...10 | 5...7×20...40 | 3...8 |
| $h_{дв}$, мкм | 0,1...0,5 | - | - | 0,1...0,8 |

У разі лазерно-плазмового та лазерного зварювання розмір субзерен в металі зварного шва найменший - $d_c = 2...10$ (рис. 4.41, а) мкм та $d_c = 6...10$ мкм. При лазерному зварюванні в металі шва також формується субструктура подовженої («блочної») форми з розмірами $d_c = 2...4 \times 8...12$ мкм з чіткими субграницями (рис. 4.41, б). При плазмовому - субструктура укрупнюється у 2 рази ($d_c = 5...20$ мкм, рис. (рис. 4.41, в), також спостерігаються субзерна подовженої форми ($d_c = 3...6 \times 10...20$ мкм). Біля ЛС при лазерному та плазмовому зварюванні подовженої форми - $d_c = 3...4 \times 5...20$ мкм та $d_c = 5...7 \times 20...40$ мкм, відповідно. Такі структурні особливості можуть призводити до нерівномірного рівня механічних властивостей по зонах зварного з'єднання за рахунок зменшення або збільшення субструктурного зміцнення, згідно залежності Холла-Петча. При лазерно-плазмовому зварюванні по всіх зонах зварного з'єднання спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівновісної форми, що буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

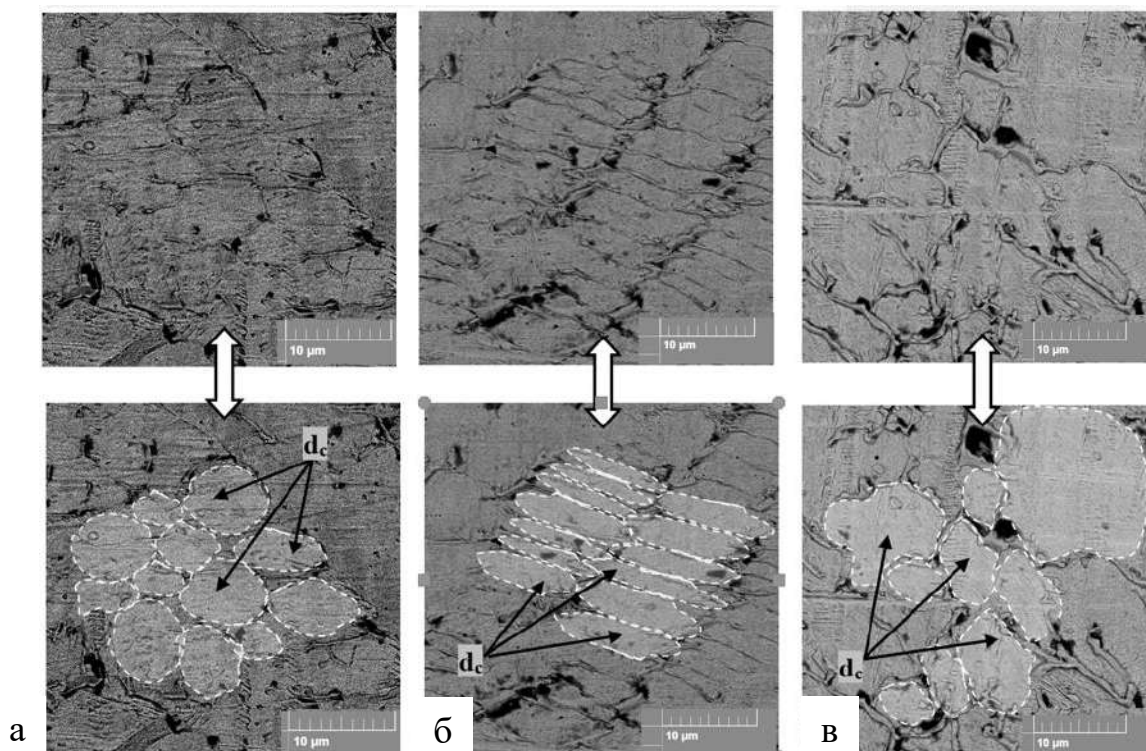


Рис. 4.41. Мікроструктура металу швів зварних з'єднань (2 мм), отриманих лазерно-плазмовим (а), лазерним (б) та плазмовим (в) зварюванням.

При порівнянні параметрів субструктури, що формується в металі зварних з'єднань сталі AISI 304 (товщиною 6 мм), розглядуваними способами встановлено наступне (табл. 4.5). У разі лазерно-плазмового та лазерного зварювання розмір субзерен в металі зварного шва та по ЛС найменший, відповідно: $d_c = 5 \dots 9$ (рис. 4.42, а) мкм та $d_c = 3 \dots 7$ мкм (шов); $d_c = 2 \dots 10$ мкм та $d_c = 2 \dots 6$ мкм (ЛС). При лазерно-плазмовому зварюванні в металі зварного шва та по ЛС формується субструктура подовженої форми з розмірами $d_c = 4 \dots 5 \times 8 \dots 25$ мкм (шов, рис. 4.42, б), $d_c = 2 \dots 4 \times 8 \dots 14$ мкм (ЛС). При плазмовому зварюванні субструктура укрупнюється у 2...5 разів як в металі шва, так і ЛС до $d_c = 10 \dots 40$ мкм (рис. 4.42, в) та $d_c = 20 \dots 30$ мкм, відповідно. Формування в металі шва субструктури із збільшенням розміру субзерна при плазмовому зварюванні призводить до зниження складової субструктурного зміцнення згідно залежності Холла-Петча. В даному випадку це проявляється в зниженні мікротвердості у порівнянні із зварними швами, що отримано лазерно-плазмовим та лазерним зварюванням. Такі структурні

особливості можуть призводити до нерівномірного рівня механічних властивостей по зонах зварного з'єднання. При лазерно-плазмовому зварюванні по всіх зонах зварного з'єднання спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівнівної форми, що буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

Таблиця 4.5. Структурні параметри металу зварних з'єднань сталі AISI 304 отриманих лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням, **6мм**

| Параметри | Зони | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| | Шов | ЛС (шов) | ЛС(ЗТВ) | ОМ |
| Гібридне лазерно-плазмове зварювання, 6 мм | | | | |
| d _с , мкм | 5...6 4...5×8...25 | 2...10 | 2...10 2...4×8...14 | 3...7 |
| h _{дв} , мкм | - | 0,1...0,2 | - | 1...2 (одиничні) |
| Лазерне зварювання, 6 мм | | | | |
| d _с , мкм | 3...7 2...4×8...15 (одиничні) | 2...6 | 4...7×8...20 | 3...5 |
| h _{дв} , мкм | - | - | - | - |
| Плазмове зварювання, 6 мм | | | | |
| d _с , мкм | 10...40 | 20...30 | 5...7×20...40 | 3...8 |
| h _{дв} , мкм | - | - | - | 0,1...0,8 (одиничні) |

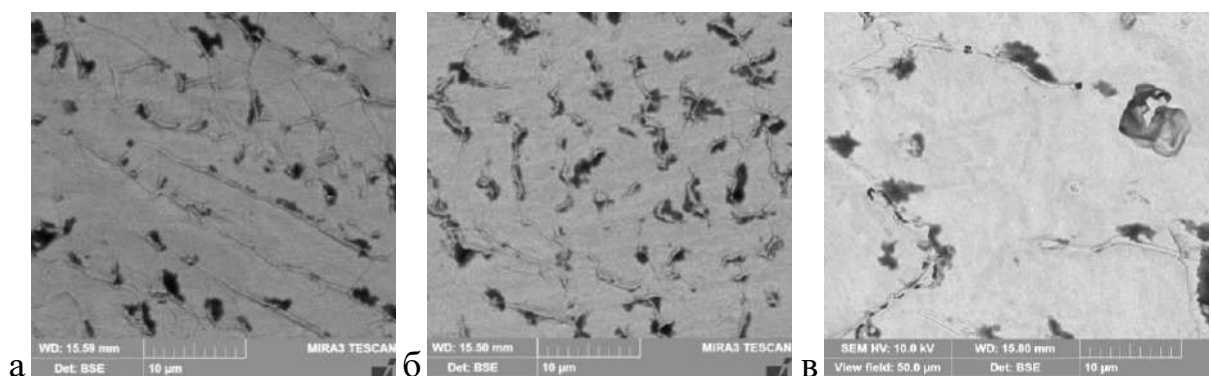


Рис. 4.42. Мікроструктура металу швів зварних з'єднань (6 мм), отриманих гібридним лазерно-плазмовим (а), лазерним (б), плазмовим (в) зварюванням.

Таким чином, з точки зору параметрів субструктури зварних швів найбільш сприятлива структура формується в металі зварних з'єднань, що отримані **лазерно-плазмовим зварюванням**.

4.2. Моделювання впливу умов технології і способу зварювання (лазерне, плазмове, гібридне лазерно-плазмове) на напружено-деформований стан зварних з'єднань.

Характер напружено-деформованого стану зварних з'єднань головним чином залежить від форми та геометричних параметрів зварного шва, що визначає величину усадочної сили та обумовлює розподіл залишкових зварювальних напружень.

Зважаючи на особливості формоутворення зварних швів при лазерно-плазмовому зварюванні, що полягають у формуванні широкої поверхневої частини зварного шва плазмовою дугою, властивій дуговим способам зварювання, з переходом в глиб металу, до «кинжальної» форми проплавлення. Величина та місце прикладення усадочної сили (центр зони пластичних деформацій) матимуть відмінний характер в порівнянні з зварними з'єднаннями, отриманими лазерним та плазмовим способом, що вноситиме зміни в розподіл залишкових зварювальних напружень. При впровадженні результатів роботи у промисловість необхідно враховувати особливості напружено-деформованого стану зварних з'єднань отриманих лазерно-плазмовим зварюванням. Для забезпечення експлуатаційних властивостей та конструкційної міцності. Це обумовлює доцільність оцінки впливу технології гібридного лазерно-плазмового зварювання, яка була проведена за допомогою моделювання теплових та термомеханічних процесів при зварюванні, методом скінченних елементів.

Моделювання проводилося за допомогою програмного комплексу, який дозволяє виконувати комп'ютерне моделювання серії зварювальних процесів при різних конфігураціях параметрів зварювання. Кінцево-елементна модель зварного з'єднання сталі AISI304 складається з 60 960 призматичних елементів і 73 382 вузлів. Пластини з габаритними розмірами: «Plate 1» - 200x100x2 мм і «Plate 2» - 200x100x2 мм, які зібрані «встик» з нульовим зазором для подальшого зварювання поздовжнім швом (рис. 4.43).

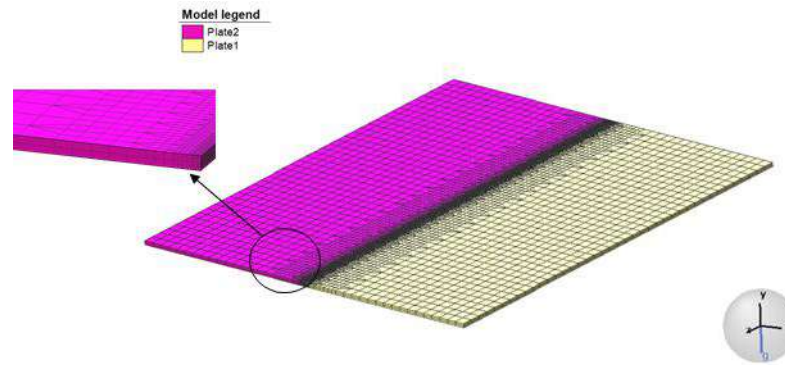


Рис. 4.43. Тривимірний кінцево-елементний модель стикового з'єднання.

У зоні інтенсивного нагріву зварного з'єднання сітка з кінцевих елементів нерегулярна, а розмір 3D елементів змінюється в межах $0.3 \times 0.3 \times 0.25$, $0.6 \times 0.6 \times 0.5$ та $1.25 \times 1.25 \times 1$ мм. За межами високонагрітої області розмір кінцевих елементів збільшений до $2.5 \times 2.5 \times 1$ і $5 \times 5 \times 1$ мм для скорочення часу розрахунку. Перехід між зонами, змодельованими елементами з різними розмірами основ забезпечується кінцевими елементами з прямокутно-трапецієподібними основами відповідних розмірів.

Зварювання виконується на підкладці "Back-Plate" товщиною 40 мм з фрезерованим пазом типу «keyhole». Пластини, що зварюються, зафіксовані вздовж напрямку зварювання за допомогою притискних пластин «Clamp 1» і «Clamp 2», відстань між якими становить 60 мм, що забезпечує вільний доступ до зони зварювання (рис. 4.44).

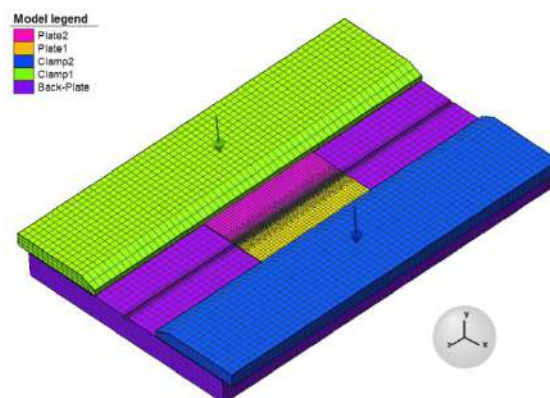


Рис. 4.44. Тривимірний кінцево-елементний модель стикового з'єднання в оснастці.

Рішення теплової задачі виконано для трьох способів зварювання: лазерного, лазерно-плазмового та плазмового. Моделювання джерела нагріву

для плазмового зварювання відповідає моделі подвійного еліпсоїда, запропонованої J. Goldak [109, 110] у вигляді подвійного еліпсоїда (рис. 4.45), з незалежним нормальним (за Гаусом) розподілом щільності потужності джерела. У роботах сучасних дослідників [111, 112] показано, що застосування моделі J. Goldak для дугового зварювання плавленням дозволяє прогнозувати термічний цикл у зварних з'єднаннях з високою точністю.

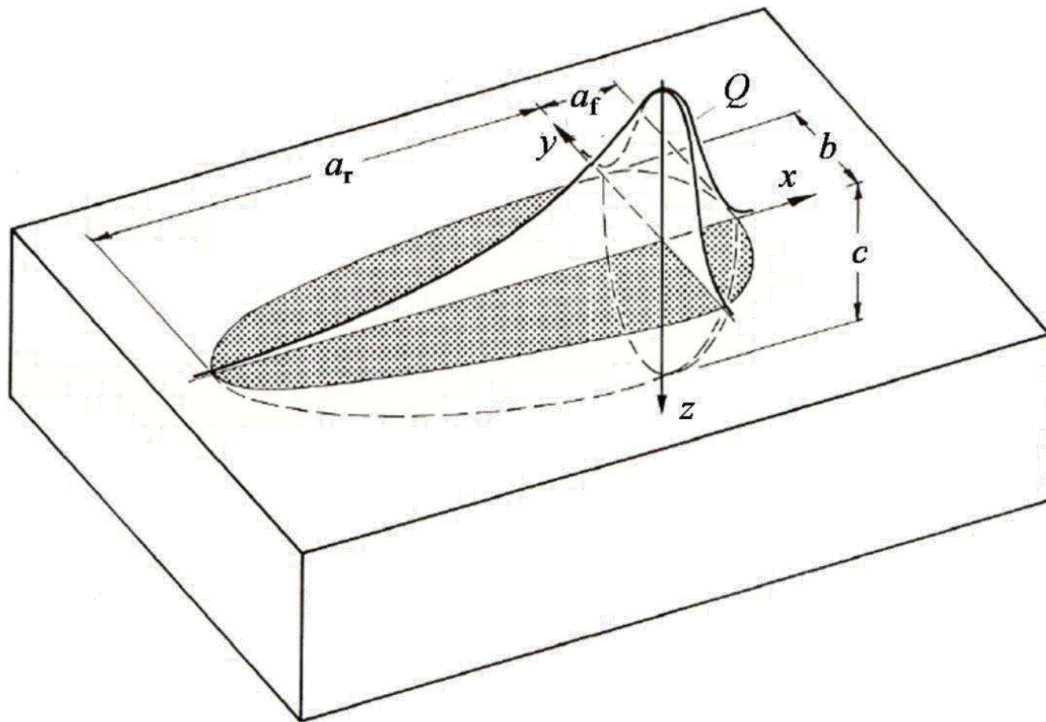


Рис. 4.45. Модель об'ємного зварювального джерела нагріву J. Goldak.

Для зварювання лазерним променем застосовано модель конічного джерела з трансформацією конічної форми в циліндричну на основі відомих параметрів променя. Модель об'ємного конічного джерела тепла (рис. 4.46) передбачає, що лазерний промінь рухається вздовж координати y з постійною швидкістю рівної швидкості зварювання і спрямований за нормаллю до поверхні виробу, а розподіл густини потужності відповідає нормальному закону.

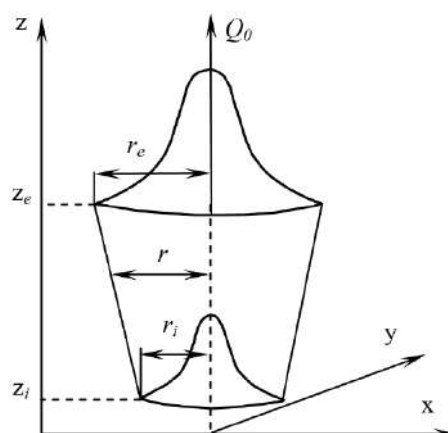


Рис. 4.46. Модель конічного джерела нагрівання при лазерному зварюванні. де r_e – радіус променя на поверхні виробу; r_i – радіус променя на тильній поверхні виробу; z_e – відстань уздовж координати z від початку системи координат до поверхні виробу; z_i – відстань уздовж координати z від початку системи координат до тильної поверхні виробу; y – координата в поздовжньому напрямку зварного з'єднання; x – координата у поперечному напрямку зварного з'єднання; Q_0 – питома кількість енергії в обсязі, Дж/мм³.

Для лазерно-плазмового зварювання моделювання теплових процесів виконано за одночасного використання двох вищезгаданих джерел. Параметри режимів зварювання стикового з'єднання розглядуваними способами зварювання наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6. Параметри режимів зварювання лазерного, лазерно-плазмового та плазмового зварювання зразків AISI 304, товщиною 2 мм.

| № п/п | № реж. | Спосіб | P, кВт | Iзв, А | Uд, В | Vзв, м/хв | Заглиблення фокусу | q, Дж/мм |
|-------|--------|--------------|--------|--------|-------|-----------|--------------------|----------|
| 1 | 23 | Лазер | 0,8 | - | - | 1 | 0,7 | 48 |
| 2 | 18 | Лазер-плазма | 0,8 | 80 | 27.2 | 1,5 | 0,7 | 119 |
| 3 | 30 | Плазма | - | 80 | 20.9 | 0,3 | - | 332,8 |

На підставі аналізу макрошліфів зварних з'єднань Рис. 4.47., виконаних заданими способами зварювання відповідно до обраної моделі рухомого джерела нагріву в програмі задавали геометричні параметри тепла джерела (рис. 4.48 – 4.50).

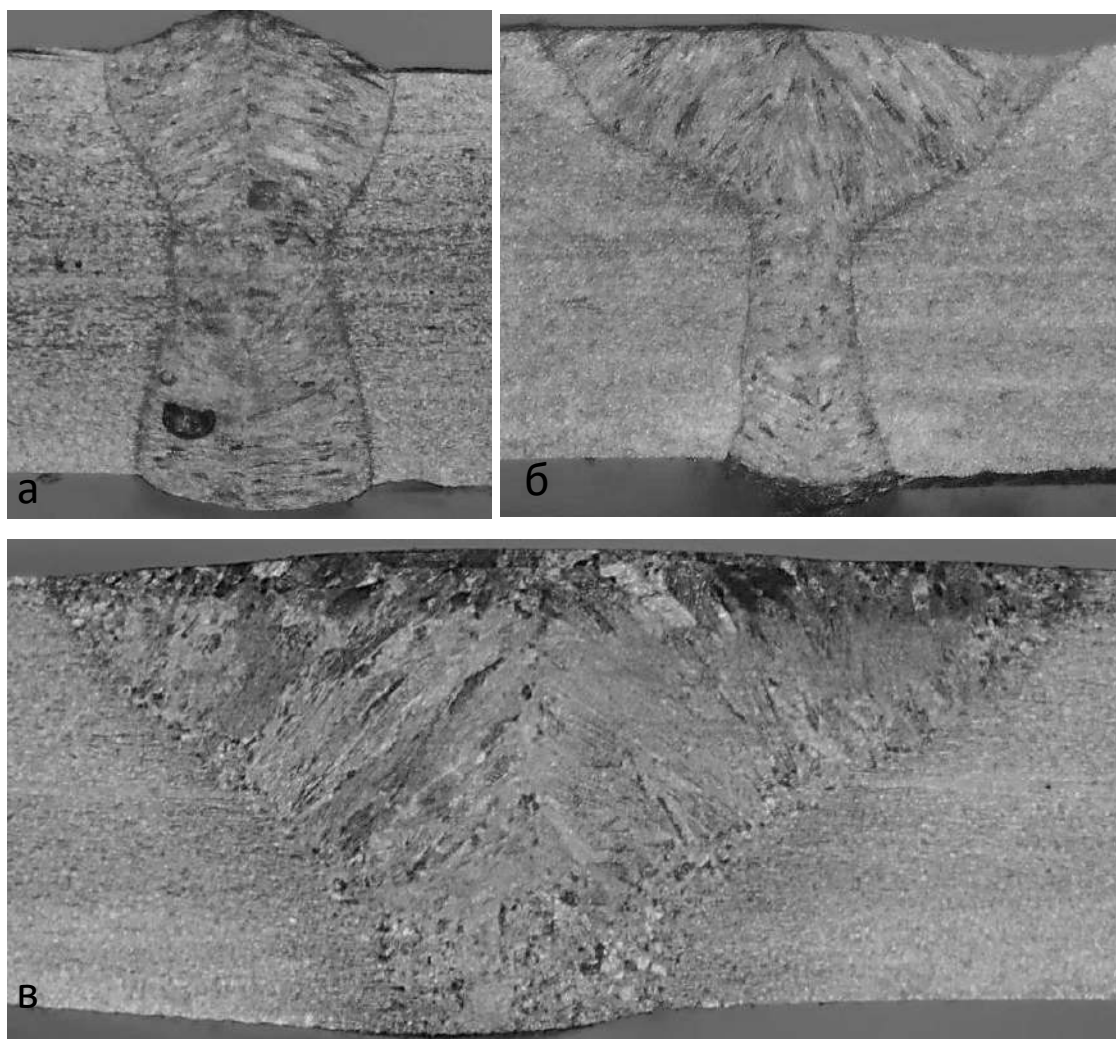


Рис. 4.47. Макрошліфи зварних з'єднань AISI 304 товщиною 2 мм, отриманих лазерним (а), плазмовим (б), та лазерно-плазмовим зварюванням (в)

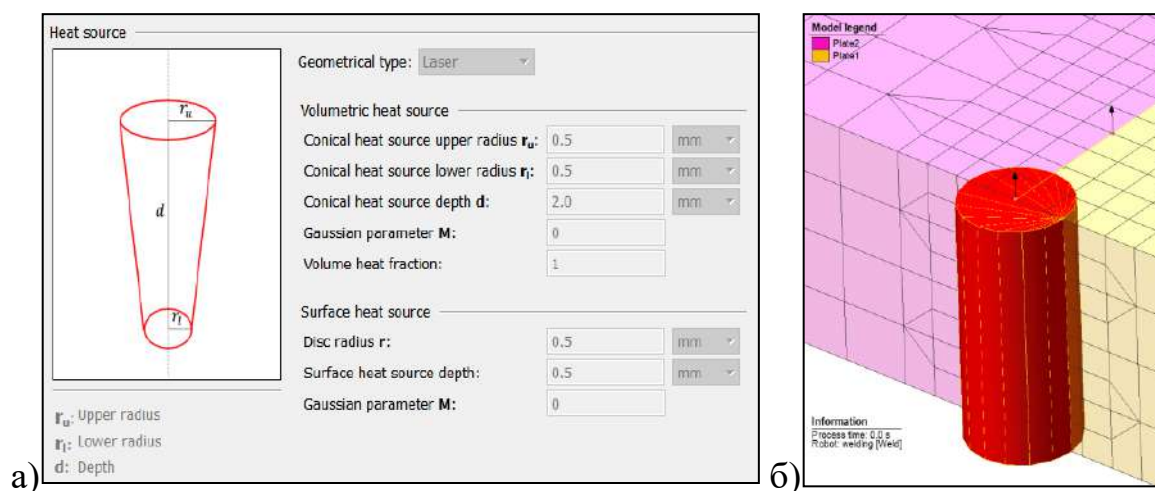


Рис. 4.48. Параметри (а) та форма джерела тепла (б) для лазерного зварювання.

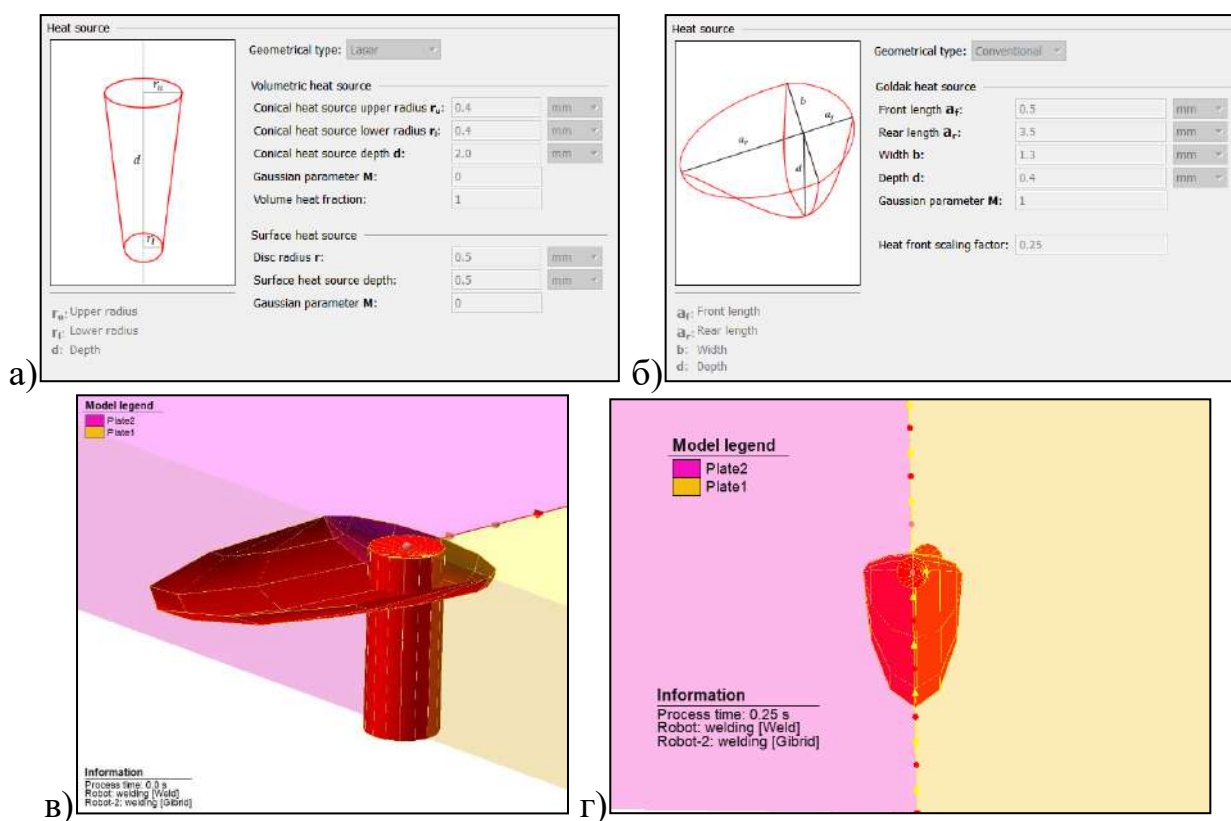


Рис. 4.49. Параметры (а, б) та форма джерела тепла (в, г) для лазерно-плазмового зварювання.

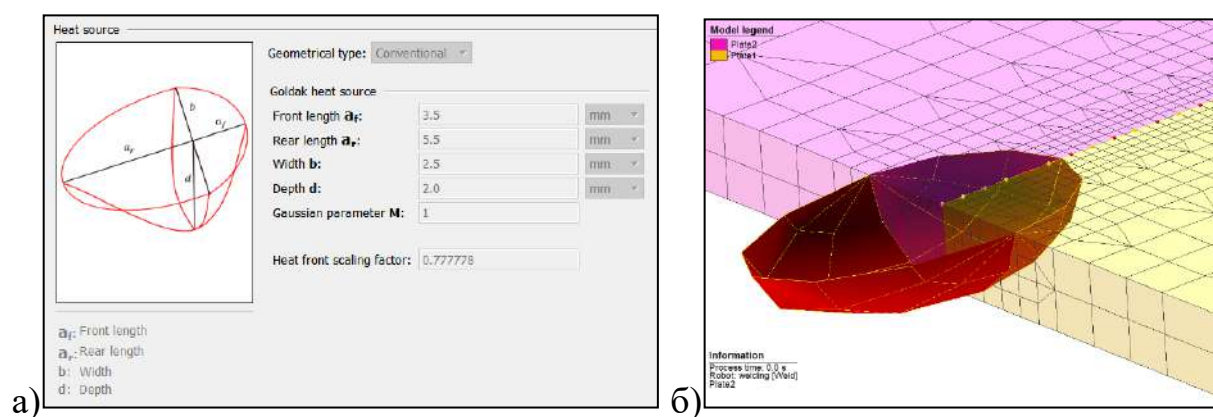
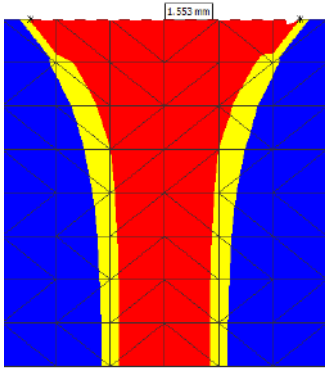
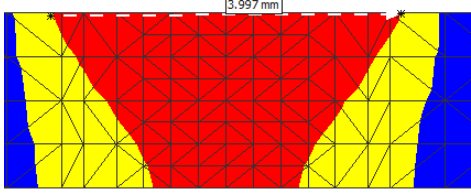
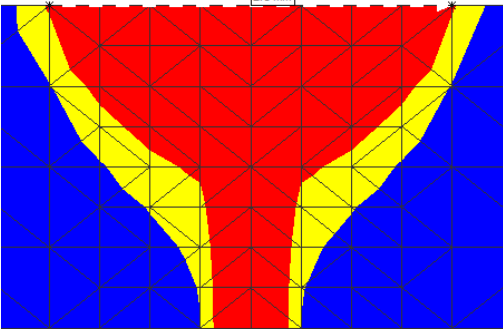


Рис. 4.50. Параметры (а) та форма тепла джерела (б) для плазмового зварювання.

Отримані в процесі моделювання форми проплавлення та їх геометричні параметри табл. 4.7. при трьох розглядуваних способах зварювання корелюють зі значенням знятими з макрошліфів.

Таблиця 4.7. Змодельовані форми проплавлення та порівняння геометричних їх параметрів

| Спосіб | Ширина шва , мм Лицева сторона/Зворотна | | Переріз ванни в розрахунковій моделі |
|--------------|--|--------------|--|
| | Фактичні | Змодельовані | |
| Лазер | 1,6/0,5 | 1,6/0,5 |  |
| Плазма | 4,2/1,5 | 4/1,7 |  |
| Лазер-плазма | 2,4/0,7 | 2,5/0,5 |  |

Порівняльний аналіз температурних кривих (рис. 4.51) показав, що максимальна температура в модельній задачі для різних способів зварювання відрізняється і становить 1805°C для лазерного, 3402°C – для лазерно-плазмового та 2268°C – для плазмового.

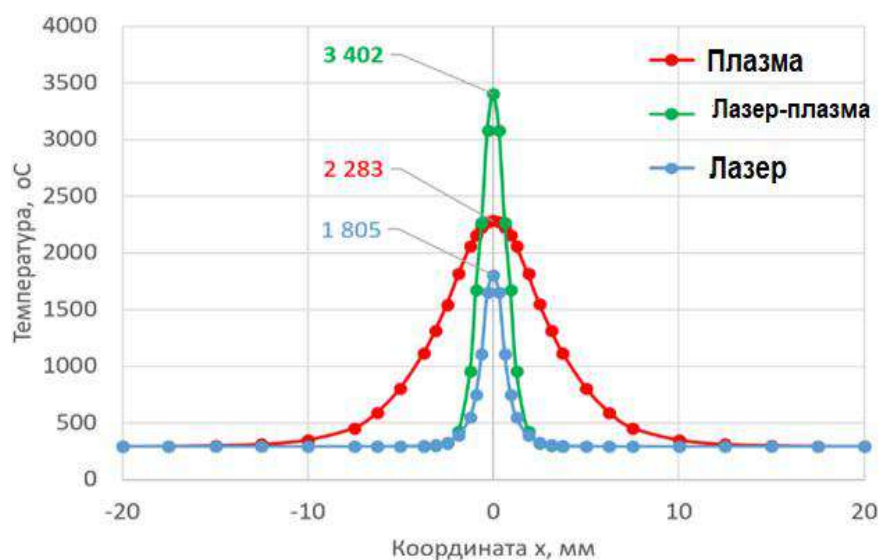


Рис. 4.51. Максимальні температури в середньому поперечному перерізі в момент дії джерела для розглядуваних способів зварювання.

По результатам моделювання теплової задачі, отримані термічні цикли зварювання, були порівняні з експериментальними даними, отриманими за результатами вимірювань в процесі зварювання за допомогою термопар (див. розділ 2), рис. 4.52. – 4.54.

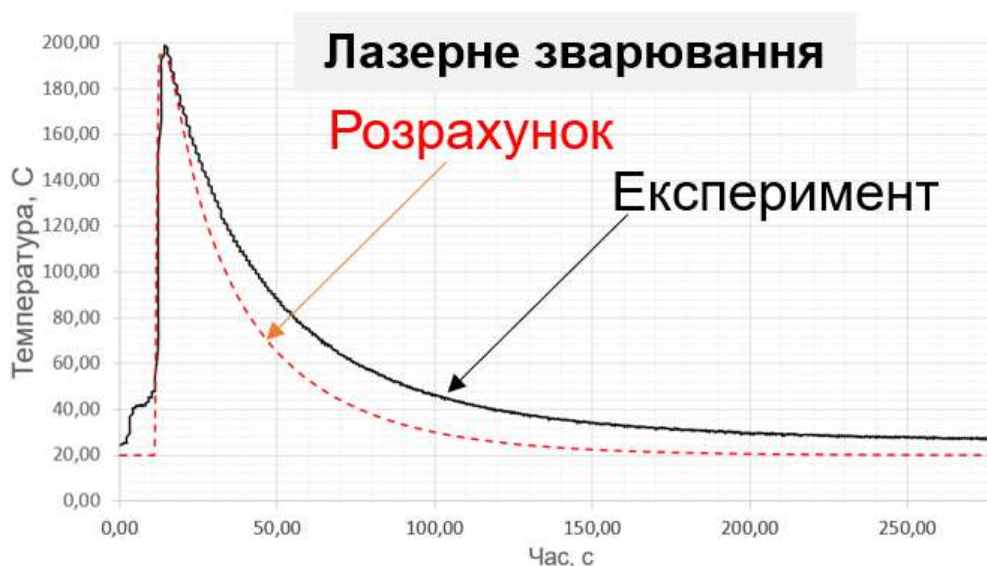


Рис.4.52. Розрахункові та експериментальні термічні цикли при лазерному зварюванні сталі AISI 304, товщиною 2 мм

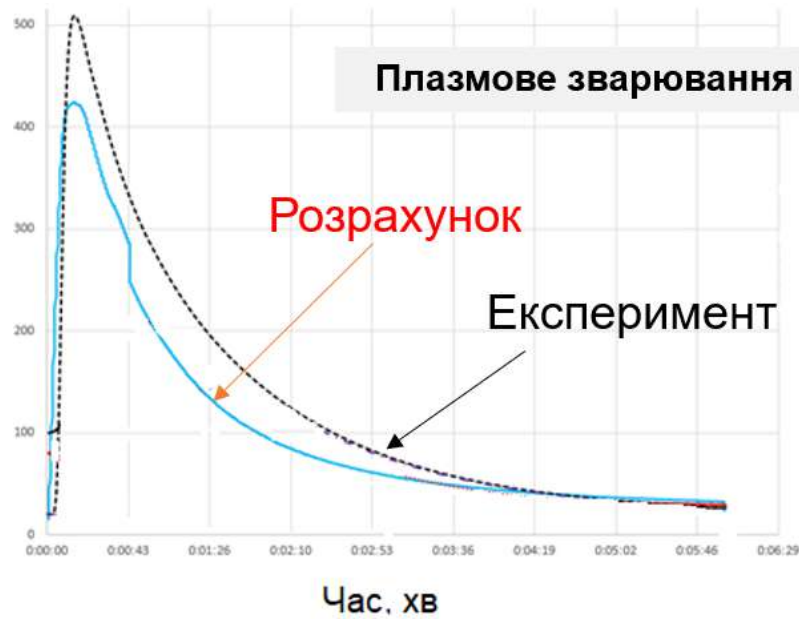


Рис.4.53. Розрахункові та експериментальні термічні цикли при плазмовому зварюванні сталі AISI 304, товщиною 2 мм

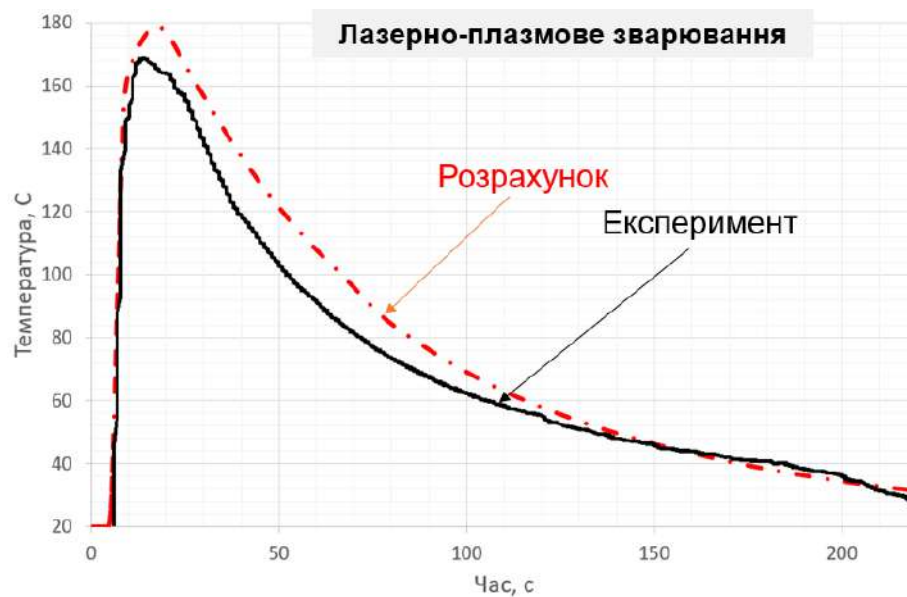


Рис.4.54. Розрахункові експериментальні термічні цикли при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні сталі AISI304, товщиною 2 мм

Змодельовані термічні цикли в більшості відповідають формі знятих за допомогою термопар. Пікові значення реальних та змодельованих температур сходяться з похибкою до 15%, що є прийнятною для подальшого моделювання напружено деформованого стану.

Після верифікації розрахункової моделі за температурними показниками, виконано подальше вирішення термо-механічної задачі. Визначено розподіли залишкових еквівалентних зварювальних напружень та переміщень рис. 4.55-4.60 для розглядуваних способів зварювання.

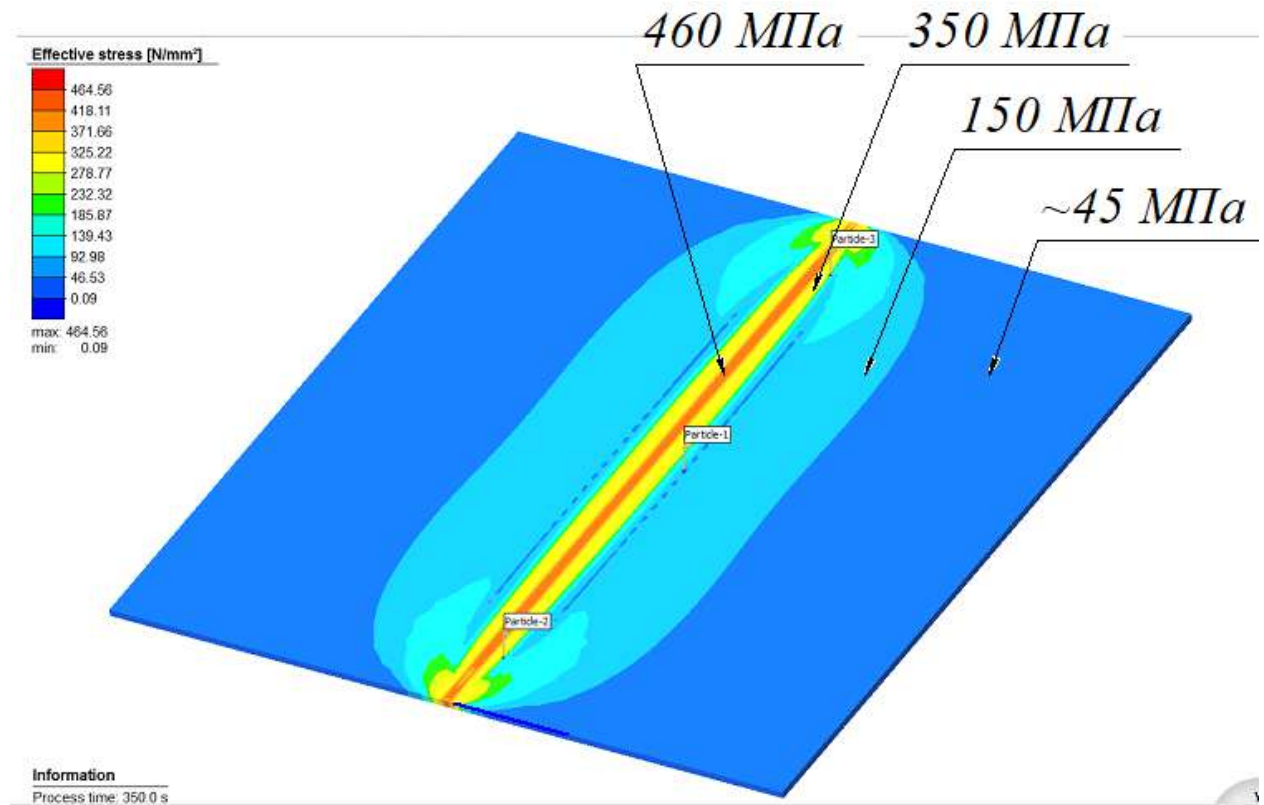


Рис.4.55. Розподіл еквівалентних залишкових зварювальних напружень при лазерному зварюванні

Максимальні напруження близько 465 МПа при моделюванні лазерного зварювання виникають у зварному шві, та 350 МПа в навколошовній зоні. В зоні на відстані 5 мм від шва, шириною 25 мм залишкові напруження становлять близько 150 МПа.

Характер та значення величини переміщень відповідають процесу лазерного зварювання та є мінімальними. В середньому становлять 0,13 мм та зосереджені у шві та ЗТВ, пікове значення становить 0,17 мм.

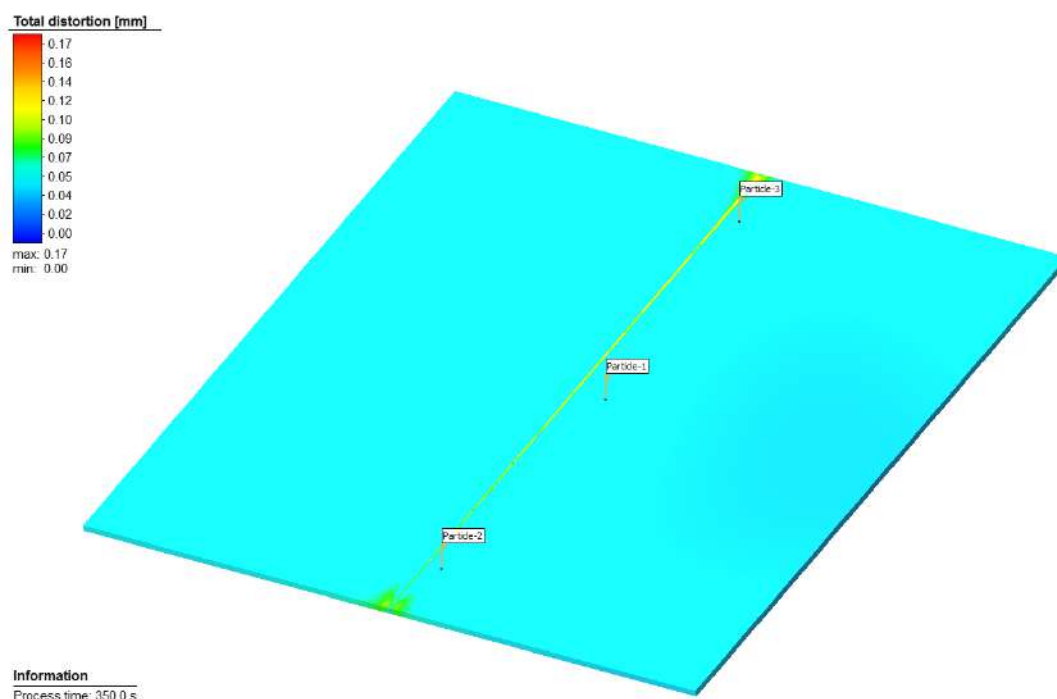


Рис.4.56. Розподіл переміщень при лазерному зварюванні

У випадку моделювання плазмового зварювання максимальні напруження сконцентровані в ЗТВ, що обумовлено усадкою об'ємного відносно лазерного зварного шва. Ця зона має ширину 4 мм та рівень напружень до 460 МПа.

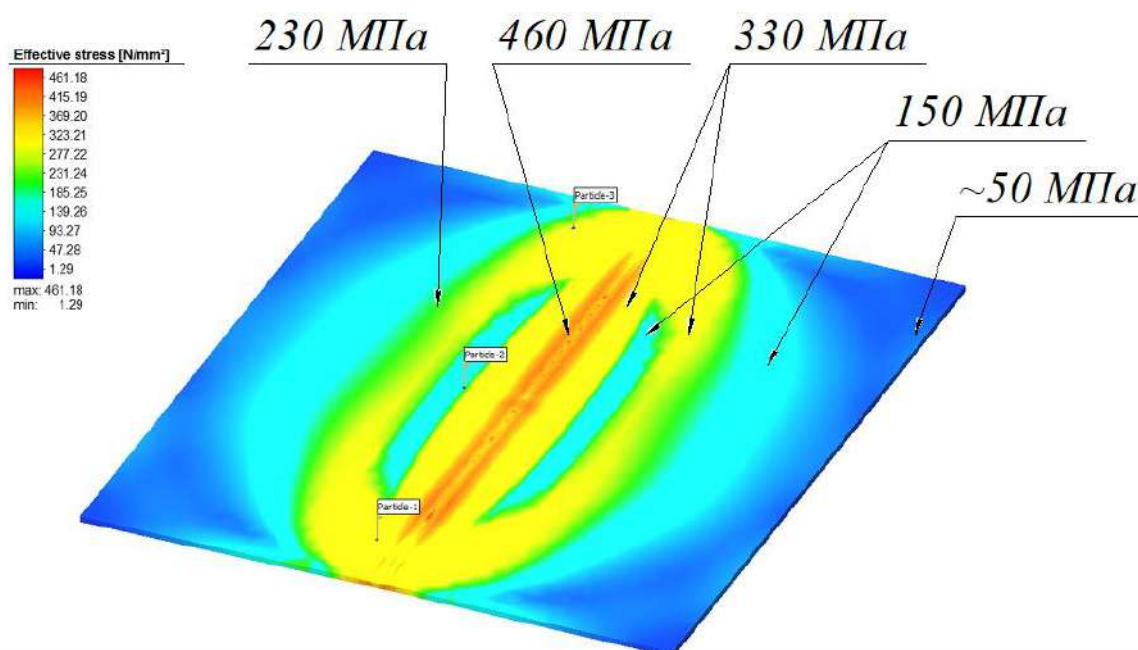


Рис.4.57. Розподіл еквівалентних залишкових зварювальних напружень при плазмовому зварюванні

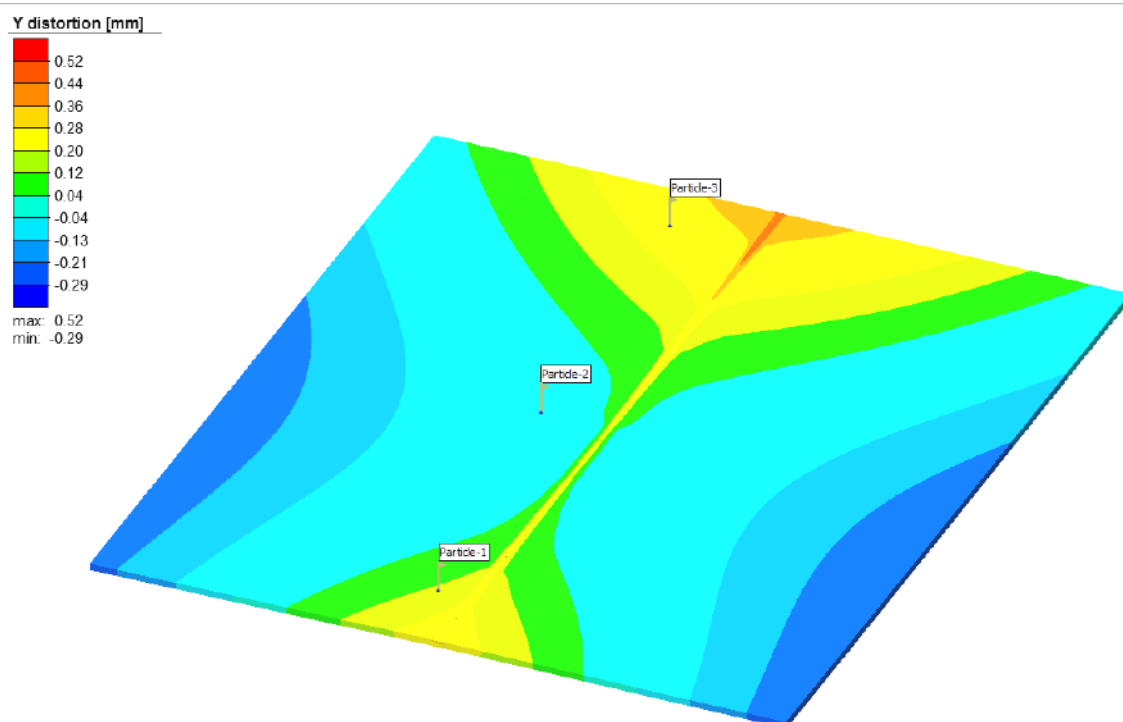


Рис.4.58. Розподіл переміщень при плазмовому зварюванні

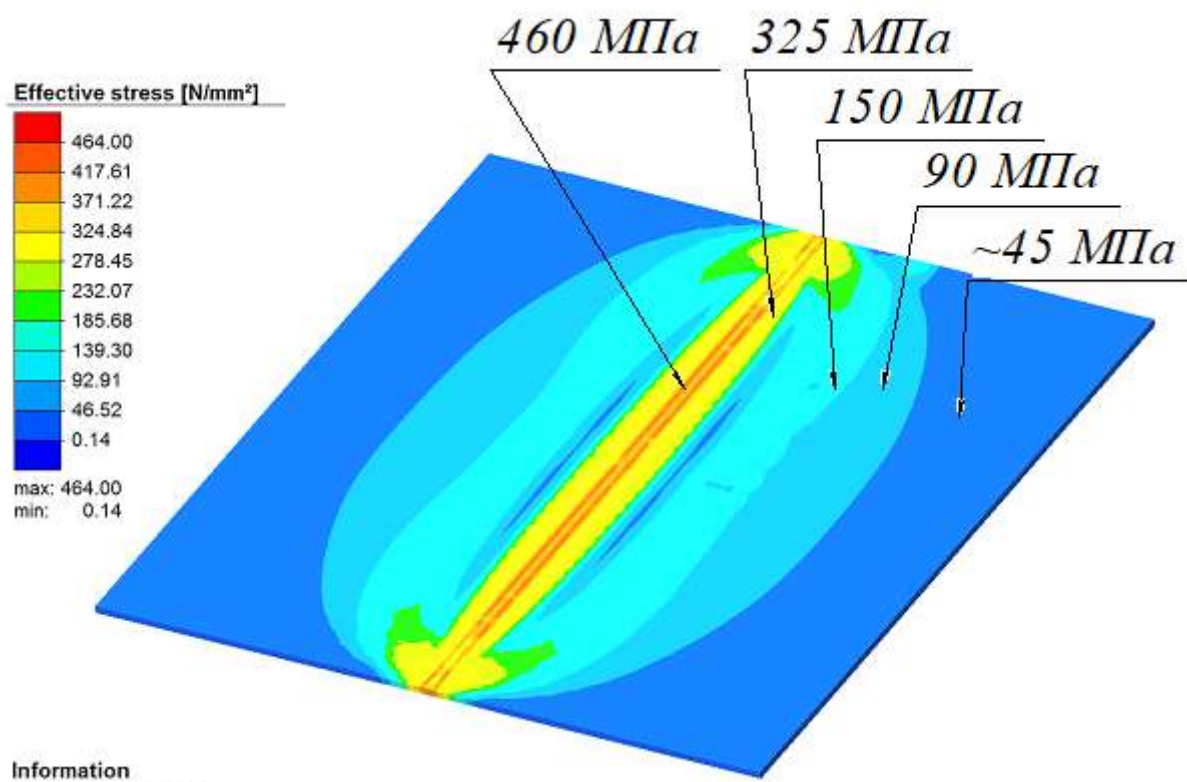


Рис.4.59. Розподіл еквівалентних залишкових зварювальних напружень при лазерно-плазмовому зварюванні

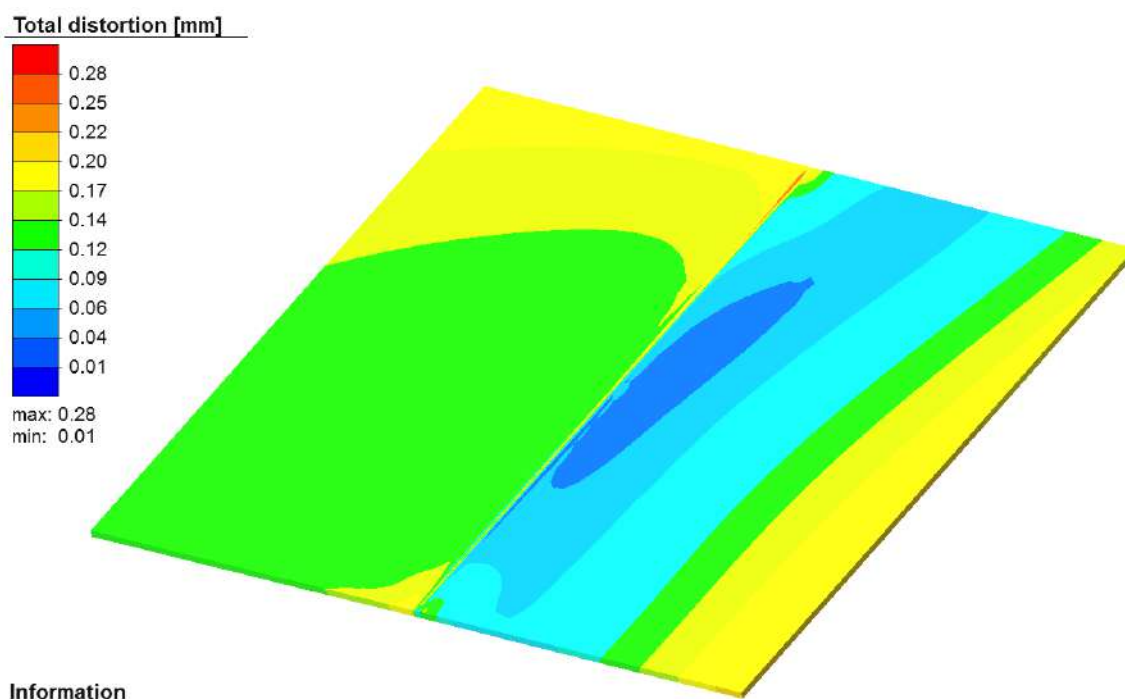


Рис.4.60. Розподіл переміщень при лазерно-плазмовому зварюванні

Отримані значення напружень та переміщень відображені в таблиці 4.8. Максимальні значення еквівалентних напружень, в моделі, для трьох розглядуваних способів знаходяться на одному рівні і становлять 460..465 МПа. Максимальні переміщення близько 0.5 мм утворилися в модельованому зразку плазмового зварювання. Переміщення при лазерно-плазмовому та лазерному зварюванні, мінімальні та відповідають значенню 0,2 мм.

Характерні зони зниження еквівалентних напружень (зони з рівнем в 150 МПа) в поперечному перерізі зразка обумовлені умовами збирання пластин в складально-зварювальній оснастці із жорстким закріпленням.

Таблиця 4.8. Значення еквівалентних залишкових зварювальних напружень, та переміщень, отриманих в результаті моделювання.

| Спосіб | Еквівалентні напруження, МПа | | Переміщення, мм | |
|--------|------------------------------|---------|-----------------|---------|
| | Максимум | Мінімум | Максимум | Мінімум |
| Лазер | 464,56 | 0,09 | 0,17 | 0 |
| Плазма | 461,18 | 1,29 | 0.52 | -0.29 |
| Гібрид | 464 | 0,14 | 0,2 | 0,1 |

Для більш детального порівняльного аналізу розглянемо діаграму розподілу еквівалентних напружень в повздовжньому напрямку, в середньому перетині змодельованих зразків – рис. 4.61, значення напружень в контрольних точках приведені в таблиці 4.9.

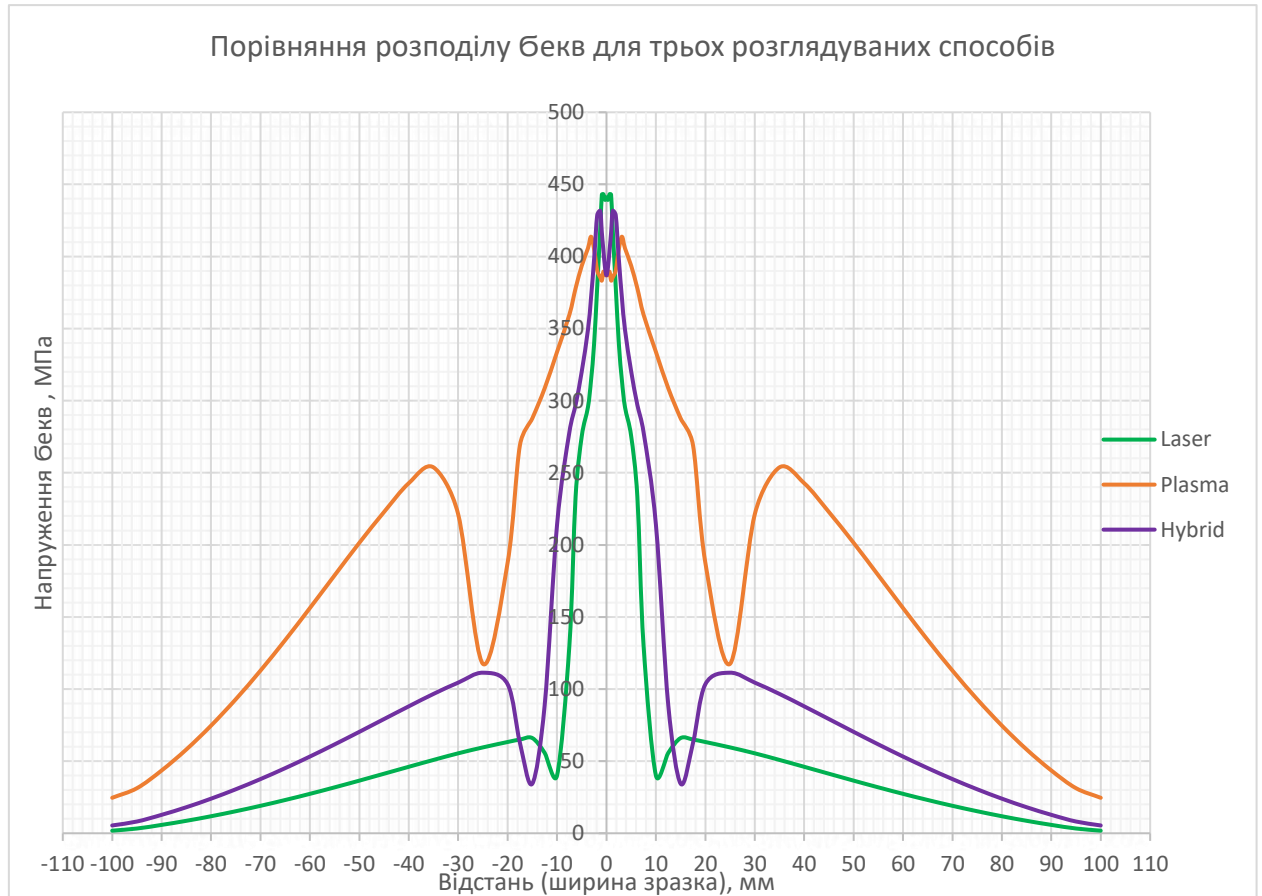


Рис. 4.61. Порівняльна діаграма розподілу еквівалентних напружень в залишковому стані

З епюр наведених на рис. 4.61, видно, що максимальні, пікові значення напружень сконцентровані в ЗТВ. Напруження у 443 МПа утворюються у зразку лазерного зварювання, для плазмового – 413,7 МПа, лазерно-плазмового зварювання займає проміжну позицію з піковим значенням 431,7 МПа.

Характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному. Це обумовлено порівняно близькими погонними енергіями зварювання.

Таблиця 4.9. Значення еквівалентних напружень в контрольних точках модельованих зразків.

| Координата, мм | Еквівалентні напруження, МПа | | |
|-------------------------|------------------------------|---------------|----------------|
| | Лазер | Гібрид | Плазма |
| 0,6 | 443,25 | 404,402 | 389,413 |
| 1,25 | 419,851 | 431,66 | 385,378 |
| 3,1 | 314,006 | 371,296 | 413,742 |
| 10 | 40,0954 | 214,013 | 333,847 |
| 15 | 66,0299 | 34,4032 | 287,761 |
| 25 | 59,5502 | 111,367 | 117,505 |
| 35 | 50,8638 | 96,631 | 253,76 |
| | | | |
| Максимум | 443,25 | 431,66 | 413,742 |
| Мінімум | 1,79 | 5,41 | 24,61 |
| <i>Середнє значення</i> | <i>143,4</i> | <i>173,27</i> | <i>247,33</i> |

На всіх епюрах спостерігається плавлене падіння напружень до 40 МПа на відстані 10 мм від осі зварного шва при лазерному зварюванні, 117 МПа на відстані 25 мм при плазмовому, та 34 МПа на відстані 15 мм для гібридного зварювання. З подальшим ростом до 66; 253; 111 МПа на координатах 15; 35 та 25 мм, для лазерного, плазмового та гібридного зварювання, відповідно.

Середнє значення напружень при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні складає 173 МПа, що є на 20% більше відносно 143 МПа при лазерному зварюванні та на 40% менше від 247 МПа – при плазмовому.

В цілому напружено-деформований стан при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні, є менш локалізованим ніж при лазерному, та характеризується нижчим рівнем залишкових напружень відносно варіанту плазмового зварювання. На основі цього, гібридне лазерно-плазмове зварювання, з точки зору напружено-деформованого стану є сприятливішим процесом отримання зварного з'єднання в порівнянні з лазерним та плазмовим зварюванням.

4.3. Експериментальна оцінка залишкових напружень в зварних з'єднаннях та верифікація результатів теоретичних досліджень.

В будь-якій конструкції чи виробі, що виготовляється за допомогою зварювання утворюються залишкові зварювальні напруження, які в сумі з напруженнями від зовнішніх навантажень можуть призвести до руйнування зварного вузла, або конструкції в цілому. Розрахункові методи в тому числі моделювання на базі методу скінченних елементів дають змогу спрогнозувати їх величину та розподіл. Однак розрахункові методики, хоча і дають точність отриманих результатів з похибкою до 20%, що загалом вважається достатнім для прогнозних методів визначення, все ж таки потребують верифікації, експериментальними методами, особливо у випадку моделювання нетипових задач гібридних технологій зварювання.

Було виконано експериментальні дослідження напруженого стану стикового зварного з'єднання, розміром 200х200 зі сталі AISI 304, товщиною 2 мм, виконаного лазерно-плазмовим зварюванням рис. 4.62.

Параметри режимів зварювання зразка наведені в таблиці 4.10.

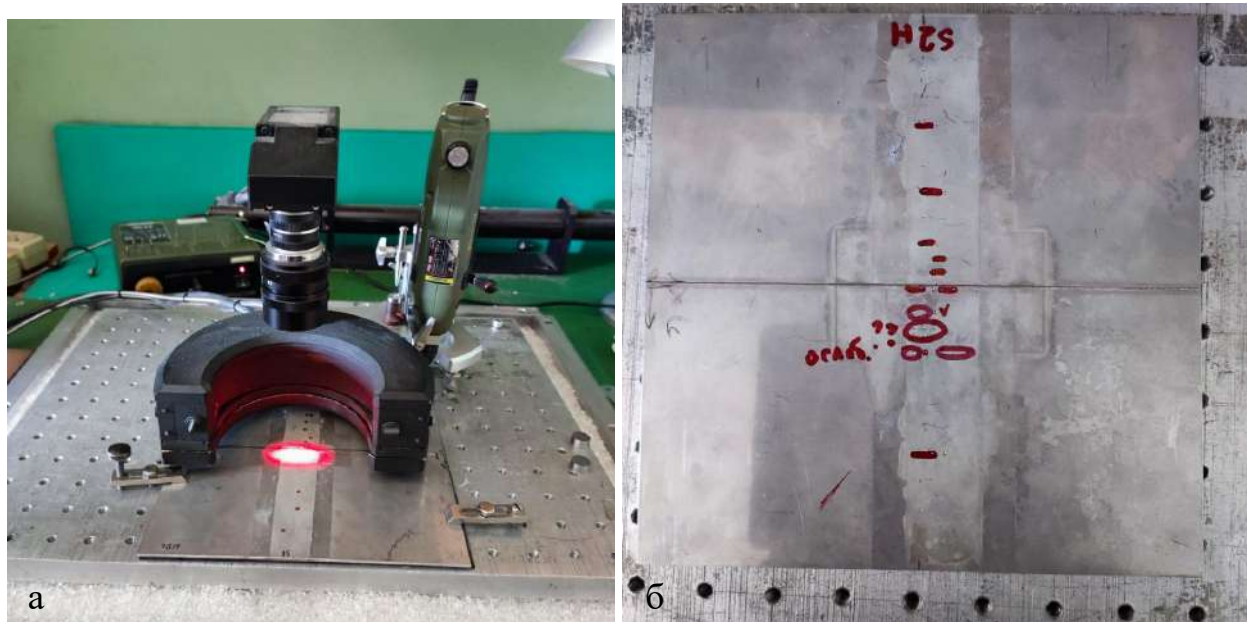


Рис. 4.62. Фото проведення вимірювань напруженого стану (а), та зовнішній вигляд зразка після виконання замірів (б).

Таблиця 4.10. – Параметри режиму зварювання зразка.

| δ , мм | P, Вт | I _{зв} , А | U _д , В | V _{зв} , м/хв |
|---------------|-------|---------------------|--------------------|------------------------|
| 2 | 800 | 80 | 27,2 | 1,5 |

Дослідження проводилися за допомогою електронного спекл-інтерферометра та визначали значення напружень на лицевій стороні зразка. Для визначення залишкових напружень цей метод у поєднанні з методом отворів отримав широке застосування. Цей метод полягає в реєстрації переміщень, що виникають в області пружного розвантаження напружень, за допомогою отвору, та подальшого обчислення залишкових напружень з використанням залежностей, отриманих в результаті моделювання напружено-деформованого стану методом кінцевих елементів. [113]

Ескіз точок визначення напружень приведений на рис. 4.63.

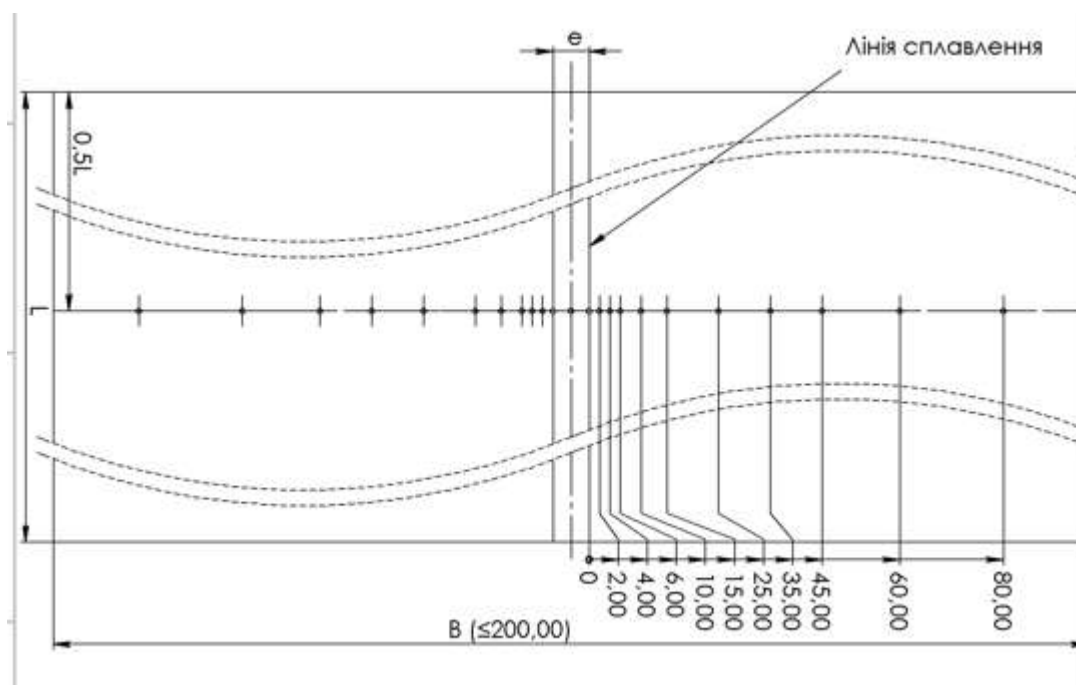


Рис. 4.63. Координати точок визначення компонент напруженого стану

При обробці даних застосовували механічні характеристики основного металу, отримані за результатами механічних випробувань на статичний розтяг (табл. 4.11).

Таблиця 4.11. Механічні властивості сталі AISI 304

| Модуль Юнга, ГПа | Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа | Границя міцності σ_B , МПа | Відносне видовження, % |
|---------------------|--|---|---------------------------|
| 193 | 300 | 654,4 | 44,45 |

Складність у визначенні залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії, на прикладі сталі AISI 304, полягає в необхідності забезпечити властивості поверхні зразка, щоб її дифузійно-відбивальні характеристики під час освітлення лазерним випромінюванням для формування спекл-структур. Для цього застосовувалося хімічне травлення в суміші азотної та соляної кислоти в пропорції 1:3. Додатково проведення експериментального визначення напружень ускладнювалося складністю механічної обробки нержавіючих сталей. Тому дані дослідження, через свою складність, можуть розглядатися як спосіб верифікації розрахункових моделей, а не як рекомендована методика визначення залишкових напружень в зварних з'єднаннях корозійностійких нержавіючих сталей типу AISI 304.

Отримані в ході дослідження експериментальні значення напружень було перераховано в еквівалентні напруження за Мізесом, відповідно до IV теорії міцності, за формулою (4.1):

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.1)$$

При розрахунках значення напружень по товщині σ_3 було прийнято рівним нулю, формула (4.1) прийняла вигляд:

$$\sigma_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (4.2)$$

За результатами розрахунків було побудовано епюру розподілу еквівалентних напружень в середньому перерізі зварного з'єднання в залишковому стані та накладено її на епюру розрахункових значень (рис. 4.64), отриману в п. 4.2.

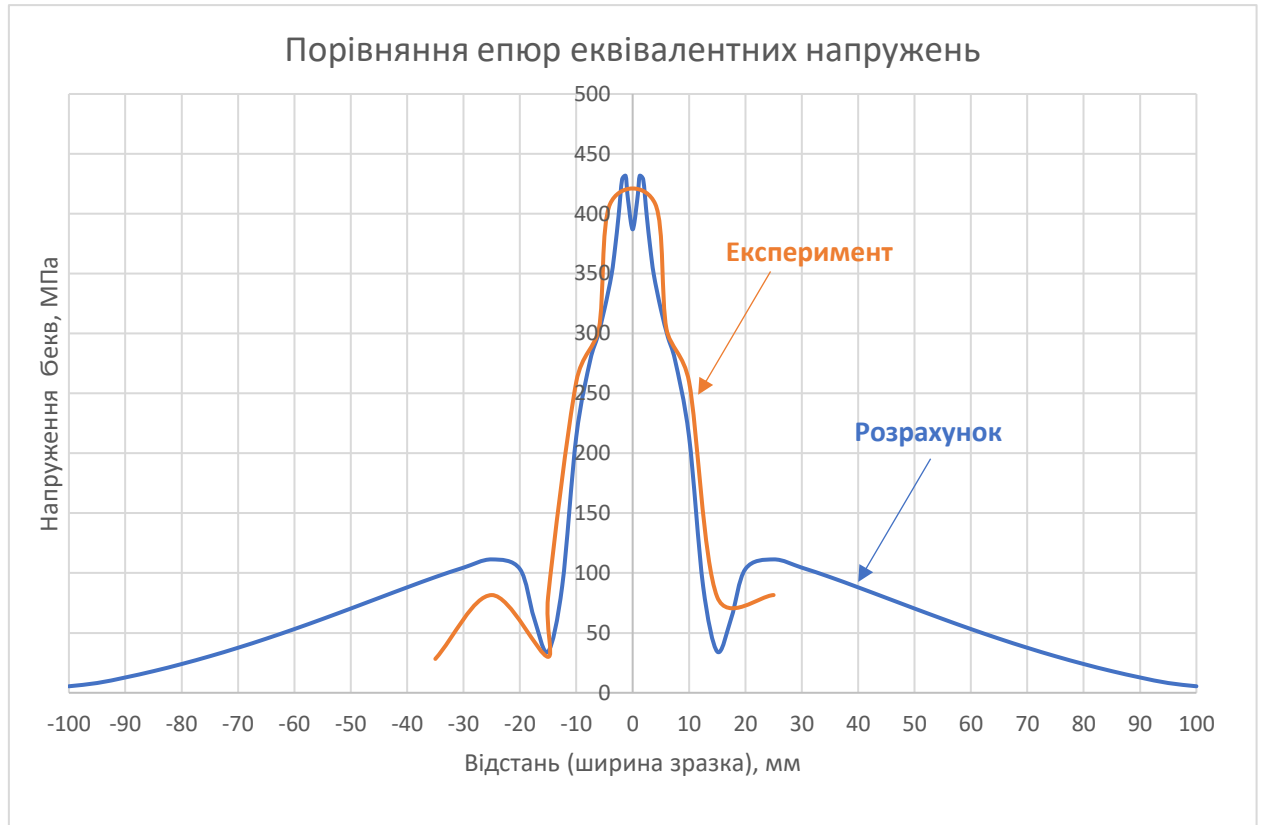


Рис. 4.64 . Порівняння епюр еквівалентних напружень у зварному з'єднанні AISI 304, товщиною 2, виконаного лазерно-плазмовим зварюванням

Відповідно до епюри розрахункових та експериментальних значень еквівалентних напружень, в середньому похибка між розрахунком та експериментом не перевищує 6%, що є близьким до заявленого, розробниками методу, значення допустимої похибки при визначенні напружень методом спекл-інтерферометрії. [114]. За результатами порівняння епюр рис. 4.64, можна зробити висновок, що розроблена розрахункова методика визначення залишкових зварювальних напружень, на базі методу скінченних елементів, є придатною для прогнозування НДС в зварних з'єднаннях, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням.

4.4. Вплив умов технології і способу зварювання на фізико-механічні властивості зварних з'єднань.

Відмінність технології отримання зварних з'єднань, зміна погонної енергій заварювання та параметрів режимів змінюють термічні цикли при зварюванні, що мають вплив як на напружено деформований стан та мікроструктуру зварних з'єднань, так і на механічні властивості.

Забезпечення необхідного рівня механічних властивостей є однією з найважливіших складових надійності зварних конструкцій, тому важливо розуміти вплив технології гібридного лазерно-плазмового зварювання на показники міцності та пластичності зварних з'єднань, отриманих за її допомогою. Для цього було проведено механічні випробування на розтяг серії зразків зварних з'єднань зі сталі AISI 304, товщиною 2 та 6 мм виконаних лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням без застосування присадних дротів, відповідно до методики див. розділ 2.



Рис. 4.65. Фото зразків зі зварних з'єднань та основного металу підготованих для випробування на розтяг в методику

Випробування проводили на універсальному серво-гідравлічному випробувальному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 кН. Контроль параметрів при випробуваннях здійснювався за допомогою стандартного програмного забезпечення TestWorks 4 системи MTS 318.25. В

таблиці 4.12. приведені механічні властивості основного металу з якого відбиралися пластини для зварювання

Таблиця 4.12. Механічні властивості сталі AISI 304 що отримані шляхом випробування плоских зразків на одновісний розтяг

| Товщина, мм | Модуль Юнга, ГПа | Границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа | Границя міцності σ_B , МПа | Відносне видовження, % |
|-------------|---------------------|--|---|---------------------------|
| 2 | 193 | 300 | 654,4 | 44,45 |
| 6 | 191 | 291 | 644,4 | 44,1 |

При випробуванні зварних з'єднань на статичний розтяг визначали міцність найбільш слабшої ділянки зварного з'єднання. Границю міцності розраховували по діаграмі деформування за методикою, яка передбачена стандартом ДСТУ ISO 6892-1:2019. При випробуванні визначали місце руйнування зразка (по металу шва, по металу зони термічного впливу, по основному металу). Результати випробувань та значення границі міцності серії зразків представлені в табл. 4.13.

Таблиця 4.13. Результати випробування зразків зварних з'єднань на статичний розтяг

| № зразка | Товщина, мм | Спосіб зварювання | Місце руйнування | Границя міцності σ_B , МПа | Відносне видовження, δ , % |
|----------|----------------|-------------------|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 18 | 2 | Лазер-плазма | зародження та руйнування в зоні термічного впливу близько лінії сплавлення | 645,6 | 51,55 |
| 23 | 2 | Лазер | зародження та руйнування в зоні термічного впливу близько лінії сплавлення | 647,1 | 52,5 |

| | | | | | |
|----|---|------------------|--|--------|-------|
| 30 | 2 | Плазма | зародження в зоні сплавлення кореня шва з основним металом; руйнування по металу шва | 638,8 | 45,9 |
| 67 | 6 | Лазер | Зародження в зоні термічного впливу з лицьової сторони; руйнування – в зоні термічного впливу близько лінії сплавлення | 637,4 | 51,6 |
| 70 | 6 | Лазер- плазма | зародження та руйнування в зоні термічного впливу близько лінії сплавлення | 633,4 | 50,05 |
| 89 | 6 | Плазма | зародження в зоні сплавлення кореня шва з основним металом; руйнування по металу шва | 614,25 | 41,05 |

Аналіз результатів показав, що показники міцності зварних з'єднань отриманих гібридним лазерно-плазмовим зварюванням є близькими до міцності з'єднань отриманих лазерним зварюванням та відповідають 97% міцності основного металу рис. 4.66. Та перевищують відповідні показники при плазмовому зварюванні на 10..20 МПа. Зниження пластичності металу зварних з'єднань відносно основного металу не спостерігається.

При цьому відносно видовження зразків отриманих гібридним зварюванням, перевищує відповідний показник з'єднань отриманих плазмовим зварюванням на 5-9%.

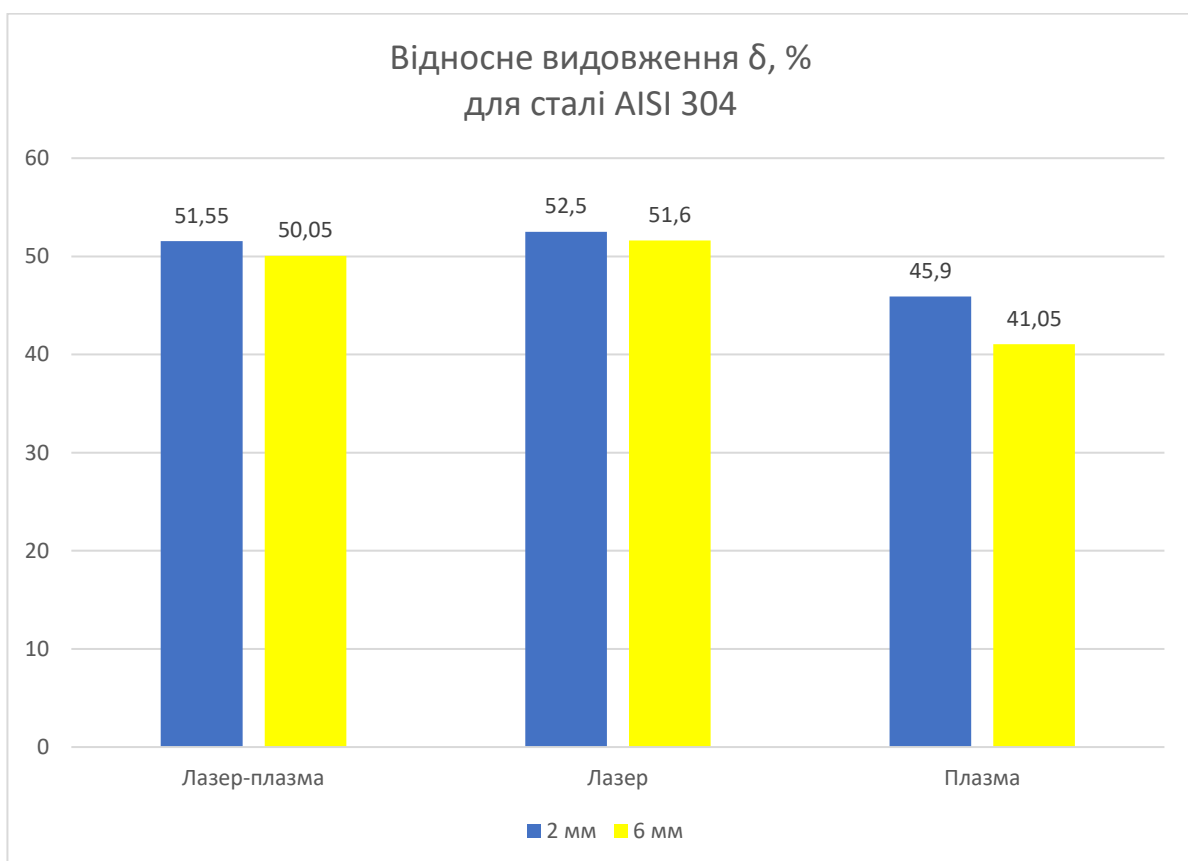
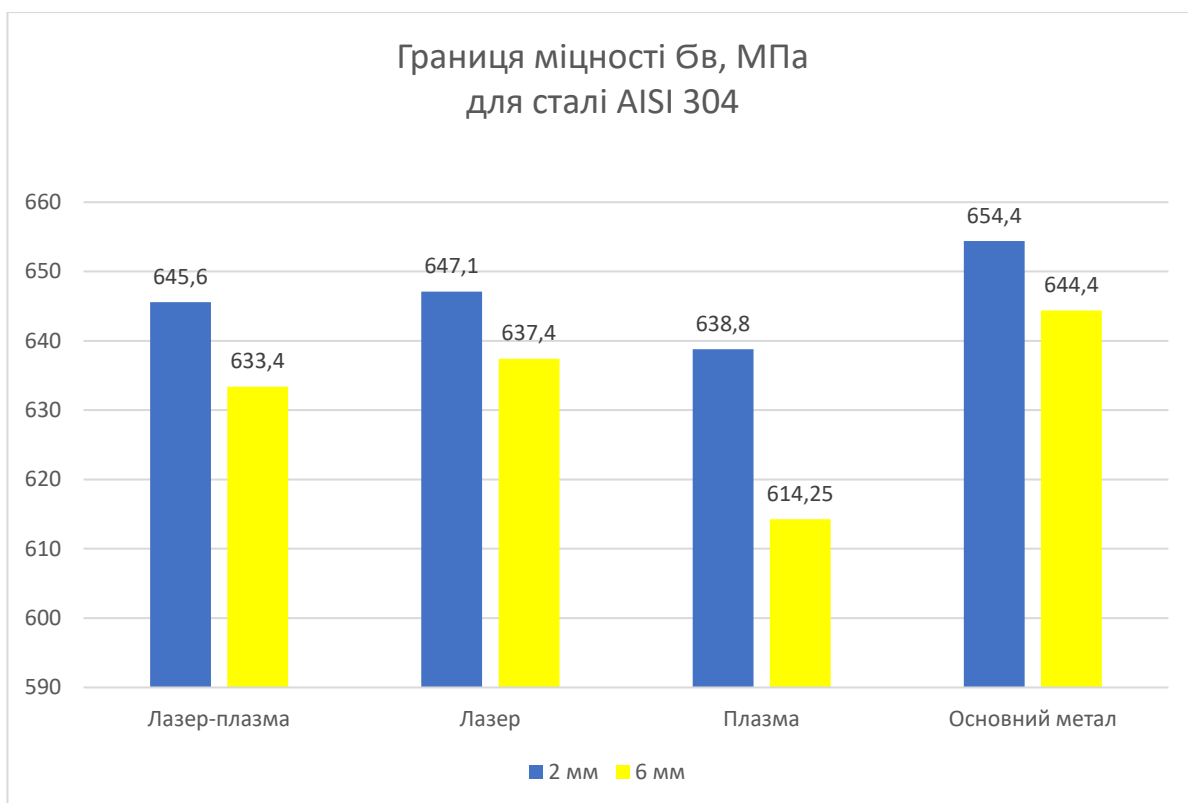


Рис. 4.66. Результати випробування на статичний розтяг зразків зварних з'єднань зі сталі AISI 304, товщиною 2 мм

Характер руйнування серій зразків отриманих лазерно-плазмовим та лазерним зварюванням подібний. Зародження та руйнування відбувається по зоні термічного впливу рис 4.67, що пов'язано з ростом зерен металу, за рахунок локального перегріву металу під впливом термічного циклу зварювання високо-концентрованого джерела нагріву, та як результат знеміцнення зони термічного впливу.

Зародження руйнування зразків зварених плазмовим зварюванням відбувалося в зоні сплавлення кореня шва з основним металом, руйнування відбувалося по металу зварного шва, що пов'язано з інтенсивним ростом кристалів, утворення крупнокристалічної зеренної структури та зниження мікротвердості в металі зварного шва та ЗТВ при плазмовому зварюванні, без застосування присаджувальних дрітів.

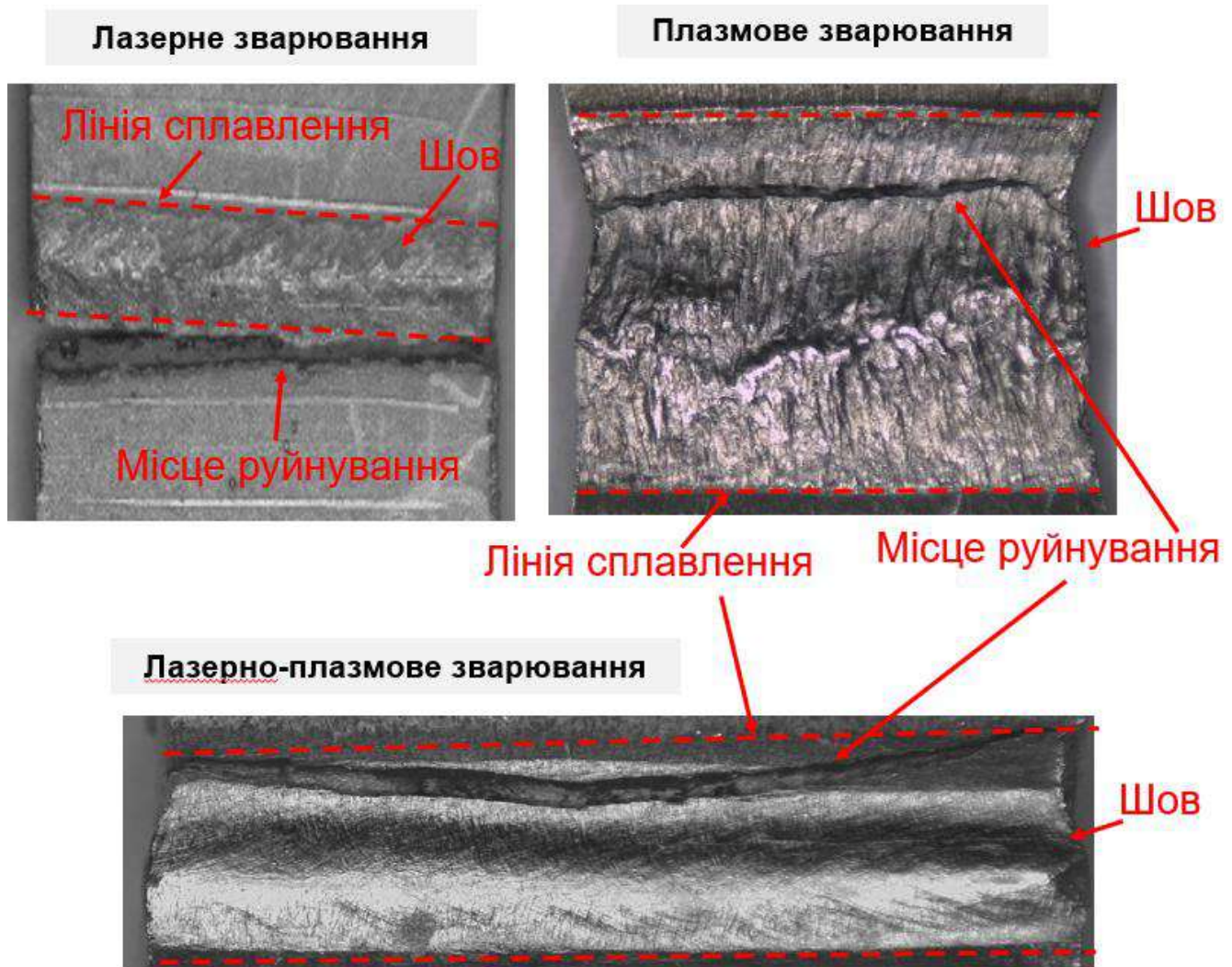


Рис. 4.67. Фото місця руйнування, зразків зварних з'єднань зі сталі AISI 304.

Що характерно серія зразків лазерного зварювання товщини 2 мм, мала відмінність в тому, що причиною руйнування деяких зразків була велика кількість внутрішніх пор (рис. 4.68 в), що є притаманним дефектом при швидкісному лазерному зварюванні, через невеликий час існування зварювальної ванни та як результат недостатній період перебування металу в рідкому стані для повної дегазації зварювальної ванни від парів металів, утворених через вигорання легуючих елементів. При дослідженні зразків лазерно-плазмового зварювання такого дефекту виявлено не було.

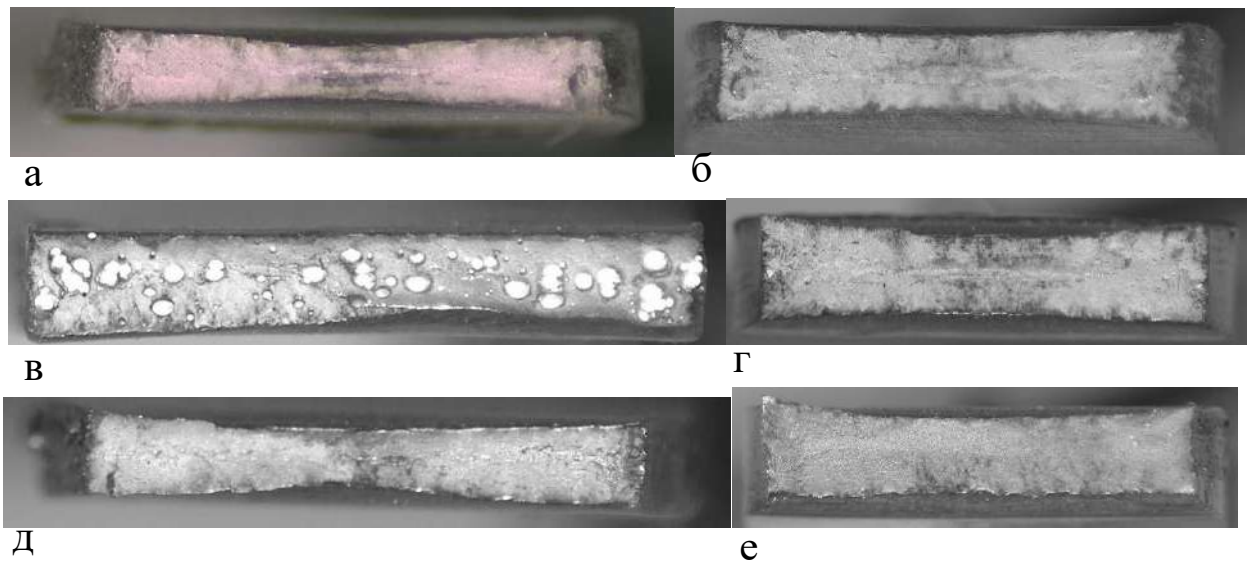


Рис. 4.68 . Фото зломів зруйнованих зразків. а; б – гібридне зварювання 2 та 6 мм; в; г – лазерне зварювання 2 та 6 мм; д; е – плазмове зварювання 2 та 6 мм;

За результатами механічних випробувань на статичний розтяг, встановлено, що найбільш сприятливі показники механічних характеристик зварних з'єднань забезпечуються при лазерному та лазерно-плазмовому зварюванні, дещо нижчий показник границі міцності до 5 МПа, при лазерно-плазмовому зварюванні сталі AISI 304, обумовлений похибкою експерименту.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Встановлено закономірності впливу технологій лазерного, плазмового, лазерно-плазмового зварювання для сталі AISI 304 різної товщини 2 та 6 мм та параметрів режимів зварювання на мікротвердість та параметри зеренної структури субструктури зварних з'єднань.

2. Мікротвердість, параметри зеренної та субзеренної структур матеріалу зварних з'єднань різняться за розмірами кристалітів, зерен, субзерен, що пов'язано з різними температурними умовами формування зварних швів.

3. Встановлено, що на режимах з високою швидкістю зварювання ($V_{зв} = 1,5$ м/хв (2мм) та $V_{зв} = 1,17$ м/хв (6мм)) при лазерно-плазмовому зварюванні в металі зварних швів утворюється приблизно однакова за розмірами кристалітів структура. В ЗТВ при товщині 6 мм спостерігається укрупнення зерна в середньому у 3 рази та підвищення мікротвердості в металі зварного шва - в 1,7 рази, по лінії сплавлення - у 1,2 рази, у ЗТВ – в 1,3 рази в порівнянні з випадком зварювання 2 мм, що пов'язано із збільшенням тепловкладання та сповільнення процесу тепловідведення.

4. Встановлено, що при лазерному зварюванні на режимах з середніми швидкостями процесу ($V_{зв} = 1$ м/хв (2мм) та $V_{зв} = 0,81$ м/ хв (6мм)) в металі зварних швів формується приблизно однакова за шириною кристалітів структура при збільшенні коефіцієнту форми зерна від $\alpha = 3,8 \dots 5,3$ (2 мм) до $\alpha = 6 \dots 6,7$ (6 мм) у разі зменшення швидкості зварювання, що пов'язано зі збільшенням тепловкладання. В металі ЗТВ для товщини 2 мм структура дрібніша в середньому у 2 рази в порівнянні з товщиною 6 мм.

5. Встановлено, що при зварюванні сталі AISI 304 різної товщини плазмовим зварюванням з низькими швидкостями процесу ($V_{зв} = 0,3$ м/ хв (2мм) та $V_{зв} = 0,2$ м/год (6мм)) та найбільшим тепловкладанням в металі швів та ЗТВ формується переважно крупнокристалічна структура при відносно

рівномірному рівні мікротвердості по зонам зварних з'єднань. У зварному шві у разі товщини 6 мм в металі зварного шва та по ЛС формується однорідна рівновісна зеренна структура та дендритна (в металі шва) при зменшенні коефіцієнту форми зерна до $\alpha = 2 \dots 6,7$ та зниженні мікротвердості у 1,3 рази. У ЗТВ зерно укрупнюється у 3 рази.

6. У разі лазерно-плазмового ($V_{зв} = 1,5$ м/хв) та лазерного зварювання ($V_{зв} = 1$ м/ хв) AISI 304 товщиною 2 мм розмір субзерен в металі зварних швів найменший. При плазмовому зварюванні ($V_{зв} = 0,3$ м/ хв) в металі швів та по лінії сплавлення субструктура укрупнюється у 2 рази, спостерігаються субзерна подовженої форми. При лазерно-плазмовому зварюванні ($V_{зв} = 1,5$ м/хв) по всіх зонах зварного з'єднання спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівновісної форми, що буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

7. При плазмовому зварюванні сталі AISI 304 товщиною 6 мм формування в металі шва субструктури із збільшенням розміру субзерна призводить до зниження мікротвердості у порівнянні із зварними швами, що отримано лазерно-плазмовим та лазерним зварюванням. Такі структурні особливості можуть призводити до нерівномірного рівня механічних властивостей по зонах зварного з'єднання. При лазерному зварюванні ($V_{зв} = 0,81$ м/ хв) по всіх зонах зварного з'єднання спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівнівської форми, що буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

8. Встановлено, що при зварюванні сталі AISI 304 найбільш сприятлива структура, з точки зору фізико-механічних характеристик, формується в металі зварних з'єднань, що отримані лазерно-плазмовим зварюванням.

9. Встановлено, що максимальні, пікові значення напружень сконцентровані в ЗТВ. Напруження у 443 МПа утворюються у зразку лазерного зварювання, для плазмового – 413,7 МПа, лазерно-плазмове зварювання займає проміжну позицію з піковим значенням 431,7 МПа. Середнє значення напружень при лазерно-плазмовому зварюванні складає 173 МПа, що є на 20% більше відносно 143 МПа при лазерному зварюванні та на 40% менше від 247 МПа – при плазмовому. Максимальні переміщення близько 0,5 мм утворилися в модельованому зразку плазмового зварювання. Переміщення при лазерно-плазмовому та лазерному зварюванні, мінімальні та відповідають значенню 0,2 мм.

10. Встановлено, що напружено-деформований стан при лазерно-плазмовому зварюванні, є менш локалізованим ніж при лазерному, та характеризується нижчим рівнем залишкових напружень відносно варіанту плазмового зварювання.

11. Методом електронної спекл-інтерферометрії проведено верифікацію розрахункової методики прогнозування напружено-деформованого стану зварних з'єднань, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням. Похибка між розрахунковими та експериментальними значеннями не перевищує 6%.

12. По результатам механічних випробувань виявлено що при одновісному розтягненні зварних з'єднань із сталі AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням, їх руйнування відбувається в зоні переходу від лінії сплавлення до зони термічного впливу, в якій спостерігається тенденція збільшення довжини кристалітів, зростанні коефіцієнту форми зерна (в середньому, з 7 до 11) і зменшення мікротвердості. Міцність зварних з'єднань отриманих лазерно-плазмовим зварюванням становить ~97% від міцності основного металу.

Розділ 5. ТЕХНОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО ЗВАРЮВАННЯ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

5.1. Технологічні експерименти та формування зварних швів при двосторонньому лазерно-плазмовому зварюванні сталей.

Технологічні експерименти з підбору оптимальних параметрів режимів лазерно-плазмового зварювання проводилися з точки зору отримання повного проплавлення зварного з'єднання при використанні мінімально можливої погонної енергії процесу.

Дослідження було проведено на сталі AISI 304, товщиною від 2 до 10 мм. Параметри режимів зварювання наведені в табл. 5.1. Фото зварних швів та макрошліфів приведені на рис. 5.1.

Таблиця 5.1. Параметри режимів лазерно-плазмового зварювання AISI 304

| №. Реж. | Товщина, мм | P, кВт | Iзв, А | Uд, В | Vзв, м/хв | Полож. фокусу | q, Дж/мм | Прим. |
|------------|----------------|-----------|-----------|----------|--------------|------------------|-------------|--|
| 1 | 2 | 0,8 | 80 | 27,2 | 1,5 | 0,7 | 119 | |
| 2 | 4 | 1,6 | 80 | 25 | 1,5 | 1,3 | 114 | |
| 3 | 6 | 1,8 | 80 | 25,2 | 1,17 | 2 | 195 | |
| 4 | 10 | 1,8 | 80 | 26 | 1 | 3 | 232x2 | Двостороннє зварювання |
| 5 | 10 | 1,8 | 80 | ~25 | 0,7 | 3 | 313 | Розрахунковий режим однопрохідного зварювання |

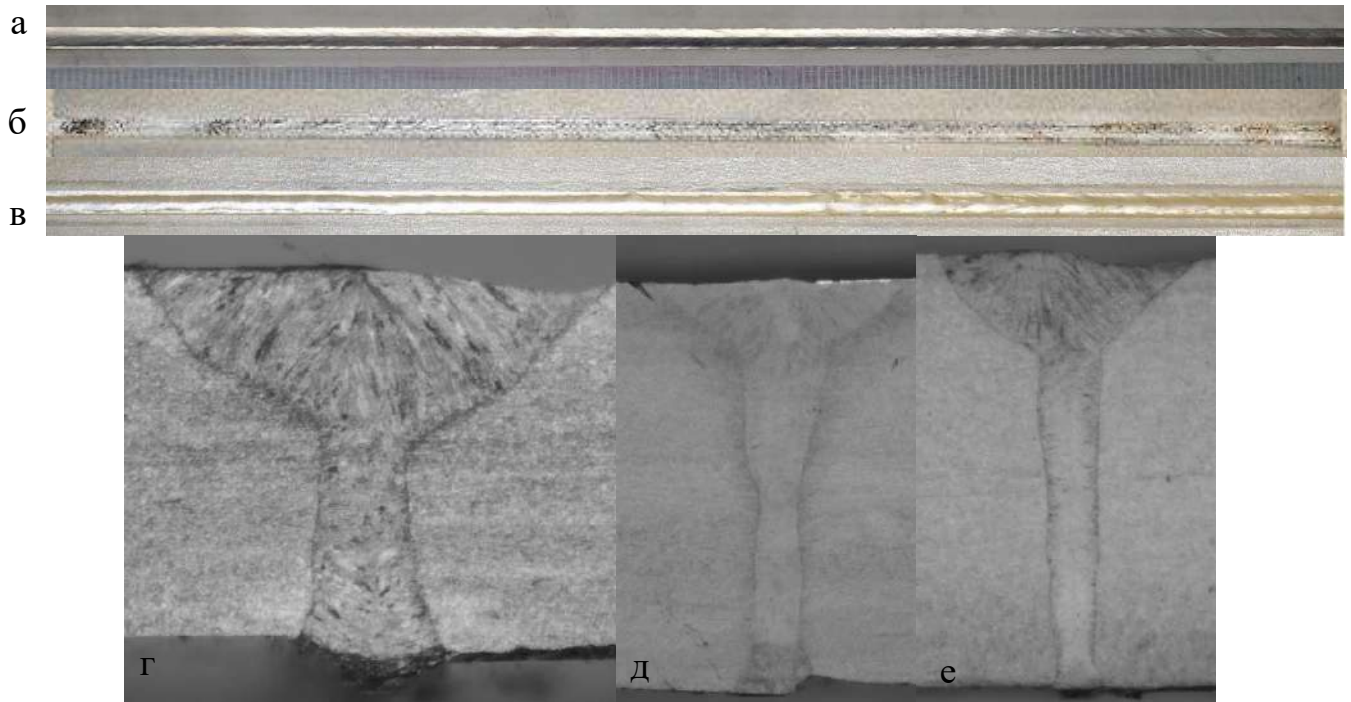


Рис. 5.1. Зовнішній вигляд зварних швів та макрошліфів з'єднань AISI 304 отриманих лазерно-плазмовим зварюванням.

а, г – 2 мм; б, д – 4 мм; в, е – 6 мм

В ході виконання зварювання AISI 304 товщиною від 2 до 6 мм була встановлена та експериментально підтверджена залежність необхідної умовної погонної енергії процесу лазерно-плазмового зварювання від товщини зварюваного матеріалу рис.5.2. За допомогою цієї залежності було виконано прогнозування необхідної погонної енергії для отримання зварного з'єднання товщини 10 мм (реж. №5, табл. 5.1.).

Потужність лазерного випромінювання була прийняти з огляду максимально можливої, що забезпечувало наявне обладнання. Параметри плазмової складової залишалися незмінними в порівнянні з випадками зварювання менших товщин. Було встановлено що, при лазерно-плазмовому зварюванні сталі AISI 304 з використанням випромінювання потужністю до 2 кВт, максимально глибина проплавлення зварюваного металу, товщиною 10 мм становить 7,2 мм (рис. 5.3).

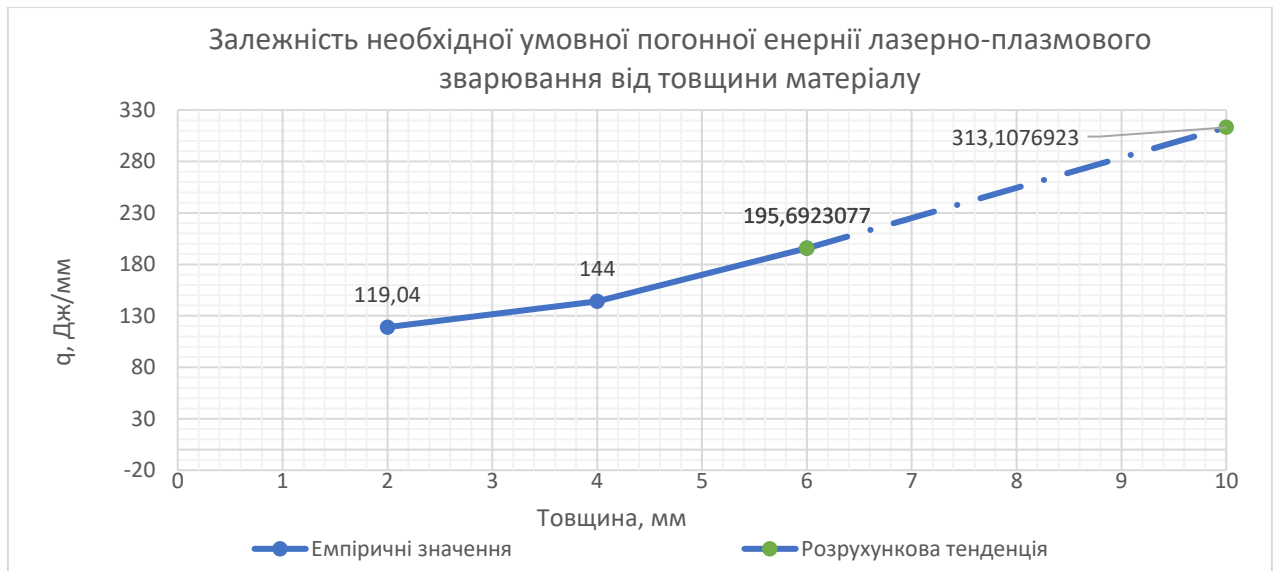


Рис. 5.2. Емпірична залежність необхідної умовної погонної енергії зварювання від товщини зварюваного металу при лазерно-плазмовому зварюванні сталі AISI 304.

Підвищення погонної енергії за рахунок зниження швидкості зварювання з 0,7 до 0,45 та 0,25 м/хв не впливає на глибину проплавлення. Натомість ширина шва збільшується до 1,7 разів.

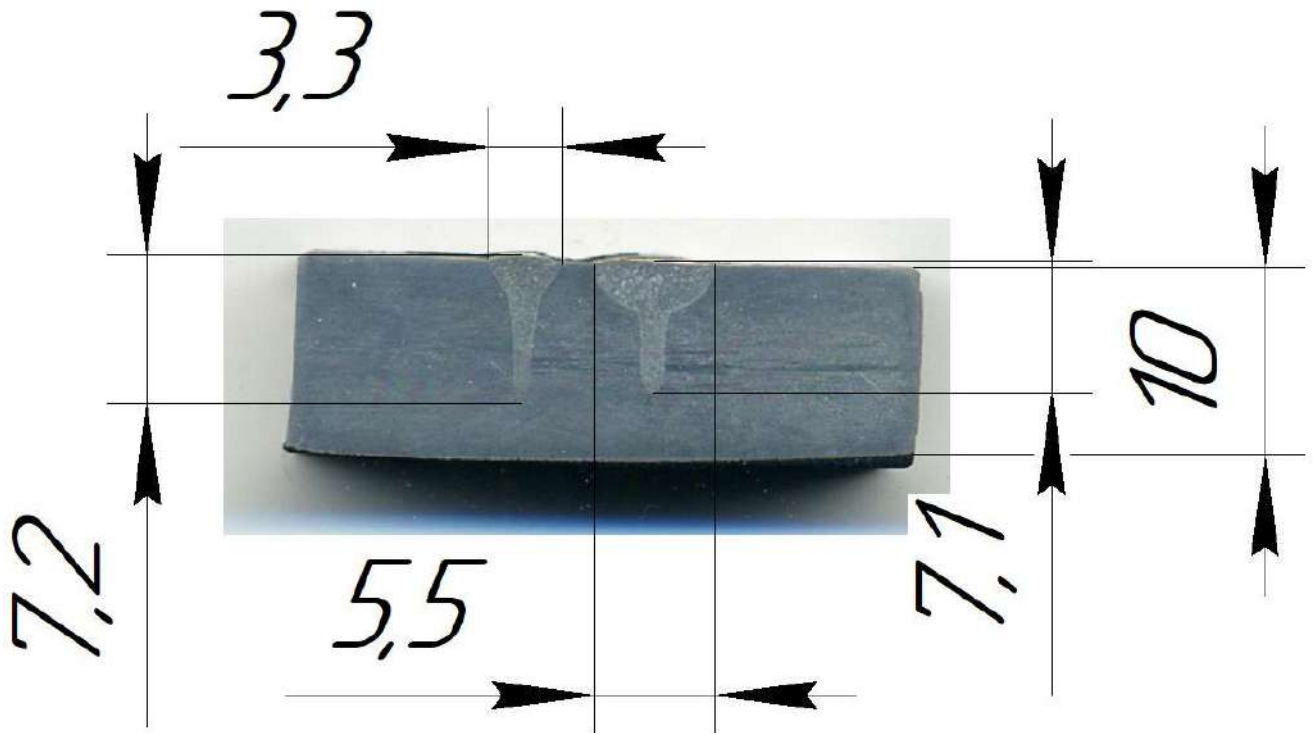


Рис. 5.3. Порівняння геометричних параметрів провару отриманого лазерно-плазмовим зварюванням на сталі AISI 304, товщиною 10 мм.
(зліва - $V_{зв}=0,45$ м/хв; справа - $V_{зв}=0,25$ м/хв)

Тому, для одержання зварного з'єднання зі сталі AISI 304 товщиною 10 мм при вказаній потужності лазерного випромінювання, розроблена технологія роботизованого двостороннього лазерно-плазмового зварювання, яке виконувалося з двох сторін із перекриттям коренів швів (рис. 5.4).

Не беручи до уваги складнощі, пов'язані з виконанням двостороннього зварного шва, такий варіант отримання зварного з'єднання має ряд переваг:

- Відсутність необхідності в додатковій механічній обробці (фрезерування розробки крайок) та застосування присадних дротів при виконанні багато-прохідного зварювання.
- Звуження ЗТВ за рахунок меншого тепловкладення в зварюваний метал.
- Зниження рівня НДС, за рахунок меншої площі двостороннього зварного шва.
- Часткова компенсація деформацій з'єднання за рахунок симетричного виконання першого та другого проходів.



Рис. 5.4. Загальний вигляд роботизованого комплексу для виконання двостороннього лазерно-плазмового зварювання.

Підготовка до технологічного процесу включає такі основні операції:

- доробка і підготовка складально-зварювальної оснастки
- уточнення оптимальних технологічних режимів
- підготовка програмного забезпечення для реалізації технологічного процесу (програмування робота)

Складально-зварювальна оснастка рис. 5.5 повинна забезпечувати, точне позиціонування зварюваних деталей в те ж саме положення з постійною повторюваністю, для цього було розроблено систему спеціалізованих упорів.

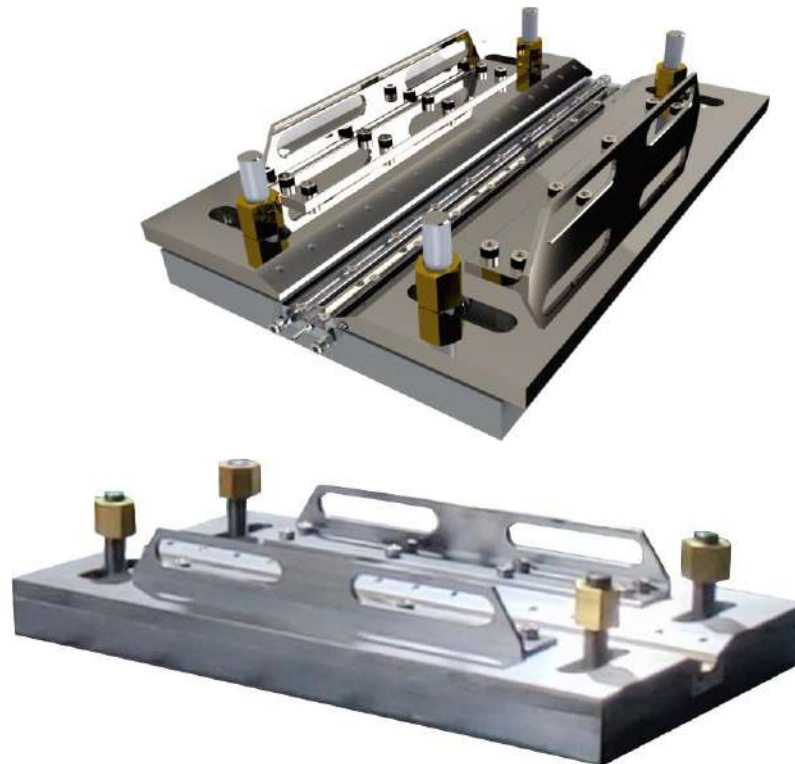


Рис. 5.5. Вигляд 3Д моделі та фото складально-зварювального оснащення.

Для забезпечення надійного газового захисту нижньої частини зварного з'єднання при виконанні першого проходу, було застосовано двох каналну подачі захисного газу в підкладку. При зварюванні може бути застосовано один з двох розроблених варіантів водоохолоджуваної підкладки (рис. 5.6) Обидва з них враховують наявність підсилення зварного шва першого проходу, що дозволяє забезпечити надійне притиснення зварюваних деталей до водоохолоджуваної підкладки та як результати збільшення тепловідведення від зварного з'єднання.

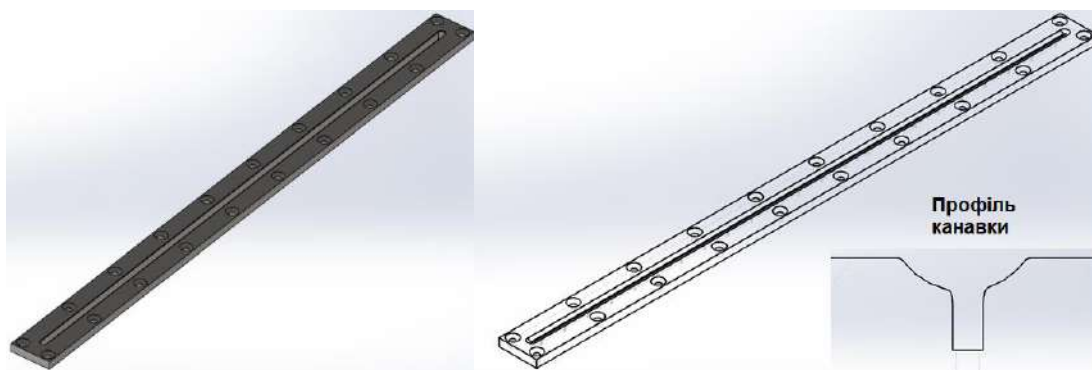


Рис. 5.6. Вигляд 3Д моделей підкладок, що призначені для виконання двостороннього лазерно-плазмового зварювання AISI 304, товщиною 10 мм.

Для оптимізації параметрів режиму зварювання, було проведено оцінчне прогнозування необхідних параметрів лазерно-плазмового зварювання, за параметром необхідної погонної енергій зварювання. Оптимально погонна енергія зварювання обиралася за попередньо емпірично, встановленою залежністю необхідної погонної енергії зварювання для отримання проплавлення зварювання від товщини зварюваного металу рис. 5.1.

Відповідно до залежності рис. 5.1, параметри режимів двостороннього лазерно-плазмового зварювання були обрані таким чином, щоб забезпечити глибину проплавлення на рівні 60-65% від товщини металу (параметри режимів приведені в табл. 5.7., що дає змогу отримати гарантоване перекриття корневих частин зварного шва рис. 5.7.

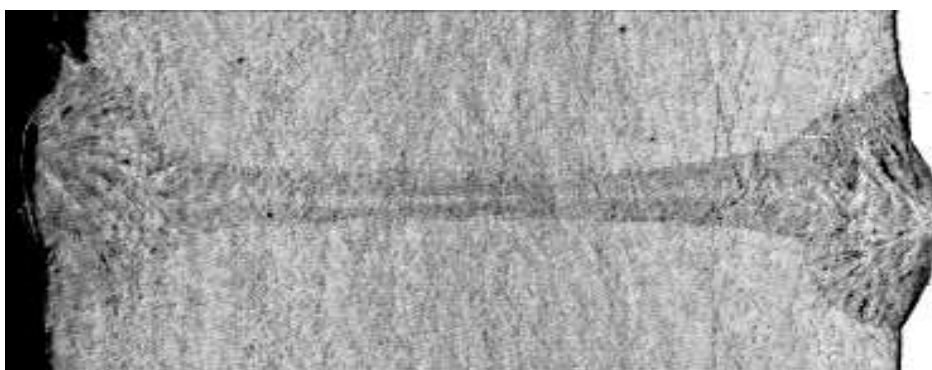


Рис. 5.7. Вигляд макрошліфа зварного з'єднання AISI 304, товщиною 10 мм, отриманого двостороннім лазерно-плазмовим зварюванням.

Таблиця. 5.2. Параметри режимів двостороннього лазерно-плазмового зварювання AISI 304, товщиною 10 мм

| Потужність випромінювання P , Вт | Зварювальний струм $I_{зв}$, А | Напруга на дузі U_d , В | Швидкість зварювання $V_{зв}$, м/хв |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---|
| 1800 | 80 | 25,2 | 1 |

Параметри режимів обиралися з точки зору максимально можливої потужності лазерного-випромінювання, при мінімально необхідній потужності плазмової дуги, щоб знизити тепловкладення в зварюваний, та зменшити об'єм переплавленого металу, та ширину ЗТВ. В порівнянні таким же варіантом виконання зварного з'єднання лазерним зварюванням продуктивність лазерно-плазмового зварювання є на 33% вищою.

Фото двостороннього стикового зварного з'єднання товщиною 10 мм приведено на рис. 5.8.



Рис. 5.8. Зовнішній вигляд зварного шва та зварного з'єднання, отриманого лазерно-плазмовим зварюванням.

Подальші випробування на статичний розрив отриманих зразків показали, що міцність одержаних лазерно-плазмовим зварюванням з'єднань знаходиться на рівні 95% міцності основного металу.

В ході проведення технологічних експериментів по зварюванню AISI 304 товщиною від 2 до 10 мм, були встановлені особливості лазерно-плазмового зварювання:

- напруга на дузі при лазерно-плазмовому зварюванні сталей більша в порівнянні з напругою на дузі при плазмовому зварюванні.

- напруга на дузі при лазерно-плазмовому зварюванні сталей знижується при збільшенні потужності лазерного випромінювання.

Вказані особливості характерні для обох варіантів технологічних схем виконання лазерно-плазмового зварювання – параксіальної та коаксіальної.

При чому параксіальна схема об'єднання джерел нагріву характеризується вищими значеннями напруги на дузі та нижчим значенням падіння напруги (до 0,6 В на 1 кВт зниження потужності випромінювання) в порівнянні з 2 В/кВт при коаксіальній схемі (Рис. 5.9).

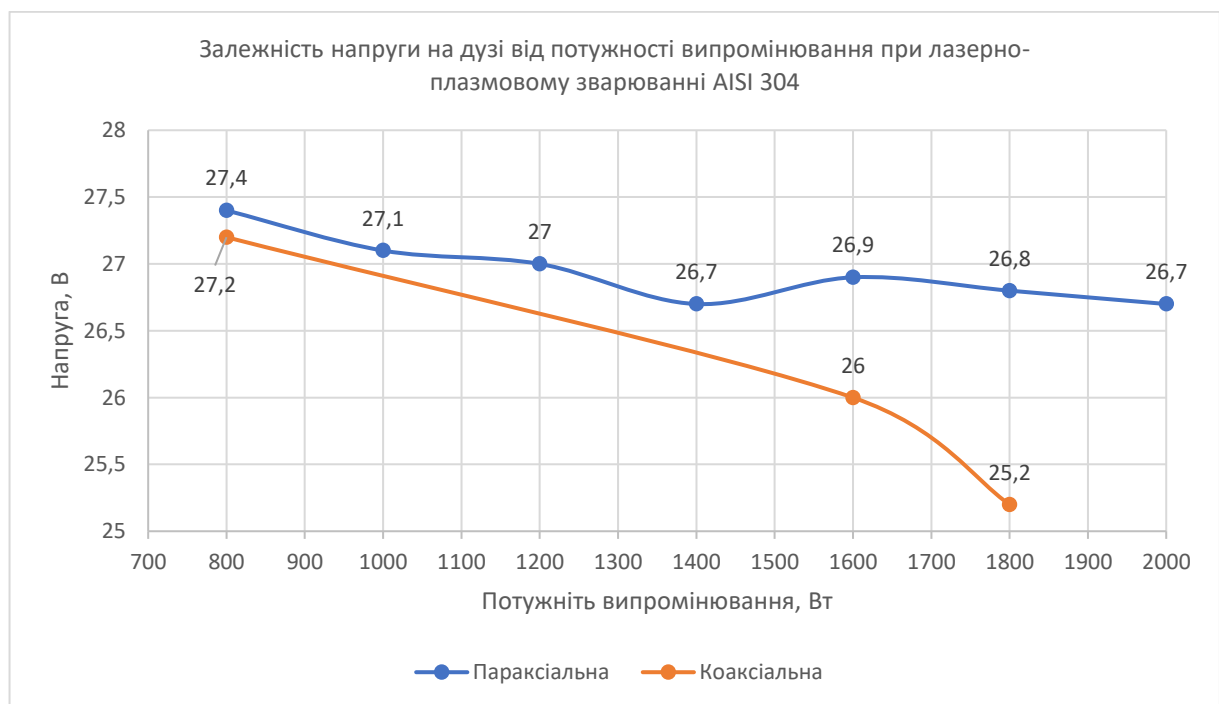


Рис. 5.9. Порівнянні залежностей зміни напруги на дузі від потужності випромінювання при лазерно-плазмовому зварюванні AISI 304 для різних технологічних схем поєднання джерел нагріву.

5.2. Оцінка можливості застосування лазерно-плазмового процесу в режимі різання

Лазерно-плазмового зварювання показує характеризується підвищенням продуктивності в порівнянні зі своїми складовими по одинці, так гібридний процес дозволяє підвищити швидкість зварювання в 1,5 рази в порівнянні з лазерним та до 5 разів в порівнянні з плазмовим. Це обумовлює науково-технічний інтерес в дослідженні гібридного процесу в умовах переходу від зварювання до різання.

Авторами було проведено розрахунки для теоретичної оцінки можливості досягнення ефекту підвищення продуктивності різання із застосуванням поєднання лазерного та плазмового джерел нагріву [115]

Отримані в результаті виконання кінцево-елементного моделювання прогнозні параметри режимів лазерно-плазмового різання [115] приведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3. Прогнозовані параметри режимів лазерного, повітряно-плазмового та лазерно-плазмового різання, що забезпечують

| Товщина листа, мм | Спосіб різання | Діаметр плями нагріву, мм | Швидкість різання, м/хв | Струм, А | Потужність теплового джерела, кВт |
|-------------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-----------|-----------------------------------|
| 5 | Лазер | 0,4 | 2,1 | — | 1.7 |
| | Плазма | ~3,0 | 2 | 100...120 | 8 ... 10 |
| | Лазер-плазма | ~2,5 | 4 | 100...120 | 10 ... 12 (1.7+8 ... 10) |
| 10 | Лазер | 0,4 | 1.1 | — | 2 |
| | Плазма | ~3,0 | 0,8 | 140...160 | 10 ... 12 |
| | Лазер-плазма | ~2,5 | 2 | 140...160 | 12 ... 14 (2+10 ... 12) |

У процесі розрахунків ці параметри вибирали за критеріями мінімізації ЗТВ та отримання найбільшої для заданої потужності теплового джерела швидкості.

Для експериментального дослідження принципової можливості прогнозованого результату, було прийнято рішення про відпрацювання технології на базі гібридного плазмотрону для лазерно-плазмового

зварювання з внесеними до соплового вузла модифікаціями (рис. 5.10). Що передбачали застосування змінного плазموутворюючого сопла («вставки») 3, що притискалося кожухом 4, що виконував функцію завихрювача потоку захисного газу (повітря). Для цього на зовнішній поверхні кожуха були виконані тангенціальні по відношенню до каналу сопла пази.

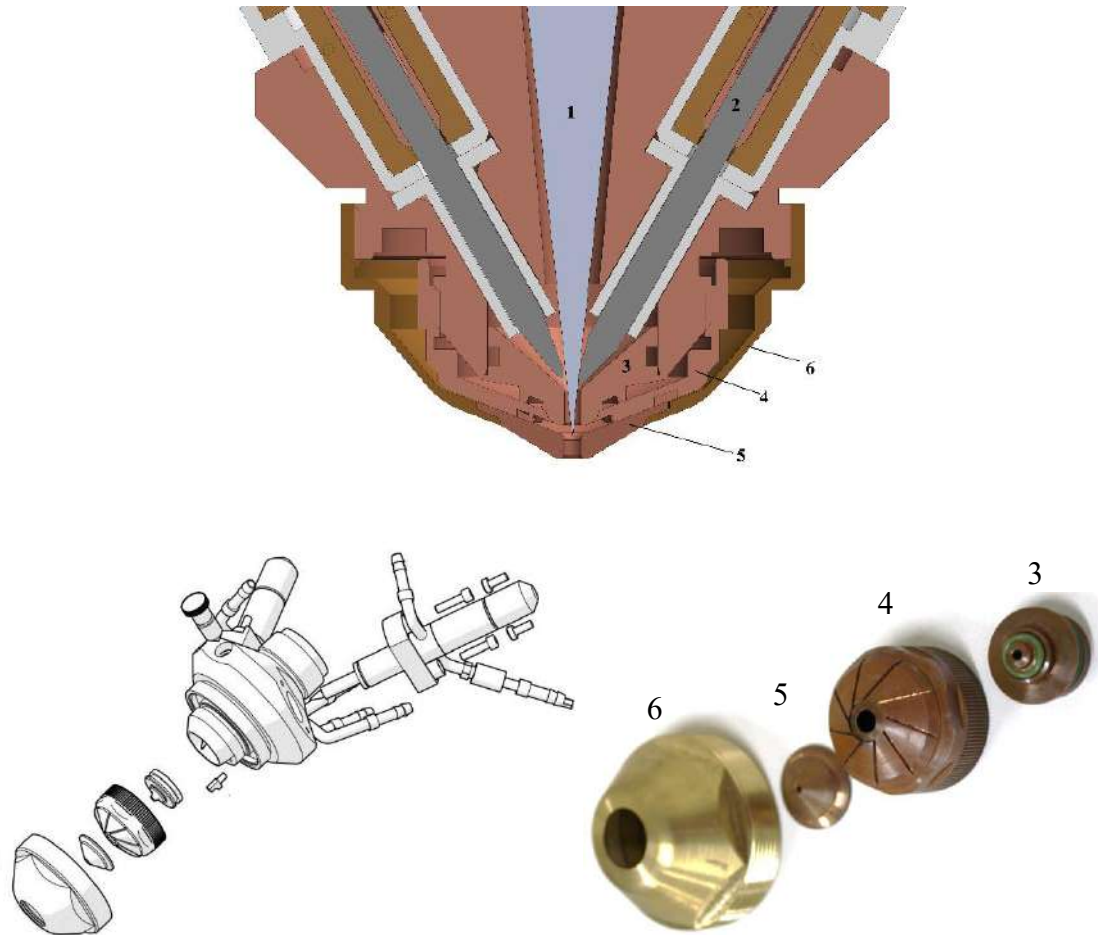


Рис. 5.10. Модифікації соплового вузла гібридного плазмотрону:

1 – лазерне випромінювання; 2 – електрод; 3 – плазмоутворююче сопло; 4 – кожух плазмоутворюючого сопла (завихрювач); 5 – захисне сопло; 6 – кожух захисного сопла.

При реалізації дослідницьких технологічних відпрацювань, зважаючи на застосування вольфрамових електродів в конструкції плазмотрону, вимушеною мірою було застосування в якості плазмоутворюючого газу, аргону. Зважаючи на те, що аргон є інертним газом і не застосовується для різання сталей. Для окислення та видування розплавленого металу в процесі різання в якості захисного газу застосовувалося повітря. Основною задачею

для функціонування плазмотрону було збереження цілісності електроду, шляхом забезпечення відсутності змішування робочих газів в плазмоутворюючій камері. В ході експериментів було встановлено, що для стабільного існування стовпа плазми та запобігання потраплянню в камеру вольфрамового електроду стисненого повітря із каналу захисного газу, процес різання має відбуватися із переважанням тиску аргону. Так емпірично підібрані оптимальні співвідношення для тисків аргону та повітря становлять 1.0:0.6, для діаметрів каналів плазмоутворюючого та захисного сопел – 1.0:2.2.

Отримання різу за допомогою поєднання лазерного випромінювання та плазмової дуги додаткову (рис. 5.11) затруднялося особливостями процесу взаємодії двох джерел нагріву та металу, що розрізається.



Рис. 5.11. Зовнішній вигляд різу вуглецевої сталі за допомогою поєднання лазерного випромінювання та плазмової дуги.

Так при реалізації процесу з переважною потужністю плазмової дуги над лазерним випромінюванням, різання відбувалося за рахунок плазмової складової, а лазерне випромінювання безперешкодно проходило через порожнину різу, та не брало участі у термічному впливі на метал.

В протилежному випадку, коли баланс потужності був зміщений в сторону лазерної компоненти, малопотужна плазмова дуга здувалася потоком робочих газів, необхідним для видування розплавленого металу із зони різання. Тому для виявлення оптимальних інтервалів технологічних режимів, які забезпечують використання переваг лазерно-плазмового процесу, подальші дослідження повинні бути направлені на оптимізацію співвідношень технологічних параметрів лазерно-плазмового різання та конструктивних параметрів плазмотрону, які забезпечують мінімальний вплив газового потоку, який використовують при лазерному різанню. При цьому використання

випромінювання лазера повинно розглядатись, як додаткове концентроване джерело енергії для плазмового різання, для підвищення енергетичної ефективності процесу, забезпечення концентрованого нагріву поверхні різу, зменшення ширини і покращення якості поверхні різу.

5.3. Розробка дослідно-промислового обладнання для реалізації гібридного лазерно-плазмового зварювання і споріднених процесів.

5.3.1. Установка для лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистових з'єднань (до 1,5 кВт потужності лазерного випромінювання і 50 А струму плазмової дуги).

Розроблена установка (рис. 5.12) призначена для реалізації наступних технологічних процесів:

- лазерно-мікроплазмове зварювання сталей, кольорових металів та сплавів (в т.ч. на основі алюмінію) товщиною до 4 мм;
- мікроплазмове зварювання сталей, кольорових металів та сплавів товщиною до 1,5 мм;

Обладнання для лазерно-мікроплазмового та мікроплазмового зварювання забезпечує реалізацію наступних технологій:

- мікроплазмове зварювання на постійному струмі прямої полярності;
- лазерно-мікроплазмове зварювання на постійному струмі прямої полярності з використанням безперервного та імпульсного лазерного випромінювання;
- лазерно-мікроплазмове зварювання на імпульсному однополярному струмі прямої полярності з використанням безперервного та імпульсного лазерного випромінювання;
- лазерно-мікроплазмове зварювання на різнополярному струмі (в т.ч. асиметричними імпульсами) з використанням безперервного та імпульсного лазерного випромінювання;

Перелік одиниць обладнання, що входить до комплектності установки приведено в табл. 5.4.



Рис. 5.12. Зовнішній вигляд вузлів установки для лазерно-мікроплазмового зварювання та конструкція загальної шафи.

1- Загальна шафа живлення та комунікацій; 2 - пульт керування; 3 - механізм подачі присадного дроту; 4 - універсальний блок водяного охолодження; 5 - плазмотрон для лазерно-мікроплазмового зварювання

Таблиця 5.4. Комплект вузлів установки для лазерно-мікроплазмового зварювання

| № | Перелік одиниць обладнання |
|----|--|
| 1. | Загальна шафа, до якої входить — Спеціалізована система управління процесом зварювання; - Інверторне джерело живлення плазмової дуги; - Блок подачі та регулювання газів; - Блок подачі та контролю потоку охолоджуючої рідини |
| 2. | Пульт керування установкою |
| 3. | Механізм подачі присадного дроту |
| 4. | Універсальний блок водяного охолодження плазмотрону |
| 5. | Плазмотрон для лазерно-мікроплазмового зварювання з кабель-шланговим пакетом |
| 6. | Комплект запасних і витратних деталей, що швидко зношуються. |

На рис. 5.13. приведено схему лазерно-мікроплазмового плазмотрону (фото – рис. 5.14), що входить у склад установки.

Введення лазерного випромінювання з довжиною хвилі 1,03 ... 1,07 мкм в інтегрований лазерно-мікроплазмовий плазмотрон здійснюється по гнучкому оптоволокну, що з'єднує лазер з плазмотроном. Це волокно кріпиться у відповідному вузлі введення 1. Вузол введення встановлений у верхній частині плазмотрона і закріплений гвинтами 8. Випромінювання, що вводиться, потрапляє на однолінзовий (лінза вузла 12 діаметром 50,8 мм з фокусною відстанню 100 мм) коліматор (2). Далі випромінювання потрапляє на фокусуючу лінзу вузла 13, що має діаметр 50,8 мм (2") з фокусною відстанню 150 мм. Проходження сфокусованого лазерного випромінювання всередині плазмотрону має забезпечуватися таким чином, щоб виключалося його потрапляння на будь-які внутрішні поверхні. Вузол переміщення лінзи забезпечує зміну положення фокальної площини в межах ± 10 мм по вертикалі.

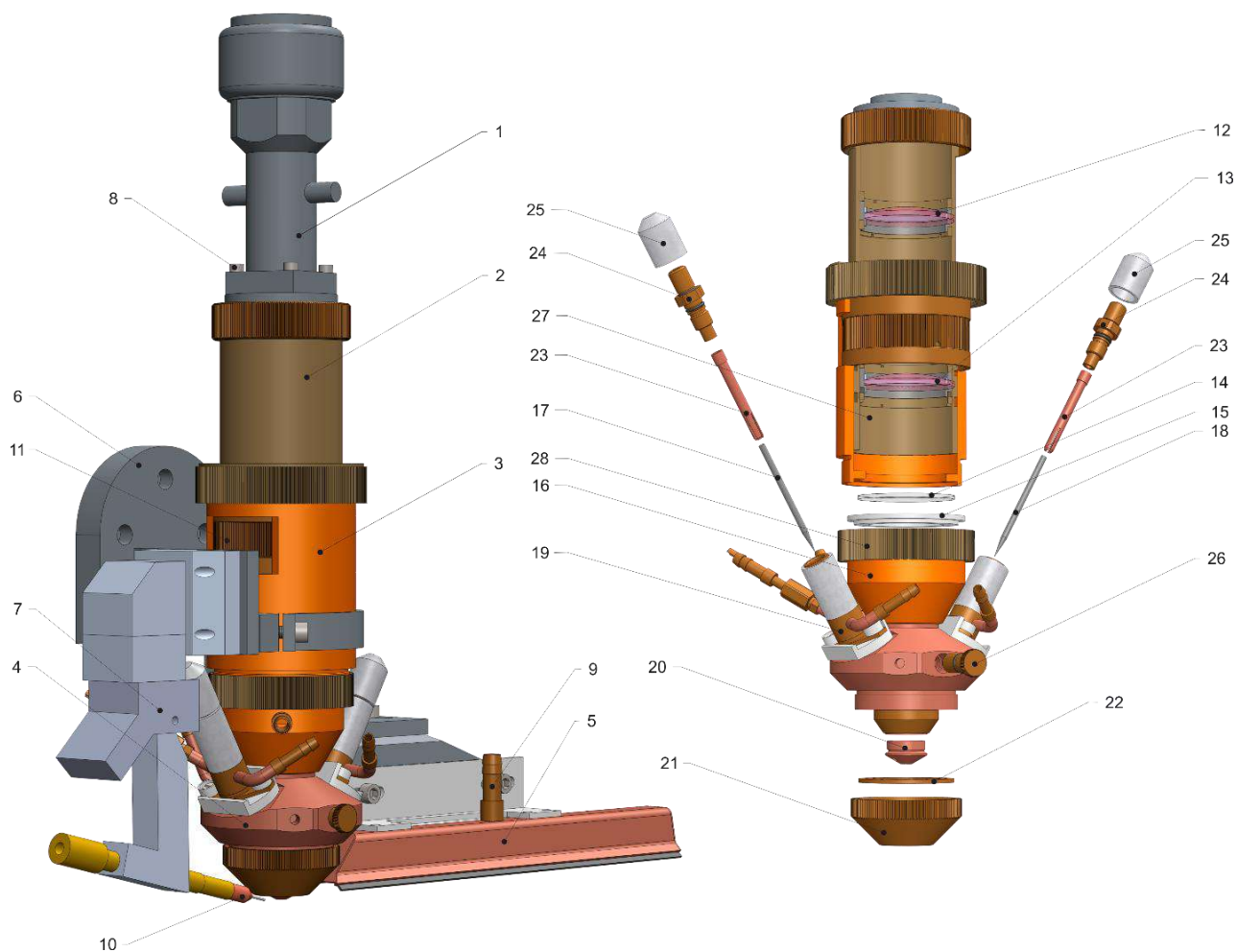


Рис. 5.13. Схема конструкції інтегрованого плазмотрону установки для лазерно-мікроплазмового зварювання:

1 - конектор оптоволоконна; 2 – однолінзовий коліматор; 3 – об'єктив; 4 – плазмова частина інтегрованого плазмотрону; 5 – вузол додаткового газового захисту зварного шва; 6 – перехідник кріплення до маніпулятора; 7 – позиціонер присадного дроту; 8 – гвинти кріплення конектора оптоволоконна; 9 – штуцер уведення газу додаткового захисту шва; 10 - мундштук позиціонера подач дроту; 11 – система фокусування лінзи; 12 - вузол кріплення лінзи коліматора; 13 - вузол кріплення фокусуючої лінзи; 14 – захисне скло; 15 – тримач захисного скла; 16 – система захисту та термостабілізації захисного скла; 17, 18 – електрод; 19 – електродний вузол; 20 - плазмоутворююче сопло; 21 – захисне сопло; 22 - газова лінза; 23 - Цанга; 24 - гвинт фіксації електрода; 25 - ковпачок; 26 – регулювальний гвинт перепускного каналу; 27 – вузол налаштування положення лінзи; 28 – накидна гайка.

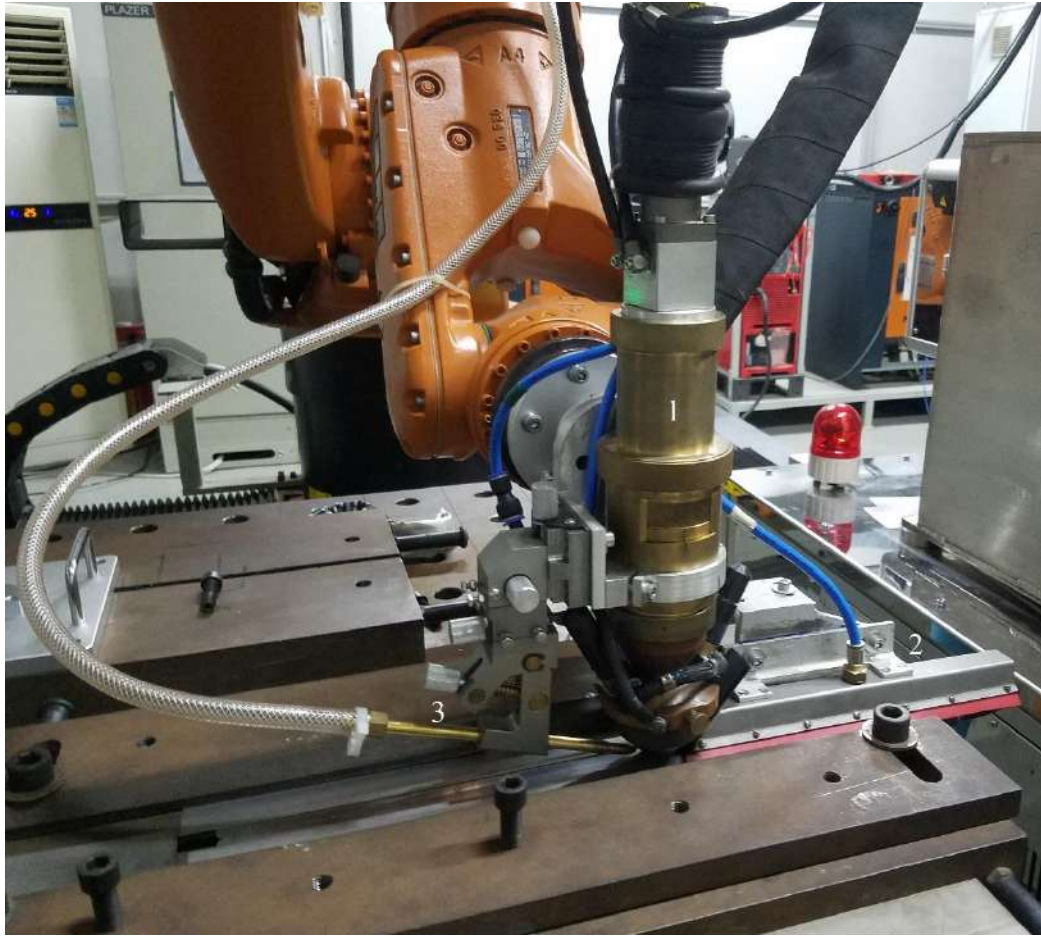


Рис. 5.14. Зовнішній вигляд головки для лазерно-плазмового зварювання з антропоморфним роботом.

В результаті було розроблено устаткування нового покоління для лазерно-плазмового зварювання, основні характеристики якого наведені в табл. 5.5. Дана установка орієнтована на зварювання сталей та сплавів у діапазоні товщин до 3 мм. Для визначення технологічних можливостей розробленої установки було проведено ряд експериментів на зразках розмірами до $300 \times 100 \times \delta$ мм із низьковуглецевої сталі ($\delta = 0,7 \dots 3,0$ мм), нержавіючої сталі 08X18H10T ($\delta = 1,0 \dots 1,5$ мм), а також алюмінієвих сплавів АМц ($\delta = 0,35$ мм) та АМг6 ($\delta = 1,0 \dots 2,5$ мм). При зварюванні останніх застосовували присадний дріт ER 5356 діаметром 1,2 мм.

Таблиця 5.5. Основні технічні характеристики устаткування нового покоління для лазерно-плазмового зварювання.

| № | Параметр | Значення |
|-----|--|--------------------|
| 1. | Живлення АС 3Р з частотою 50 Гц, В | 380 ($\pm 15\%$) |
| 2. | Робоче значення напруги на дузі, В | 0 - 30 |
| 3. | Діапазон регулювання зварювального струму, А | 3 - 80 |
| 9. | Тиск газів на вході до загальної шафи, бар | 2 - 4 |
| 10. | Витрати газів: | |
| | - Захисний газ , л/хв | 1,5 – 6,0 |
| | - Плазмоутворюючий, л/ хв | 0,5 – 1,5 |
| | - газ захисту оптики, л/ хв | 4,0 – 6,0 |
| 11. | Діаметри плазмоутворюючих сопел, мм | 1,5; 2,0; 2,5 |
| 12. | Діаметри вольфрамових електродів, мм | 3,2 |
| 13. | Фокусна відстань фокусуючої лінзи, мм | 150 \pm 1 |
| 14. | Фокусна відстань лінзи коліматора, мм | 100 \pm 1 |
| 15. | Діаметр оптики, мм | 50,4 |
| 18. | Метод керування | Контролер |

5.3.2. Установка для гібридного лазерно-плазмового зварювання при підвищеній потужності лазерного випромінювання (до 6 кВт) і плазмової дуги (до 320 А).

Установка PLAZER Hybrid L5Pl рис. 5.15 для лазерно-плазмового зварювання та можливості різання призначена для реалізації наступних технологічних процесів:

- лазерно-плазмове зварювання на постійному чи імпульсному струмі прямої полярності з використанням безперервного лазерного випромінювання;

- лазерно-плазмове зварювання на різнополярному струмі з використанням безперервного лазерного випромінювання; лазерне зварювання; плазмове зварювання в т.ч. на різнополярному струмі.

- експериментальний процес лазерно-плазмового різання на постійному струмі з використанням безперервного лазерного випромінювання; лазерне різання; плазмове різання.

В якості робочих газів для зварювання використовуються аргон, суміші аргону з вуглекислим газом. В якості робочих газів для різання використовуються аргон, стиснене повітря, азот.

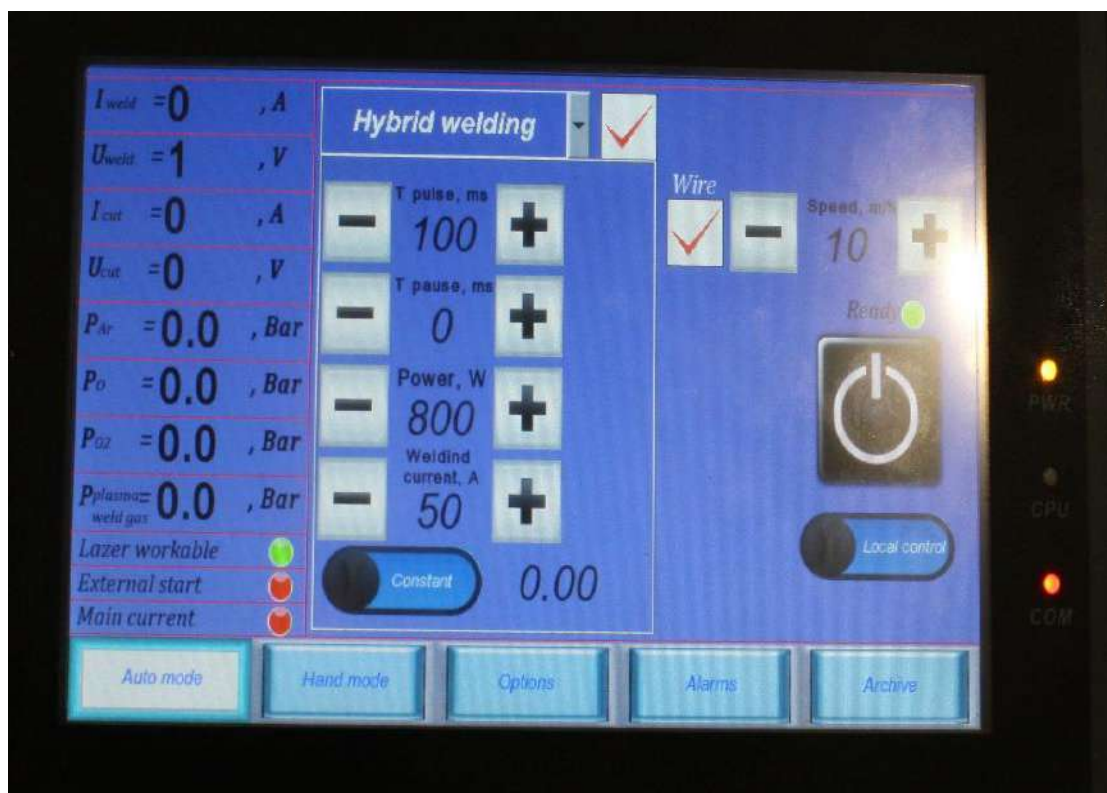


Рис. 5.15. Блок-схема установки для лазерно-плазмових процесів з можливістю фіксації параметрів режимів

Установка складається з наступних основних вузлів (рис. 5.16): Загальна силова шафа 1 слугує для розміщення джерела живлення зварювальної чергової дуги для плазмового зварювання 2; джерела живлення для плазмового різання 3 та джерела живлення для зварювання неплавким електродом. Блок підготовки газів 7, слугує для подачі робочих газів до інтегрованої головки 9, з необхідними витратами та тиском. Установка додатково укомплектована блоком автономного водяного охолодження плазмотрону 8 та механізмом подачі присадного дроту 6. Керування установкою відбувається через мобільний пульт 5, з вбудованою системою автоматичного управління процесами. В даній системі реалізовано можливість фіксування та архівування параметрів режимів в процесі зварювання (рис. 5.17).



Рис. 5.16. Основні вузли установки PLAZER Hybrid L5PI



Зварювальна головка рис. 5.18 розрахований на потужність лазерного випромінювання до 6 кВт та струмове навантаження до 320 А.

Гібридний плазмотрон може використовуватися в двох конфігураціях: лазерно-плазмового зварювання та дослідно-експериментального гібридного різання рис. 5.19.

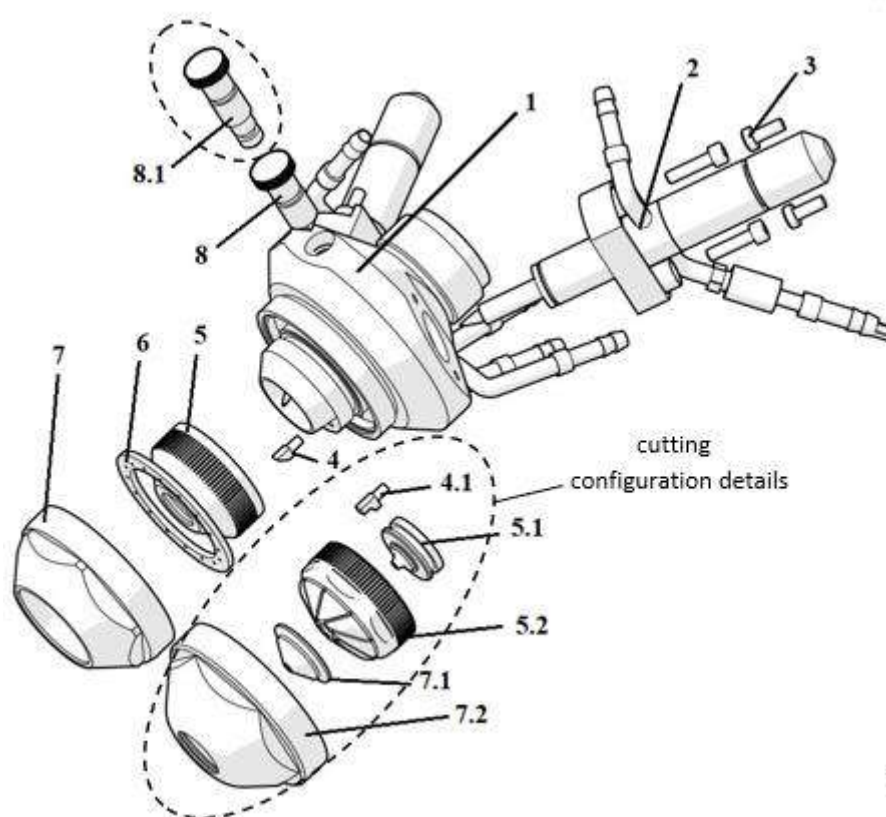


Рис. 5.19. Схема конфігурацій гібридного плазмотрону PLAZER Hybrid L5Pl.

1 – корпус; 2 – електродний вузол; 3 – ізолююча заглушка; 4 – розділювач контуру охолодження «зварювання»; 4.1. - розділювач контуру охолодження «різання»; 5 – плазмоутворююче сопло «зварювання»; 5.1 – плазмоутворююче сопло «різання»; 5.2 – кожух плазмоутворюючого сопла «різання»; 6 – дифузор захисного газу «зварювання»; 7 – захисне сопло «зварювання»; 7.1 - захисне сопло "різання"; 7.2 - кожух захисного сопла "різання".

Установка для лазерно-плазмового зварювання при підвищеній потужності лазерного випромінювання, може бути реалізована як на базі антропоморфного робота рис. 5.20 (а), так і на основі трьохкоординатного маніпулятора (б). Технічні характеристики установки наведено в табл. 5.6.

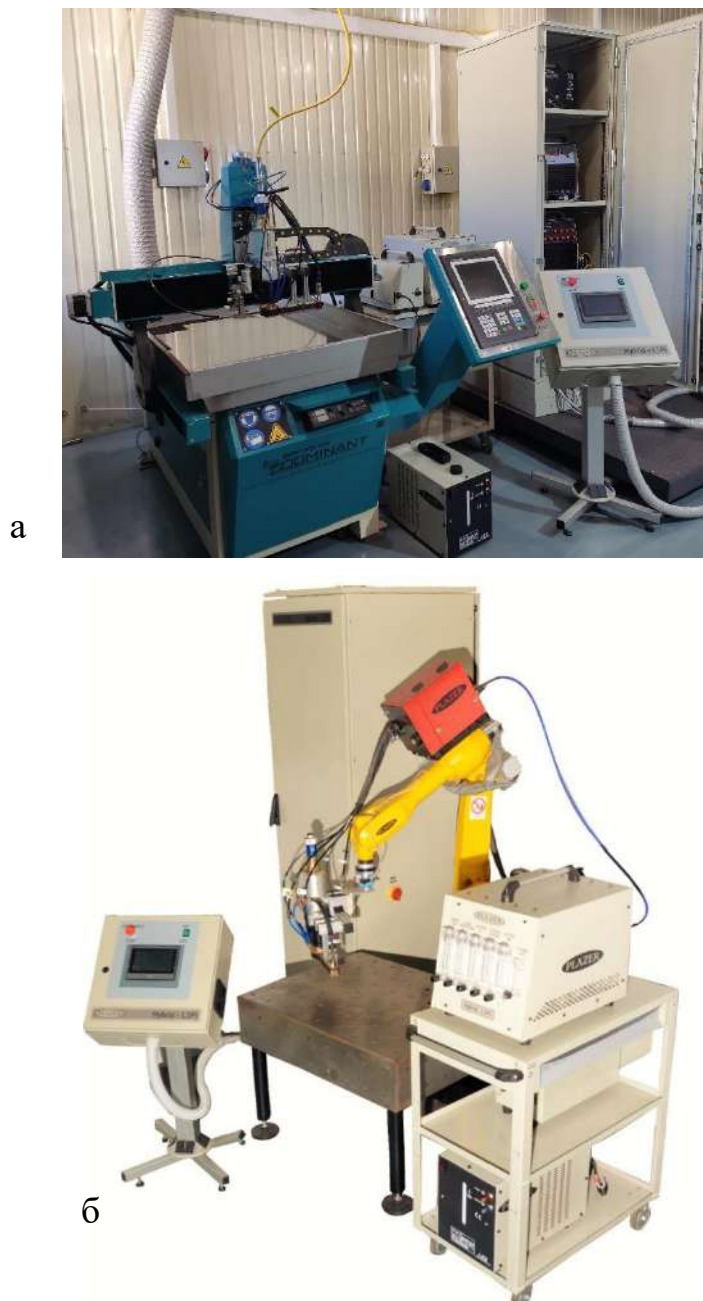


Рис. 5.20. Загальний вигляд установки для лазерно-плазмового зварювання PLAZER Hybrid L5Pl. (а - з трьохкоординатним столом; б – з антропоморфним роботом)

Таблиця 5.6. Технічні характеристики установки для лазерно-плазмового зварювання при підвищеній потужності лазерного випромінювання (до 6 кВт) і плазмової дуги (до 320 А)

| № | Параметр | Значення |
|-----|--|---------------|
| 1. | Напруга трифазної мережі живлення змінного струму з частотою 50 Гц, В | 380 (±15%) |
| 2. | Напруга холостого ходу джерела живлення для зварювання, не більше | 60 |
| 3. | Напруга холостого ходу джерела живлення для різання, не більше | 315 |
| 4. | Робоча напруга на дузі джерела живлення для зварювання, | 12 - 28 |
| 5. | Робоча напруга на дузі джерела живлення для різання, | 80-120 |
| 6. | Межі регулювання зварювального струму прямої полярності для лазерно-плазмового зварювання, А | 20-320 |
| 7. | Межі регулювання струму різання прямої полярності для лазерно-плазмового різання, А | 20-100 |
| 8. | Межі регулювання струму чергової дуги, А | 10 - 30 |
| 9. | Тиск робочих газів на вході в установку, бар | 2 - 8 |
| 10. | Витрати газів для процесу лазерно-плазмового зварювання: | |
| | - плазмоутворюючого, л/хв | 2 - 25 |
| | - захисного, м3/хв | 0,3 – 3 |
| | - додаткового захисту, м3/хв | 0,3 – 3 |
| 11. | Витрати газів для процесу гібридного різання: | |
| | - плазмоутворюючого, л/хв | 2-25 |
| | - захисного, м3/хв | 1-16 |
| 12. | Діаметри присадного дроту, мм | 0,8-1,2 |
| 13. | Межі регулювання швидкості подачі присадного дроту, м/хв. | 0,6 – 6 |
| 14. | Довжина кабель-шлангового пакету плазмотрону, не більше, | 6 |
| 15. | Потужність лазерного випромінювання, до , кВт | 6 |
| 16. | Діаметр електродів, мм | 4 |
| 17. | Фокусна відстань лінзи коліматора, мм | 120 |
| 18. | Хід ручного налаштування лінзи коліматора, мм | ±35 |
| 19. | Фокусна відстань фокусуючої лінзи, мм | 250 |
| 20. | Хід налаштування фокусної відстані, мм | ±10 |

5.4. Висновки по розділу 5.

1. Виконано технологічні експерименти по підборі параметрів режимів лазерно-плазмового зварювання AISI 304 з точки зору отримання повного проплавлення зварного з'єднання з мінімально можливою погонною енергією процесу.

2. Встановлено залежність необхідної погонної енергії лазерно-плазмового зварювання від товщини зварюваної сталі AISI 304.

3. Встановлено максимально можливу глибину проплавлення (7,2 мм) сталі AISI 304 товщиною 10 мм при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням потужності лазерного-випромінювання до 2 кВт. При чому підвищення погонної енергії за рахунок зниження швидкості зварювання з 0,7 до 0,45 та 0,25 м/хв не впливає на глибину проплавлення. Натомість ширина шва збільшується до 1,7 разів.

4. Розроблено технологію двостороннього лазерно-плазмового зварювання AISI 304 товщиною 10 мм, що дає змогу отримати гарантоване перекриття корневих частин зварного шва за рахунок забезпечення глибини проплавлення одного проходу на рівні 60-65% від товщини металу.

5. Було проведено розрахунки для теоретичної оцінки можливості досягнення ефекту підвищення продуктивності різання із застосуванням поєднання лазерного та плазмового джерел нагріву та виконано модернізацію обладнання для проведення досліджень.

6. Розроблено та впроваджено дві лінійки установка для лазерно-мікроплазмового зварювання тонколистових з'єднань (до 1,5 кВт потужності лазерного випромінювання і 50 А струму плазмової дуги. Та лазерно-плазмового зварювання підвищених товщин з потужністю випромінювання до 6 кВт та зварювальним струмом до 320 А.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Шляхом дослідження впливу спільної дії стисненої плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера встановлено, що ефективність передачі енергії при лазерно-плазмовому зварюванні становить 66-67%, що перевищує аналогічні показники плазмового (56%) та теплопровіднісного лазерного зварювання (30...40%). При чому ефективність передачі енергії при лазерному зварюванні з утворенням «кейхолу» є вищою (80%), через покращені умови поглинання випромінювання в «кейхолі»

2. В процесі лазерно-плазмового зварювання нелегованих і легованих (нержавіючих) сталей, в порівнянні із плазмовим зварюванням, має місце зростання напруги на дузі на величину 1-3 В, а також збільшення поглинутої металом енергії на 6% відносно суми окремої дії складових, при цьому спостерігається збільшення в ~ 2 рази площі поперечного перерізу провару порівняно із сумою площ перерізів лазерного і плазмового проварів, а також підвищення глибини проплавлення на 20-30% відносно лазерного зварювання, що може пояснюватися тиском плазмової дуги і гідродинамічними течіями у зварювальній ванні.

3. Показано, що поєднання випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги в єдиному джерелі енергії на прикладі зварювання нержавіючої сталі при потужності лазера і плазми по ~ 2 кВт, дозволяє збільшити глибину проплавлення, порівняно із застосуванням діодного лазера для гібридного лазерно-плазмового процесу – на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO₂-лазера – на 40%.

4. Встановлено, що на режимах з високою швидкістю зварювання ($V_{зв} = 1,5$ м/хв ($\delta=2$ мм)) та $V_{зв} = 1,17$ м/хв ($\delta=6$ мм)) при лазерно-плазмовому зварюванні в металі зварних швів утворюється приблизно однакова за розмірами кристалітів структура. В ЗТВ при товщині 6 мм спостерігається укрупнення зерна в середньому у 3 рази та підвищення мікротвердості в металі зварного шва - в 1,7 раз, по лінії сплавлення - у 1,2

рази, у ЗТВ – 1,3 рази в порівнянні з випадком зварювання 2 мм, що пов'язано із збільшенням тепловкладання та сповільнення процесу тепловідведення.

5. У разі лазерно-плазмового ($V_{ЗВ} = 1,5$ м/хв) та лазерного зварювання ($V_{ЗВ} = 1$ м/хв) AISI 304 товщиною 2 мм розмір субзерен в металі зварних швів найменший. При плазмовому зварюванні ($V_{ЗВ} = 0,3$ м/хв) в металі швів та по лінії сплавлення субструктура укрупнюється у 2 рази, спостерігаються субзерна подовженої форми. При лазерно-плазмовому зварюванні ($V_{ЗВ} = 1,5$ м/хв) по всіх зонах зварного з'єднання спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівновісної форми, що буде забезпечувати комплекс властивостей міцності та тріщиностійкості зварного з'єднання.

6. Моделювання напружено деформованого стану зварних з'єднань зі сталі AISI 304, товщиною 2 мм, виконаних лазерно-плазмовим, лазерним та плазмовим зварюванням, показало, що характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному зварюванні та є менш локалізованим, а також характеризується нижчим рівнем залишкових напружень відносно варіанту плазмового зварювання. Середнє значення напружень при лазерно-плазмовому зварюванні складає 173 МПа, що є на 20% більше відносно 143 МПа при лазерному зварюванні та на 40% менше від 247 МПа – при плазмовому. При цьому пікові значення напружень сконцентровані в зоні термічного впливу і в більшій мірі залежать від погонних енергій зварювання, ніж від температури максимальної нагріву зварювальної ванни. Експериментальна перевірка результатів моделювання підтвердила, що похибка не перевищує 10%.

7. Випробування на статичний розрив з'єднань, одержаних досліджуваними способами, показали, що при лазерному і лазерно-плазмовому зварюванні руйнування переважно відбувається у зоні переходу від лінії сплавлення до ЗТВ, що спричинено більшим розміром

кристалів в цій зоні. При плазмовому зварюванні руйнування в більшій мірі відбувався по металу зварного шва, що пов'язано із орієнтацією і крупним розміром дендритів шва. Показники межі міцності для лазерного і гібридного зварювання є близькими, становлять ~97% від основного металу й відрізняються в межах похибки експерименту.

8. На прикладі лазерно-плазмового зварювання сталі AISI 304 з використанням випромінювання волоконного лазера потужністю до 2 кВт встановлено пікові значення погонної енергії, перевищення яких не впливає на глибину проплавлення, при чому підвищення погонної енергії за рахунок зниження швидкості зварювання призводить до збільшення ширини швів. З врахування даних результатів розроблені технологічні прийоми для реалізації двостороннього швидкісного гібридного лазерно-плазмового зварювання і підтверджено достоїнства такої технології (звуження ЗТВ за рахунок меншого тепловкладення в зварюваний метал, зниження рівня НДС, за рахунок меншої площі двостороннього зварного шва, часткова компенсація деформацій з'єднання за рахунок симетричного виконання першого та другого проходів, тощо).

9. Створено та впроваджено 2 типи обладнання для роботизованого лазерно-плазмового зварювання з гібридними плазмотронами та коаксіальною подачею лазерного випромінювання, розрахованими на потужність випромінювання $P \leq 1,5$ кВт і струм до 100 А та $P \leq 6,0$ кВт і струм до 320 А.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beik V., Marzbani H., Jazar R. Welding sequence optimization in the automotive industry: A review // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 233, Is. 17, 2019. – P. 5945-5952. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954406219859909>
2. Boillot P., Peultier J. Use of Stainless Steels in the Industry: Recent and Future Developments // Procedia Engineering, Vol. 83, 2014. – P. 309-321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.015>
3. Steel strips play an important role in defensive shield // Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 74 no. 3, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1108/aeat.2002.12774cad.018>
4. Mishler, H W, Monroe, R E, and Rieppel, P J. WELDING OF HIGH-STRENGTH STEELS FOR AIRCRAFT AND MISSILE APPLICATIONS (Technical Report). United States: N. p., 1959. Web., 4229223, DMIC-118; PB-151074, NSA-14-002698, AF18(600)-1375.
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б. Е. Патона. – М., «Машиностроение», 1974. – 768 с.
6. Paton B.E. Advanced studies and developments of the E.O. Paton Electric Welding Institute in the field of welding and related technologies // The Paton Welding Journal, #11-12, 2018. – P. 4-15. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.01>
7. Korzhyk V.M., Khaskin V.Yu., Grynyuk A.A., Illyashenko E.V., Bernastkyi A.V., Peleshenko S.I. Features of laser-plasma welding of corrosion-resistant steel aisi 304 using laser // The Paton Welding Journal, #12, 2021. – P. 9-17. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.12.02>
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2008. – 664 с.

9. Olsen F. O., Hansen K. S., Nielsen J. S. Multibeam fiber laser cutting // Journal of Laser Applications, V. 21, 2009 – 133. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.3184436>
10. Jeffrey Kuo C.-F., Chiu H.-Y., Syu S.-S., Huy Vu Q. The CO₂-laser parameter optimization design and practical verification for a touch panel conductive film // Opt. Lasers Eng., V. 52, 2014. – P. 250–260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.05.013>
11. Lütke M., Mahrle A., Himmer T., Morgenthal L., Beyer E. Remote-cutting – A smart solution using the advantages of high brightness lasers // Journal of Laser Applications, 2018, ICALEO 2008, V. 2005 (2008). DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5061284>
12. Mahrle A., Lütke M., Beyer E. Fibre laser cutting: Beam absorption characteristics and gas-free remote cutting // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 224, Is. 5, 2009. – P. 1007-1018. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1747>
13. Danzer, W., Himmer, T., Morgenthal, L., Lütke, M. Cutting with fibre lasers 3. Internationaler Fraunhofer-Workshop „Faserlaser“, Fraunhofer IWS Dresden, Annual Report 2007. – 85 p.
14. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца // М.: Высш. шк., 1988 – 207 с.: ил.
15. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 264 с.
16. Faerber M., Danzer W., Berkmanns J. Laser welding with or without shielding gas? // Journal of Laser Applications, PICALO 2006, V. 38 (2006), 2018. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5056968>
17. Stavridis J., Papacharalampopoulos A., Stavropoulos P. Quality assessment in laser welding: a critical review // Int. J. Adv. Manuf. Technol., V. 94, 2018. – P. 1825–1847. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0461-4>

18. Abt F. et al. Camera based closed loop control for partial penetration welding of overlap joints // *Phys Procedia*, V. 12, 2011 – P. 730–738.
19. Kim C.-H., Ahn D.-C. Coaxial monitoring of keyhole during Yb:YAG laser welding // *Opt Laser Technol.*, V. 44(6), 2012. – P. 1874–1880.
20. Kawahito Y., Mizutani M., Katayama S. Investigation of high-power fiber laser welding phenomena of stainless steel // *TRANSACTIONS-JWRI*, V. 36(2), 2007:11.
21. Tenner F. et al. Experimental approach for quantification of fluid dynamics in laser metal welding // *Journal of Laser Applications*, V. 27(S2), 2015 : S29003.
22. Khaskin V.Yu., Korzik V.N., Sydorets V.N., Bushma A.I., Wu B., Luo Z. Improving the efficiency of hybrid welding of aluminum alloys // *The Paton Welding Journal*, #12, 2015. – P. 14-18.
23. Seto N., Katayama S., Matsunawa A. Porosity Formation Mechanism and Suppression Procedure in Laser Welding of Aluminum Alloy // *Welding International*, V. 15(3), 2001. – P. 191-202. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110109549341>
24. Fotovvati B., Wayne S. F., Lewis G., Asadi E. A Review on Melt-Pool Characteristics in Laser Welding of Metals // *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, Article ID 4920718, 18 pages, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4920718>
25. Charles J., Bonnefois B. Super duplex stainless steels: properties and weldability // *Proceedings of the Conference in Applications of Stainless Steels*, Stockholm, Sweden, 1992. – pp. 1108–1121.
26. Kotecki D. J. Ferrite control in duplex stainless steel weld metal // *Welding Journal*, Vol. 65, 1986. – pp. 273s–278s.
27. Kou S. *Welding Metallurgy*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, USA, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471434027>
28. Munitz A. Microstructure of rapidly solidified laser molten Al-4.5 Wt Pct Cu surfaces // *Metallurgical Transactions B*, Vol. 16, no. 1, 1985. – pp. 149–161.

29. Manoharan A/L K., Quazi M. M., Bashir M. N., Salleh M. N. M., Zaifuddin A. Q, Lingamm R. An Overview of LaserWelding of High Strength Steels for Automotive Application // International Journal of Technology and Engineering Studies, Vol. 6 Is. 1, 2020. – pp. 23-40. DOI: <https://dx.doi.org/10.20469/ijtes.6.10004-1>
30. Mohammed Ridha G., Ishak M., Ahmad S. N. A. S., Abdulhadi H. A. Fiber laser welding of dissimilar 2205/304 stainless steel plates // Metals, Vol. 7, No. 12, 2017. – pp. 546–548. DOI: <https://doi.org/10.3390/met7120546>
31. Ma X., Lin J., Ju J., Lei Y., Fu H. Effect of laser welding speed on the weld quality of a 5A06 aluminum alloy // Materials Testing, Vol. 60, No. 11, 2018. – pp. 1085-1092. DOI: <https://doi.org/10.3139/120.111253>
32. Wei Xu, Wu Tao, Haiwen Luo, Shanglu Yang. Effect of welding speed on microstructure and mechanical behavior of laser welded Al-Si coated 22MnB5 steel // Optics & Laser Technology, V. 154, 2022, 108344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108344>
33. Wits W.W., Becker Jauregui J.M. Laser Beam Welding of Titanium Additive Manufactured Parts // Procedia CIRP, Vol. 28, 2015. – P. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.013>
34. Mascenik J., Pavlenko S. Determination of stress and deformation during laser welding of aluminium alloys with the pc support // MM Science Journal, November, 2020. – P. 4104-4107. DOI: https://doi.org/10.17973/MMSJ.2020_11_2020037
35. Goodwin D.W. Industrial Lasers and Their Applications // Optica Acta: International Journal of Optics, V. 32(7), 1985, Published online: 03 Dec 2010. – p. 748. DOI: <https://doi.org/10.1080/716099691>
36. Haboudou A., Peyre P., Vannes A. B. Influence of surface preparation and process parameters on the porosity generation in aluminum alloys // Journal of Laser Applications, V. 16, 20 (2004). DOI: <https://doi.org/10.2351/1.1619995>

37. Liu Z., Kutsuna M., Xu G. Fiber laser welding of 780MPa high strength steel // Journal of Laser Applications, ICALEO 2006, V. 1101 (2006), 2018. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5060755>
38. Микроплазменная сварка / Б.Е. Патона, В.С. Гвоздецкий, Д.А. Дудко и др. – Киев: Наук. думка, 1979. – 248 с.
39. Golański D., Chmielewski T., Skowrońska B., Rochalski D. Advanced Applications of Microplasma Welding // Biuletyn Instytutu Spawalnictwa, No. 5, 2018 – P. 53-63. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2018.5/5>
40. Goshkoderya M. E., Kondratev N. A., Nikitina V. R., Zhugarev N. A. Development of a compact plasma torch design for welding and surfacing // 2020 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 939 012026. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/939/1/012026>
41. Korzhik V.N., Sydorets V.N., Han Shanguo, Babich A.A., Grinyuk A.A., Khaskin V.Yu. Development of a robotic complex for hybrid plasma-arc welding of thin-walled structures // The Paton Welding Journal, #5-6, 2017. – P. 62-70. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.12>
42. Chandra-ambhorn S., Chauiphan W., Sukwattana N. C., Pudkhunthod N., Komkham S. Plasma Arc Welding between AISI 304 and AISI 201 Stainless Steels Using a Technique of Mixing Nitrogen in Shielding Gas // Advanced Materials Research, V. 538–541, 2012. – P. 1464–1468. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.538-541.1464>
43. Rao Z. H., Liao S. M., Tsai H. L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding // Journal of Applied Physics, V. 107, 2010 ; 044902. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3291121>
44. Krivtsun I.V., Demchenko V.F., Krikent I.V., Kovalenko D.V., Kovalenko I.V. Effect of current and arc length on characteristics of arc discharge in nonconsumable electrode welding // The Paton Welding Journal, #5, 2019. – P. 2-12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.05.01>

45. Fuerschbach P W. Cathodic cleaning and heat input in variable polarity plasma arc welding of aluminum. *Welding Journal*, Vol. 77, Is. 2, 1998. DOE: AC04-94AL85000
46. Гришин И.С. Микроплазменная сварка тонколистовых конструкций. Курс лекций. // Куйбышев. авиац. ин-т. Самара, 1991. – 42 с.
47. Liu Y., Liu J., Ye H., Yao Y. Study on plasma arc welding technology and properties of metal materials // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, V. 563, 2019 : 022003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/563/2/022003>
48. Chen S., Yan Z., Jiang F. Arc discharge and pressure characteristics in pulsed plasma gas of PAW // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 102, 2019. – P. 695–703. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3198-9>
49. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. – М.: Машиностроение, 1972. – 264 с.
50. Выбор режимов микроплазменной сварки / В.С. Гвоздецкий и др. // *Автомат. сварка*, №3, 1973. – С. 59-61.
51. Patent 1547172 Великобритания, МКИ В23К 26/00, 9/00. Methods and apparatus for cutting, welding, drilling and surface treating / W. M. Steen. – Оpubл. 06.06.79.
52. Patent US4167662 США, МКИ В23К 9/00. Methods and apparatus for cutting and welding / W. M. Steen. – Оpubл. 11.09.79.
53. Steen W. M., Eboo M. Arc augmented laser welding // *Metal Construction.*, Vol. 11, No. 7, 1979. – P. 332-335.
54. Clarke J., Steen W. M. Arc augmented laser cutting // *Proceedings of the Laser 1979 Conf.*, Germany, Munich, 1979. – P. 247.
55. Steen W. M. Arc augmented laser processing of materials // *J. of Appl. Phys*, Vol. 51, No. 11, 1980. – P. 5636-5641.
56. Mazumder J., Steen W. M. Laser welding of steels in can making // *Welding J.*, Vol. 60, No. 6, 1981. – P. 19-25.

57. Steen W. M., Eboo M. Arc augmented laser welding // *Metal Construction*, Vol. 11, No. 7, 1979. – P. 332-335.
58. Кривцун И.В. Комбинированные лазерно-дуговые процессы обработки материалов и устройства для их реализации // Дис. ... докт. техн. наук: 05.09.10. Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, Киев. – 2002. – 393 с.
59. Сидорец В.Н. Лазерно-микроплазменная сварка алюминиевых сплавов / В.Н. Сидорец, А.И. Бушма, В.Ю. Хаскин // *Збірник наукових праць НУК*, №3-4, 2012. – С. 26-31.
60. Krivtsun I. V. Application of diode and CO₂ lasers in laser-plasma welding of thin sheet aluminum alloys / Krivtsun I. V., Khaskin V. Yu., Zatserkovny A. S., Bernatsky A.V. // *Welding and Material Testing / Sudarea și Încercarea Materialelor, BID ISIM*, XVIII, №3, 2009. – P. 47-51.
61. Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys / Krivtsun I.V., Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Shulym V.F., Ternovoj E.G. // *The Paton Welding Journal*, №5, 2007. – P. 36-39.
62. Khaskin V.Yu. Development of laser welding of aluminium alloys at the e.o. paton electric welding institute (Review) // *The Paton Welding Journal*, №5, 2013. – P. 51-55.
63. Krivtsun I. V. Hybrid laser-plasma welding of stainless steels / I.V. Krivtsun, A.I. Bushma, V.Yu. Khaskin // *The Paton Welding Journal*, №3, 2013. – P. 46-50.
64. Krivtsun I. V. Laser-plasma welding of stainless steels and aluminum alloy / I.V. Krivtsun, A.I. Bushma, V.Yu. Khaskin // *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 2013. – P. 76-82.
65. Acherjee B. Hybrid laser arc welding: State-of-art review // *Optics & Laser Technology*, Vol. 99, 2018. – P. 60-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
66. Hu B., den Ouden G. Synergetic effects of hybrid laser/arc welding // *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 10, Is. 4, 2005. – P. 427-431. DOI: <https://doi.org/10.1179/174329305X44170>

67. Zhang C., Gao M., Zeng X. Influences of synergy effect between laser and arc on laser-arc hybrid welding of aluminum alloys // Optics & Laser Technology, Vol. 120, 2019, 105766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105766>
68. Mahrle A., Schnick M., Rose S., Demuth C., Beyer E., Füssel U. Process characteristics of fibre-laser assisted plasma arc welding // Author manuscript, published in "Journal of Physics D: Applied Physics 44, 34, 2011. – 345502". DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/34/345502>
69. Hipp D., Mahrle A., Jäckel S., Beyer E., Leyens C., Füssel U. Method for high accuracy measurements of energy coupling and melting efficiency under welding conditions // Journal of Laser Applications, V.30, 2018, 032414. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.5040615>
70. Hipp D., Mahrle A., Beyer E., Jäckel S., Hertel M., Füssel U. Thermal Efficiency Analysis for Laser-Assisted Plasma Arc Welding of AISI 304 Stainless Steel // Materials, V.12, 2019, 1460. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12091460>
71. Meng Y., Gao M., Zeng X. Effects of arc types on the laser-arc synergic effects of hybrid welding // Optics Express, Vol. 26, Is. 11, 2018. – P. 14775-14785. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.014775>
72. Emmelmann C., Kirchhoff M., Petri N. Development of Plasma-Laser-Hybrid Welding Process // Physics Procedia, Vol. 12, 2011. – P. 194–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.025>
73. Patent US5700989 CIIA, МКИ B23K 26/00, 10/00. Combined Laser and Plasma Arc Welding Torch / I.S. Dykhno, I.V. Krivtsun, G.N. Ignatchenko. – Оpubл. 23.12.97.
74. Patent US6388227 B1 CIIA: Combined Laser and Plasma-Arc Processing Torch and Method. / I.Dykhno, G.Ignatchenko, E.Bogachenkov. – Оpubл. 14.05.2002.
75. Patent US5866870 CIIA, МКИ B23K 10/00, 26/00. Enhanced Laser Beam Welding / R.P. Walduck. – Оpubл. 02.02.99.

76. Kim C.H. CO₂ Laser-Micro Plasma Arc Hybrid Welding for Galvanized Steel Sheets / C.H. Kim, Y.H. Ahn, J.H. Kim // Transactions of Nonferrous Metals Society of China, V.21, Supplement 1, 2011. – P. s47-s53.
77. Qualification of Nd:YAG and CO₂ Laser Plasma Hybrid Welding with Filler Material Powder / K. Stelling, M. Lammers, H. Schobbert, et al. // Welding and Cutting. – 2006. – V.5, No.6. – P. 330-334.
78. Bushma A.I. State-of-the-art of hybrid laser-plasma welding (Review)// The Paton Welding Journal, №8, 2015. – P. 18-25.
79. Patent ZL201610092501.6 Китай, МКИ В23К 26/00. Способ гибридной лазерно-микроплазменной сварки / V. Khaskin, D. Cai, V. Korzhyk, I. Krivtsun, S. Peleshenko, S. Han, Z. Luo, X. Wang. – Оpubл. 08.03.2018.
80. Особенности сварки алюминиевых сплавов лазерным, микроплазменным и гибридным способами / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, А.А. Чайка и др. // Сварщик, №3, 2014. – С. 30-35.
81. Optimisation of the processes of laser, microplasma and hybrid laser–microplasma welding of aluminium alloys / A. M. Orishich, A. G. Malikov, V. D. Shelyagin, V. Yu. Khaskin & A. A. Chayka // Welding International, Vol.30, No.12, 2016. – P. 957–961.
82. Möller F., Thomy C. Interaction Effects between Laser Beam and Plasma Arc in Hybrid Welding of Aluminum // Physics Procedia, Vol. 41, 2013. – P. 81-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.054>
83. Qualifizierung des Nd:YAG- und CO₂-Laser-Plasma-Pulver-Hybridschweißens. AiF-Vorhaben-Nr. 13674 N. Zwischenbericht für den Zeitraum 01.01.2004 bis 31.12.2004.
84. Stelling K., Schobbert H., Kannengiesser Th., Boellinghaus Th. Vertical-up and -down laser plasma powder hybrid welding of a high nitrogen austenitic stainless steel // Welding in the World, Vol. 49, n° 5/6, 2005. – P. 45-49.
85. Шишов А.Ю., Третьяков Р.С., Третьяков Е.С, Ставертий А.Я. Перспективы разработки технологии лазерно-плазменной сварки изделий

больших толщин в судостроении с использованием порошкового присадочного материала // Инженерный журнал: наука и инновации, №6, 2012. – С. 146-152.

86. A/SP Joining Technologies Committee Report ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL (AHSS) WELD PERFORMANCE STUDY FOR AUTOBODY STRUCTURAL COMPONENTS // Welding Processes Performed by RoMan Engineering Services, Supervised by Auto/Steel Partnership Joining Project, Structural Welding Sub Group Members.

87. Yoon S. H., Hwang J. R., Na S. J. A study on the plasma-augmented laser welding for small-diameter STS tubes // Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol.32, 2007. – P. 1134–1143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0436-3>

88. Page C. J., Devermann T., Biffin J., Blundell N. Plasma augmented laser welding and its applications // Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 7, No.1. 2002. – P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1179/136217102225001313>

89. Lasertechnik aktuell // Bremer Institut für angewandte Strahltechnik, Bulletin, No.2, 2007.

90. Möller F. Wechselwirkung zwischen Lichtbogen und Laserstrahl bei Aluminium // Strahltechnik, Bd. 59, Bremen; BIAS Verlag, 2016. – 115 s. Hrsg.: F. Vollertsen, R. Bergmann, Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2016. ISBN 978-3-933762-53-5

91. Plasma welding with a superimposed coaxial fiber laser beam / S. Rose, A. Mahrle, M. Schnick etc. // Welding in the World, V.57, Issue 6, November 2013. – pp. 857-865.

92. Beyer E., Standfuss J. Innovations in laser welding using high brightness lasers // Heriot-Watt IMRC Conference, 26th June 2012, Edinburgh. – 49 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0079-6>

93. Mahrle A., Rose S., Schnick M., Beyer E., Füßel U. Laser-assisted plasma arc welding of stainless steel // Journal of Laser Applications V. 25, 2013. – 032006. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4798338>

94. Mahrle A., Rose S., Schnick M., Beyer E., Fußel U. Stabilisation of plasma welding arcs by low power laser beams // Science and Technology of Welding

and Joining, V. 18, No. 4, 2013. – P. 323-328. DOI: <https://doi.org/10.1179/1362171813Y.00000000109>

95. Маркашова Л.И, Шелягин В.Д., Кушнарёва О.С., Бернацкий А.В. Влияние технологических параметров лазерного и лазерно-плазменного легирования на свойства наплавленных слоев стали 38ХН3МФА // Автоматическая сварка, №5-6, 2015. – С. 131-137.

96. Борисов Ю. С., Демченко В. Ф., Лесной А. Б., Хаскин В. Ю., Шуба И. В. Численное моделирование теплообмена и гидродинамики при лазерно-плазменной обработке металлических материалов // Автоматическая сварка, №4, 2013. – С. 3-8

97. Unocic, R. R., & DuPont, J. N. (2004). Process efficiency measurements in the laser engineered net shaping process. // Metallurgical and Materials Transactions B, 35(1), 143–152. doi:10.1007/s11663-004-0104-7

98. Reisgen U., Krivtsun I., Gerhards B., Zabirow A. Experimental research of hybrid welding processes in combination of gas tungsten arc with CO₂- or Yb:YAG-laser beam // Journal of Laser Applications V.28, 2016. – 022402. (DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4944096>)

99. <https://caeonline.com/buy/scanning-electron-microscopes/tescan-mira3-lmu/9114894>

100. Lobanov L.M., Pivtorak V.A., Savitsky V.V., Tkachuk G.I. Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry // The Paton Welding Journal. 2006. №01. P. 24-29.

101. T Hassel , A Beniyash, G Klimov. Non-vacuum electron beam welding and cutting of copper

102. Fuerschbach, P. W., & Eisler, G. R. (2002). Effect of laser spot weld energy and duration on melting and absorption. Science and Technology of Welding and Joining, 7(4), 241–246. doi:10.1179/136217102225004293

103. V. Korzhyk, V. Khaskin, S. Peleshenko, V. Shcheretskyi, Illiashenko Yevhenii. 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

104. Krivtsun I., Hubaiev K., Krikent I., Semenov O., Reisgen U., Zabiroy A. Metal Penetration in TIG, Laser and Hybrid (TIG + Laser) Spot Welding. Part II – Mathematical Modelling.

105. Seyffarth P., Krivtsun I. Laser-Arc Processes and Their Applications in Welding and Material Treatment – London: Taylor and Francis Books, V.1, 2002. – 200 p. (DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482264821>)

106. Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент: Сб. статей и докладов под ред. акад. НАН Украины И.В. Кривцуна. – Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. – 642 с.

107. Eriksson I., Powell J., Kaplan A. Guidelines in the choice of parameters for hybrid laser arc welding with fiber lasers // Physics Procedia V.41, 2013. – P. 119-127. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.059>)

108. Krivtsun I.V., Shelyagin V.D., Khaskin V.Yu., Shulym V.F., Ternovoj E.G. Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys // The Paton Welding Journal, No.5, 2007. – P. 36-40.

109. Goldak, J., Chakravarti, A., and Bibby, M., 1984. A new finite element model for welding heat sources. Metall. Trans. 15B(2): 299–305

110. Goldak, J. A., Akhlagi, M., 2005. Computational Welding Mechanics. – U.S., Springer. – 322 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/b101137>

111. Slyvinsky O.A., Prepiialo A. O., Bondarenko V.L., Slyuta V. P. Calculation and experimental analysis of thermal processes of thin-sheet stainless steel welding using TIG and CMT methods // Technological Systems, No 1, 2014. – pp. 76-82.

112. Khudyakov A., Korobov Yu., Danilkin P., Kvashnin V. Finite element modeling of multiple electrode submerged arc welding of large diameter pipes IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 681, 2019. : 012025. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012025>

113. Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук. Определение остаточных напряжений в элементах конструкций на основе применения электронной спекл-интерферометрии и метода конечных элементов// Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №4, 2006 с. 15-20.

114. Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак, В. В. Савицкий, Г. И. Ткачук К Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии.// Автоматическая сварка №1 2006 с. 25-30

115. Korzhyk V., Khaskin V., Perepychay A., Illiashenko. E., Peleshenko S. Forecasting the results of hybrid laser-plasma cutting of carbon steel.// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, № 21 (104), 2020. – P. 6-14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199830>

Додаток А



Товариство з обмеженою відповідальністю
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР «ПЛАЗЕР»

Україна, 01042, м. Київ, вул. Філатова, 10-А, оф.2/10, код ЄДРПОУ 38388946,
Р/р №26002010060574 в АТ «Укресімбанк», МФО 322313,
Тел., +38-044-353 39-98, факс: +38-044-247-44-57
www.plazer.com.ua E-mail: plazer2010@meta.ua

№26-15 від 24 липня 2023 р.

ДОВІДКА**про впровадження результатів наукової-дослідної роботи**

ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР» інформує про впровадження наукових і практичних результатів роботи «Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера» проведеної аспірантом відділу «Електротермічних процесів обробки матеріалів» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Ілляшенком Євгенієм Володимировичем, а саме:

- Рекомендації по підбору оптимальних режимів зварювання сталей та сплавів кольорових металів.
- Модернізації зварювальних головок та плазмотронів для лазерно-плазмового зварювання, в т.ч. з точки зору газодинамічних характеристик.
- Оптимізації конструкції вузла додаткового газового захисту зварного з'єднання.
- Розробок циклограм керування обладнання для процесу лазерно-плазмового зварювання.

Підтверджуємо, що в результаті співпраці, на підприємстві ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР» виконано впровадження розробленого в ІЕЗ ім. Є.О. Патона зразка промислового обладнання, а саме – організовано серійне виробництво комплексів для лазерно-мікроплазмового та лазерно-плазмового зварювання сталей та сплавів «PLAZER Hybrid – L5PI».

Основні технічні характеристики комплексу PLAZER Hybrid – L5PI

| № | Найменування параметра | Величина |
|---|---|--------------------------|
| 1 | Напруга трифазної мережі живлення змінного струму з частотою 50 Гц, В | 400 (±15%) |
| 2 | Струм споживання по кожній фазі, А не більше | 25 |
| 3 | Робочий струм дуги прямої полярності неплавкого електрода в процесах плазмового зварювання, А | до 200 |
| 4 | Потужність лазерного випромінювання, кВт | до 5,0 |
| 5 | Захисний газ для зварювання | Ar, Ar + CO ₂ |
| 6 | Плазмоутворюючий та захищаючий оптику газ у гібридному лазерно-плазмовому пальнику | Ar |
| 7 | Робоча напруга джерела живлення, В | 12-36 |

| | | |
|----|--|------------|
| 8 | Кількість блоків спеціалізованої системи електроживлення плазмотрону, шт. | 1 |
| 9 | Тиск робочих газів на вході в систему газопідготовки, бар | 2 - 6 |
| 10 | Витрати газів: | |
| | - захисного, л/хв | 4 - 40 |
| | - плазмоутворюючого, л/хв | 1,0 - 10,0 |
| 11 | Кількість вольфрамових неплавких електродів в гібридній головці, шт. | 1 |
| 12 | Діаметр вольфрамового неплавкого електрода в гібридній головці, мм | 4,0 |
| 13 | Фокусна відстань лінзи коліматора, мм | 100 |
| 14 | Хід ручного налаштування лінзи коліматора, мм | ±20 |
| 15 | Точність ходу ручного налаштування лінзи коліматора, мм | ±0,25 |
| 16 | Фокусна відстань лінзи, що фокусує, мм | 200 |
| 17 | Хід налаштування фокусної відстані, мм | ±25 |
| 18 | Точність ходу ручного налаштування фокусної відстані лінзи, що фокусує, мм | ±0,25 |
| 19 | Кількість оптичних елементів, шт.: | |
| | - лінза коліматора | 1 |
| | - фокусуюча лінза | 1 |
| | - захисне скло | 1 |
| 20 | Діаметр фокусуючої та захисної оптики, мм | 50,8 |
| 21 | Витрата охолоджувальної води БАО, л/хв | 7 - 10 |
| 22 | Швидкість подачі присаджувального дроту, м/год | 50...500 |
| 23 | Діаметри присаджувального дроту, мм | 0,8-1,6 |
| 24 | Довжина кабель-шлангового пакета, м, не більше | 10 |



Роботизований комплекс обладнання для гібридного лазерно-плазмового зварювання сталей та сплавів PLAZER Hybrid – LSPi (ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР», Україна)



Роботизований комплекс обладнання для гібридного лазерно-мікроплазмового зварювання сталей та сплавів поставлений на експорт в Гуандунський інститут зварювання, КНР

Комплекс обладнання PLAZER Hybrid – L5PI забезпечує технологію лазерно-плазмового зварювання вуглецевих; нержавіючих сталей; кольорових металів та сплавів. Гібридна технологія зварювання, яку забезпечує PLAZER Hybrid – L5PI, має істотні переваги в порівнянні з лазерними технологіями:

- підвищена продуктивність, що забезпечує підвищення швидкостей зварювання;
- нижчі вимоги до підготовки зварюваних кромок, що дозволяє знизити витрати на механообробку металу перед зварюванням.
- Наявність плазмової дуги дозволяє компенсувати втрати потужності лазерного випромінювання при зварюванні з подачею дроту присадки.

До складу комплексу входить спеціальна система управління обладнанням, яка дозволяє фіксувати та записувати технологічні параметри процесу зварювання. Це дає можливість збирати статистичні дані та обробляти їх для наукових досліджень.

Перша партія поставлена на експорт в Гуандунський інститут зварювання Гуандунської Академії Наук, КНР.

Директор



М.Ф. Короб