

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БАБИЧ ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 621.791.754.2

**ДИСЕРТАЦІЯ**

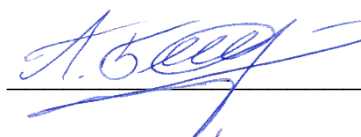
**ГІБРИДНЕ ПЛАЗМОВО-ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ З КОАКСІАЛЬНИМ  
РОЗМІЩЕННЯМ ДУГИ ПЛАВКОГО ЕЛЕКТРОДУ**

Спеціальність 05.03.06 – «Зварювання та споріднені процеси і технології»

Галузь 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 О.А. Бабич

Науковий керівник:



**Коржик Володимир Миколайович**

доктор технічних наук

**Київ – 2021**

## АНОТАЦІЯ

**Бабич О.А. Гібридне плазмово-дугове зварювання з коаксіальним розміщенням дуги плавкого електроду.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.06 – зварювання та споріднені технології. – Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2021.

Дисертація присвячена вивченню особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів, взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів одна з одною, а також з металами, що зварюють, дослідженню напружено-деформованого стану та механічних властивостей отриманих зварних з'єднань, створенню комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання.

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану досліджень і тенденцій розвитку технологій і обладнання гібридного плазمو-дугового зварювання плавким електродом. В останнє десятиріччя проблема зварювання сталей і алюмінієвих сплавів вирішується за рахунок використання гібридних технологій, зокрема таких, що поєднують переваги плазмового і дугового способів зварювання. Для цього в одній зварювальній ванні концентрують енергію стисненої дуги з неплавким електродом і дуги з плавким електродом. Дану технологію називають гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом. Цей процес більш відомий у світі під назвою Plasma-MIG.

Процес Plasma-MIG зварювання було запропоновано у 1970-х роках групою дослідників з лабораторії фірми Philips (A. Christinus, H.J. Liei'kens, W.G. Essers). Подальші дослідження, які проводилися в останнє десятиріччя, були спрямовані на ретельне дослідження окремих складових процесу та його поведінки в цілому (T.S. Tanaka; S.B. Mamat; M. Hertel; M.Y. Mahani). Можливість використання даного процесу для зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів виникла завдяки роботам, проведеним в ІЕЗ ім. Є.О. Патона

такими дослідниками, як І.В. Кривцун, В.М. Сидорець, Н.О. Макаренко, К.О. Кондрашов та ін. В цих роботах показано, що підґрунтям для подальшої оптимізації технологічних чинників процесу є вивчення його фізичних та металургійних особливостей.

**Другий розділ** присвячено опису розробки дослідницького комплексу для вивчення гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та методів виконання досліджень. Він включає:

- опис створення дослідницького комплексу з високошвидкісними відео реєстрацією процесів, що відбуваються в дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів двох зварювальних дуг для проведення фізичних досліджень поведінки плазмової дуги і дуги плавкого електроду, а також їх впливу одна на одну та на формування зварного з'єднання;

- опис методів проведення механічних випробувань зварних зразків;

- опис методів виконання експериментів по дослідженню напружено-деформованого стану зразків при гібридному Plasma-MIG і MIG зварюванні;

- опис методів проведення металургійних досліджень.

**В третьому розділі** наведено теоретичне прогнозування та експериментальні дослідження взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного Plasma-MIG зварювання плавким електродом. Для цього створено математичну модель взаємодії стисненої плазмової дуги та дуги з плавким електродом при гібридному плазмово-дуговому зварюванні.

Порівняння розрахункової та дослідної вольт-амперних характеристик плазмового розряду в процесі Plasma-MIG зварювання показало що розрахункові результати корелюють з дослідними, а похибка при розрахунках складає не більше 7%.

Досліджено вплив умов технології гібридного плазмово-дугового зварювання на особливості протікання фізичних та металургійних процесів, форму та розміри зварних з'єднань. Проаналізовано особливості взаємодії плазмової дуги і дуги плавкого електроду під час спільного впливу на сталі і

алюмінієві сплави, а також особливості формування і перенесення крапель металу плавкого електроду. Вивчався взаємний вплив параметрів режиму зварювання та їх вплив на розміри і форму зварного шва. Це дозволило встановити відповідні загальні тенденції для випадків зварювання сталей і алюмінієвих сплавів та відмінності при зварюванні цих металів.

**В четвертому розділі** на підставі виявлених раніше тенденцій, за критерієм якості формування швів, були вибрані раціональні режими гібридного Plasma-MIG зварювання. Механічні випробування на статичний розрив показали, що Plasma-MIG зварювання забезпечує міцність з'єднань з алюмінієвих сплавів на рівні 80-90% від показників основного металу, на відміну від міцності 75-80% при імпульсному MIG зварюванні.

Зниження погонної енергії на 10-20% порівняно з імпульсним MIG зварюванням (при рівних швидкостях) дозволяє на 5-10% зменшувати розміщення з'єднань алюмінієвих сплавів, а також зменшувати втрати вмісту певних легуючих елементів в металі швів (наприклад, Mg до ~5%, Mn до 15% тощо,). При цьому в порівнянні з MIG зварюванням витрати електродного дроту для випадку Plasma-MIG знижуються на 10-30%.

Для визначення залишкового напружено-деформованого стану (НДС) після зварювання пластин алюмінієвого сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм) за допомогою програмного комплексу «Simufact welding» було проведено моделювання теплових процесів при Plasma-MIG зварюванні.

Результати чисельного моделювання НДС для Plasma-MIG зварювання перевіряли шляхом їх фізичного вимірювання методом спекл-інтерферометрії на стикових зварних з'єднаннях алюмінієвого сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм). Було встановлено, що залишкові деформації у разі Plasma-MIG зменшуються на 20-40% порівняно з імпульсним MIG зварюванням, а залишкові напруження залишаються на рівні таких для MIG зварюванням, показуючи тенденцію до зменшення при збільшенні розміру з'єднань.

**П'ятий розділ** присвячено розробці та практичному застосуванню дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмо-дугового

зварювання. Описана розробка промислової моделі гібридного плазмотрону за коаксіальною схемою. З метою оптимізації конструктивних параметрів гібридного плазмотрону було виконано комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки по контурах плазмоутворюючого та захисного газів.

Створено комплекс обладнання Plasma-MIG зварювання з загальною системою керування. На базі потужностей ТОВ «НВЦ«ПЛАЗЕР» (Україна) налагоджено серійне виробництво даного комплексу. Обладнання було впроваджене в Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР), а також в Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР). Воно використовувалося для виготовлення партій елементів судових конструкцій з алюмінієвих сплавів 1561 і 7075 товщиною 5-8 мм та сталей товщиною до 12 мм за один прохід без розробки крайок.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1) встановлені умови циклічного переміщення анодної плями на кільцевому неплавкому електроді коаксіального плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, шляхи управління процесами газодинаміки плазмоутворюючого газу;

2) встановлено, що за рахунок впливу плазмової дуги оберненої полярності на дугу плавкого електроду та при величині постійного струму дуги плавкого електроду до  $\sim 180$  А спостерігається крупнокрапельне перенесення металу без розбрикування з частотами 20-50 Гц, з підвищенням сили струму дуги плавкого електроду спостерігається тенденція переходу до дрібнокрапельного і струменевого переносу;

3) отримало подальший розвиток дослідження умов одержання глибокого проплавлення сталей і алюмінієвих сплавів, а також пониження схильності до утворення внутрішніх пор та несплавлень металу плавкого електроду з основним металом за рахунок впливу плазмової дуги на зварюваний метал, стиснення нею дуги плавкого електроду і заглиблення останньої в зварювальну ванну;

4) встановлено що при близьких значеннях погонних енергій у разі гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів вигорання

легкоплавких елементів зменшується порівняно з MIG процесом (Mg на 5%, а Mn майже на 15%). При цьому на 15-25% зменшується розмір зони термічного впливу і на 5-15% підвищується межа міцності швів;

5) отримало подальший розвиток дослідження напружено-деформованого стану з'єднань, отриманих при гібридному зварюванні з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом, показано зниження залишкових деформацій у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, порівняно із аналогічними параметрами для випадку дугового MIG зварювання.

### **Практичне значення.**

1) для дослідження фізичних явищ, що виникають при взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів в гібридному плазмово-дуговому процесі, створено експериментальний комплекс з високошвидкісною відео реєстрацією процесів та реєстрацією електричних параметрів дуг, який дозволив встановити розмір крапель електродного дроту і частоту їх перенесення, проаналізувати поведінку дуги плавкого електроду, а також виявити вплив плазмоутворюючого газу на блукання анодної плями по кільцевому аноду;

2) за результатами досліджень фізичних і металургійних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей типу 09Г2С, AISI304 і алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм обрано параметри технологічних режимів за умов досягнення швидкості до 60 м/год., які для алюмінієвих сплавів забезпечують міцність ( $\sigma_B$ ) ~ 85-95% і відносне видовження до 80% від показників основного металу у сполученні із залишковими деформаціями приблизно на 20-40% меншими за такі для MIG зварювання;

3) встановлена залежність співвідношення струмів плазмової дуги і дуги плавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні від теплопровідності зварюваного металу, так у разі зварювання сталей (менша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% перевищувати струм

плазми, а у разі зварювання алюмінієвих сплавів (більша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% бути нижчим за струм плазми;

4) встановлені технологічні переваги гібридного плазмово-дугового зварювання порівняно із дуговим та плазмовим процесами, зокрема відсутність розбризкування електродного металу, глибоке проплавлення без утворення ефекту «замкової шпарини», можливість зварювання пластин нержавіючої сталі товщиною 12 мм за один прохід без розробки крайок із погонною енергією до 3500 Дж/мм;

5) для реалізації розроблених технологічних підходів гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів створено гібридний плазмотрон з кільцевим неплавким електродом прямого водяного охолодження зі вставкою з тугоплавкого композитного матеріалу і завихрювачем плазмоутворюючого газу, а також системою захисту зварювальної ванни і гарячої ділянки сформованого шва ламінарними газовими потоками;

6) створено комплекс обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування, яка дозволяє синхронізувати роботу джерел живлення, маніпуляторів та периферійного обладнання для автоматизації і гнучкого налаштування зварювального циклу;

7) розроблені технології однопрохідного гібридного плазمو-дугового зварювання плавким електродом елементів судових конструкцій зі сталей і алюмінієвих сплавів товщиною до 10 мм для використання на судноверфі Guangzhou Shipyard International (м. Гуанчжоу, КНР), за якими виготовлено і передано для подальших випробувань дослідно-промислому партію виробів.

**Ключові слова:** гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом, взаємодія дуг, напружено-деформований стан, зварне з'єднання, плазмотрон, газодинаміка, комплекс обладнання.

## ABSTRACT

### **Babych O.A. Hybrid plasma-arc welding with the coaxial placement of the arc of the fusible electrode.**

Thesis for a Philosophy Doctor degree on speciality 05.03.06 – Welding and related technologies. – The E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

Thesis is devoted to the study of the features of hybrid Plasma-MIG welding of carbon, alloy steels and aluminum alloys, the interaction of the arcs of fusible and non-fusible electrodes with each other, as well as with weldable metals, the study of stress-strain state and mechanical properties of welded joints, creation of a complex of equipment for hybrid Plasma-MIG welding.

**The first section** is devoted to the analysis of the current state of research and trends in the development of technologies and equipment for hybrid plasma-arc fusion welding. In the last decade, the problem of welding steels and aluminum alloys is solved through the use of hybrid technologies, in particular those that combine the advantages of plasma and arc welding methods. To do this, in one welding bath concentrate the energy of a compressed arc with a non-fusible electrode and an arc with a fusible electrode. This technology is called hybrid plasma-arc fusion welding. This process is better known in the world as Plasma-MIG.

The Plasma-MIG welding process was proposed in the 1970s by a group of researchers from the Philips laboratory (A. Christinus, H.J. Liei'kens, W.G. Essers). Further research conducted in the last decade has focused on a thorough study of individual components of the process and its behavior in general (T.S. Tanaka; S.B. Mamat; M. Hertel; M.Y. Mahani). The possibility of using this process for welding alloy steels and aluminum alloys arose due to work carried out including in the Paton welding institute by such researchers as I.V. Krivtsun, V.N. Sydorets, N.O. Makarenko, K.O. Kondrashov and others. In these works it is shown that the basis for further optimization of technological factors of the process is the study of its physical and metallurgical features.



**The second section** is devoted to the description of the development of a research complex for the study of hybrid Plasma-MIG welding and methods of research. It includes:

- description of the creation of a research complex with high-speed video recording of processes occurring in the arc gap and registration of electrical parameters of two welding arcs for physical studies of the behavior of plasma arc and fusible arc, as well as their influence on each other and the formation of welds;
- description of methods of mechanical tests of welded samples;
- description of methods for performing numerical and physical experiments to study the stress-strain state of the samples in hybrid Plasma-MIG and MIG welding;
- description of methods of metallurgical research.

**The third section** presents theoretical prediction and experimental studies of the mutual influence of arcs and their joint influence on the process of hybrid Plasma-MIG welding. For this purpose, a mathematical model of the interaction of a compressed plasma arc and an arc with a fusible electrode in hybrid plasma-arc welding was created.

Comparison of the calculated and experimental volt-ampere characteristics of the plasma discharge in the process of Plasma-MIG welding showed that the calculated results correlate with the experimental ones, and the error in the calculations is not more than 7%.

The influence of the conditions of hybrid Plasma-MIG welding technology on the peculiarities of physical and metallurgical processes, the shape and size of welded joints is studied. The peculiarities of the interaction of the plasma arc and the fusible electrode arc during the joint action on steels and aluminum alloys, as well as the peculiarities of the formation and transfer of metal droplets of the fusible electrode are analyzed. The mutual influence of welding mode parameters and their influence on the size and shape of the weld was studied. This allowed us to establish the relevant general trends for the welding of steels and aluminum alloys and the differences for the welding of these metals.

In the fourth section, based on the previously identified trends in the criterion of the quality of the formation of the seams were selected rational modes of hybrid Plasma-MIG welding. Mechanical tests for static rupture have shown that Plasma-MIG welding provides strength of joints of aluminum alloys at the level of 80-90% of the base metal, in contrast to the strength of 75-80% in pulsed MIG welding.

Reduction of running energy by 10-20% compared to pulsed MIG welding (at equal speeds) allows to reduce by 5-10% the unhardening of aluminum alloys, as well as to reduce the loss of low-melting alloying elements in the weld metal (eg, Mg to ~ 5 %, Mn to 15%, etc.). In comparison with MIG welding, the costs of the electrode wire for the case of Plasma-MIG are reduced by 10-30%.

The results of numerical simulation of the stress-strain state for MIG and Plasma-MIG welding were verified by their physical measurement by speckle interferometry on butt welds of aluminum alloy 1561 ( $\delta = 5$  mm). It was found that the residual strains in the case of Plasma-MIG are reduced by 20-40% compared to pulsed MIG welding, and the residual stresses remain at the level of those for MIG welding, showing a tendency to decrease with increasing size of the joints.

**The fifth section** is devoted to the development and practical application of research and industrial equipment for hybrid Plasma-MIG welding. The development of an industrial model of a hybrid plasma torch according to the coaxial scheme is described. In order to optimize the design parameters of the hybrid plasma torch, computer modeling of gas dynamics processes along the contours of plasma-forming and protective gases was performed.

A set of Plasma-MIG welding equipment with a common control system has been created. On the basis of the capacities of Ltd. “SPC “PLAZER” (Ukraine) serial production of this complex has been established. The equipment was introduced at the Guangdong Welding Institute (Guangzhou, China) and at the HUAHENG Welding Joint Stock Company (Kunshan, Jiangsu Province, China). It was used to make batches of elements of ship structures from aluminum alloys 1561 and 7075 with a thickness of 5-8 mm and steels up to 12 mm thick in one pass without the edges preparation.

**Scientific novelty of the obtained results.**

1) the conditions of cyclic movement of the anode spot on the annular non-fusible electrode of the coaxial plasma torch for hybrid Plasma-MIG welding, the ways of controlling the processes of gas dynamics of the plasma-forming gas are established;

2) it is established that due to the influence of the plasma arc of plus electrode polarity on the arc of the fusible electrode and at the value of the direct current of the arc of the fusible electrode to  $\sim 180$  A there is a large droplet transfer of metal without spraying with frequencies of 20-50 Hz, with increasing current strength of the arc of the fusible electrode there is a tendency to transition to fine-droplet and jet transfer;

3) further development of the study of the conditions for deep penetration of steels and aluminum alloys, as well as reducing the tendency to form internal pores and non-fusion of the fusible metal with the base metal due to the influence of the plasma arc on the weld metal, its compression of the arc of the fusible electrode and the deepening of the latter in the welding bath;

4) it was found that at close values of linear energies in the case of hybrid Plasma-MIG welding of aluminum alloys, the combustion of low-melting elements decreases compared to the MIG process (Mg by 5% and Mn by almost 15%). At the same time the size of a zone of thermal influence decreases by 15-25% and the limit of durability of seams increases by 5-15%;

5) further developed the study of stress-strain state of joints obtained by hybrid welding using plasma arc and arc with a fusible electrode, showed a decrease in residual deformation in welded joints of aluminum alloys, compared with similar parameters for the case of arc MIG welding.

### **Practical meaning.**

1) to study the physical phenomena that occur during the interaction of arcs of fusible and non-fusible electrodes in a hybrid Plasma-MIG process, created an experimental complex with high-speed video recording of processes and registration of electrical parameters of arcs, which allowed to establish the size of electrode droplets the behavior of the arc of the fusible electrode, as well as to detect the effect of plasma-forming gas on the traveling of the anode spot on the annular anode;

2) according to the results of research of physical and metallurgical features of hybrid Plasma-MIG welding of steels type 09G2S, AISI304 and aluminum alloys

AMg6, 1561, 5083, 7075 up to 8 mm thick, the parameters of technological modes are selected under conditions of reaching speeds up to 60 m/h, which for aluminum alloys provide tensile strength ~ 85-95% and relative elongation up to 80% of the base metal in combination with residual deformations of approximately 20-40% less than those for MIG welding;

3) the dependence of the ratio of plasma arc currents and the arc of the fusible electrode in hybrid Plasma-MIG welding on the thermal conductivity of the weld metal, so in the case of welding steels (lower thermal conductivity) MIG arc current may be 10-30% higher than plasma current, and in the case of welding greater thermal conductivity) the MIG arc current can be 10-30% lower than the plasma current;

4) established technological advantages of hybrid Plasma-MIG welding compared to arc and plasma processes, in particular the absence of electrode metal spraying, deep penetration without the formation of the effect of "keyhole", the ability to weld 12 mm thick stainless steel plates in one pass without edges preparation with running energy up to 3500 J / mm;

5) to implement the developed technological approaches of hybrid Plasma-MIG welding of carbon, alloy steels and aluminum alloys created a hybrid plasma torch with a ring non-fusible electrode of direct water cooling with an insert of refractory composite material and a swirler of plasma-forming gas, and also system of protection of a welding bath and a hot site of the formed seam by laminar gas streams;

6) created a set of equipment for hybrid Plasma-MIG fusion welding of carbon, alloy steels and aluminum alloys with a single control system that allows you to synchronize the operation of power supplies, manipulators and peripherals for automation and flexible adjustment of the welding cycle;

7) developed technologies of single-pass hybrid Plasma-MIG welding of elements of ship structures made of steels and aluminum alloys up to 10 mm thick for use at the shipyard Guangzhou Shipyard International (Guangzhou, China), which manufactured and transferred for further testing of research and industrial batch of products.

**Keywords:** hybrid Plasma-MIG welding, interaction of arcs, stress-strain state, welded joint, plasma torch, gas dynamics, complex of equipment.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних.**

1. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Berdnikova O. On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 906, P. 63-71.

2. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Bondarenko O. Electrical Characteristics of the Equipment for the Hybrid Plasma-MIG Welding. *Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON)*. 12-13 October 2017. Riga: IEEE. P. 1-6.

3. Sydorets V., Korzhyk V., Babych O. On the Plasma Temperature in the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 872. P. 61-66.

**Статті у наукових фахових виданнях України.**

4. **Бабич О.А.**, Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Dong С., Han S. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. №7.

5. **Бабич А.А.**, Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Донг Ч., Цай Д., Хан Ш., Лоо З. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке Plasma-MIG. *Colloquium-journal*. 2020. №17(69). С. 33-40..

6. Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Хан Ш., **Бабич А.А.**, Гринюк А.А., Хаскин В.Ю. Создание роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки тонкостенных конструкций. *Автоматическая сварка*. 2017. №5-6. С. 72-82.

7. Коржик В.Н., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Хаскин В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-

дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. №4. С. 32-37.

8. Коржик В.Н., Квасницкий В.В., Хаскин В.Ю., Прохоренко Д.В., Перепичай А.А., Гринюк А.А., **Бабич А.А.** Влияние закрепления в жесткой оснастке на формирование остаточного напряженно-деформированного состояния стыковых соединений пластин из сплава 1561 при MIG, PAW и гибридной PAW-MIG сварке. *American Scientific Journal*. 2017. №17(1). С. 14-29.

9. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *American Scientific Journal*. 2016. №5. С. 36-43.

10. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Sciences of Europe*. 2016. №6(6). С.

11. . Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Изучение порообразования при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *East European Scientific Journal*. 2016. №12(16). С. 104-110.

12. Коржик В.Н., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., **Бабич А.А.** Гибридная плазменно-дуговая сварка тонкостенных панелей из алюминиевого сплава. *Первый независимый научный вестник*. 2016. №12-13. С. 28-36.

13. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-135.

14. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития

плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №11. С. 39-51.

15. Коржик В.М., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И., Коротенко В.В., **Бабич А.А.** Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-134.

### **Патенти України на винахід та корисну модель**

1. Спосіб гібридного плазмо-дугового зварювання з імпульсною подачею газу: пат. 120542 Україна. № 201713005; заявл. 28.12.2017; опубл. 14.07.2019, Бюл. №24. 6 с.

2. Спосіб лазерно-плазмового зварювання: пат. 129895 Україна. №201604845; заявл. 29.04.2016; опубл. 26.11.2018, Бюл. №22. 4 с.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	.....	20
<b>Розділ 1. Аналіз особливостей гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом</b>	.....	28
1.1	Розкриття сучасного стану та об'ємів досліджень виконаних за обраною темою.....	28
1.2	Основні переваги процесу гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом, питання, що потребують вирішення та сучасні напрямки досліджень в цій області .....	37
1.3	Мета роботи та задачі дослідження .....	41
1.4	Висновки до розділу 1 .....	42
<b>Розділ 2. Розробка дослідницького комплексу для вивчення процесів гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом та опис методів досліджень</b>	.....	44
2.1	Розробка дослідницького комплексу обладнання для вивчення процесу гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом.....	44
2.2	Методика досліджень напруженого стану зварних з'єднань, отриманих гібридним плазово-дуговим зварюванням плавким електродом.....	63
2.3	Методика досліджень механічних властивостей зварних з'єднань, отриманих гібридним плазово-дуговим зварюванням плавким електродом .....	64
2.4	Методика досліджень структури зварних з'єднань, отриманих гібридним плазово-дуговим зварюванням плавким електродом ....	65
2.5	Висновки до розділу 2 .....	66



<b>Розділ 3. Прогнозування та експериментальні дослідження взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом .....</b>	<b>68</b>
3.1 Моделювання процесу гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом з урахуванням взаємного впливу стисненої плазової дуги та дуги плавкого електроду.....	68
3.2 Експериментальні дослідження взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом .....	78
3.3 Дослідження особливостей впливу плазової дуги та дуги з плавким електродом одна на одну та на протікання фізичних і металургійних процесів при формуванні зварних з'єднань.....	81
3.3.1. Дослідження взаємного впливу дуг плавкого і неплавкого електродів особливостей їх впливу на формування і перенос краплі електродного металу.....	82
3.3.2. Дослідження впливу параметрів режиму гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом на розміри і форму зварного шва.....	86
3.4 Висновки до розділу 3 .....	93
<b>Розділ 4. Дослідження технології гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом і властивостей одержаних з'єднань .....</b>	<b>95</b>
4.1 Відпрацювання режимів гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом для різних видів металів та сплавів .....	95
4.1.1. Гібридне плазово-дугове зварювання алюмінієвих сплавів .....	95
4.1.2. Гібридне плазово-дугове зварювання низьколегованих та корозійностійких сталей.....	107

4.2	Теоретичний аналіз напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань та розробка підходів до управління залишковими деформаціями при гібридному зварюванні плавким електродом.....	109
4.2.1.	Вибір комп'ютерної моделі для аналізу напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань .....	110
4.2.2.	Проведення математичного моделювання напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням в порівнянні із іншими методами зварювання плавленням.....	112
4.3	Проведення експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням в порівнянні із іншими методами зварювання плавленням.....	123
4.4	Висновки по розділу 4 .....	133
<b>Розділ 5. Розробка та приактичне застосування дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом .....</b>		
5.1	Образно-знакова модель промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом...	136
5.2	Розробка промислового варіанту плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом із підвищеним ресурсом роботи.....	137
5.2.1.	Проектування основних вузлів плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з підвищеним ресурсом роботи.....	139

5.2.2.	Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки у плазмотроні для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.....	142
5.2.3.	Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки у додатковому захисному соплі плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом .....	145
5.3	Рекомендації до джерел живлення для реалізації промислових технологій гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.....	146
5.4	Розробка системи автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом...	150
5.5	Промисловий комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом .....	153
5.6	Приклади практичного застосування розробленого обладнання та технології в промисловості .....	155
5.7	Порівняння економічних показників гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом та дугового зварювання плавким електродом в інертному газі.....	159
5.8	Висновки по розділу 5 .....	161
	<b>Загальні висновки</b> .....	163
	Перелік посилань .....	165
	Додаток А .....	183

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Інтенсивний розвиток наземного, повітряного і морського швидкісного транспорту обумовлює необхідність застосування інноваційних високопродуктивних технологій одержання зварних з'єднань вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів. Це пов'язано із низкою недоліків, характерних для традиційних зварювальних процесів. Так, у разі застосування зварювання з дугою плавкого електроду (MIG зварювання) відбувається значний перегрів електродного металу, що призводить до часткового вигорання легуючих елементів алюмінієвих сплавів і, як наслідок, зниження міцності отриманих з'єднань. Крім того, при MIG зварюванні формуються достатньо широкі шви і мають місце значні залишкові деформації. У разі застосування зварювання з дугою неплавкого електроду (TIG зварювання) знижується продуктивність і також мають місце значні залишкові деформації. Обидва розглянуті процеси вимагають попередньої розробки крайок, що також ускладнює одержання з'єднань.

Одним зі шляхів усунення зазначених недоліків є застосування плазмового зварювання. Проте, цей процес також має власні недоліки. Підвищена інтенсивність енергії та осьова концентрація тиску (ефект «замкової шпарини») часто призводять до виникнення дефектів формування швів (зокрема, подрізів, корневих дефектів, нерівномірного формування верхнього валика підсилення) і наявності внутрішньої пористості. Високі вимоги до підготовки крайок і точності складання під зварювання.

Низкою дослідників, зокрема І.В.Кривцуном, Н. Тон, W. Esser, М. Танака показано, що у разі поєднання плазмового і MIG зварювання в межах спільного гібридного процесу виникає можливість покращення одержуваних результатів за рахунок одночасного локального підігріву зварюваних крайок плазмовою дугою із формуванням шва MIG-процесом. При цьому сформований шов може також підігріватися (додатково оплаватися) плазмовою дугою, що покращує його формування і усуває ризик виникнення подрізів зі збільшенням швидкості

зварювання. Все це робить створення технологій гібридного плазмо-дугового зварювання (Plasma-MIG) актуальною науково-технічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України відповідно до планів фундаментальних і прикладних робіт за такими темами: «Розробка конструкції плазмотрону для гібридного плазмового зварювання плавким електродом з осьюовою подачею електродного дроту» (01.01.2016-31.12.2016); (№ ДР 0118U005294) «Підвищення ресурсу зварних промислових і транспортних конструкцій шляхом розробки та застосування комбінованої технології «швидкісне гібридне плазмове зварювання струмопровідним дротом + електродинамічна обробка» (Цільова програма наукових досліджень НАН України “Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд” (Ресурс-2) затвердженої постановою Президії НАН України від 16.12.2015 № 293 , постановою Президії НАН України від 20.01.2016 № 12 та розпорядженням Президії НАН України від 05.04.2016 № 208); (№ ДР 0117U001186 ) «Дослідження фізико-металургійних процесів при гібридному та комбінованому зварюванні з поєднанням плазми і дуги плавкого електрода та створення програмно-апаратного забезпечення для реалізації технологій зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів та суднобудівних сталей» (1.6.1.1.21.31(21/31) 2017-2021 р.р. Зазначені науково-дослідні роботи, виконавцем та відповідальним виконавцем яких був здобувач, стали основою для підготовки і представлення даної дисертації.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – розширення технологічних можливостей отримання якісних з'єднань з високими механічними властивостями і створення комплексу обладнання для гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом шляхом встановлення закономірностей протікання фізичних та металургійних процесів під час взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів одна з одною, а також зі сталями і алюмінієвими сплавами, що зварюють гібридним плазмо-дуговим способом.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

1. Аналіз технологічних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

2. Створення експериментального комплексу обладнання для вивчення фізичних та металургійних процесів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні із високошвидкісною відео реєстрацією процесів у дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів обох дуг.

3. Прогнозування взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазмово-дугового зварювання з використанням математичного моделювання. Дослідження впливу параметрів режиму зварювання на формування зварних швів зі сталей та алюмінієвих сплавів.

4. Відпрацювання режимів гібридного плазмово-дугового зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів, аналіз їх напружено-деформованого стану та механічних характеристик.

5. Розробка та практичне застосування дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, для отримання зварних швів деталей товщинами до 12 мм за один прохід в тому числі без розробки крайок.

**Об'єкт дослідження** – гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом сталей і алюмінієвих сплавів.

**Предмет дослідження** – фізичні та металургійні процеси при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів.

**Методи дослідження.** Для розв'язання поставлених завдань і отримання основних результатів дисертаційної роботи використовувались такі сучасні методи дослідження, як: високошвидкісна відео реєстрація процесів що відбуваються в дуговому проміжку та реєстрація електричних параметрів дуг плавкого і неплавкого електродів; математичне моделювання, а також аналітичні

і числові методи аналізу фізичних явищ, які супроводжують процеси гібридного плазмово-дугового зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів; візуальні та хронографічні методи контролю; оптичне і механічне вимірювання геометричних параметрів зварених зразків; металографічні дослідження одержаних структур і визначення долі вигорання легуючих елементів за допомогою оптичної мікроскопії, спектрального аналізу; мікродюрOMETричний аналіз; вимірювання напружено-деформованого стану зварених зразків шляхом спекл-інтерферометрії.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В роботі проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на забезпечення потрібних механічних властивостей і хімічного складу з'єднань алюмінієвих сплавів, вуглецевих і легованих сталей одержаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

1) встановлені умови циклічного переміщення анодної плями на кільцевому неплавкому електроді коаксіального плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, шляхи управління процесами газодинаміки плазмоутворюючого газу;

2) встановлено, що за рахунок впливу плазмової дуги оберненої полярності на дугу плавкого електроду та при величині постійного струму дуги плавкого електроду до  $\sim 180$  А спостерігається крупнокрапельне перенесення металу без розбризування з частотами 20-50 Гц, з підвищенням сили струму дуги плавкого електроду спостерігається тенденція переходу до дрібнокрапельного і струменевого переносу;

3) отримало подальший розвиток дослідження умов одержання глибокого проплавлення сталей і алюмінієвих сплавів, а також пониження схильності до утворення внутрішніх пор та несплавлень металу плавкого електроду з основним металом за рахунок впливу плазмової дуги на зварюваний метал, стиснення нею дуги плавкого електроду і заглиблення останньої в зварювальну ванну;

4) встановлено що при близьких значеннях погонних енергій у разі гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів вигорання легкоплавких елементів зменшується порівняно з MIG процесом (Mg на 5%, а Mn майже на 15%). При цьому на 15-25% зменшується розмір зони термічного впливу і на 5-15% підвищується межа міцності швів;

5) отримало подальший розвиток дослідження напружено-деформованого стану з'єднань, отриманих при гібридному зварюванні з використанням плазмової дуги та дуги з плавким електродом, показано зниження залишкових деформацій у зварних з'єднаннях з алюмінієвих сплавів, порівняно із аналогічними параметрами для випадку дугового MIG зварювання.

**Практичне значення.** Встановлені в роботі закономірності гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів, а також вимоги до промислових конструкцій з цих матеріалів, дозволили створити гібридний пальник з інноваційними конструктивними елементами і нову систему керування джерелами живлення. Практична цінність роботи міститься в наступному:

1) для дослідження фізичних явищ, що виникають при взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів в гібридному плазмово-дуговому процесі, створено експериментальний комплекс з високошвидкісною відео реєстрацією процесів та реєстрацією електричних параметрів дуг, який дозволив встановити розмір крапель електродного дроту і частоту їх перенесення, проаналізувати поведінку дуги плавкого електроду, а також виявити вплив плазмоутворюючого газу на блукання анодної плями по кільцевому аноду;

2) за результатами досліджень фізичних і металургійних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей типу 09Г2С, AISI304 і алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм обрано параметри технологічних режимів за умов досягнення швидкості до 60 м/год., які для алюмінієвих сплавів забезпечують міцність ( $\sigma_B$ ) ~ 85-95% і відносне видовження до 80% від показників основного металу у сполученні із



залишковими деформаціями приблизно на 20-40% меншими за такі для MIG зварювання;

3) встановлена залежність співвідношення струмів плазмової дуги і дуги неплавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні від теплопровідності зварюваного металу, так у разі зварювання сталей (менша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% перевищувати струм плазми, а у разі зварювання алюмінієвих сплавів (більша теплопровідність) струм MIG дуги може на 10-30% бути нижчим за струм плазми;

4) встановлені технологічні переваги гібридного плазмово-дугового зварювання порівняно із дуговим та плазмовим процесами, зокрема відсутність розбризкування електродного металу, глибоке проплавлення без утворення ефекту «замкової шпарини», можливість зварювання пластин нержавіючої сталі товщиною 12 мм за один прохід без розробки крайок із погонною енергією до 3500 Дж/мм;

5) для реалізації розроблених технологічних підходів гібридного плазмово-дугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів створено гібридний плазмотрон з кільцевим неплавким електродом прямого водяного охолодження зі вставкою з тугоплавкого композитного матеріалу і завихрювачем плазмоутворюючого газу, а також системою захисту зварювальної ванни і гарячої ділянки сформованого шва ламінарними газовими потоками;

6) створено комплекс обладнання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування, яка дозволяє синхронізувати роботу джерел живлення, маніпуляторів та периферійного обладнання для автоматизації і гнучкого налаштування зварювального циклу;

7) розроблені технології однопрохідного гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом елементів судових конструкцій зі сталей і алюмінієвих сплавів товщиною до 10 мм для використання на судноверфі Guangzhou Shipyard International (м. Гуанчжоу, КНР), за якими виготовлено і передано для подальших випробувань дослідно-промислому партію виробів.

Теоретичні положення і практичні рекомендації з гібридного плазмодугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів можуть бути використаними у навчальному процесі при підготовці студентів і аспірантів технічних спеціальностей.

**Особистий внесок здобувача.** В дисертаційній роботі авторові належать: постановка мети і обґрунтування задач дослідження, вибір наукових підходів до їх вирішення, аналіз особливостей і тенденцій розвитку технологій гібридного плазмодугового зварювання вуглецевих, легованих сталей та алюмінієвих сплавів [7-13, 15], постановка і розв'язання математичних задач плавлення електродного дроту за наявності оточуючої плазмової дуги і визначення впливу дуги плавкого електроду на ВАХ плазмової дуги [1-3], виконання розрахунків для вибору режимів і визначення НДС [4-5], підготовка обладнання і проведення досліджень, порівняння одержаних практичних і розрахункових результатів [4-5, 7-11, 13], конструювання обладнання [6, 12, 14]. Шляхом поєднання розрахункового підходу з експериментальними дослідженнями і літературними даними автором розроблені технологічні прийоми гібридного плазмодугового зварювання вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів, що дозволяють підвищувати механічні характеристики одержуваних з'єднань із одночасним зменшенням їх собівартості за рахунок збереження вмісту легуючих елементів в швах.

**Апробація роботи.** Основні положення і результати дисертації докладалися і обговорювалися на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях і семінарах:

- 70-th International Institute of Welding, June 26-30, 2017, Shanghai, China;
- PolyWeld–2019: збірник тез доповідей міжнародної конференції «Іноваційні технології та інжиніринг у зварюванні», „КПІ імені Ігоря Сікорського”, 2019, Київ, Україна;
- Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON), 12-13 October 2017, Riga, Latvia;

- Презентація по новим матеріалам і технологіям зварювання між країнами СНД і районом високотехнологічних новітніх виробництв у м. Чжаоцін 2017 року, 22-25 травня 2017, м. Чжаоцін, КНР;

- Виставка-конференція з лазерної техніки і технології, 19.09.2017, м. Гуанчжоу, КНР;

- Форум-саміт галузі морських матеріалів, 2 сесія, 18-19.06.2017, м. Далянь, КНР;

- Зустріч-презентація зарубіжних спеціалістів і проектів, 27-29.09.2016, м. Лонгян, КНР;

- Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні промислові матеріали для морських технологій», 23-25.06.2016, м. Ухань, КНР;

- DISTC: DongGuan International Science and Technology Cooperation Week, 11-12.12.2015, DongGuan, China;

- VIII міжнародна конференція молодих учених і спеціалістів «Зварювання і споріднені технології», 20-22 травня 2015 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, Україна.

**Публікації.** По темі дисертації опубліковано 23 роботи, з них 21 публікація (3 у бібліографічній і реферативній базі даних Scopus, 7 у фахових виданнях, що входять до переліку ДАК України), 2 патенти України.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 186 сторінок, включаючи 31 таблицю, 90 рисунків, список літератури з 171 найменування на 18 сторінках і 1 додатку.

## РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ

### 1.1 Розкриття сучасного стану та об'ємів досліджень виконаних за обраною темою

Інтенсивний розвиток швидкісних транспортних засобів наземного, повітряного і морського базування обумовлює необхідність застосування інноваційних високопродуктивних технологій одержання зварних з'єднань вуглецевих, легованих сталей і алюмінієвих сплавів. Це пов'язано із низкою недоліків, характерних для традиційних зварювальних процесів. Так, у разі застосування зварювання з дугою плавкого електроду (MIG зварювання) відбувається значний перегрів електродного металу, що призводить до часткового вигорання легуючих елементів алюмінієвих сплавів і, як наслідок, зниження міцності отриманих з'єднань. Крім того, при MIG зварюванні формуються достатньо широкі шви і мають місце значні залишкові деформації. У разі застосування зварювання з дугою неплавкого електроду (TIG зварювання) знижується продуктивність і також мають місце значні залишкові деформації. Обидва розглянуті процеси вимагають попередньої розробки крайок, що також ускладнює одержання з'єднань.

Одним зі шляхів усунення зазначених недоліків є застосування плазмового зварювання. Проте, цей процес також має власні недоліки. Підвищена інтенсивність енергії та осьова концентрація тиску (ефект «замкової шпарини») можуть призводити до виникнення дефектів формування швів (зокрема, подрізів, кореневих дефектів, нерівномірного формування верхнього валика підсилення) і наявності внутрішньої пористості. Високі вимоги до підготовки крайок і точності складання під зварювання потребують додаткових часових матеріальних ресурсів.

В останні роки інтенсивно розвивається ряд гібридних лазерно-дугових технологій, які об'єднують в одній зварювальній ванні енергію лазерного променя і дуги плавкого електроду [67, 130, 166] або лазерний промінь і стиснену

дугу неплавкого електроду [30, 67, 128], Ці технології зварювання мають багато переваг, проте мають і, як мінімум, один спільний недолік — високу вартість обладнання, що пояснюється наявністю у складі комплексів лазерної техніки. Більш економічно обґрунтованим за початковими капіталовкладеннями і собівартістю виконуваних робіт будуть гібридні технології, що поєднують в одній зварювальній ванні енергію стисненої дуги неплавкого електроду і дугу плавкого електроду. Такий гібридний процес називають гібридним плазмодуговим зварюванням плавким електродом. Цей процес отримав назву Plasma-MIG.

Гібридне плазмодугове зварювання плавким електродом являє собою процес горіння в одну зварювальну ванну двох електричних дуг, дуги плавкого електроду яка горить між кінчиком електроду та деталлю і стисненої дуги неплавкого електроду (плазмової), що горить між неплавким електродом та деталлю. При цьому електродний дріт проходить по центру каналу плазмоутворюючого сопла таким чином, що виявляється оточений іонізованою плазмою дуги неплавкого електроду. Неплавкий електрод може бути виконаний як у вигляді трубчатого електроду і розміщуватися співвісно з електродним дротом, так і у вигляді стрижневого електроду і розміщуватися в стороні від електродного дроту. На даний час коаксіальна схема розташування неплавкого електроду є найбільш розповсюдженою. На рисунку 1.1 приведена принципова схема плазмотрону для гібридного плазмодугового зварювання плавким електродом.

Процес гібридного плазмодугового зварювання вперше був запропонований дослідниками W.G. Esser та A.C. Liei'kens з фірми Philips Corporations. Перший патент на гібридний плазмотрон і спосіб зварювання з одночасним використанням горіння в одну зварювальну ванну стисненої дуги неплавкого електроду і дуги плавкого електроду також належить фірмі Philips Corporations [44]. Схема гібридного плазмотрону, розробленого фірмою Philips Corporatins, наведена на рисунку 1.2.

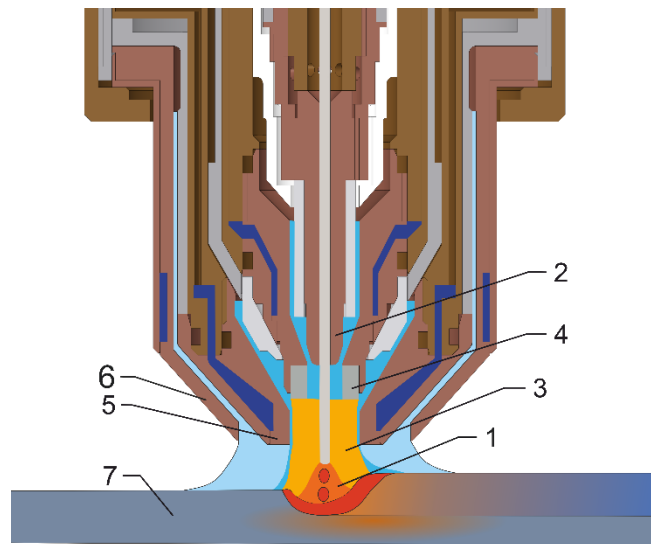


Рисунок 1.1 Принципова схема плазматрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. 1 - дуга плавкого електроду; 2 - мундштук плавкого електроду; 3 - стиснена дуга прямої дії; 4 - трубчатий електрод плазматрону; 5 - плазмотворююче сопло; 6 - захисне сопло; 7 – матеріал, що зварюється

Електродний дріт подавався коаксіально до каналу плазмотворюючого сопла. Зварювання виконувалося на постійному струмі зворотної полярності, в якості аноду виступав вольфрамовий електрод, який розташовувався з боку від осі плазмотворюючого сопла.

У наступні роки зусилля співробітників корпорації Philips були спрямовані на удосконалення конструкції гібридного плазматрону з бічним розташуванням вольфрамового аноду [42, 43, 45].

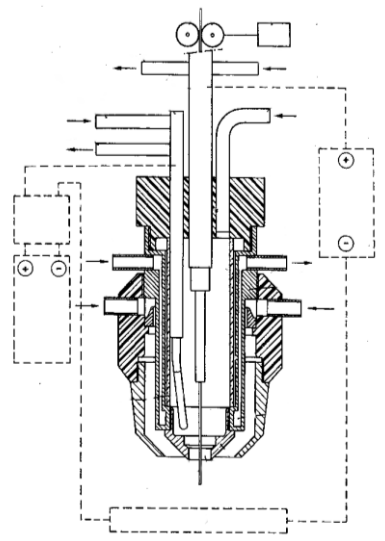
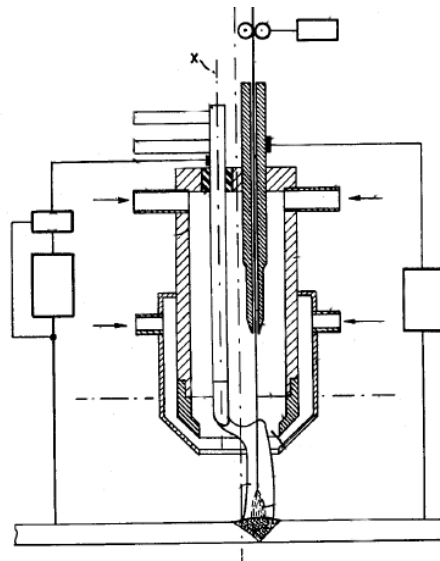


Рисунок 1.2 Плазматрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, розроблений фірмою Philips Corporations [46].

Для забезпечення компактності розмірів гібридного плазмотрону анод плазмової частини і електродний дріт зміщали в різні боки від осі самого плазмотрону (рис. 1.3) [45].

Розглядалося питання використання стисненої дуги не тільки прямої, але і непрямої дії. Пропонувалися різні варіанти збудження стисненої дуги непрямої дії: між вольфрамовим катодом і плазмоутворюючим соплом; між двома поруч розташованими вольфрамовими електродами, коли електродний дріт проходив між двома вольфрамовими електродами [43].

Можливість використання дуги непрямої дії розглядалася не тільки для стисненої дуги, а й для дуги плавкого електроду [42]. Надалі використання як непрямої стисненої дуги неплавкого електроду, так і непрямої дуги плавкого електроду не набуло широкого поширення.

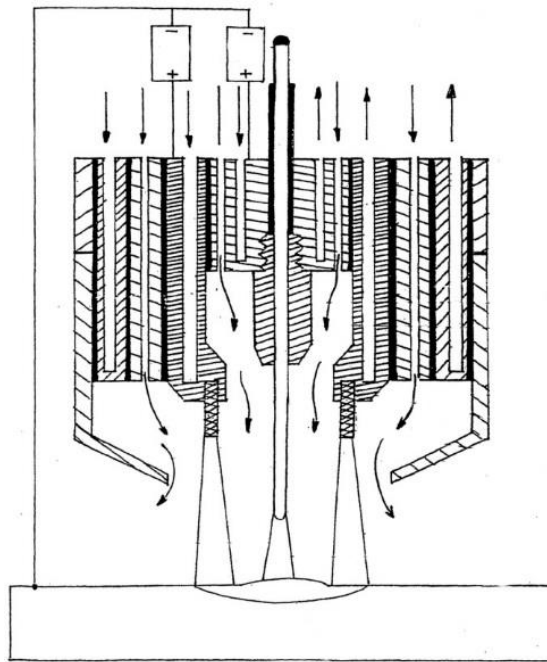


*Рисунок 1.3 Плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом зі зміщенням електродного дроту і вольфрамового аноду в бік від осі плазмотрону [45].*

Опрацьовувалося питання використання двох електродних дротів для процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом [40]. Було запропоновано бічне розміщення вольфрамового аноду і живлення двох плавких електродів, від двох джерел живлення постійного струму, бічне розташування вольфрамового аноду і коаксіальне розташування розщепленого плавкого електроду з його живленням від одного джерела живлення постійного

струму, з розташуванням вольфрамового аноду між дротами розщепленого плавкого електроду, а також використання розщепленого плавкого електроду і мідного пологого аноду, що працює в режимі генерації не стисненої дуги постійного струму оберненої полярності. Такі схеми розташування електродів так само не набули поширення.

Пропонувалися варіанти спільного горіння в загальну ванну дуги плавкого і не плавкого електродів з коаксіальним розташуванням дроту і порожнистим анодом [41, 83]. На рис. 1.4 представлена схема гібридного пальника для дугового зварювання плавким і неплавким електродами. Така схема реалізації гібридного процесу зварювання плавким електродом теж не отримала широкого розповсюдження.



*Рисунок 1.4 Гібридний пальник для зварювання плавким та неплавкий електродами у спільну ванну [83].*

Для реалізації процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом фірмою Philips була розроблена і деякий час випускалася установка PZ4302/10. Установка складається з джерела живлення для плазмово-дугового зварювання постійним струмом, джерела живлення постійного струму для зварювання плавким електродом (обидва джерела живлення розміщені в одному корпусі), механізму подавання електродного дроту і системи керування. Дана

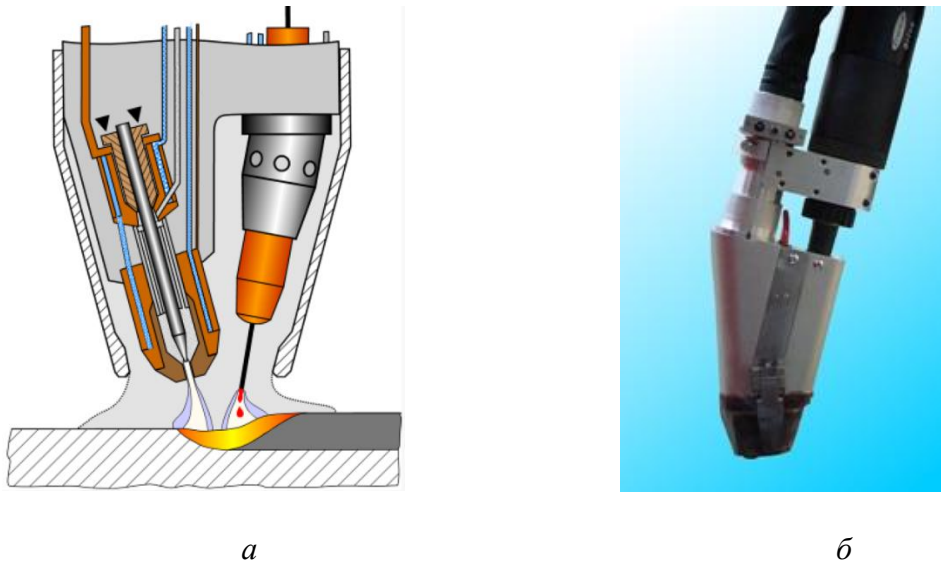


установка забезпечувала максимальний струм 400 А для плазмово-дугового зварювання постійним струмом і 630 А для зварювання плавким електродом.

Поряд з співвісним розташуванням стисненої дуги неплавкого електроду і дуги плавкого електроду розглядалося питання спільного горіння в одну зварювальну ванну стисненої дуги неплавкого і дуги плавкого електродів, розташованих одна за одною [47, 60]. Основним розробником обладнання для плазмово-дугового зварювання плавким електродом з послідовним розташуванням стисненої дуги неплавкого електроду і дуги плавкого електроду є компанія Plasma Laser Technologies Ltd (PLT). Процес плазмово-дугового зварювання плавким електродом розробки цієї компанії отримав запатентовану назву Super-MIG. Пальник плавкого електроду і плазмотрон розташовуються в одному корпусі і мають одне спільне захисне сопло (рис. 1.5). Для зварювання матеріалів, які не мають на своїй поверхні оксидів, температура плавлення яких вища за температуру плавлення основного металу, використовують стиснену дугу неплавкого електроду постійного струму прямої полярності і дугу плавкого електроду постійного струму оберненої полярності. Для запобігання електромагнітної взаємодії між дугами до складу плазмотрону додатково введено "електромагнітний щит". Для зварювання алюмінієвих сплавів розроблено спеціальний пальник, який забезпечує плазмово-дугове зварювання різнополярним асиметричним струмом на струмах до 200 А і зварювання плавким електродом на постійному струмі оберненої полярності до 550 А (рис. 1.6). До складу комплексу обладнання для плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Super-MIG» окрім пальника входить плазмовий модуль та система керування комплексом обладнання. Пізніше права на технологію «Super-MIG» перейшли до компанії WeldObot Ltd.

Процес Super-MIG дозволяє спростити конструкцію пальника з боковою подачею дроту порівняно зі схемою коаксіальної подачі дроту, але при цьому дуга плавкого електроду додатково не обтискається стисненою дугою неплавкого електроду, що викликає більш сильне розбризкування крапель

електродного металу і забезпечує меншу проплавляючу здатність обох зварювальних дуг. Це, скоріше комбінований процес зварювання ніж гібридний.



*Рисунок 1.5 Схема процесу (а) та зварювальний пальник для процесу Super-MIG (б) фірми Plasma Laser Technologies Ltd [76].*



*Рисунок 1.6 Гібридний пальник фірми WeldObot Ltd для плазмово-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвих сплавів [76].*

Подальший розвиток гібридних пальників для плазмово-дугового зварювання плавким електродом пішов по шляху впровадження використання порожнинного аноду [64, 149, 156].

За схемою використання кільцевого порожнинного аноду і коаксіального подавання електродного дроту побудований і гібридний плазмотрон фірми Merkle [61]. Як джерела живлення для генерування плазми і дуги плавкого електроду використовувалися джерела живлення фірми Merkle (ФРН) для зварювання плавким електродом. Особливістю гібридного пальника для плазово-дугового зварювання плавким електродом фірми Merkle є біметалічний збірний анод. Нижня частина аноду виконана з тугоплавкого матеріалу і припаяна до мідної частини. Даний напрямок досліджень не було продовжено і в лінійці обладнання, що випускається серійно фірмою Merkle відсутній пальник для гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом і сам комплекс обладнання для плазово-дугового зварювання плавким електродом.

Дослідження гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом проводяться в багатьох університетах світу, зокрема в Технічному університеті міста Хемніц (Німеччина). Там було розроблено пристрій, що забезпечує включення і спільну роботу джерел живлення для плазово-дугового зварювання неплавким електродом на постійному струмі при оберненій полярності і джерела живлення для дугового зварювання плавким електродом на постійному струмі оберненої полярності [38]. Дослідження такої ж спрямованості проводяться і в SLV Muenchen (Німеччина). Аналогічні дослідження проводяться в Пермському державному університеті (Росія) [169, 170]. В Україні питаннями плазово-дугового зварювання електродом, що плавиться займалися в Приазовському технічному університеті [116, 133-138, 163-165].

Особливості процесу плазово-дугового зварювання плавким електродом також вивчаються в Китаї, Японії і Бразилії [1-5, 7, 8, 11, 14, 16, 20, 25, 26, 31-35, 54, 55, 71-74, 78, 79, 84, 86, 88].

Фірма ТВІ (Німеччина) налагодила випуск за індивідуальним замовленням пальників PLM 500 і PLM 600 з кільцевим анодом для плазово-дугового зварювання плавким електродом, який витримує навантаження до 250 А і 300 А

постійного струму оберненої полярності відповідно окремо для плазмової частини пальника і вузла плавкого електроду (рис. 1.7)

Особливістю конструкції пальника для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом є наявність повністю мідного аноду. Плазмоутворююче сопло і захисне газове сопло в даній конструкції виконані як загальна деталь, що ускладнює конструкцію і збільшує вартість цієї деталі (рис. 1.8). Таким чином, зростає ціна витратних матеріалів для даного пальника.



*Рисунок 1.7 Зварювальний пальник PLM 500 фірми TBI для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом [108].*



*Рисунок 1.8 Плазмоутворююче та захисне газове сопло пальника PLM 500 фірми TBI для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом [108].*

Фірмами AMT Maschinen- und Gerätetechnik GmbH (ФРН) і IMC Soldagem (Бразилія) розроблені установки для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

Установка Hybrid 8000 MR (AMT) забезпечує одночасне генерування постійного струму оберненої полярності окремо для стисної дуги неплавкого електрода і для дуги плавкого електрода. Регулювання величини зварювального струму для кожної з дуг виконується індивідуально в діапазоні від 15 до 400 А. Використання даної установки для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом трохи ускладнено, тому що в системі стисненої дуги не передбачена наявність чергової дуги і осцилятора для її запалювання.

Установка DigiPulus A7PM (IMC Soldagem) забезпечує аналогічний набір зварювальних функцій як і установка фірми AMT.

Незважаючи на значний інтерес наукової спільноти до гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та певну кількість розробленого обладнання для його реалізації технологія все ще не набула широкого розповсюдження у промисловості, а особливості процесу залишаються недостатньо вивченими.

## **1.2 Основні переваги процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, питання, що потребують вирішення та сучасні напрямки досліджень в цій області**

Цей спосіб зварювання позиціонується як один з варіантів усунення недоліків зварювання плавким електродом таких як нестабільність дуги, розбризування електродного металу, мала глибина проплавлення і т.п.

Нестабільність дуги плавкого електроду при дуговому зварюванні плавким електродом (GMAW) в основному викликана неконтрольованою поведінкою катодної плями на поверхні основного металу, яка веде до збурень при переносі електродного металу. Ця проблема при GMAW зварюванні частково вирішується додаванням активних газів у захисне середовище, проте додавання

активних газів не завжди допустиме. Гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом дозволяє стабілізувати дугу без додавання активних газів у зону зварювання.

При гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом дуга плавкого електроду існує в оточенні іонізованої аргонної плазми згенерованої дугою неплавкого електроду, що кардинально змінює умови її горіння порівняно з GMAW процесом.

Аналіз спектру дуги гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом проведений Н. Топ в роботі [74] показав, що в центральній частині дуги нижче торця плавкого електроду домінують спектральні лінії таких елементів як Fe, Mn, Cu, Ca, Ar, інтенсивність цих спектральних ліній відповідає температурам і діапазоні 6000 – 8000 К. Тоді як в периферійній зоні дуги нижче торця плавкого електроду та в зоні вище нього присутні виключно спектральні лінії аргону (Ar), а їх інтенсивність відповідає температурам близько 13200 К.

Також у роботі [74] показано, що щільність електронів  $i$ , відповідно, електропровідність зовнішньої дуги значно вища ніж внутрішньої. Відповідно, можна припустити, що більша частина струму між плавким електродом та основним металом тече через зовнішню дугу, а на внутрішню припадає близько 5% струму, що, в тому числі, підтверджується більшою інтенсивністю свічення зовнішньої дуги в зоні нижче торця плавкого електроду порівняно з верхньою частиною зовнішньої дуги. Вища ж інтенсивність свічення внутрішньої дуги порівняно із зовнішньою, яку відмічають більшість дослідників [16, 34, 35, 55, 168], обумовлена не високою щільністю струму, що протікає через неї, а більш високою інтенсивністю свічення елементів, що входять до складу газової фази в цій зоні.

Ряд попередніх досліджень [31, 34, 35, 74, 86, 168] показує, що наявність іонізованої плазми сприяє розподіленню зони прив'язки дуги плавкого електроду на всій поверхні рідкої краплі і на частині вильоту електроду. Це призводить до зниження щільності струму на поверхні краплі і, відповідно, зменшення її температури [31, 34, 35]. Також розподілення дуги сприяє

послабленню магнітної пінч сили, яка діє на перешийок між краплею та дротом, деякому збільшенню розміру краплі (порівняно з GMAW процесом на тому ж струмі), збільшенню площі її поверхні і, як наслідок, подальшому зменшенню щільності струму і перегріву краплі.

Ще однією значною перевагою гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом порівняно з GMAW процесом, яка витікає з наявності іонізованої аргонної плазми згенерованої дугою неплавкого електроду є можливість незалежного керування під час зварювання кількістю введеної енергії та об'ємом наплавленого металу. Тоді як при GMAW зварюванні тепловкладення жорстко прив'язане до об'єму наплавленого металу (швидкості подавання електродного дроту). Така можливість гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом дозволяє розширити діапазони можливих режимів зварювання і, за певних умов, досягти значного зменшення об'єму наплавленого металу під час зварювання (порівняно з GMAW) зберігши при цьому рівень тепловкладення потрібний для отримання якісного зварного з'єднання. Однак вплив дуг плавкого та неплавкого електродів на форму і розміри зварного шва на сьогодні вивчені недостатньо для надійного прогнозування областей оптимальних співвідношень потужностей дуг плавкого і неплавкого електродів які б забезпечили отримання зварних швів потрібної форми і розмірів. Це питання потребує більш глибокого вивчення.

Для успішного застосування процесу гібридного плазмово-дугового зварювання, крім іншого, потрібно розуміти принципи взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів та їх впливу одна на одну. Це важливо як для формування загальної картини процесів, що відбуваються в дуговому проміжку, так і для розуміння того які вольт-амперні характеристики (ВАХ) повинні мати джерела живлення дуг плавкого та неплавкого електродів. Деякі практичні дослідження з цього приводу проводилися [16, 86], а дієвого теоретичного механізму для вивчення і прогнозування взаємного впливу запропоновано не було.

Однією з причин, що стримує промислове використання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом є відносна складність

конструкцій плазмотронів та їх експлуатації, а також низька стійкість вузлів плазмотрону таких як неплавкий кільцевий електрод та плазмоутворююче сопло. Причинами виходу з ладу цих компонентів найчастіше є оплавлення та електрична ерозія (для кільцевого електроду), а також потрапляння крапель розплавленого електродного металу (для плазмоутворюючого сопла).

В силу особливостей конструкції плазмотрону робочий торець неплавкого електроду має форму кільця з діаметром внутрішнього отвору не менше 3 мм, це значить, що площа робочого торця, як правило, досить значна і досягти щільності струму яка б гарантувала рівномірне розподілення зони прив'язки дуги неплавкого електроду по всій його робочій частині вдається при високих струмах. Використання високих струмів дуги неплавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом часто буває технологічно недоцільно. Через це ряд дослідників [116, 134, 168] відмічають, що регулярно спостерігають явище розщеплення дуги неплавкого електроду, або прив'язки її в одному місці. Це приводить до швидкого локального перегріву і руйнування частини робочого торця електроду. Як показано автором роботи [116] при щільності струму до  $6-7 \text{ А/мм}^2$  дуга неплавкого електроду не охоплюватиме всю площу робочого торця електроду і прив'язуватиметься в одному місці, хаотично рухатиметься, або розщеплятиметься на кілька дуг. Дієвих методів боротьби з руйнуванням робочої частини електроду під дією описаних вище факторів запропоновано не було. Більшість конструкцій гібридних плазмотронів передбачають наявність роз'ємного неплавкого електроду з швидкозмінною, як правило, мідною вставкою. Для підвищення ресурсу роботи гібридного плазмотрону потрібно розв'язати проблему локального руйнування робочої частини електроду.

Руйнування плазмоутворюючого сопла найчастіше відбувається при потраплянні на стінки каналу крапель розплавленого електродного металу, що приводить до різкого локального перегріву і руйнування частини стінки каналу. Вірогідність розбризкування електродного металу при гібридному плазмово-дуговому зварюванні найвища у моменти старту та зупинки процесу, коли



параметри режиму не стабільні. Так відсутність чи занадто малий струм плазмової дуги призведуть до дистабілізації процесу переносу електродного металу і значному розбризкуванню. Зменшити вірогідність пошкодження сопла в цей момент можна максимально скоротивши час стабілізації процесу, що досягається за рахунок чіткої синхронізації роботи джерел живлення, подаючого механізму та інших вузлів зварювального комплексу.

### 1.3 Мета роботи та задачі дослідження

З аналізу літературних даних [1-171] та стану розвитку процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом можна дійти висновку, що:

- гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом це перспективна зварювальна технологія з рядом унікальних переваг, яка може мати широке розповсюдження в промисловості за умови розв’язання ряду питань, що стримують її розвиток;

- не запропоновано дієвого механізму теоретичного дослідження впливу дуг плавкого і неплавкого електродів одна на одну та на процес зварювання;

- недостатньо вивчені особливості формування крапель електродного металу та їх переносу за наявності оточуючого плазмового розряду;

- недостатньо вивчений вплив балансу потужності між дугами плавкого і неплавкого електродів на форму і розміри зварного шва;

- майже немає досліджень напружено-деформованого стану зварних з’єднань отримуваних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом;

- низька стійкість вузлів гібридного плазмотрону стримує розповсюдження технології;

- майже немає сучасних комплексів обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання з високим рівнем автоматизації.

З огляду на сказане вище **мета роботи** полягає у наступному — розширення технологічних можливостей отримання якісних з’єднань з високими

механічними властивостями і створення комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом шляхом встановлення закономірностей протікання фізичних та металургійних процесів під час взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів одна з одною, а також зі сталями і алюмінієвими сплавами, що зварюють гібридним плазмово-дуговим способом.

Звідси витікають задачі, які необхідно вирішити при виконанні цієї роботи:

1. Аналіз технологічних особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

2. Створення експериментального комплексу обладнання для вивчення фізичних та металургійних процесів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні із високошвидкісною відео реєстрацією процесів у дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів обох дуг.

3. Прогнозування взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазмово-дугового зварювання з використанням математичного моделювання. Дослідження впливу параметрів режиму зварювання на формування зварних швів зі сталей та алюмінієвих сплавів.

4. Відпрацювання режимів гібридного плазмово-дугового зварювання легованих сталей і алюмінієвих сплавів, аналіз їх напружено-деформованого стану та механічних характеристик.

5. Розробка та практичне застосування дослідно-промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, для отримання зварних швів деталей товщинами до 12 мм за один прохід в тому числі без розробки крайок.

#### **1.4 Висновки до розділу 1**

1. Гібридне плазмово-дугове зварювання плавким електродом є перспективною зварювальною технологією, що має ряд особливостей та переваг порівняно з іншими способами зварювання.

2. Розглянуто розвиток Plasma-MIG зварювання, основні технологічні схеми плазмотронів, їх переваги та недоліки, визначено найбільш перспективні з них.

3. Показані особливості процесу Plasma-MIG зварювання, його переваги порівняно з MIG зварюванням та слабкі місця. Виявлено дуже обмежений вибір плазмотронів та обладнання для Plasma-MIG зварювання.

4. Проаналізовано об'єми та напрямки досліджень в області Plasma-MIG зварювання, з'ясовано, що ряд питань потребують більш детального вивчення. Таких як взаємодія двох дуг, особливості перенесення електродного металу, напружено-деформований стан отримуваних зварних з'єднань тощо.

5. Визначені найбільш актуальні напрямки подальших досліджень в області Plasma-MIG зварювання.

## **РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА ДОСЛІДНИЦЬКОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ ТА ОПИС МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ**

### **2.1 Розробка дослідницького комплексу обладнання для вивчення процесу гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом**

Дослідження гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом виконувалися за допомогою спеціалізованого дослідницького комплексу обладнання, розробленого для цих задач в ІЄЗ ім. Є.О. Патона.

Вимоги, що пред'являлися до комплексу обладнання для гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання були наступні.

Комплекс, перш за все, повинен забезпечувати можливість реалізації процесу гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом, широкі можливості з регулювання та контролю параметрів процесу зварювання, гнучкість у налаштуванні та зручність у використанні, для чого він має бути укомплектований наступними вузлами:

- дослідним плазмотроном для гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом з осьовою подачею електродного дроту;
- джерелами живлення дуг плавкого та неплавкого електродів;
- плазмовим модулем для підпалу і підтримання чергової дуги, а також для регулювання витрат плазмоутворюючого газу;
- маніпулятором для механізованого переміщення зварювальної головки відносно зварюваних зразків;
- оснасткою для фіксації зварюваних зразків;
- блоком охолодження вузлів дослідного плазмотрону;
- системою керування процесом зварювання та вузлами комплексу;
- датчиками вимірювання зварювального струму та напруги на дузі;

- високошвидкісною відеокамерою для фіксації процесів у дуговому проміжку;
- системою збору та обробки даних зібраних з камери та датчиків.

Розглянемо детальніше вимоги до кожного з вищезгаданих вузлів.

**Дослідний плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом** має відповідати схемі з кільцевим неплавким електродом і осьовим подаванням електродного дроту (рис. 1.1, розділ 1). Повинно бути організоване інтенсивне відведення тепла від кільцевого неплавкого електроду та плазмоутворюючого (обтискаючого) сопла. Струмоведачий наконечник плавкого електроду, кільцевий неплавкий електрод та плазмоутворююче сопло мають бути швидкозмінними. З аналізу літературних даних, досвіду попередніх дослідників [55, 73, 78, 116, 134, 168] та власного досвіду дугового зварювання було зроблено висновок, що для зварювання листів зі сталей та алюмінієвих сплавів товщинами 5-12 мм при використанні гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом у більшості випадків достатньо сумарного струмового навантаження в 500 А. Для рівних можливостей дослідження впливу на процес як плазмової дуги так і дуги плавкого електроду доцільно розділити струмове навантаження порівну, тобто плазмотрон має витримувати струми до 250 А як на плазмовій дузі так і на дузі плавкого електроду з ПВ 100%. Діаметр отвору у неплавкому електроді має бути у межах від 3 мм (мінімальний діаметр, за якого вірогідність дотикання електродного дроту  $\varnothing 1,6$  мм до стінки отвору в неплавкому електроді достатньо мала) до 7 мм (максимальний діаметр отвору згадуваний у літературних джерелах). Діаметр каналу плазмоутворюючого сопла має бути у межах 6-12 мм (відповідно до габаритів робочої площадки неплавкого електроду).

**Джерела живлення дуг плавкого та неплавкого електродів** повинні забезпечувати роботу дуг на струмах не менше 250 А при ПВ 100%, мати гнучкі налаштування режимів роботи та параметрів пуску/зупинки дуги, а також мати можливість зовнішнього керування.

**Плазмовий модуль** має забезпечувати підпал та роботу чергової дуги на струмах до 50 А, конструктивно дозволяти підключення плазмотрону як на прямій так і на оберненій полярності. Також він повинен забезпечувати можливість достатньо точного регулювання та підтримання витрат плазмоутворюючого газу (з точністю не гірше 0,2 л/хв).

**Маніпулятор для механізованого переміщення зварювальної головки** або зварюваних листів має забезпечувати одноосьове переміщення зі зварювальною швидкістю в діапазоні швидкостей 5-100 м/год, мати вхідні канали для зовнішнього керування пуском/зупинкою та швидкістю переміщення.

**Оснастка для фіксації зварюваних зразків** має забезпечувати надійну, жорстку фіксацію листів товщинами від 3 мм до 12 мм і довжиною не менше 400 мм. Також потрібно передбачити можливість встановлення підкладок для формування кореневого валика підсилення шва та організації газового захисту зворотної сторони зварного з'єднання.

**Блок охолодження вузлів дослідного плазмотрону** має бути замкненою системою відведення тепла, здатною працювати на дистильованій воді або сумішах для охолоджуючих систем, які не дають з'явитися осаду на охолоджуваних поверхнях. Потужність теплового розсіювання блоку повинна бути не меншою за 1 кВт.

**Система керування процесом зварювання та вузлами комплексу** повинна керувати усіма вузлами комплексу, давати оператору можливість запрограмувати автоматизований пуск/зупинку вузлів згідно запланованої циклограми зварювання, контролювати виникнення аварійних ситуацій та, у разі їх виникнення, зупиняти процес з метою запобігання пошкодження пальника чи вузлів системи. Також необхідно передбачити можливість ведення архіву у якому фіксувати час та параметри режиму кожного зварювання і можливість експорту цієї інформації на зовнішні носії.

**Датчики вимірювання струму та напруги на дузі** повинні забезпечувати можливість вимірювання в усьому діапазоні режимів роботи плазмотрону з

точністю вимірних значень не гірше  $\pm 5\%$ . Для струмів зварювання діампазон складає 10-300 А, для напруг на зварювальних дугах 0-100 В. Також датчики мають бути забезпечені надійною системою запобігання потрапляння струму з силової частини у вимірювальні контури, тобто мати гальванічну, оптичну чи іншу систему розв'язки силового і вимірювального контурів.

**Швидкісна відеокамера** для фіксації процесів, які відбуваються у дуговому проміжку повинна мати можливість запису з частотою не менше 2000 к/с, інтерфейс для забезпечення зовнішнього пуску і зупинки запису, а також передбачати можливість встановлення на об'єктив затемнюючих та інших світлофільтрів.

**Система збору і обробки даних** має забезпечувати запис даних отриманих від датчиків з частотою дискретизації не менше 20 кГц/канал, імпорт з відеокамери та зберігання у енергонезалежній пам'яті системи відзнятого відеоряду, а також можливість синхронізації усіх отриманих даних в одній часовій шкалі. Дозволяти обробку аналіз та експорт на зовнішні носії інформації зібраних даних.

Згідно приведених вище вимог в ІЕЗ ім. Є.О. Патона був спроектований та зібраний дослідницький комплекс обладнання для вивчення особливостей процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

Даний комплекс виконано за блочно-модульною схемою (рис. 2.1), він включає в себе (рис. 2.2-2.5): плазмотрон для машинного гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з осьовим подаванням дроту (рис. 2.2), модифіковане джерело живлення для зварювання неплавким електродом Tetrix 421 AC/DC (рис. 2.3), модифіковане джерело живлення для зварювання плавким електродом Fronius TPS 450 (рис. 2.4), модернізований плазмовий модуль Fronius FPM 10 (рис. 2.5), блок автономного охолодження, багатопозиційний лабораторний стіл-маніпулятор зі складально-зварювальною оснасткою (рис. 2.6), загальну систему керування що керує усіма системами включаючи стіл-маніпулятор (рис. 2.7).

Частина збору і обробки даних складається з двох датчиків струму: LEM LA 305-S/SP19, двох датчиків напруги LEM LV 25-200, швидкісної відеокамера pco.dimax HS та системи збору і обробки даних побудованої на базі ПК зі встановленим АЦП National Instruments PXIe-6363.

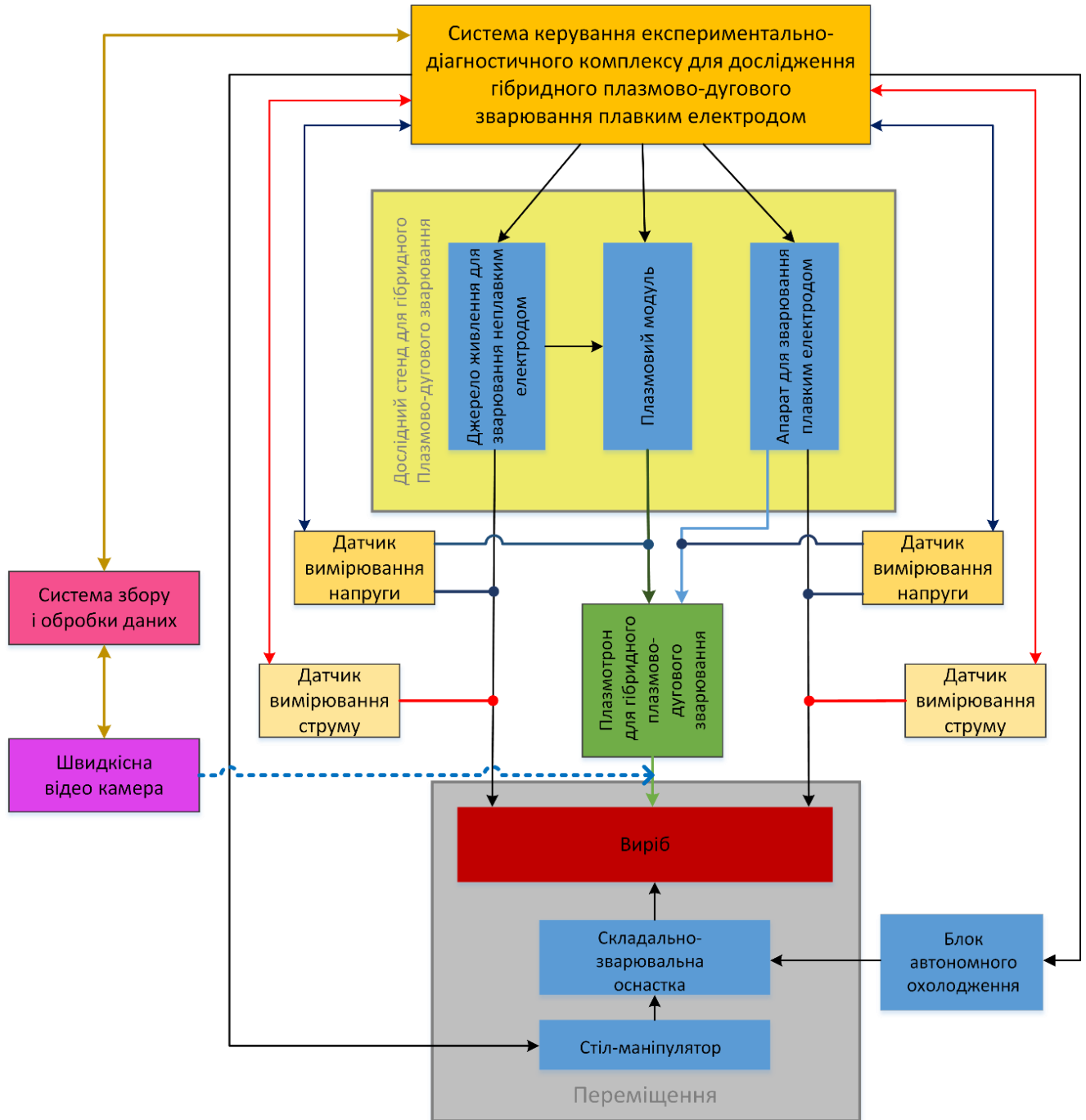


Рисунок 2.1 Блок-схема експериментально-діагностичного комплексу обладнання для дослідження процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом



Основні технічні характеристики дослідницького комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з осьовим подаванням дроту приведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 Основні технічні характеристики комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

№	Назва параметру	Величина
1	Напруга трифазної мережі живлення змінного струму, В	400 ( $\pm 15\%$ )
2	Робочий струм джерела живлення дуги плавкого електроду у процесі гібридного плазмово-дугового зварювання, А	50-250
3	Робоча напруга джерела живлення плавкого електроду в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання	15 - 34
4	Робочий струм джерела живлення дуги неплавкого електроду у процесі гібридного плазмово-дугового зварювання, А	50-250
5	Робоча напруга джерела живлення неплавкого електроду в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання	16 - 34
6	Захисний газ	Ar; Ar + CO <sub>2</sub> ;
7	Плазмоутворюючий газ	Ar
8	Центральний газ	Ar
9	Витрати газів:	
	- захисного, л/хв.	10 - 40
	- плазмоутворюючого, л/хв.	0,1 – 10
	Центрального, л/хв.	4-15
10	Діаметр електродного дроту, мм	1,2; 1,6

### **Дослідний плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом**

Згідно приведених вище вимог було складене технічне завдання на проектування дослідного плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Основні технологічні параметри дослідного плазмотрону приведені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Основні технологічні параметри дослідного плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

Назва параметру	Значення
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для стисненої дуги неплавкого електрода при ПВ 100%, А	250
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для дуги плавкого електрода при ПВ 100%, А	250
Плазмоутворюючий газ	Ar
Витрати плазмоутворюючого газу, л/хв	0,1 - 10,0
Захисний газ	Ar
Витрати захисного газу л/хв.	8 - 40
Струм чергової дуги, А	5 - 50
Фокусуєчий газ	Ar
Витрати фокусуєчого газу, л/хв.	1 - 10
Охолодження неплавкого електрода	Водяне непряме
Охолодження плазмо утворюючого сопла	Водяне пряме
Охолодження захисного сопла	Водяне пряме
Матеріал плазмоутворюючого сопла	Мідь
Діаметр електродного дроту, мм	1,2; 1,6

Виходячи з поставлених у технічному завданні вимог, автор шляхом комп'ютерного моделювання за допомогою прикладної програми «SolidWorks» спроектував 3D модель плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом (рис. 2.2, а). На рисунку 2.2, б приведений осьовий розріз моделі спроектованого плазмотрону.

За кресленнями зробленими по вищезгаданій моделі було виготовлено дослідний екземпляр плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом. Фото виготовленого плазмотрону приведене на рисунку 2.2, в.

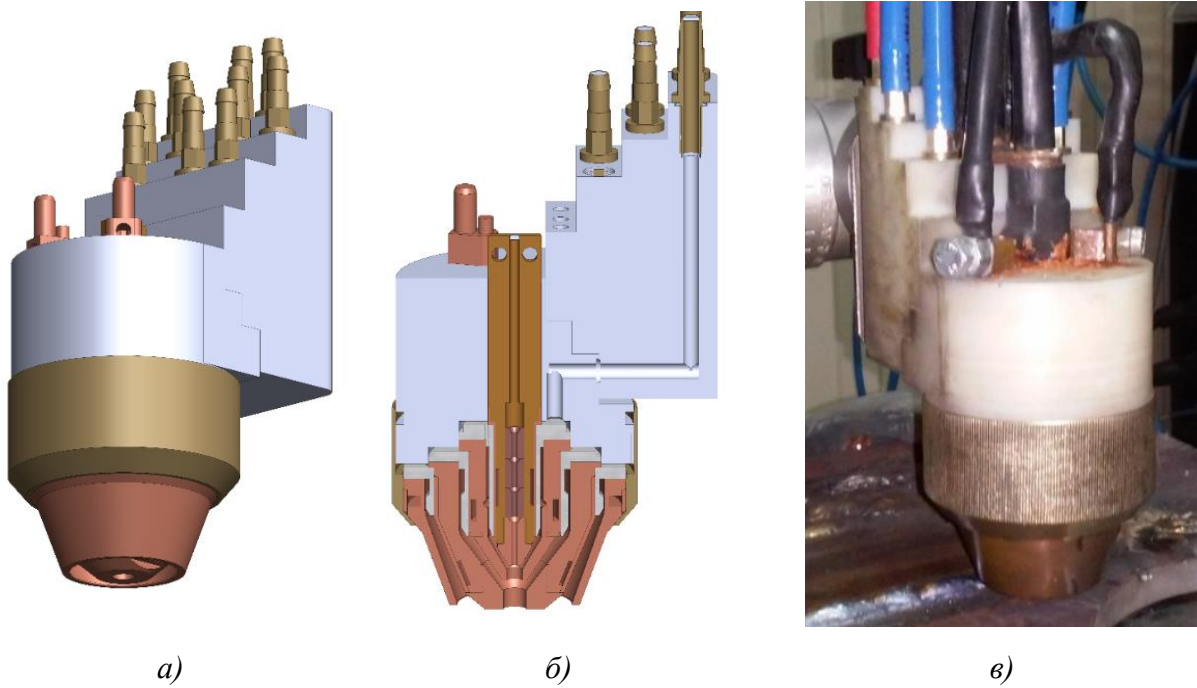


Рисунок 2.2 3Д модель (а) та осьовий розріз 3Д моделі (б) плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

### Джерело живлення дуги неплавкого електроду

У якості джерела живлення дуги неплавкого електроду було використане джерело Tetrix 421 AC/DC фірми EWM (рис. 2.3). Воно призначене для аргонодугового зварювання неплавким електродом на постійному струмі і забезпечує стабільне горіння дуги в діапазоні струмів 10 до 400 А. Система стабілізації зварювального струму працює з точністю  $\pm 1$  А. Для підвищення стійкості неплавкого електроду при підпалі дуги в джерелі живлення передбачене плавне наростання струму від початкового значення, на якому відбувається підпал дуги, до його робочого значення. Час протягом якого відбувається наростання струму регулюється в діапазоні 0,1...7,0 сек. Плавне гасіння дуги та заварювання кратера зварювальної ванни забезпечує система спаду зварювального струму. Час спаду регулюється в діапазоні 0,1...7,0 сек.

Для підключення джерела живлення до системи керування та інтегрування його до складу лабораторно-дослідного комплексу воно було модифіковане спеціалістами ІЕЗ. Було додано інтерфейс який забезпечує

можливість зовнішнього керування пуском/зупинкою зварювання та величиною зварювального струму, а також трансляцію до загальної системи керування вимірних значень зварювального струму та напруги.



Рисунок 2.3 Зварювальне джерело живлення для аргонодугового (плазмового) зварювання Tetrax 421 AC/DC.

Основні технічні характеристики зварювального джерела живлення Tetrax 421 AC/DC для аргонодугового зварювання наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 Основні технічні характеристики зварювального джерела живлення Tetrax 421 AC/DC

Назва параметру	Значення
Напруга живлячої мережі (змінний струм частотою 50 Гц), В	400 ( $\pm 15\%$ )
Потужність, що споживається з мережі, кВА, не більше	24
Сила струму, що споживається з мережі, А, не більше	35
Діапазони регулювання зварювального струму, А	5-400
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	400
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	360
Напруга холостого ходу, В	70
Робоча напруга джерела живлення, В	7-34
Час наростання струму від початкового до робочого значення, с	0-7
Час спадання струму від робочого до струму заварювання кратера, с	0-7
Час дії струми заварювання кратера, с	0-8
Діапазони регулювання початкового струму, % від робочого струму	1-100
Діапазони регулювання струма заварювання кратера, % від робочого струму	1-100
Час продування газом перед зварюванням, с	0-3
Час продування газом після зварюванням, с	0-30

### Джерело живлення дуги плавкого електроду

Живлення дуги плавкого електроду здійснювалося за допомогою інверторного джерела живлення Fronius TPS 450 (рис. 2.4) укомплектованого модулем подавання електродного дроту Fronius VR155. Апарат призначений для зварювання плавким електродом на постійному струмі.

В системі керування джерелом живлення передбачено як режим ручних налаштувань, при якому параметри режиму зварювання (швидкість подавання електродного дроту та напруга на джерелі живлення) вибираються безпосередньо оператором, так і режим синергетичних налаштувань.

Для поліпшення умов відриву крапель в процесі зварювання в апараті передбачено режим модуляції зварювального струму.



*Рисунок 2.4 Апарат Fronius TPS 450 для зварювання плавким електродом з інверторним джерелом живлення*

Для підключення зварювального апарату до системи керування та інтегрування його до складу лабораторно-дослідного комплексу виконали його модифікацію. Було додано інтерфейс який забезпечує можливість зовнішнього керування пуском/зупинкою зварювання, а також трансляцію до

загальної системи керування вимірних значень зварювального струму та напруги.

Характеристики зварювального апарату з джерелом живлення Fronius TPS 450 наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 Основні характеристики зварювального апарату з джерелом живлення Fronius TPS 450

Найменування параметру	Значення
Напруга живлячої мережі (змінний струм частотою 50 Гц), В	400 ( $\pm 15\%$ )
Потужність, що споживається з мережі, кВА, не більше	24
Сила струму, що споживається з мережі, А, не більше	35
Діапазони регулювання зварювального струму, А	50-450
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	450
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	360
Напруга холостого ходу, В	80
Робоча напруга джерела живлення, В	14-34
Швидкість подавання електродного дроту, м/хв.	2-22
Діаметр електродного дроту, мм	1,2; 1,6

### Плазмовий модуль

Для функціонування плазмової частини спеціалізованого комплексу обладнання використовувався плазмовий модуль Fronius FPM 10 (рис. 2.5). Його діапазон регулювання струму чергової дуги становить 5...50 А.

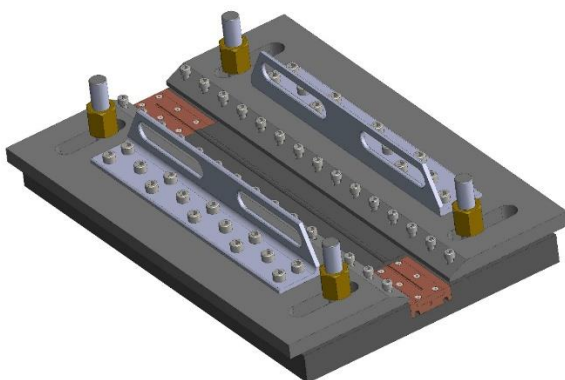


Рисунок 2.5 Плазмовий модуль FRONIUS FPM 10

Плазмовий модуль також забезпечує подачу плазмоутворюючого газу. Робочий діапазон витрат плазмоутворюючого газу становить 0,1...10 л / хв. з точністю 0,1 л / хв., крок регулювання 0,1 л / хв. Витрати плазмоутворюючого газу і сигнал пуск/стоп можуть задаватися як через загальну систему керування так і з панелі самого модуля, залежно від обраного режиму роботи. Конструкція плазмового модуля була допрацьована таким чином, що дозволяє здійснювати підключення до плазмотронів як на прямій так і на оберненій полярності (залежно від потреб способу зварювання).

### **Зварювальний стіл-маніпулятор та складально-зварювальна оснастка**

Для складання листів під зварювання та забезпечення їх жорсткої фіксації під час виконання зварювання було розроблено та виготовлено складально-зварювальну оснастку. 3D модель та зовнішній вигляд даної оснастки приведено на рис. 2.6. Оснастка складається з масивної металевої плити, до якої за допомогою плит-притискачів притискаються зразки, що зварюють. Притискання виконується за допомогою гвинтів M22. Для більш щільного притискання листів під час зварювання тонколистових з'єднань в плитах-притискачах передбачені додаткові притискні гвинти M8, розташовані вздовж крайки плит з кроком у 75 мм один від одного. Для забезпечення жорсткості конструкції на плитах-притискачах передбачені додаткові ребра жорсткості.



а)



б)

*Рисунок 2.6 3D модель (а) та зовнішній вигляд (б) складально-зварювальної оснастки для фіксації зварюваних зразків.*



Для виконання зварювання в діапазоні товщин від 1,0 до 12,0 мм (і більше) за один прохід в конструкції складально-зварювальної оснастки передбачена установка по центру нижньої пластини змінних підкладок з формуючими канавками. Розміри канавок вибрано із розрахунку забезпечення якісного формування кореневої частини зварних з'єднань. Змінні підкладки з формуючими канавками монтуються у мідний водоохолоджуваний тримач. Конструкцією передбачено виконання зварювання як з охолодженням підкладки так і без охолодження.

Для зварювання алюмінієвих сплавів змінні підкладки виконано із немагнітної аустенітної сталі.

Для зварювання сталей змінні підкладки виконано із міді. Для додаткового захисту нижньої частини швів у підкладках передбачено отвори для проходу захисного газу. Підкладки з формуючими канавками також передбачено монтувати у мідний водоохолоджуваний тримач. Розмір канавок у підкладках розроблено для виконання зварювання листів у діапазоні від 1,0 до 12,0 мм (і більше).

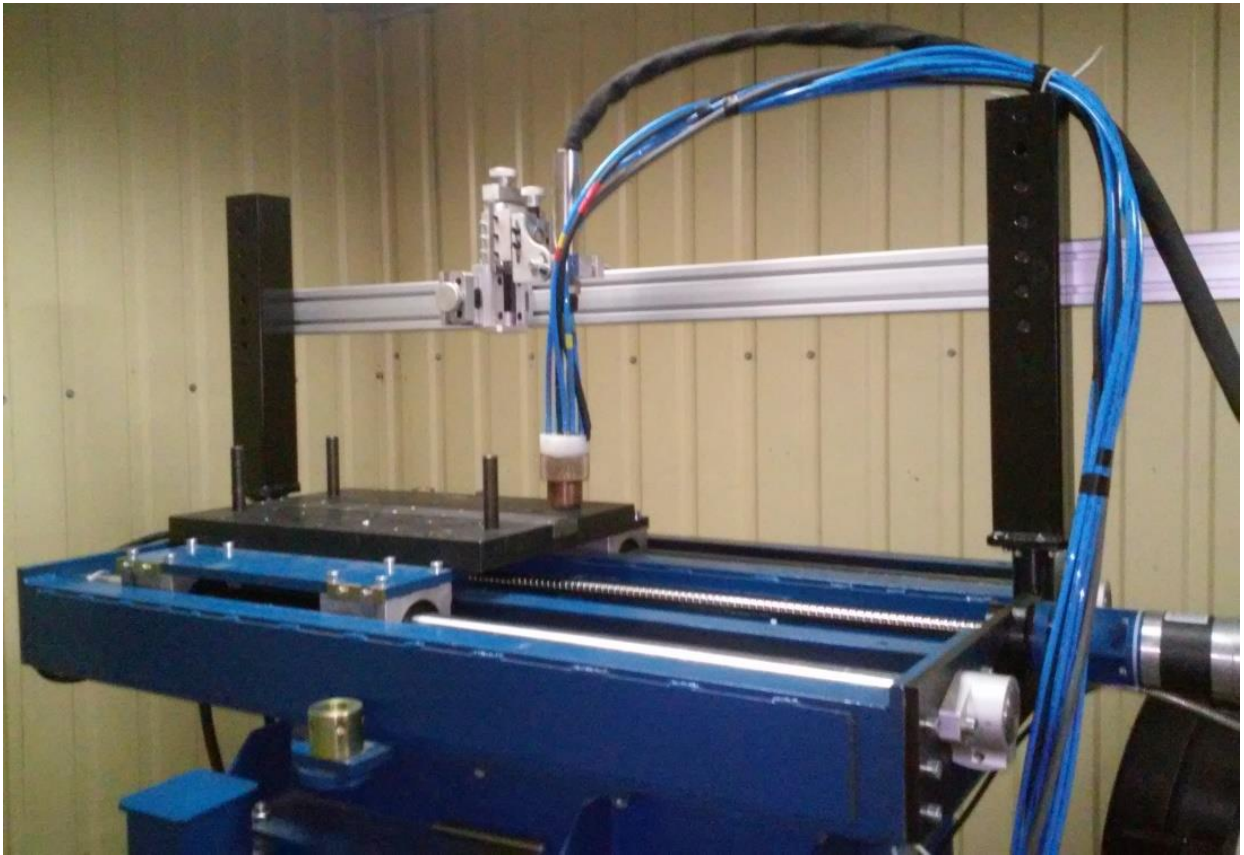
Під час зварювання переміщується складально-зварювальна оснастка. Плазмотрон залишається нерухомими. Така конструкція дозволяє покращити умови спостереження за процесами горіння дуги, в тому числі з відеофіксацією процесу. Відсутність коливань плазмотрону під час руху надає можливість виключити вплив коливань плазмотрону на процеси горіння дуги.

Складально-зварювальна оснастка монтується на рухомій платформі стола-маніпулятора. Конструкція стола-маніпулятора призначена, в першу чергу, для відпрацювання технологій зварювання стикових, напускових та таврових з'єднань у багатьох просторових положеннях (рис. 2.7).

Платформа зі складально-зварювальною оснасткою може переміщуватися зі швидкістю від 5 до 500 см/хв. (від 0,83 до 83 мм/с). Плавність руху забезпечується за рахунок використання сервоприводу. Рух передається за допомогою кульково-гвинтової передачі (КГП). Платформа встановлена на круглих направляючих. Використання сервоприводу забезпечує плавність

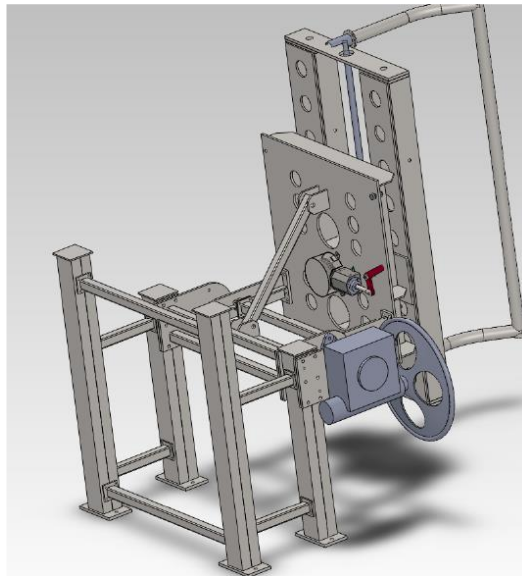


старту та зупинки рухомої платформи, при цьому забезпечується однакова плавність руху у всьому діапазоні швидкостей переміщення платформи.



*Рисунок 2.7 Стіл-маніпулятор з установленою складально-зварювальною оснасткою та закріпленим плазмотроном.*

Балка для кріплення пальників жорстко закріплена на каркасі системи переміщення складально-зварювальної оснастки. Дана конструкція дозволяє без суттєвих зусиль переналагоджувати даний стіл-маніпулятор для виконання зварювання у багатьох просторових положеннях. Так, конструкцією стола-маніпулятора передбачено виконання зварювання у нижньому положенні; вертикальних швів на вертикальній площині у режимах зварювання на підйом та на спуск; горизонтальних швів на вертикальній площині; горизонтальних швів на похилій площині; швів на підйом та на спуск на похилій площині. Конструкція стола-маніпулятора передбачає складання стиків під зварювання у зручному нижньому положенні і подальше переведення у просторове положення, необхідне для зварювання. На рисунку 2.8 приведені зображення 3D моделі стола-маніпулятора.



*Рисунок 2.8 Комп'ютерна 3D модель стола-маніпулятора у положенні для зварювання вертикальних швів на вертикальній площині.*

### **Блок охолодження вузлів дослідного плазмотрону**

Дослідний плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом має чотири незалежні контури охолодження для відведення тепла від вузла плавкого електроду, від неплавкого плазмового електроду, від плазмоутворюючого та захисного сопел. Для прокачування крізь них охолоджуючої рідини використовувалися як вбудовані блоки охолодження джерел живлення (одноконтурний у Fronius TPS 450 та двоконтурний у Tetrix 421 AC/DC), так і окремий блок автономного охолодження (БАО) SELMA БВА-02 для відведення тепла від найбільш теплонавантаженого неплавкого плазмового електроду.

### **Загальна система керування дослідницького комплексу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом**

Система керування побудована на базі промислового PLC контролера та сенсорної НМІ панелі виробництва компанії Kinco. За її допомогою здійснюється керування усіма вузлами комплексу. Серед іншого система керування забезпечує такі можливості:

- аварійне вимкнення однією кнопкою джерел живлення зварювального струму, плазмового модуля та механізму переміщення;

- координація роботи усіх вузлів комплексу для реалізації процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом на постійному струмі як прямої, так і зворотної полярності;
- гнучке програмування і автоматизоване відпрацювання усіх етапів циклу зварювання (як то послідовність і тривалість дій при підпаленні дуги, під час і при завершенні циклу зварювання);
- контроль потоку охолоджуючої рідини, блокування пуску і аварійна зупинка циклу зварювання при відсутності сигналу з датчиків потоку охолоджуючої рідини;
- контроль підпалення плазмової дуги та дуги плавкого електроду при старті процесу та їх горіння під час зварювання, аварійна зупинка процесу у разі відсутності підпалення чи згасання однієї з дуг;
- ведення архіву з фіксацією тривалості зварювання та параметрів режиму з можливістю запису на зовнішні носії інформації (через інтерфейс USB 2.0);
- забезпечення контролю режимів роботи системи збору даних, синхронізація роботи останньої з роботою інших вузлів комплексу.

Зовнішній вигляд шафи керування комплексом для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом наведено на рис. 2.9.



*Рисунок 2.9 Шафа керування комплексом обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.*

Для загальної системи керування дослідницького комплексу було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення яке дозволяє реалізовувати процес гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та керувати цим процесом, інтегрувати в одному робочому середовищі усі вузли та елементи комплексу і керувати ними як в автоматизованому, так і в ручному режимі. На рисунку 2.10 наведено зображення головного вікна програми загальної системи керування експериментально-діагностичного комплексу.

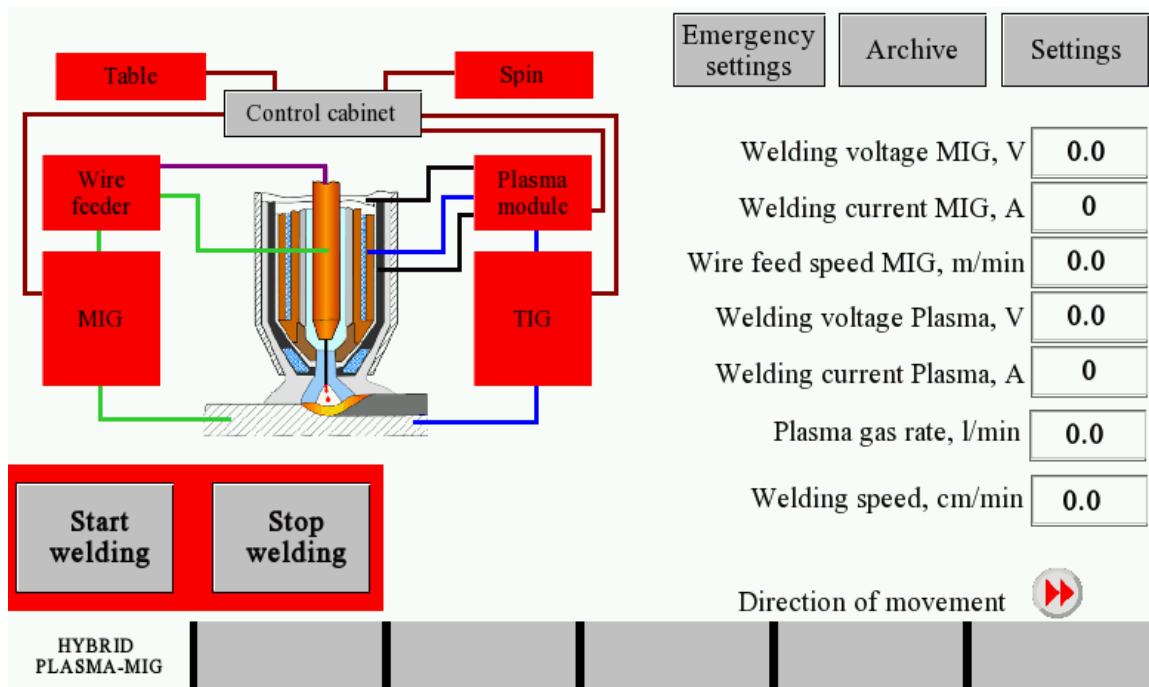


Рисунок 2.10 Зображення головного вікна програми загальної системи керування експериментально-діагностичного комплексу

### Датчики вимірювання струму та напруги

До складу дослідницького комплексу для забезпечення можливості вимірювання струмів зварювання та напруги на дузі з достатньою для подальшого аналізу чутливістю включені наступні датчики.

Два датчики вимірювання струму LEM LA 305-S/SP19, це гальванічно розв'язані перетворювачі струму із замкнутою петлею зворотного зв'язку на ефекті Холла придатні для вимірювання постійного, імпульсного та різнополярного струму. Основні технічні характеристики датчиків вимірювання струму наведені у таблиці 2.5

Таблиця 2.5 Основні технічні характеристики датчика вимірювання струму LEM LA 305-S/SP19

Первинний номінальний струм (r.m.s), А	500
Діапазон вимірювання первинного струму, А	0...±1000
Вторинний номінальний струм (r.m.s), мА	142,8
Напруга живлення, В	±15...24
Точність вимірювання, %	±0,8
Похибка лінійності вимірювань, %	<0,1
Полоса частот пропускання, кГц	DC...100

Окрім датчиків струму до складу комплексу входять два датчики вимірювання напруги LEM LV 25-200, це гальванічно розв'язані перетворювачі напруги із замкнутою петлею зворотного зв'язку на ефекті Холла придатні для вимірювання постійної, імпульсної та різнополярної напруги. Основні технічні характеристики датчиків вимірювання напруги наведені у таблиці 2.6

Таблиця 2.6 Основні технічні характеристики датчика вимірювання напруги LEM LV 25-200

Первинна номінальна напруга (r.m.s), В	200
Діапазон вимірювання первинної напруги, А	0...±300
Первинний номінальний струм (r.m.s), мА	10
Вторинний номінальний струм (r.m.s), мА	25
Напруга живлення, В	±12...15
Точність вимірювання, %	±1
Похибка лінійності вимірювань, %	<0,2
Полоса частот пропускання, кГц	DC...100

### Швидкісна відеокамера

З метою відеофіксації процесів, що відбуваються у дуговому проміжку та на поверхні зварювальної ванни у дослідницькому комплексі використовували швидкісну відеокамеру dimax HS4 компанії pco. (Канада) (рис. 2.11). Дана камера повністю відповідає вимогам, що висувалися до модуля відеофіксації дослідницького комплексу, забезпечує можливість запису відео з частотою кадрів до 46764 к/с, має гнучкі можливості зовнішнього керування та надає можливість установки широкого ряду об'єктивів для фото/відеокамер завдяки

наявності стандартного роз'єму для об'єктивів F-mount. Основні технічні характеристики камери pco.dimax HS4 наведені в таблиці 2.7

Таблиця 2.7 Основні технічні характеристики швидкісної відеокамери pco.dimax HS4

Тип сенсору	CMOS
Максимальна роздільна здатність, пікселів	2000×2000
Розмір пікселя, мкм	10
Максимальна швидкість запису, к/с	2277 (2000×2000 пікс.) 46746 (320×200 пікс.)
Об'єм вбудованої пам'яті, ГБ	36
Інтерфейси обміну даними	USB 3.0, GigE/USB 2.0, HD-SDI, CameraLink
Роз'єм для об'єктивів	F-mount
Вага, кг	7,9



Рисунок 2.11 Зовнішній вигляд швидкісної відеокамери pco.dimax HS4

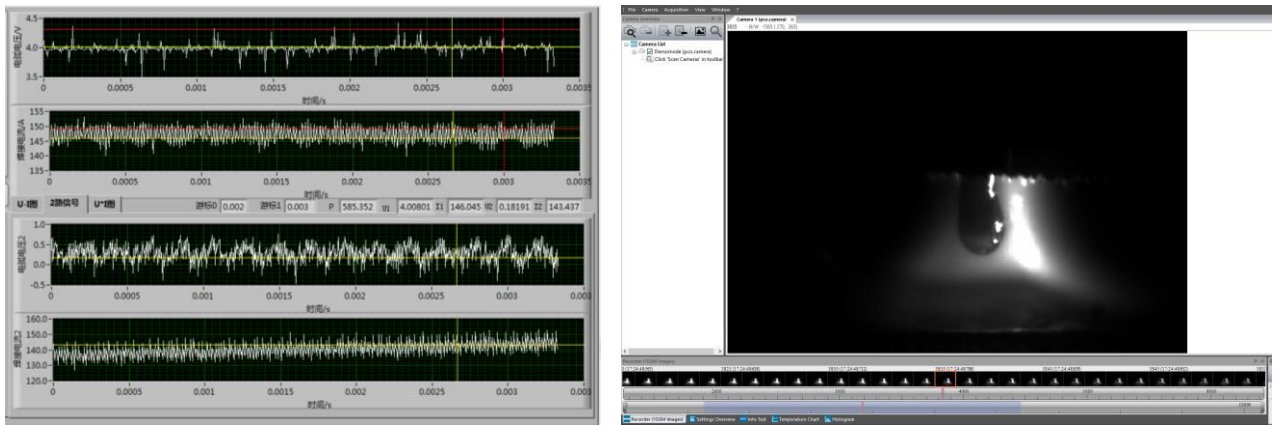
### Система збору і обробки даних

Система збору і обробки даних дослідницького комплексу побудована на базі ПК зі встановленим АЦП National Instruments PXIe-6363 (16 каналів, 2 МГц/канал), що дає можливість збирати і обробляти в одній системі як дані з датчиків струму/напруги (через АЦП), так і відеозапис зі швидкісної камери. Система збору і обробки даних інтегрована з загальною системою керування дослідницького комплексу, що дає можливість автоматизованого керування нею при проведенні дослідних зварювань

Для інтеграції вимірювальних приладів у дослідницький комплекс, обробки і аналізу сигналів з датчиків та камери використовували середовище



MATLAB. Вигляд робочого вікна обробки осцилограм та робочого вікна програми rco.camware для обробки відеоряду відзнятого матеріалу наведено на рисунку 2.12.



а)

б)

Рисунок 2.12 Вигляд робочого вікна для обробки осцилограм струму/напруги (а) в середовищі MATLAB та відеоряду записаного камерою (б) (програма rco.camware)

## 2.2 Методика досліджень напруженого стану зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом

В роботі вивчався характер розподілення залишкових зварювальних напружень при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.

Напружений стан зразків поздовжніх зварних з'єднань вимірювали безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії (рис. 2.13). Використовували метод, заснований на вимірюванні деформацій при пружному розвантаженні об'єму металу в досліджуваних точках на поверхні зразка, викликаних свердленням ненаскрізних отворів діаметром 1,0 мм [27] з використанням спеціалізованого пристрою для свердлення 2 (рис. 2.13). Застосовували оптичну схему інтерферометра 1, в якій досліджувана ділянка зразка 3 освітлювалася випромінюванням лазера під одним і тим же кутом з двох напрямків і таким чином визначали площинні компоненти вектору переміщень, що характеризують деформацію зразка в площині. Величина кута між нормаллю до точки досліджуваної поверхні і напрямком освітлення складала 57°. Вибір

методу обумовлений необхідністю збереження цілісності зразка після реєстрації його початкового напруженого стану.



*Рисунок 2.13 Вимірювання залишкових напружень методом спекл-інтерферометрії на поздовжніх стикових зварних швах, де 1-інтерферометр, 2-пристрій для свердлення, 3-зразок зварного з'єднання.*

Співставлення параметрів напруженого стану і параметрів залишкової формозміни на конкретному зразку зварного з'єднання, виконаного зварюванням MIG та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом (Plasma-MIG), дозволило визначити ефективність кожного з процесів з позицій напружено-деформованого стану. Для реєстрації напруженого стану стикового з'єднання використовували малогабаритний інтерферометр 1, який встановлювали безпосередньо на поверхню досліджуваного зразка (рис. 2.13). До складу приладу входили наступні основні компоненти: спекл-інтерферометр, CCD-камера, світловод, основа приладу з трьома конусними опорами.

### **2.3 Методика досліджень механічних властивостей зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом**

Механічні випробування зварних з'єднань на статичне одновісне розтягнення проводили згідно вимог ДСТУ ISO 4136:2009, ДСТУ ISO 6892-



1:2019, твердість металу зва та основного металу визначали за ДСТУ ISO 9015-1:2008, ДСТУ ISO 9015-2:2009

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.

Для механічних випробувань на статичний розрив використовували розривну машину моделі МР-200.

Визначення межі міцності зварних з'єднань проводили як на зразках з не видаленим «підсиленням», так і на зразках з видаленим «підсиленням» вирізаних зі зварних з'єднань. Зразок вирізали так, щоб вісь шва розташовувалася перпендикулярно напрямку розтягнення.

Показники межі плинності, відносного видовження і звуження металу шва оцінювали на зразках з видаленим «підсиленням» як з кореневої так і з лицьової сторони.

Мікротвердість вимірювали на приладі LECO М-400, а також на оптичному мікроскопі POLIVAR із приставкою DORAMET-1000, при навантаженні 20-200 г.

#### **2.4 Методика досліджень структури зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом**

Металографічний аналіз основного металу і зварних з'єднань зі сталей та алюмінієвих сплавів виконували за допомогою мікроскопів МИМ-8 (збільшення 100...1350 крат) та НЕОРНОТ-23 (збільшення 25...1500 крат). Дослідження проводились на поперечних шліфах, вирізаних зі зварних з'єднань.

Підготовка шліфів складалася з наступних операцій:

— вирізання зразка зі зварного з'єднання з використанням відрізних фрез, абразивних кругів або електроіскрового різання;

- фіксація зразка з використанням запресовування у термореактивних смолах чи заливки епоксидними або акриловими смолами;
- шліфування зразка на шліфувально-полірувальному станку з використанням абразивного паперу та полірувальних емульсій.

Підготовлені шліфи промиваються водою та висушуються потоком гарячого повітря.

Для виявлення макроструктури [115] на сплавах системи Al-Mg-Mn (1561 та 5083) застосовували розчин такого складу: 72 % HCl, 24 % HNO<sub>3</sub>, 4 % HF. Час травлення 5...7 с. Для дослідження мікроструктури шліфи піддавали електролітичному травленню в розчині електроліту такого складу: 970 -930 см<sup>3</sup> CH<sub>3</sub>COOH, 30 – 70 см<sup>3</sup> HClO<sub>4</sub>. Час травлення складав 5...10 с. В усіх випадках після травлення виконували промивку шліфа у воді та сушку гарячим повітрям.

Для виявлення макроструктури вуглецевих сталей застосовували хімічне травлення у водному розчині хлорного заліза. Час травлення складав 5...30 с. Для виявлення мікроструктури – хімічне травлення у 4% розчині азотної кислоти HNO<sub>3</sub> в етиловому спирті C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Час травлення складав 5...30 с. В усіх випадках після травлення виконували промивку шліфа у воді та сушку гарячим повітрям.

Для виявлення макроструктури нержавіючих сталей (зокрема, SUS304) застосовували хімічне травлення у «царській горілці» – три частини HCl + одна частина HNO<sub>3</sub>. Час травлення складав 20...60 с. Для виявлення мікроструктури застосовували електролітичне травлення у водному розчині хромової кислоти при напругах 15-20 В. Час травлення складав 20...60 с. В усіх випадках після травлення виконували промивку шліфа у воді та сушку гарячим повітрям.

## 2.5 Висновки до розділу 2

1. Розроблено та зібрано дослідницький комплекс обладнання з високошвидкісною відео реєстрацією процесів що проходять у дуговому проміжку та реєстрацією електричних параметрів дуг. Комплекс призначений

для вивчення особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом, зокрема фізичних явищ, що виникають при взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів.

2. Спроектовано та виготовлено дослідний плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з коаксіальним розміщенням плавкого та неплавкого електродів.

3. Розроблено та виготовлено загальну систему керування дослідницьким комплексом, яка забезпечує координацію роботи усіх вузлів та елементів комплексу, керування ними, збір і запис значень параметрів режиму зварювання, а також даних з вимірювальних датчиків.

4. Для загальної системи керування розроблено спеціалізоване програмне забезпечення яке дозволяє реалізувати процес гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та керувати цим процесом.

5. Напружено-деформований стан зварених зразків досліджували з використанням методу електронної спекл-інтерферометрії.

### **РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ ДУГ ТА ЇХ СПІЛЬНОГО ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

#### **3.1 Моделювання процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з урахуванням взаємного впливу стисненої плазмової дуги та дуги плавкого електроду**

З попередніх досліджень [1, 2, 86, 165] достеменно відомо, що при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом плазмозна дуга та дуга плавкого електроду мають значний взаємний вплив одна на одну. Також було розроблено ряд як простих [1, 55] так і комплексних [16] моделей для вивчення особливостей цього впливу. Комплексні моделі досить громіздкі і за їх допомогою важко отримати технологічні параметри. прості моделі дають залежність швидкості плавлення електроду від струму плазмової дуги. Хоча експериментальні дослідження [165] показують, що швидкість плавлення електроду майже не залежить від струму плазмової дуги. Натомість, у роботі [74] висловлене припущення, що швидкість плавлення електроду прямо пропорційна температурі плазмового розряду.

З метою більш детального вивчення цього впливу доцільно провести моделювання процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом [71, 72]. У якості основного інструменту дослідження оберемо математичне моделювання. За основу візьмемо модель описану у роботі [69].

Однак процес плазмово-дугового зварювання плавким електродом не може бути прирівняний до звичного зварювання плавким електродом у захисному газі (MIG), адже при плазмово-дуговому зварюванні нагрів вильоту електроду відбувається не лише за рахунок протікання через нього струму, а й, в більшій

мірі, за рахунок випромінювання плазмової дуги, яке підкоряється нелінійним закономірностям.

### Динаміка плавлення електродного дроту

Термічні процеси в плавкому електроді розглянуті з наступними припущеннями: фази нагрівання вильоту електроду та його плавлення розділені і взаємодіють таким чином, що фінальні умови нагрівання є стартовими для плавлення; Виліт плавкого електроду нагрівається плазмовим розрядом неплавкого електроду та протікаючим через плавкий електрод струмом; довжина зони плавлення електроду значно менша за довжину його вильоту; перенос металу крапельний. Ці припущення співпадають з такими у роботі [69], з якої взята основа моделі. Різниця між процесами зварювання плавким електродом (MIG) та гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом (plasma-MIG), з точки зору застосованої моделі, полягає у тому, що виліт плавкого електроду додатково нагрівається плазмовим розрядом кільцевого неплавкого електроду (аноду).

Електродний дріт розташований всередині циліндричного плазмового розряду по його осі. Підвищення його температури відбувається за рахунок конвекційного нагрівання та нагрівання випромінюванням плазми. Будемо вважати, що температура плазми  $T_p=5500\dots15000\text{K}$ . Досить легко показати, що частка енергії передавана плавкому електроду через конвективний теплообмін надзвичайно мала, тому при вирішенні задачі конвективне нагрівання приймати до уваги не будемо. Нагрівання випромінюванням підкоряється закону Стефана-Больцмана і диференціальне рівняння, що описує зміну температури  $T$  з часом  $t$  виглядає так:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{2\beta \cdot \sigma_{SB}}{\gamma \cdot c \cdot r_w} (T_p^4 - T^4) \quad (3.1)$$

Де  $\sigma_{SB}$  — постійна Стефана-Больцмана;  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $c$ ,  $r_w$  — ступінь чорноти, щільність, специфічне тепло і радіус плавкого електроду відповідно.

Вирішення диференційного рівняння в неявно вираженій формі

$$t = \frac{\beta \cdot \sigma_{SB} \cdot T_p^3}{\gamma \cdot c \cdot r_w} \cdot \left[ \tanh^{-1} \left( \frac{T}{T_p} \right) - \tanh^{-1} \left( \frac{T_0}{T_p} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{T}{T_p} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{T_0}{T_p} \right) \right] \quad (3.2)$$

де  $T_0$  — початкова температура електродного дроту.

Використовувати вирішення (3.2) для майбутнього дослідження важко. Спростимо його враховуючи той факт, що максимальна температура електродного дроту — температура плавлення  $T_m$  значно нижча за температуру плазми  $T_p$ . У цьому випадку ми отримуємо просте вирішення

$$T = T_0 + \frac{2\beta \cdot \sigma_{SB} \cdot T_p^4}{\gamma \cdot c \cdot r_w} \cdot t \quad (3.3)$$

Різниця між рішеннями при температурі плавлення  $T_m$  складає 0,2% для сталі та 0,02% для алюмінію (діаметр зварювального дроту 1,2 мм). Це дає нам основу для майбутнього використання формули (3.3).

Енергія накоплена в металі вильоту електроду від протікання зварювального струму і радіації плазми сумується з енергією що виділяється в приелектродній області (прианодній) і витрачається на нагрівання та плавлення металу. З цієї умови може бути отримана швидкість плавлення електроду.

$$v_m = \frac{\pi r_w^2 U_a i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \cdot \beta \cdot \sigma_{SB} \cdot T_p^4 \cdot r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 [c(T_m - T) + \lambda]} \quad (3.4)$$

Тут  $i$  — зварювальний струм (МІГ-процес);  $l$  — довжина дуги;  $U_a$  — анодне падіння напруги;  $l_w$  та  $l_p$  — відстань від токоведучого накінецьника МІГ частини до деталі та від плазмоутворюючого сопла до деталі відповідно (див. рис. 3.1);  $\rho$  та  $\lambda$  — питомий опір та прихована теплота плавлення електродного металу.

Очевидно динаміка плавлення електроду буде описана диференціальним рівнянням суть якого полягає в тому, що швидкість зміни довжини електроду еквівалентна різниці швидкостей плавлення та подавання електродного дроту  $v$

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_a i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^4 q} - v \quad (3.5)$$

Де  $q = c(T_m - T_0) + \lambda$ .

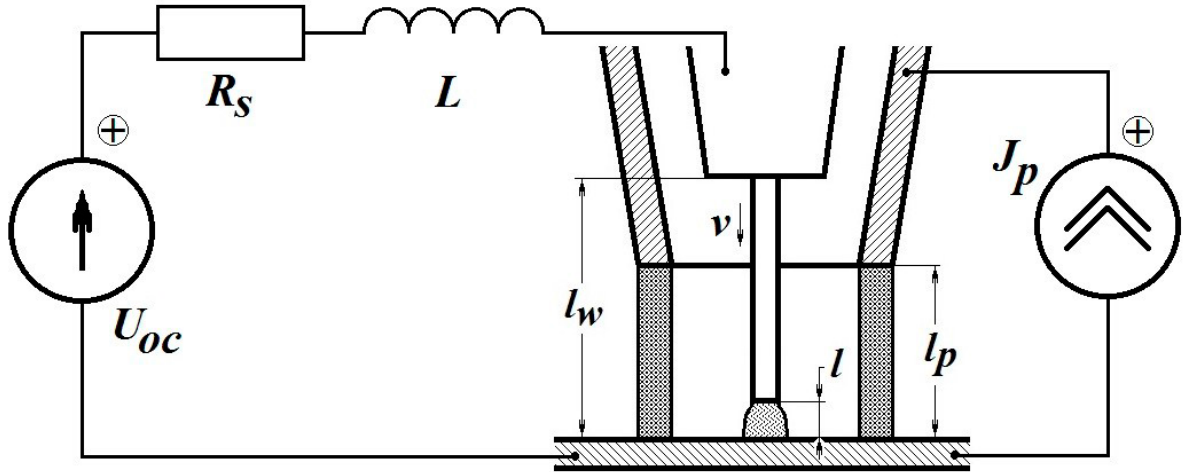


Рисунок 3.1 Ланцюг електричного живлення процесу гібридного плазмово-дугового зварювання [72].

### Динаміка ланцюга з дугою плавкого електроду

Згідно закону Кірхгофа,  $U_{0c}$  напруга на джерелі живлення розімкнутого ланцюга еквівалентна сумі падінь напруги на елементах ланцюга (див. рис. 3.1) — активному опорі  $R_s$  та індуктивності  $L$  джерела живлення і з'єднувальних кабелів, активному опорі вильоту електроду і падіння напруги на дузі  $E \cdot l$  ( $E$  — напруженість електричного поля в дузі)

$$U_{0c} = R_s i + L \frac{di}{dt} + \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i + El + U_a + U_k \quad (3.6)$$

Де  $U_k$  — катодне падіння напруги.

Рівняння (3.5) і (3.6) складають систему нелінійних диференціальних рівнянь (3.7) що описує динаміку системи «джерело живлення – дуга за плавким електродом» в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = \frac{\pi r_w^2 U_a i + \rho i^2 (l_w - l) + 2\pi^2 \beta \sigma_{SB} T_p^4 r_w^3 (l_p - l)}{\pi^2 \gamma r_w^2 q} - v \\ \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left( U_{0c} - R_s i - \rho \frac{l_w - l}{\pi r_w^2} i - El - U_a - U_k \right) \end{cases} \quad (3.7)$$

**Статичний стан системи «джерело живлення — дуга з плавким електродом» та умови його існування**

Щоб знайти фіксовані точки що визначають статичний стан нам потрібно прирівняти праву частину системи (3.7) до нуля. Рівняння для визначення статичного значення довжини дуги  $l_0$  і статичного значення струму зварювання  $i_0$  мають форму:

$$\begin{aligned}
& \rho(r_w E^2 + 2\rho\beta\sigma_{SB}T_p^4) \cdot l_0^3 - \\
& - \rho[r_w E(2\bar{U}_{OC} + U_a + El_w) + 4\beta\sigma_{SB}T_p^4(\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \\
& + \rho(2\beta\sigma_{SB}T_p^4 l_p - \gamma q v r_w)] \cdot l_0^2 + \\
& + [r_w U_a E + 2\rho(2\beta\sigma_{SB}T_p^4 l_p - \gamma q v r_w)] \cdot (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \\
& + \rho r_w \bar{U}_{OC}(\bar{U}_{OC} + U_a + 2El_w) + \\
& + 2\beta\sigma_{SB}T_p^4(\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 \cdot l_0 - \\
& - [r_w U_a \bar{U}_{OC}(\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) + \rho r_w \bar{U}_{OC}^2 l_w + \\
& + (2\beta\sigma_{SB}T_p^4 - \gamma q v r_w)(\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)] = 0
\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
& \rho R_S i_0^3 - \rho(\bar{U}_{OC} + U_a - El_w) i_0^2 + \\
& + \pi r_w [2\beta\sigma_{SB}T_p^4[\pi r_w^2 R_S + \rho(l_w - l)] + r_w(U_a E + \gamma \rho q v)] i_0 - \\
& - \pi^2 r_w^3 [2\beta\sigma_{SB}T_p^4(\bar{U}_{OC} - El_p) + \gamma q v E r_w] = 0
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Де  $\bar{U}_{OC} = U_{OC} - U_a - U_k$ .

Для дослідження властивостей цих рішень використаємо умови існування, суть яких полягає в наступному: процес плазово-дугового зварювання фізично може бути реалізований коли статичний струм зварювання більший нуля

$$i_0 > 0 \tag{3.10}$$

і статичне значення довжини дуги знаходиться у діапазоні від нуля (електрод дотикається до деталі) до дистанції токоведучий мундштук—деталь (відгорання електроду)

$$0 < l_0 < l_w \tag{3.11}$$



Використовуючи умову існування (3.11) можливо отримати діапазон варіацій напруги відкритого ланцюга джерела живлення плавкого електроду (див. рис. 3.2 (a))

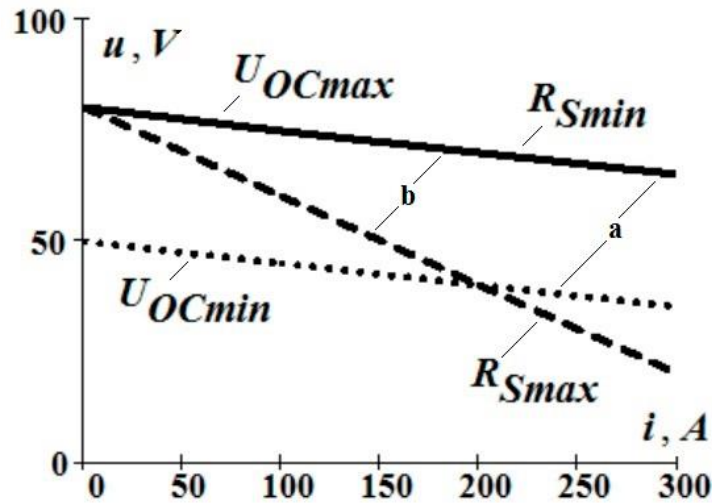


Рисунок 3.2 Діапазон зміни зовнішньої характеристики джерела живлення дуги плавкого електроду при зміні напруги у відкритому ланцюзі (a) і при зміні його внутрішнього опору (b) [72]

$$U_{OCmin} < U_{OC} < U_{OCmax} \quad (3.12)$$

У цьому випадку мінімальне значення напруги відкритого ланцюга є рішенням квадратного рівняння

$$\begin{aligned} \rho r_w l_w \bar{U}_{OCmin}^2 + r_w U_a (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w) \bar{U}_{OCmin} + \\ + (2\beta \sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) (\pi r_w^2 R_S + \rho l_w)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Аналогічно можна отримати діапазон варіацій внутрішнього опору джерела живлення дуги плавкого електроду (див. рис. 3.2 (b))

$$R_{Smax} > R_S > R_{Smin} \quad (3.14)$$

В цьому випадку максимальне значення внутрішнього опору є рішенням квадратного рівняння

$$\begin{aligned} (2\beta \sigma_{SB} T_p^4 l_p - \gamma q v r_w) (\pi r_w^2 R_{Smax} + \rho l_w)^2 + \\ + r_w U_a \bar{U}_{OC} (\pi r_w^2 R_{Smax} + \rho l_w) + \rho r_w l_w \bar{U}_{OC}^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Застосування умов існування (3.10) та (3.11) також дозволяє визначити максимальну температуру плазми, за якої буде протікати процес плазово-дугового зварювання

$$T_{p\max} = \left( \frac{\gamma q v E r_w}{2\beta \sigma_{SB} (El_p - U_{OC} + U_a + U_k)} \right)^{1/4} \quad (3.16)$$

Було підраховано, що температура (зокрема: для сталі  $T_{p\max}=7960\text{K}$ ; для алюмінію  $T_{p\max}=7340\text{K}$ , параметри процесу для яких проводилися розрахунки наведені у [118]). Ці результати добре узгоджуються з експериментальними даними наведеними у [74].

### **Зміна електричних характеристик плазового розряду під впливом захисного газу і при взаємодії з MIG процесом.**

Існує взаємний вплив газових розрядів один на одного в процесі гібридного плазово-дугового зварювання. Вплив плазового розряду на плавлення електродного дроту розглянуто вище. Плавлення електродного дроту в свою чергу впливає на електричні параметри плазового розряду [16, 89], зокрема, його вольт-амперну характеристику (VAC).

Ці особливості повинні бути враховані при розробці джерел живлення для процесу плазово-дугового зварювання [126]. Однак залежність електричних характеристик від технологічних параметрів процесу плазово-дугового зварювання не може бути отримана з використанням існуючих резистивних моделей [54, 59].

Було допрацьовано модель дуги, розроблену в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона [57] для описання процесу гібридного плазово-дугового зварювання.

#### ***Узагальнена модель зварювальної дуги***

Давайте коротко нагадаємо основні твердження, на яких ґрунтується узагальнена модель динамічної дуги.

Плазмова дуга феноменологічно розглядається як тепловий макрооб'єкт, що є частиною електричного ланцюга зі статичною ВАС  $U_{Plasma}(i)$ . Закон енергозбереження для цього теплового макрооб'єкта виглядає так

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_{\theta} \quad (3.17)$$

Цей закон пов'язує три енергетичні параметри стовпа плазмової дуги: внутрішню енергію  $Q$ , вхідну потужність  $P$  і вихідну потужність  $P_{\theta}$ . Внутрішня енергія стовпа дуги  $Q$  - сума всіх видів енергії плазми: енергії теплового руху, енергії іонізації, енергії коливань і обертання молекул, тощо і залежить від радіусу дуги і довжини, тобто від її об'єму. Під терміном вхідної потужності  $P$  мається на увазі потужність, поглинута стовпом плазмової дуги з електричного ланцюга, а під терміном вихідної потужності  $P_{\theta}$  мається на увазі потужність, що повертається стовпом плазмової дуги до навколишнього простору за допомогою різних типів теплопровідності та випромінювання.

Застосування терміну дії струму дуги [57] та введення змінної  $i_{\theta}$  дають можливість виразити енергетичні параметри дуги через електричні параметри

$$P = \frac{U_{Plasma}(i_0)}{i_0} \cdot i_{Plasma}^2; P_{\theta} = U_{Plasma}(i_{\theta}) \cdot i_{\theta}; \quad (3.18)$$

$$Q = 2\theta \cdot \int_0^{i_{\theta}} U_{Plasma}(i_{\theta}^*) \cdot di_{\theta}^*, \quad (3.19)$$

(де  $i_{Plasma}$  — струм плазмової дуги,  $\theta$  — постійна часу дуги) і отримати диференціальне рівняння моделі

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} + i_{\theta}^2 = i_{Plasma}^2 \quad (3.20)$$

Рівняння (3.20) доповнене формулою зв'язку між струмом плазмової дуги та напругою на ній

$$u = \frac{U_{Plasma}(i_{\theta})}{i_{\theta}} \cdot i_{Plasma} \quad (3.21)$$

яка входить до рівнянь, відповідно до законів Кірхгофа.

***Узагальнена модель плазмової дуги з обдуванням захисним газом.***

У випадку обдування плазмової дуги захисним газом окрім природної конвекції з'являється додатковий механізм поглинання енергії. Цей механізм базується на примусовій конвекції, сила якої  $P_v$  може бути прийнята до уваги безпосередньо

$$P_v = \frac{W_A}{V_A} Q = \frac{v_{ShG}}{l_p} Q \quad (3.22)$$

Де  $V_A$  це об'єм зайнятий стовпом плазмової дуги,  $W_A$  це об'єм плазми затрачений в одиницю часу: для поздовжнього дуття  $W_A = \pi \cdot (r_{Aout}^2 - r_{Ain}^2) \cdot v_{ShG}$ ,  $v_{ShG}$  — швидкість обдування захисним газом,  $r_{Ain}$  та  $r_{Aout}$  — внутрішній та зовнішній радіуси стовпа плазмової дуги (див. рис. 3.1).

Рівняння енергетичного балансу в цьому випадку виглядає так

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta - P_v \quad (3.23)$$

Рівняння моделі плазмової дуги з поздовжнім обдувом захисним газом

$$\theta \frac{di_\theta^2}{dt} = i_{Plasma}^2 - i_\theta^2 \left[ 1 + \frac{v_{ShG}}{l_p} \cdot \frac{Q}{P_\theta} \right] \quad (3.24)$$

Рівняння (3.24) можливо використовувати для опису динаміки плазмової дуги там, де поздовжній обдув захисним газом є невід'ємною частиною процесу.

***Узагальнена модель плазмової дуги з електродним дротом, що рухається в середині неї***

Коли електродний дріт рухається в середині циліндричного плазмового розряду, з'являється ще один механізм відтягування енергії пов'язаний з нагріванням дроту. Він має бути взятий до уваги в законі збереження енергії

$$\frac{dQ}{dt} = P - P_\theta - P_v - P_w \quad (3.25)$$

Нагрівання електродного дроту радіацією плазмового розряду було визначене нами вище.

$$P_w = 2\pi r_w \beta \sigma_{SB} T_p^4 (l_p - l_0) \quad (3.26)$$

Рівняння узагальненої моделі динаміки плазмової дуги для процесу плазмово-дугового зварювання

$$\theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} = i_{plasma}^2 - i_{\theta}^2 \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right) \quad (3.27)$$

Для отримання вольт-амперної характеристики (ВАХ) плазмового розряду в плазмово-дуговому зварюванні ми використовуємо процедуру описану в статті [58]. В результаті отримуємо параметричну залежність напруги плазмового розряду від його струму.

$$U_{PlasmaMIG}(i_{\theta}) = U(i_{\theta}) \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2} \quad (3.28)$$

$$I_{PlasmaMIG}(i_{\theta}) = i_{\theta} \left( 1 + \frac{P_v + P_w}{P_{\theta}} \right)^{1/2} \quad (3.29)$$

Значення  $i_{\theta}$  відіграють роль параметру у цих формулах.

Графік, представлений на рис. 3.3, демонструє тенденцію до збільшення напруги на плазмовому розряді зі збільшенням швидкості захисного газу і його температури. Це добре узгоджується з явищами, які спостерігалися в ході технологічних експериментів при порівнянні процесів плазмового і гібридного плазмово-дугового зварювання [118, 12, 37].

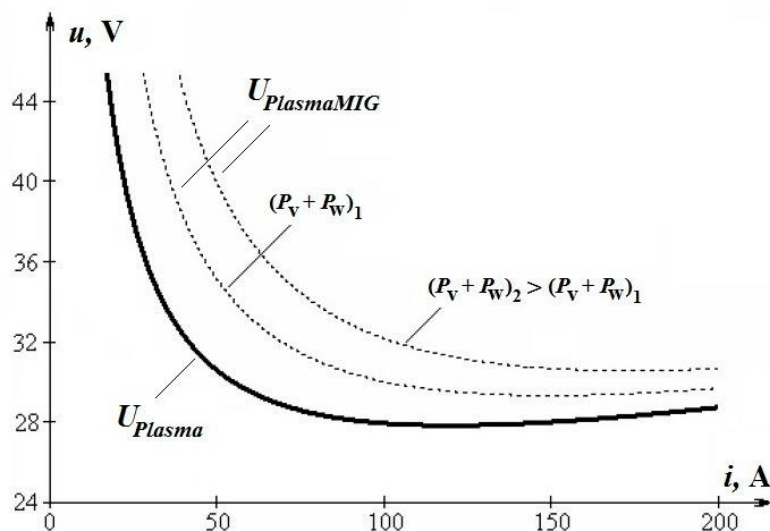


Рисунок 3.3 Вольт-амперна характеристика плазмового розряду в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання (пунктирні лінії) у порівнянні з вольт-амперною характеристикою плазмового розряду без MIG процесу (суцільна лінія) алюмінієвих сплавів (5083) [72].

### 3.2 Експериментальні дослідження взаємного впливу дуг та їх спільного впливу на процес гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

З метою перевірки достовірності та точності наведених вище результатів математичного моделювання було проведено ряд експериментальних досліджень.

Зокрема для перевірки спрогнозованої вольт-амперної характеристики плазмового розряду для гібридного плазмово-дугового зварювання проведено ряд дослідних зварювань (проплавів суцільної пластини) на режимах аналогічних тим, що були використані при прогнозуванні. Параметри режимів дослідних зварювань наведені в таблиці 3.1

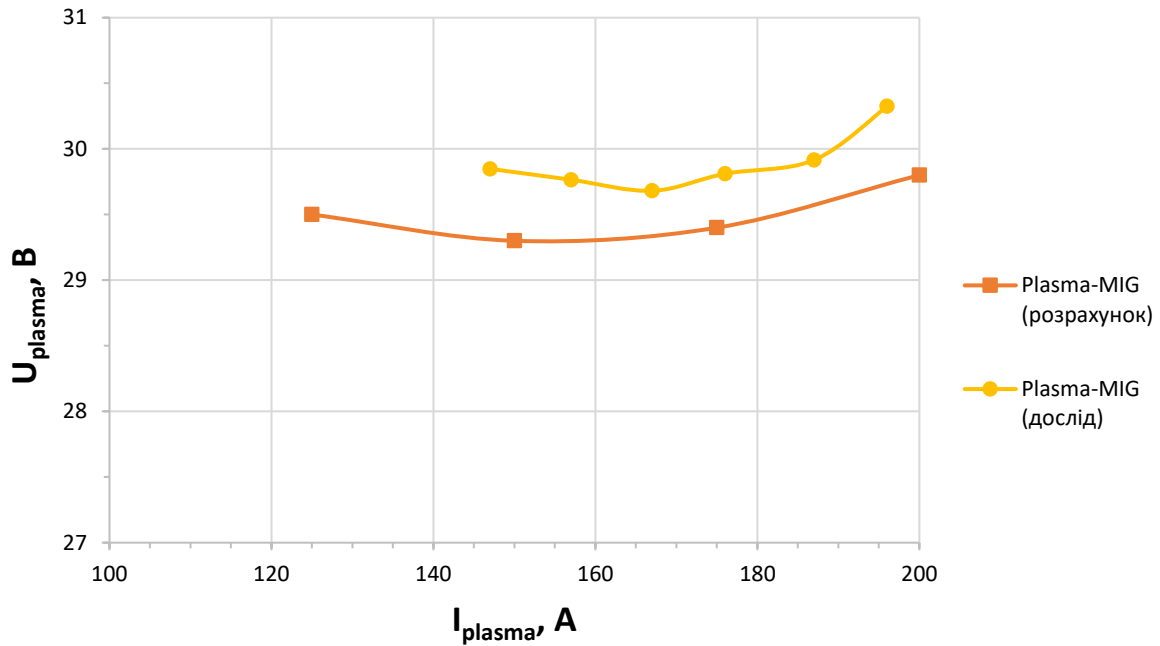
Таблиця 3.1 Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 5083 дротом ER5356 Ø1,6 мм для перевірки вольт-амперної характеристики плазмового розряду

№	$I_{\text{plasma}}$ , А	$U_{\text{plasma}}$ , В	$V_{\text{др.}}$ , м/хв	$I_{\text{MIG}}$ , А	$U_{\text{MIG}}$ , В
1	147	29,85	8	188	21,5
2	157	29,77	8	184	21,5
3	167	29,68	8	181	21,6
4	176	29,81	8	177	21,5
5	187	29,92	8	175	21,6
6	196	30,32	8	172	21,6

За результатами проведених дослідів побудована ВАХ плазмового розряду та проведене порівняння з розрахунковими даними (рис. 3.4). З наведеного графіку видно, що розрахункові результати корелюють з дослідними, а похибка при розрахунках складає не більше 7%.

Далі перевірили вплив витрати (швидкості обдування) захисного газу на напругу на плазмовому розряді при гібридному плазмово-дуговому зварюванні. З цією метою провели 5 дослідних зварювань (проплавів суцільної пластини) на

режимах наведених у таблиці 3.2. та розрахунки напруги на плазмовому розряді для режимів 1 і 2 наведених у таблиці 3.2.



*Рисунок 3.4 Порівняння розрахункової та дослідної вольт-амперних характеристик плазмового розряду в процесі гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 5083.*

Таблиця 3.2 Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 5083 дротом ER5356 Ø1,6 мм для перевірки впливу витрати захисного газу на напругу плазмового розряду

№	$Q_{\text{з.г.}}, \text{л/хв}$	$I_{\text{plasma}}, \text{A}$	$U_{\text{plasma}}, \text{B}$	$V_{\text{др.}}, \text{м/хв}$	$I_{\text{MIG}}, \text{A}$	$U_{\text{MIG}}, \text{B}$
1	25	176	29,81	8	177	21,6
2	30	176	30,51	8	176	21,7
3	35	176	31,11	8	178	21,6
4	40	176	31,60	8	177	21,5
5	60	176	32,61	8	176	21,6

З діаграми (рис. 3.5) побудованої за результатами проведених розрахунків та дослідів видно, що прогнози впливу витрати захисного газу на напругу плазмового розряду підтверджуються розрахунками і похибка розрахунків складає не більше 7%.

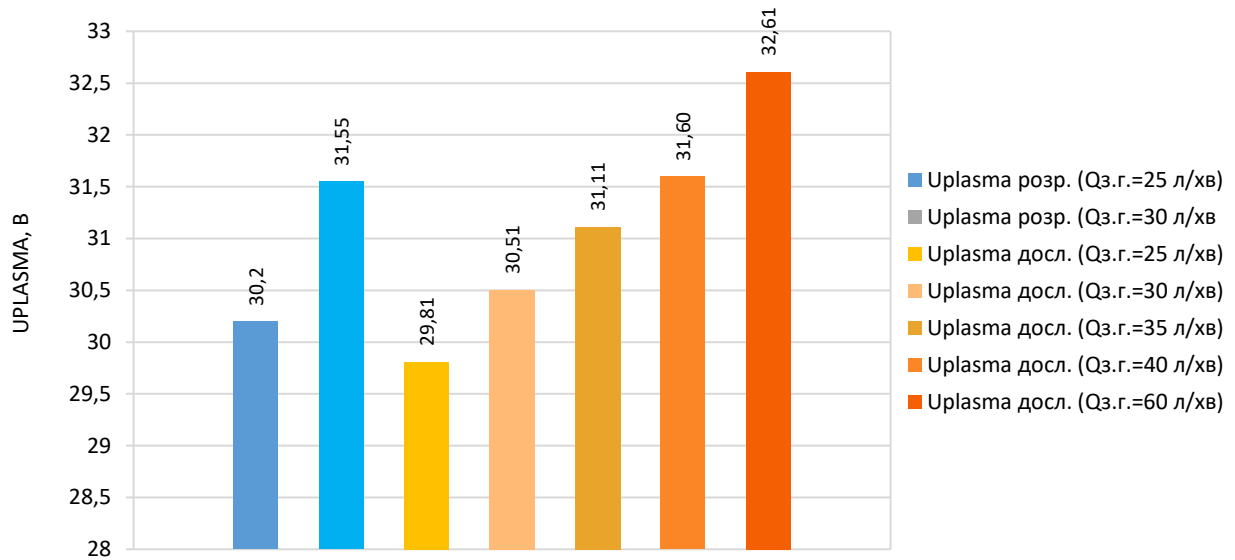


Рисунок 3.5 Вплив витрати захисного газу на напругу на плазмовій дузі при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.

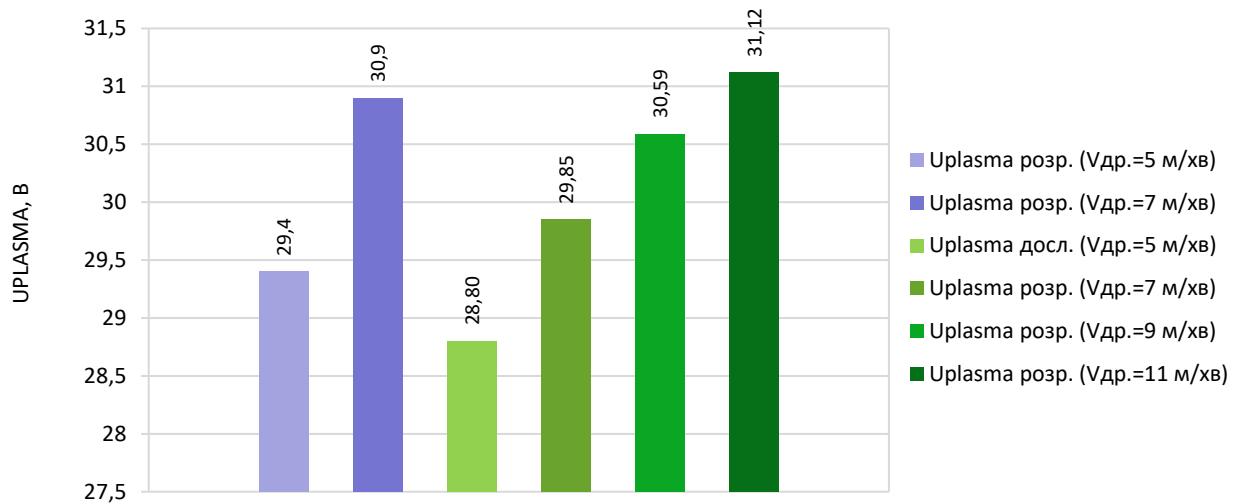
Для перевірки впливу швидкості подавання електродного дроту на напругу на плазмовому розряді при гібридному плазмово-дуговому зварюванні провели 4 дослідних зварювання (проплавів суцільної пластини) на режимах наведених у таблиці 3.3, та розрахунки напруги на плазмовому розряді для режимів 1 і 2 наведених у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 5083 дротом ER5356 Ø1,6 мм для перевірки впливу швидкості подавання електродного дроту на напругу плазмового розряду

№	Q <sub>з.г.</sub> , л/хв	I <sub>plasma</sub> , А	U <sub>plasma</sub> , В	V <sub>др.</sub> , м/хв	I <sub>МІГ</sub> , А	U <sub>МІГ</sub> , В
1	25	176	28,80	5	125	23,3
2	25	176	29,85	7	149	21,8
3	25	176	30,59	9	181	20,6
4	25	176	31,12	11	224	19,7

Результати проведених розрахунків та дослідів приведено на діаграмі (рис. 3.6), з якої видно, що прогнози впливу витрати електродного дроту на напругу плазмового розряду підтверджуються розрахунками і похибка розрахунків складає не більше 6,5%.





*Рисунок 3.6 Вплив швидкості подавання електродного дроту на напругу плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.*

Як видно з наведених вище даних напруга плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні прямопропорційно залежить як від швидкості обдування плазмового розряду захисним газом, так і від швидкості подавання електродного дроту. Якщо перше спостереження не має великого практичного значення, адже витрата захисного газу підбирається з огляду на достатній рівень захисту зони зварювання від впливу атмосферних газів і, зазвичай, варіюється у досить вузьких межах, то друге необхідно враховувати при виборі чи проектуванні джерел живлення плазмової дуги для гібридного плазмово-дугового зварювання, а також при складанні синергетичних залежностей для майбутніх автоматизованих комплексів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

### **3.3 Дослідження особливостей впливу плазмової дуги та дуги з плавким електродом одна на одну та на протікання фізичних і металургійних процесів при формуванні зварних з'єднань**

Для дослідження процесів, які відбуваються у дуговому проміжку при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом, а також впливу дуг неплавкого і плавкого електродів на особливості формування і перенесення

крапель розплаву плавкого електроду використовували експериментально-діагностичний комплекс описаний у розділі 2 цієї роботи.

### **3.3.1. Дослідження взаємного впливу дуг плавкого і неплавкого електродів особливостей їх впливу на формування і перенос краплі електродного металу**

За допомогою швидкісної відеозйомки з одночасною фіксацією напруг на дугах неплавкого і плавкого електродів та їх струмів досліджували процес формування краплі електродного металу. Для проведення досліджень проводили наплавки на суцільну пластину товщиною 10 мм з алюмінієвого сплаву 1561. Зварювання проводили з використанням електродного дроту марки ER5356 Ø1,6 мм. Швидкість подавання дроту варіювали в діапазоні 5-12 м/хв (струм дуги плавкого електроду 125-245 А), струм дуги неплавкого електроду варіювали в діапазоні 100-200 А. Швидкість відеофіксації складала 3000 к/с.

Аналіз результатів проведеного дослідження показав, що поведінка дуги плавкого електроду за наявності оточуючої плазмової дуги відрізняється від такої для класичного MIG/MAG зварювання. Зокрема на отриманих зображеннях видно, що дуга розподіляється по всій поверхні краплі і сягає кінцевої частини вильоту електроду. Цей факт підтверджує припущення і спостереження ряду дослідників [11, 31, 34, 35, 37, 74], що за наявності навколо іонізованої плазми анодна пляма дуги плавкого електроду значно стабільніша і більша за площею, а щільність струму, відповідно, менша. З високою долею вірогідності це призводить до зниження рівня тепловкладення в приповерхневі шари рідкого металу краплі і їх температури, що може сприяти зниженню рівня вигорання певних легуючих елементів, таких як Mg, Mn та інші. Підвищення рівня переходу легуючих елементів у метал шва буде показано пізніше у цьому розділі.

Результати дослідження також показують, що за наявності оточуючого плазмового розряду характер переносу крапель електродного металу змінюється порівняно з традиційним дуговим зварюванням плавким електродом. Зокрема межа переходу від крупнокрапельного переносу електродного металу до крапельного зміщується в сторону зростання струму на 25-30%. Так, для

гібридного плазмово-дугового зварювання у досліджуваному випадку на струмах дуги плавкого електроду до 180 А спостерігається крупнокрапельне перенесення з частотою перенесення крапель не більше 40 Гц (див. рис. 3.7).

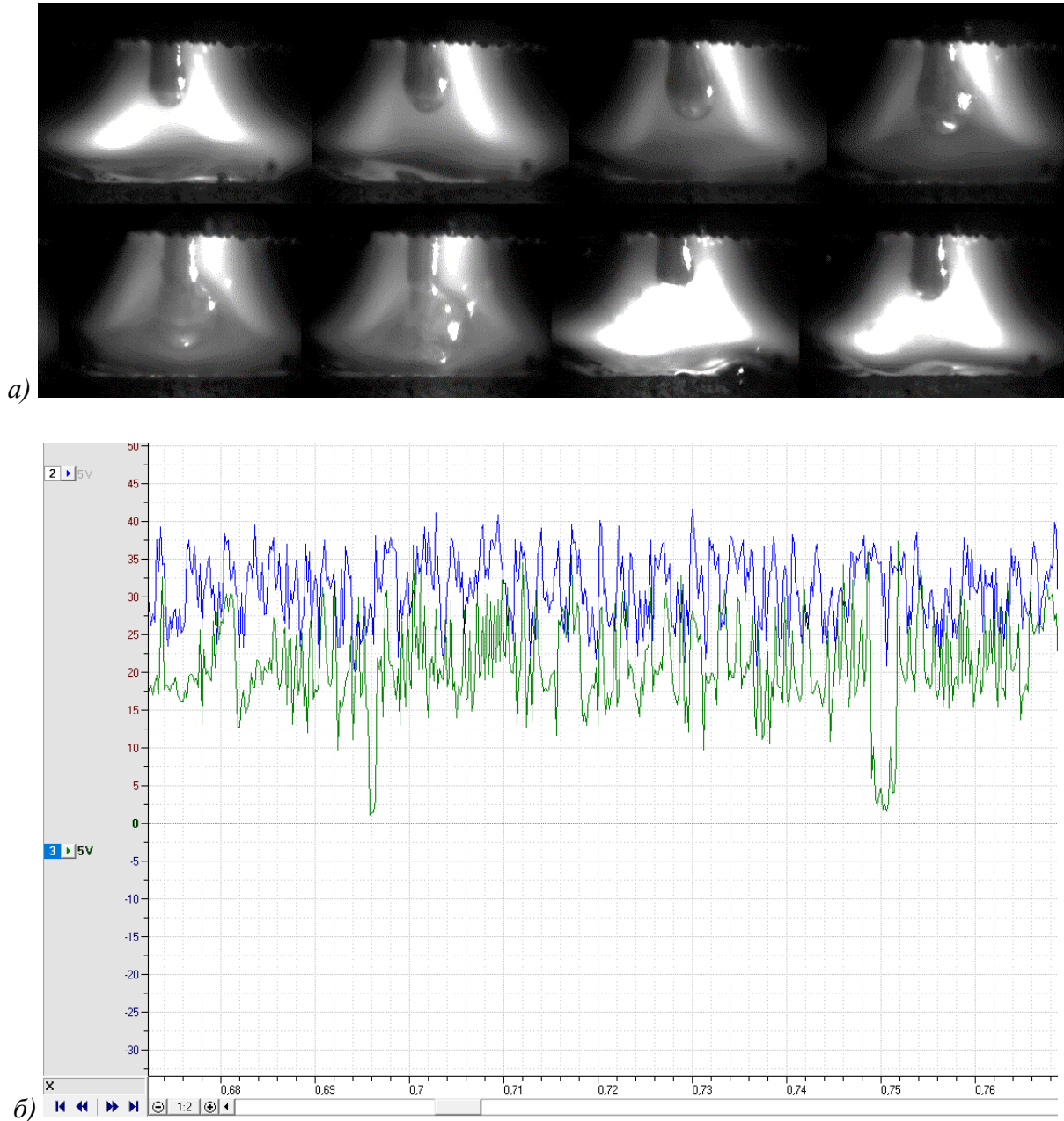


Рисунок 3.7 Візуалізація етапів перенесення краплі металу під час гібридного плазмово-дугового зварювання сплаву 1561 при швидкості 7,4 м/хв. подачі дроту  $\varnothing 1,6$  мм ( $I_{MIG}=145$  А,  $I_{PL}=120$  А, час перенесення краплі – близько 50 мс) (а); Осцилограми напруг на дугах неплавкого (канал 2, синій) та плавкого (канал 3, зелений) електродів для цього режиму зварювання (б)

При збільшенні струму дуги плавкого електроду від 180 А і більше розмір крапель зменшується, а частота їх перенесення зростає (рис. 3.8), сягаючи 120-130 Гц при струмі близько 230А. Подальше підвищення струму плавкого електроду веде до переходу від крапельного до струменевого переносу електродного металу, що цілком закономірно.

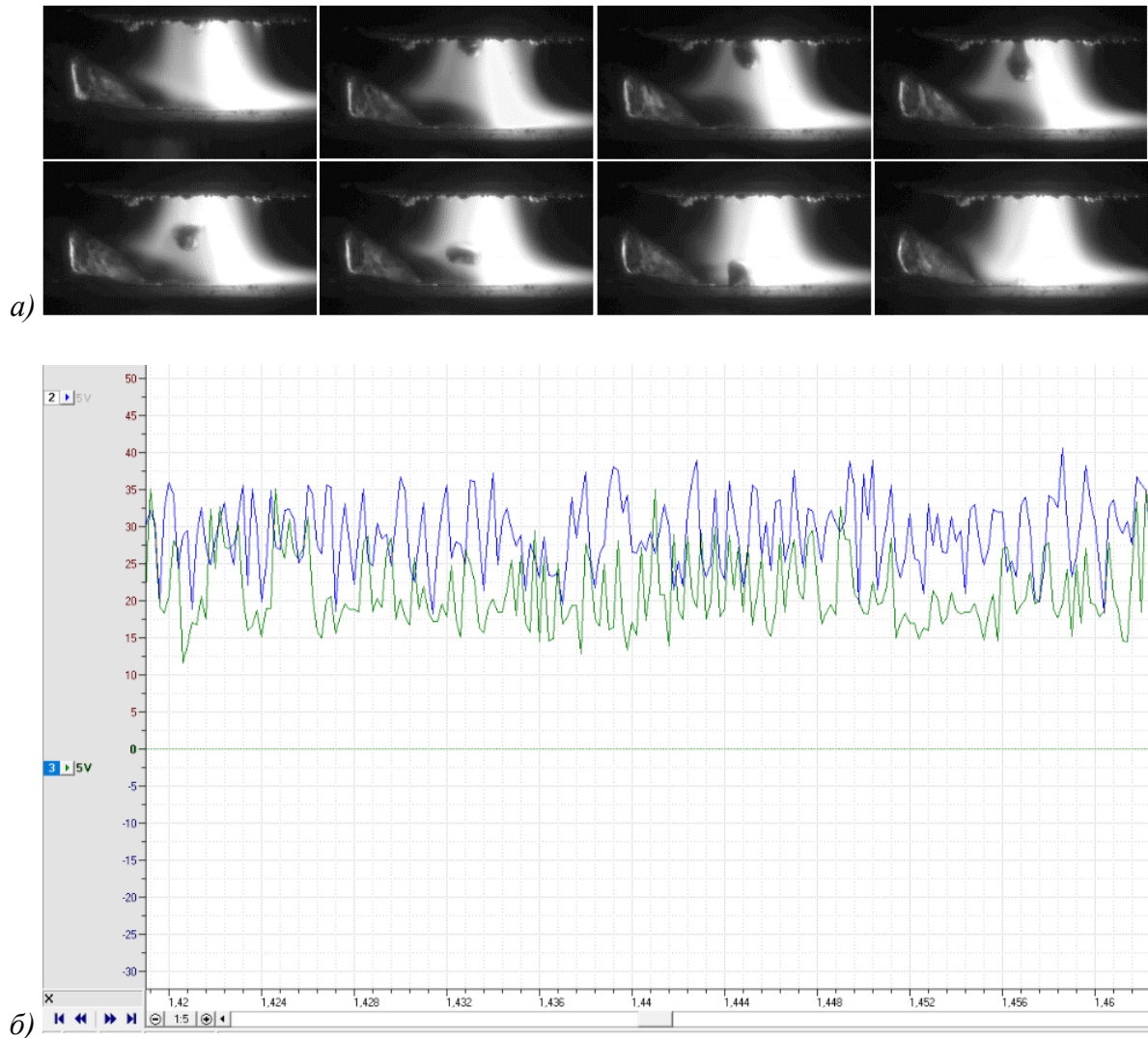


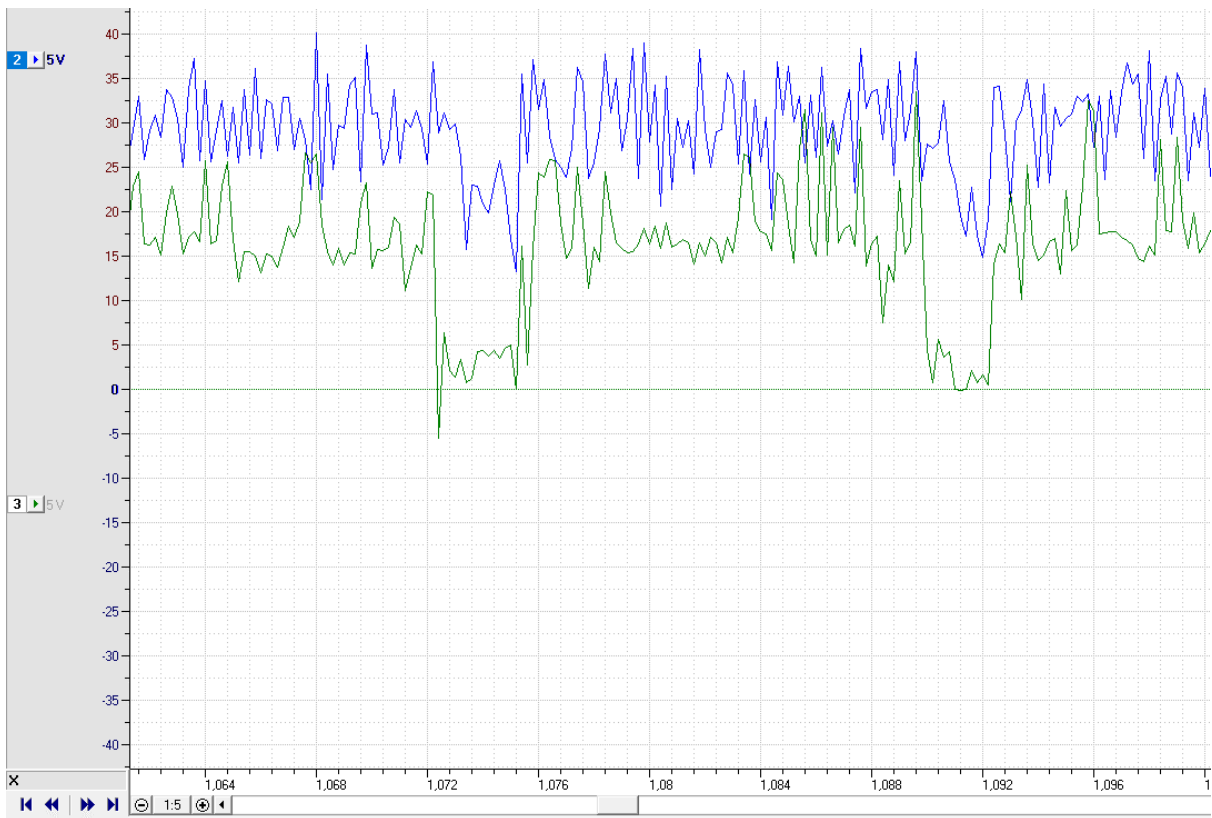
Рисунок 3.8 Візуалізація етапів перенесення краплі металу під час гібридного плазмово-дугового зварювання сплаву 1561 при швидкості 11,5 м/хв. подачі дроту  $\varnothing 1,6$  мм ( $I_{MG}=230$  А,  $I_{PL}=180$  А, час переносу краплі – близько 8 мс); Осцилограми напруг на дугах неплавкого (канал 2, синій) та плавкого (канал 3, зелений) електродів для цього режиму зварювання (б)

Таку різницю в переносі краплі електродного металу між гібридним плазмово-дуговим та традиційним дуговим зварюванням плавким електродом можна пояснити тим, що розподілення зони прив'язки дуги плавкого електроду

на всю поверхню краплі і оплавлений кінчик вильоту при гібридному процесі змінює характер протікання струму між вильотом електроду і деталлю. Значна частина струму не протікає через перешийок між вильотом і краплею, а шунтується через оточуючий плазмовий розряд від вильоту до деталі [74], що сприяє послабленню магнітної пінч-сили яка діє на перешийок між краплею та дротом і призводить до більш пізнього відриву краплі, а відповідно і до деякого збільшення її розміру.

Цей же механізм лежить в основі практично повної відсутності розбризування електродного металу при гібридному плазмово-дуговому зварюванні. Проведені дослідження показують, що при гібридному процесі абсолютна більшість крапель електродного металу потрапляє у зварювальну ванну навіть при крупнокрапельному переносі і крупнокрапельному переносі з короткими замиканнями (К.З). Наявність навколо вильоту електроду і краплі іонізованої плазми дуги неплавкого електроду, а також часткове шунтування струму дуги плавкого електроду через цю плазму значно спрощує відновлення дуги плавкого електроду після короткого замикання, чи відриву краплі і послаблює електромагнітні сили які провокують виштовхування краплі із зони зварювання. Рівень розбризування електродного металу при Plasma-MIG зварюванні в середньому не перевищує 0,5-0,7%.

Також при проведенні досліджень помічено, що під час перенесення краплі з К.З. і тривалості К.З. більше 5 мс часто спостерігається шунтування плазмової дуги на електродний дріт з подальшим її відновленням після розриву К.З. На рисунку 3.9 наведені осцилограми напруг на дугах плавкого та неплавкого електродів для режиму зварювання з К.З. і шунтуванням плазмової дуги. Подібне явище відмічають і інші дослідники [116]. Таке явище негативно впливає на стабільність процесу зварювання і режимів з тривалими короткими замиканнями варто уникати з метою запобігання негативного впливу на зварне з'єднання і пальник.



*Рисунок 3.9 Осцилограми напруг на дугах плавкого (канал 3, зелений) та неплавкого (канал 2, синій) електродів для режиму зварювання з К.З. і шунтуванням плазмової дуги.*

### **3.3.2. Дослідження впливу параметрів режиму гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом на розміри і форму зварного шва**

З метою вивчення взаємного впливу параметрів режиму гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та їх впливу на розміри і форму зварного шва було проведено ряд дослідних зварювань. Дослідження проводили шляхом виконання наплавки на суцільну пластину з фіксацією параметрів режиму, виготовленням поперечних макрошліфів отриманих наплавки і вимірюванням глибини проплавлення, ширини шва та висоти наплавленого валику. Для проведення досліджень обрали наступні матеріали: низьковуглецева сталь марки 09Г2С та алюмінієвий сплав 1561.

Досліджували вплив таких параметрів режиму зварювання як швидкість подавання електродного дроту ( $V_{п.др.}$ , м/хв), струм дуги неплавкого електроду ( $I_{pl}$ , А).

З метою зменшити кількість дослідів та уникнути можливого пошкодження обладнання діапазон варіювання параметрів режиму було звужено до областей у яких були отримані задовільні результати при попередніх дослідженнях [1, 2, 11, 20, 26, 55, 87, 116, 134, 158, 169]. Для кожного з досліджуваних параметрів обрали по 6 значень з рівним кроком в межах визначеної області дослідження. Параметри режимів дослідних зварювань для сталі 09Г2С приведено в таблиці 3.4, а для алюмінієвого сплаву 1561 в таблиці 3.5

Таблиця 3.4 Параметри режимів дослідних зварювань для сталі 09Г2С.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{plasma}$ , А	170	170	170	170	170	170	150	160	180	190	200	210
$V_{п.др.}$ , м/хв	5	6	7	8	9	10	8	8	8	8	8	8
$V_{зв.}=100$ см/хв; $\varnothing$ ел.др.=1,2 мм; дистанція сопло/деталь—6 мм.												

Таблиця 3.5 Параметри режимів дослідних зварювань для алюмінієвого сплаву 1561.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{plasma}$ , А	175	175	175	175	175	175	145	155	165	185	195	205
$V_{п.др.}$ , м/хв	5	6	7	8	9	10	8	8	8	8	8	8
$V_{зв.}=100$ см/хв; $\varnothing$ ел.др.=1,6 мм; дистанція сопло/деталь—6 мм.												

Аналіз результатів проведених зварювань показує, що зростання швидкості подавання електродного дроту призводить як до зростання глибини проплавлення, так і до збільшення ширини шва. Збільшення швидкості подавання електродного дроту від 5 м/хв до 10 м/хв спричинило зростання глибини проплавлення на 84% від початкового значення, тоді як збільшення ширини шва становить 33% від початкового значення для сталі 09Г2С (рис. 3.10)

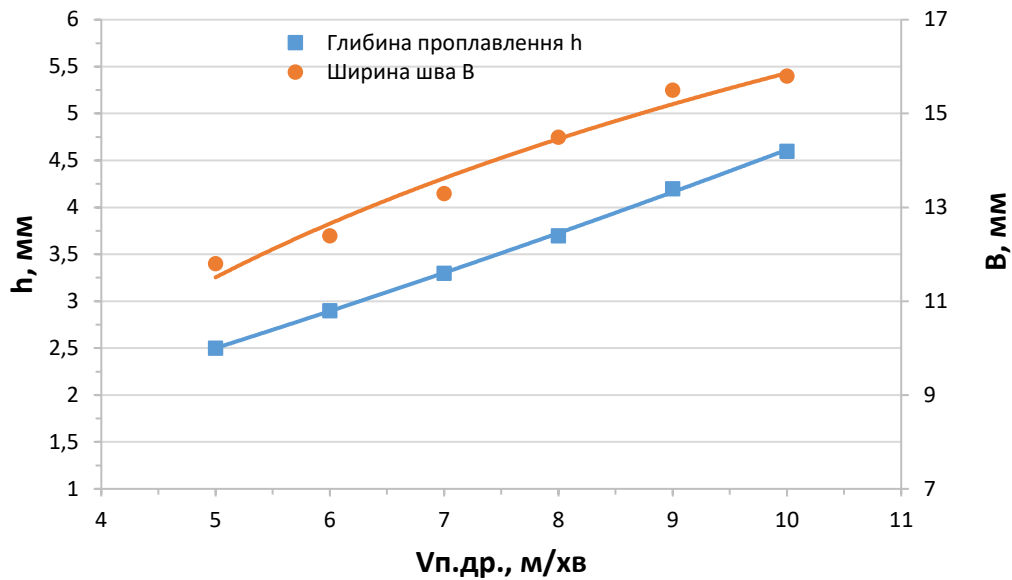


Рисунок 3.10 Вплив швидкості подавання дроту на глибину провару і ширину шва при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сталі 09Г2С

У випадку ж збільшення сили струму неплавкого електроду від 150 А до 200 А глибина проплавлення зросла на 20% від початкового значення і показує тенденцію до зменшення швидкості зростання, а збільшення ширини шва становить 18,8% від початкового значення зі сталою швидкістю зростання (див. рис. 3.11)

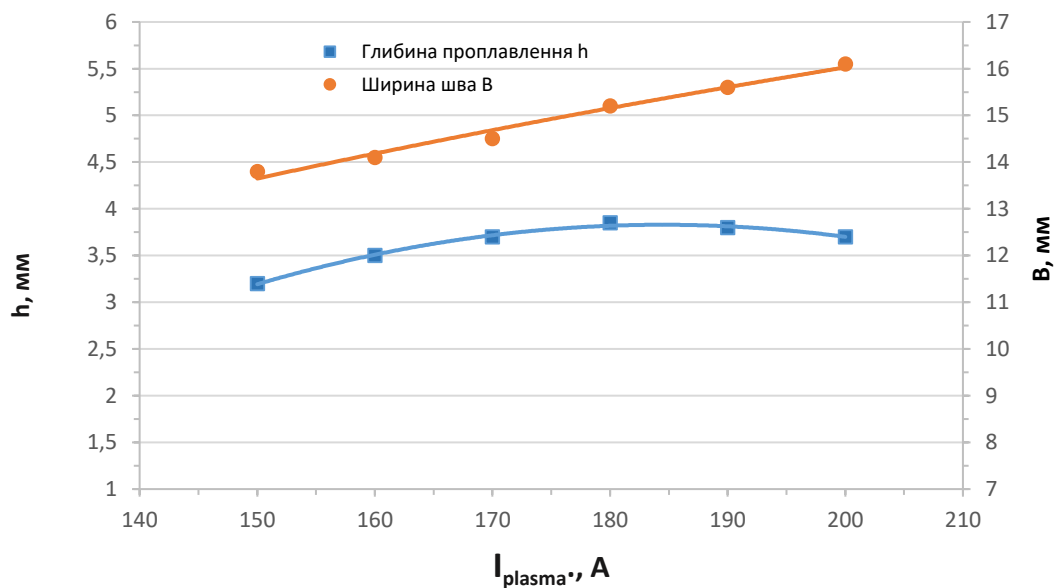
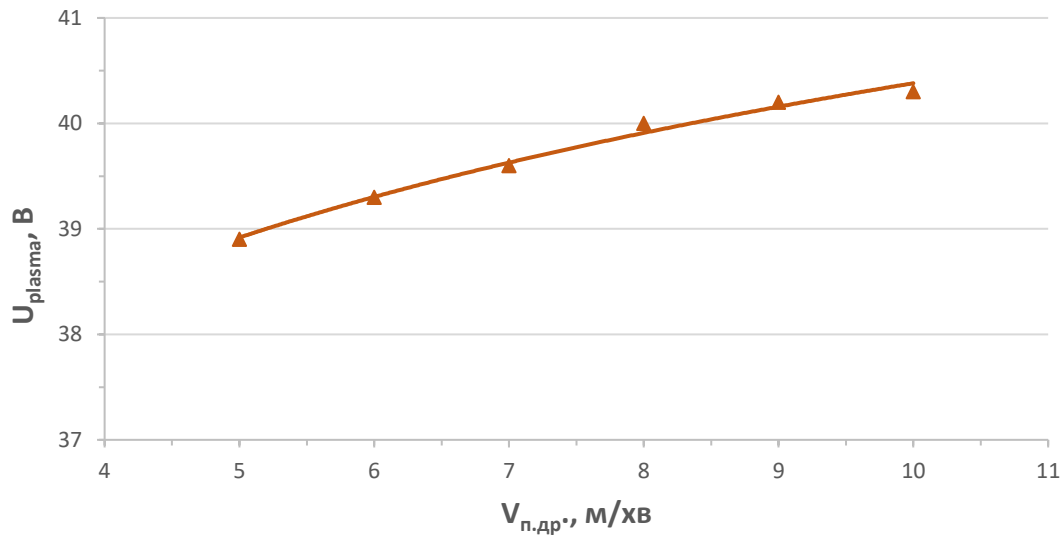


Рисунок 3.11 Вплив сили струму плазмового розряду на глибину провару і ширину шва при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сталі 09Г2С



Для випадку гібридного плазмово-дугового зварювання сталі 09Г2С підтверджується тенденція зростання напруги на плазмовому розряді зі збільшенням швидкості подавання електродного дроту (рис. 3.12) спрогнозована у підрозділі 3.1 цієї роботи.



*Рисунок 3.12 Вплив швидкості подавання дроту на напругу плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сталі 09Г2С*

Порівнявши струми дуги плавкого електроду для гібридного плазмово-дугового зварювання та дугового зварювання плавким електродом при однакових швидкостях подавання електродного дроту бачимо, що струм при гібридному зварюванні на 40-50 А менший ніж при класичному дуговому (рис. 3.13). Це явище можна пояснити тим, що виліт електродного дроту при гібридному зварюванні додатково підігривається випроміненням дуги неплавкого електроду, якою він оточений, а значить на подальший нагрів і плавлення дроту витрачається менше енергії дуги плавкого електроду.

Така різниця у співвідношеннях струму і швидкості подавання дроту робить практично неможливим використання при гібридному плазмово-дуговому зварюванні синергетичних залежностей напрацьованих для класичного дугового зварювання плавким електродом, що потрібно враховувати при виборі чи проектуванні джерел живлення для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

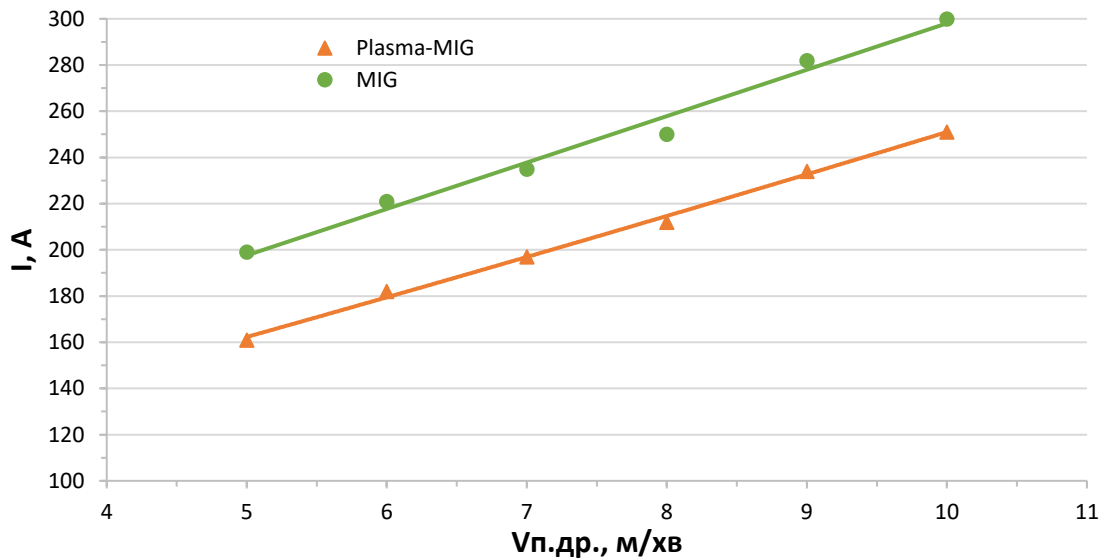


Рисунок 3.13 Залежність струму дуги плавкого електроду від швидкості подавання дроту при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом та при дуговому зварюванні плавким електродом сталі 09Г2С

Тенденції виявлені при дослідженні гібридного плазмово-дугового зварювання сталі 09Г2С загалом справедливі і для зварювання алюмінієвого сплаву 1561 (див. рис. 3.14-3.17).

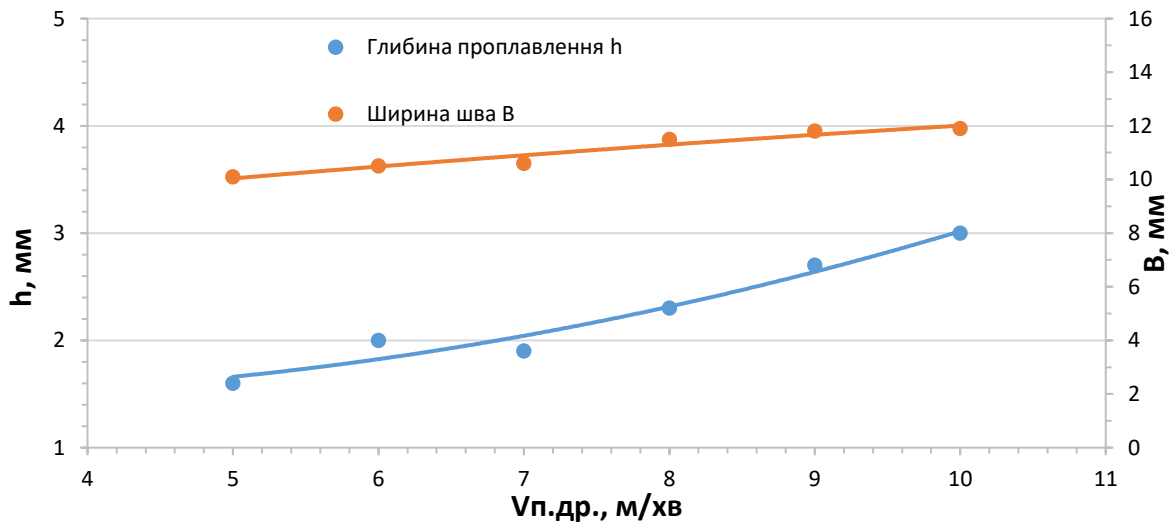


Рисунок 3.14 Вплив швидкості подавання дроту на глибину провару і ширину шва при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сплаву 1561

Збільшення швидкості подавання електродного дроту від 5 м/хв до 10 м/хв спричиняє зростання глибини проплавлення на 84% від початкового значення, тоді як збільшення ширини шва становить 18% від початкового значення для

сплаву 1561, що співставно зі значеннями аналогічних параметрів для сталі 09Г2С (див. рис. 3.14).

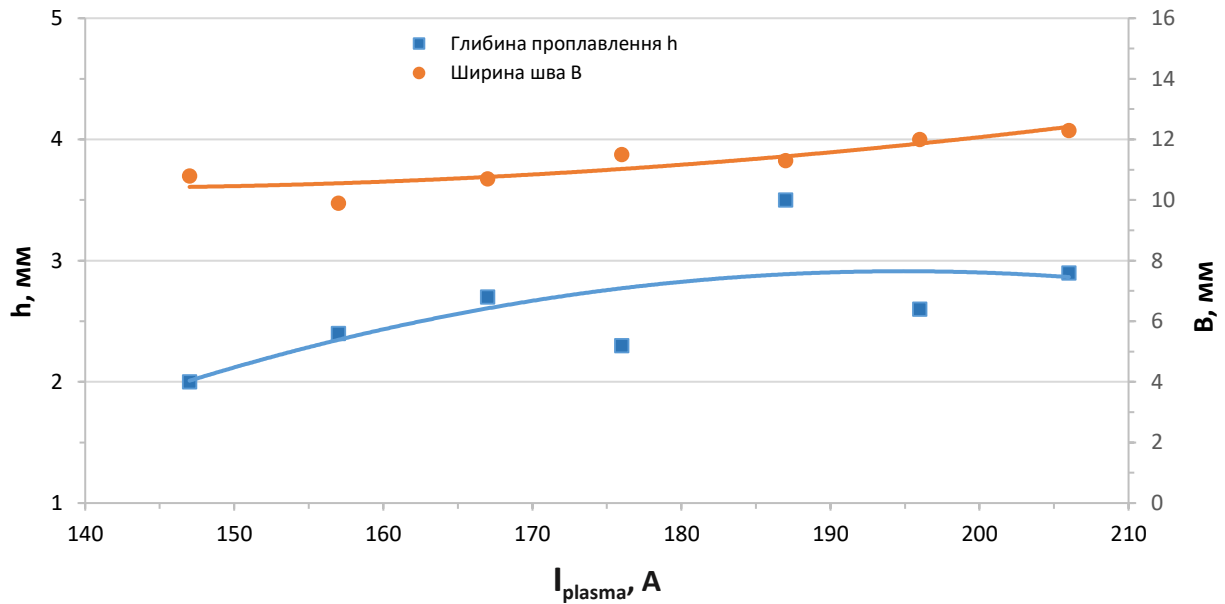


Рисунок 3.15 Вплив сили струму плазмового розряду на глибину провару і ширину шва при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сплаву 1561

А от збільшення сили струму неплавкого електроду від 150 А до 200 А підвищує глибину проплавлення на 45%-75% від початкового значення показуючи тенденцію до зменшення швидкості зростання, збільшення ж ширини шва становить 24% від початкового значення з легкою тенденцією до прискорення (див. рис. 3.15). Ці значення значно вищі ніж такі для вуглецевої сталі, що свідчить про більш виражений позитивний вплив на глибину проплавлення підігрівання основного металу плазмовою дугою при гібридному плазмово-дуговому зварюванні металів з високою теплопровідністю, таких як алюмінієві сплави. Таким чином можна зробити висновок, що для досягнення максимальної глибини проплавлення при гібридному зварюванні матеріалів з високою теплопровідністю, таких як алюмінієві сплави доля плазмової дуги в загальному тепловкладенні має бути вища за таку для матеріалів з нижчою теплопровідністю, як сталі.

Для гібридного плазмово-дугового зварювання сплаву 1561 також підтверджується тенденція зростання напруги на плазмовому розряді зі

збільшенням швидкості подавання електродного дроту (рис. 3.16) спрогнозована у підрозділі 3.1 цієї роботи.

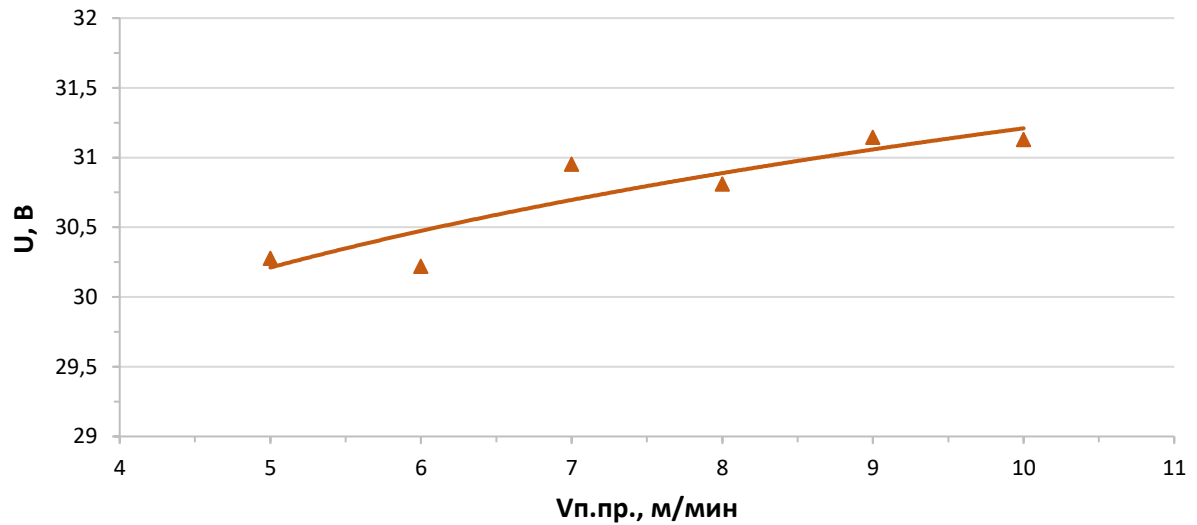


Рисунок 3.16 Вплив швидкості подавання дроту на напругу плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом сплаву 1561

Різниця струмів дуги плавкого електроду для гібридного плазмово-дугового зварювання та дугового зварювання плавким електродом сплаву 1561 при однакових швидкостях подавання електродного дроту склала від 15А до 65А зростаючи по мірі збільшення швидкості подавання дроту (див. рис. 3.17). Фізика цього процесу така ж як і для зварювання сталі.

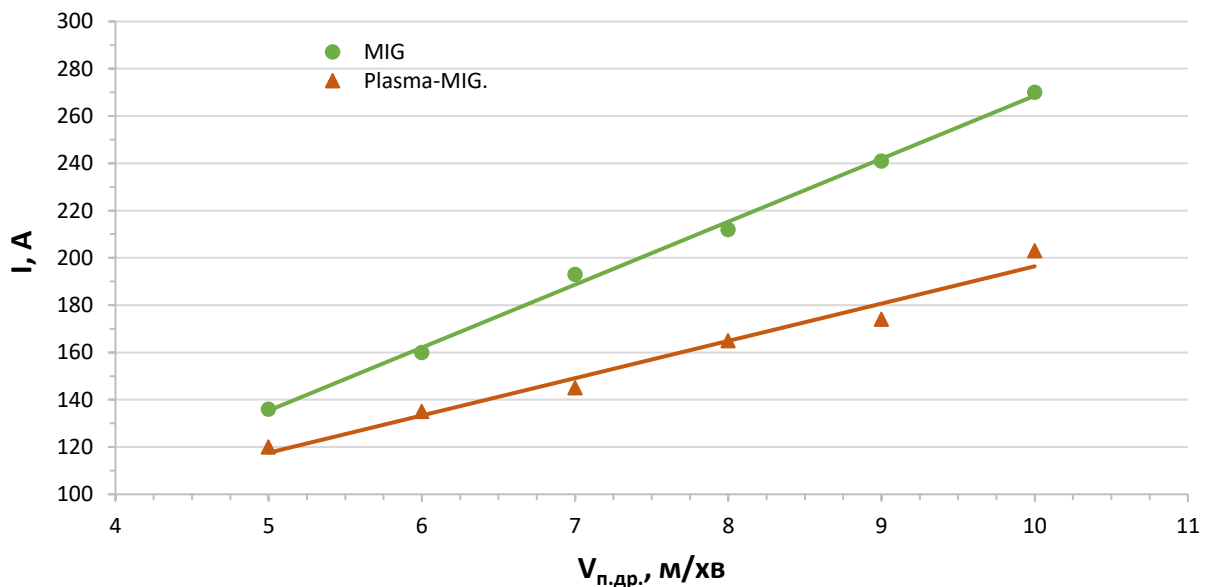


Рисунок 3.17 Залежність струму дуги плавкого електроду від швидкості подавання дроту при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом та при дуговому зварюванні плавким електродом сплаву 1561

Вивчення взаємного впливу параметрів режиму зварювання та їх впливу на розміри та форму зварного шва дозволило встановити відповідні загальні тенденції для випадків зварювання сталей і алюмінієвих сплавів.

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. Створено математичну модель динаміки плавлення електродного дроту з урахуванням впливу на нього оточуючого плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом яка дає можливість прогнозувати ступінь впливу плазмового розряду на швидкість плавлення електродного дроту.

2. Отримано параметричні залежності напруги плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом з урахуванням впливу проходження всередині розряду електродного дроту та швидкості обдування зовнішнього периметру розряду захисним газом. Що дало змогу спрогнозувати вольт-амперну характеристику плазмового розряду для гібридного плазмово-дугового зварювання і показати, що напруга на плазмовій дузі для цього процесу на 4-20% вища за таку для класичного плазмового зварювання з тими ж параметрами режиму.

3. Дослідним шляхом підтверджено спрогнозовані тенденції до зростання напруги плазмової дуги і проказано, що похибка розрахункової моделі не перевищує 7%.

4. Показано, що зі зростанням швидкості подавання електродного дроту напруга на плазмовій дузі також зростає. Це має бути враховано при виборі чи проектуванні джерел живлення плазмової дуги для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

5. Встановлено, що за наявності оточуючого плазмового розряду характер переносу крапель електродного металу змінюється порівняно з традиційним дуговим зварюванням плавким електродом. Зокрема межа переходу від крупнокрапельного переносу електродного металу до крапельного

зміщується в сторону зростання струму на 25-30% порівняно з традиційним дуговим зварюванням плавким електродом.

6. Для гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвих сплавів на струмах дуги плавкого електроду до 180 А спостерігається крупнокрапельний перенос з частотою перенесення крапель не більше 40 Гц. При збільшенні струму дуги плавкого електроду від 180 А і більше розмір крапель зменшується, а частота їх перенесення зростає, сягаючи 120-130 Гц при струмі близько 230А. Подальше підвищення струму плавкого електроду веде до переходу від крапельного до струменевого переносу електродного металу.

7. Показано, що при гібридному плазмово-дуговому зварюванні дуга плавкого електроду розподіляється по всій поверхні краплі і сягає кінцевої частини вильоту електроду.

8. За рахунок взаємодії дуг плавкого і неплавкого електродів розбризування електродного металу при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом мінімальне і в середньому не перевищує 0,5-0,7%.

9. Зростання енергії плазмового розряду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні сильніше впливає на розміри зварного шва при зварюванні матеріалів з високою теплопровідністю (напр. алюмінієвих сплавів) ніж при зварюванні сталей, що має бути враховано при виборі режимів гібридного плазмово-дугового зварювання згаданих матеріалів.

## РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ОДЕРЖАНИХ З'ЄДНАНЬ

### 4.1 Відпрацювання режимів гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом для різних видів металів та сплавів

Після проведення аналізу впливу параметрів режиму гібридного плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання плавким електродом на особливості формування зварного з'єднання, згідно виявлених тенденцій було відпрацьовано режими зварювання для різних типів металів та сплавів.

#### 4.1.1. Гібридне плазмОВО-ДУГОВОГО зварювання алюмінієвих сплавів

Зварювання проводилося для таких марок алюмінієвих сплавів: сплав 1561 (товщини 5 та 8 мм), сплав 5083 (товщини 8 мм).

У якості базового способу зварювання для порівняння прийємо імпульсне дугове зварювання плавким електродом як найбільш близьке за продуктивністю та можливими сценаріями використання.

При зварюванні листів зі сплаву 1561 товщиною 5 мм імпульсним дуговим зварюванням плавким електродом була досягнута максимальна швидкість зварювання 60 см/хв (36 м/год). Основним критерієм якості швів допущених до подальшого дослідження була відсутність недопустимих дефектів згідно вимог ДСТУ EN ISO 10042:2015 та Морського реєстру судноплавства РФ.

Режим імпульсного дугОВОГО зварювання плавким електродом приведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Параметри режиму імпульсного дугОВОГО зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плавкий електрод			
					Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата захисного газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1561	5	ER5356	1,6	60 (36)	8	253	25,8	24

Під час зварювання спостерігалось інтенсивне розбризування електродного металу, а також утворення на поверхні зварного шва внаслідок інтенсивного вигорання магнію з дроту шару «нагару», який можливо видалити металевою щіткою. Зовнішній вигляд зварного шва одразу після зварювання приведено на рисунку 4.1



*Рисунок 4.1 Зовнішній вигляд зварного шва листів товщиною 5 мм зі сплаву 1561, отриманого імпульсним зварюванням плавким електродом (одразу після зварювання)*

Зображення поперечного перетину зварного шва приведено на рисунку 4.2



*Рисунок 4.2 Поперечний перетин зварного шва листів товщиною 5 мм зі сплаву 1561, отриманого імпульсним зварюванням плавким електродом*

Ширина шва склала 13,8 мм, висота «підсилення» шва — 1,5 мм. У поперечному перетині шва спостерігається рівномірно розподілена дрібна пористість, розмір пор не перевищує 0,1 мм.

Для формування кореня шва як при імпульсному дуговому так і при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом пластин зі



сплаву 1561 товщиною 5 мм використовували підкладку з аустенітної нержавіючої сталі з формуючою канавкою 6×2,5 мм.

Для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом були відпрацьовані режими зварювання сплаву 1561 товщиною 5 мм з дротами діаметрами 1,2 мм та 1,6 мм на швидкості 60 см/хв. Однакова швидкість зварювання полегшить порівняння результатів з базовим способом зварювання.

Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин зі сплаву 1561 товщиною 5 мм приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 Параметри режиму гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1561 на швидкості 60 см/хв (36 м/год).

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма				Плавкий електрод			
					Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата плазмоутворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, хв.	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата центрального газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1561	5	ER5356	1,2	60 (36)	100	25,4	5	30	12,5	155	17,4	7
1561	5	ER5356	1,6	60 (36)	100	24,6	5	30	7,4	165	17,9	7

Зовнішній вигляд зварного шва зі сплаву 1561 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом приведено на рисунку 4.3



Рисунок 4.3 Зовнішній вигляд зварного шва зі сплаву 1561 товщиною 5 мм виконаний гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом

Фото поперечних шліфів зварних з'єднань зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на режимах приведених в таблиці 4.2 показані на рисунку 4.4

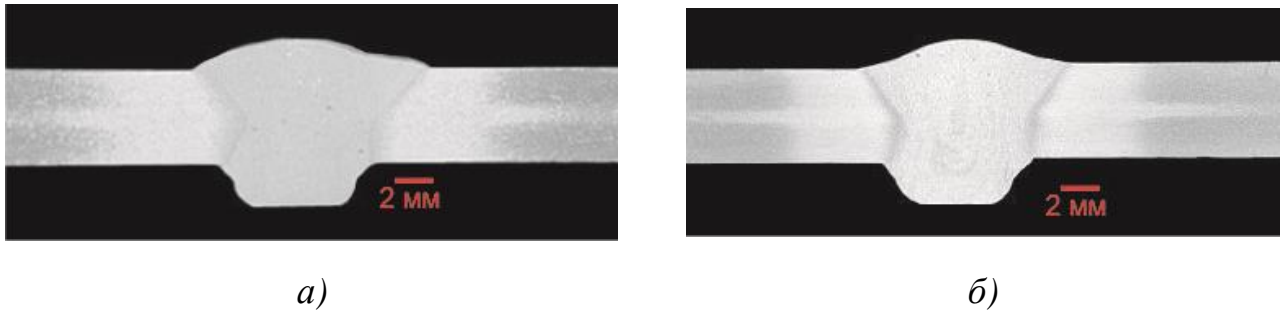


Рисунок 4.4 Фото поперечних шліфів зварних з'єднань листів зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм, виконаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом з дротами діаметром 1,2 мм (а) та 1,6 мм (б)

Проаналізувавши параметри режимів імпульсного дугового зварювання плавким електродом та гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин з алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм, а також розміри отриманих зварних швів можна дійти висновку, що використання плазмово-дугового зварювання дозволяє зменшити ширину шва на 22% (з 13,8 мм до 10,7 мм), знизити кількість використаного електродного дроту на 13%. При цьому на 39% знижується величина погонної енергії, що позитивно вплине на показники міцності зварного з'єднання.

На рисунку 4.5 наведене розподілення твердості в поперечному перетині зварних з'єднань, отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм, виконаних у нижньому положенні з використанням підкладки з формуючою канавкою. В усіх випадках у якості захисного газу використовувався аргон.

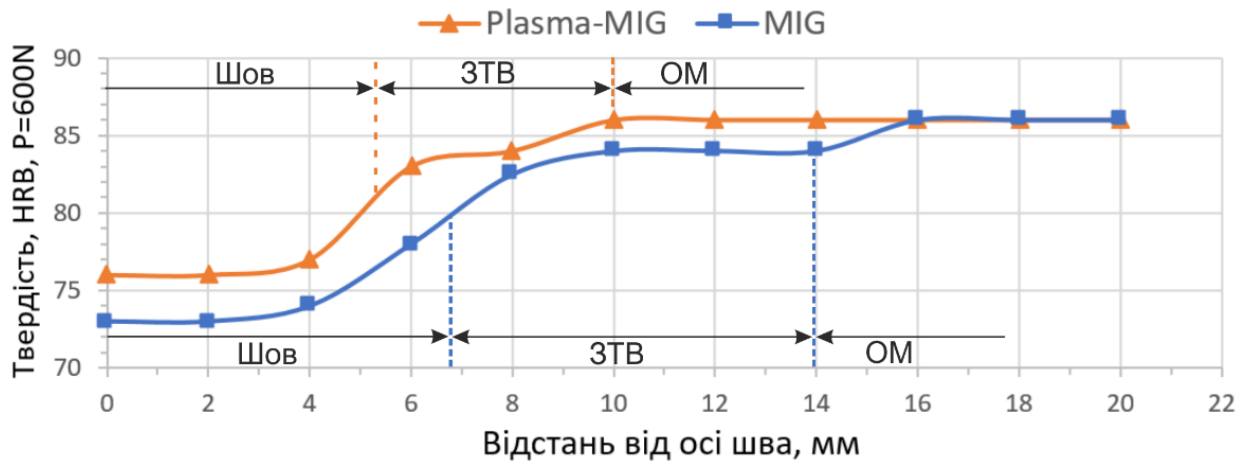


Рисунок 4.5 Розподілення твердості в поперечному перерізі зварних з'єднань, отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм при швидкості зварювання 60 см/хв.

На рисунку 4.6 наведені показники міцності зразків зварних з'єднань при статичному навантаженні зі знятим кореневим валиком та зі знятим кореневим валиком і підсиленням шва для випадків імпульсно-дугового зварювання плавким електродом та гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

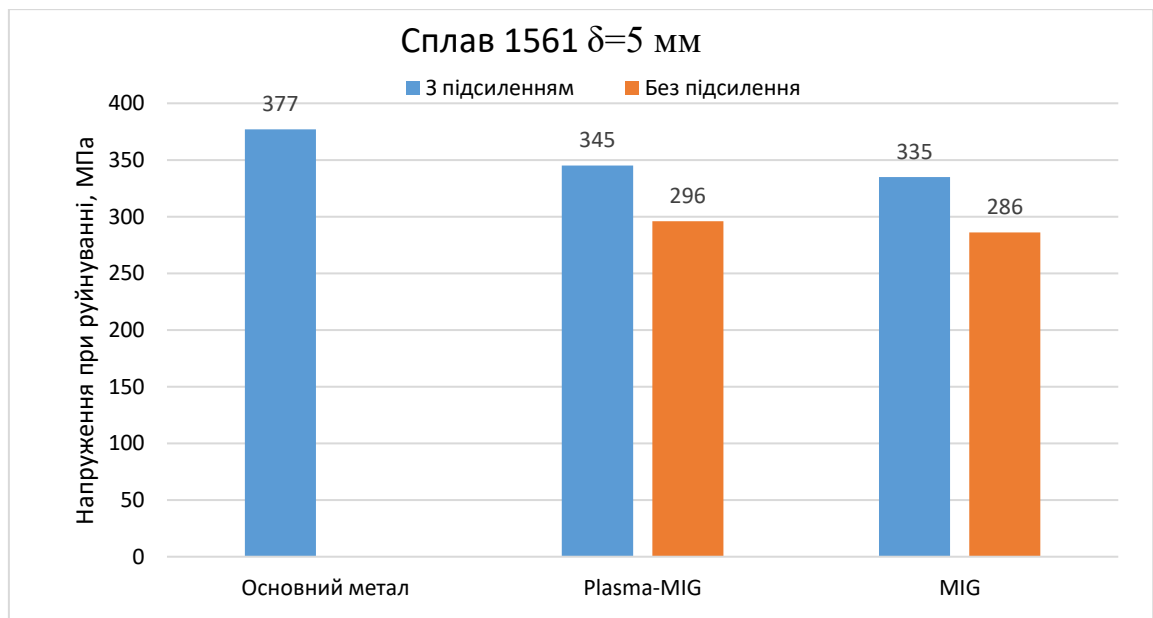
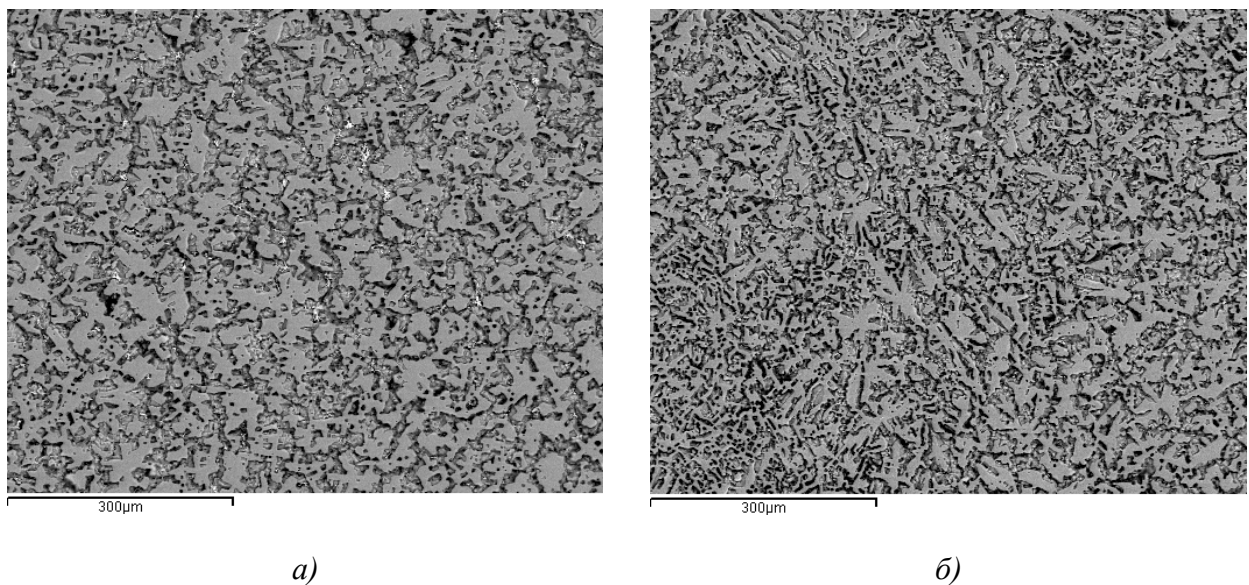


Рисунок 4.6 Показники міцності зварних з'єднань при статичному навантаженні отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм при швидкості зварювання 60 см/хв.

Як видно з діаграми наведеної на рисунку 4.6 коефіцієнт міцності зварних з'єднань отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом складає 92% від міцності основного металу, тоді як коефіцієнт міцності зварних з'єднань отриманих імпульсним дуговим зварюванням плавким електродом складає 89% від міцності основного металу. Різницю в міцності зварних з'єднань можна пояснити меншим тепловкладенням в метал та меншим об'ємом використаного електродного дроту при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.

Аналіз мікроструктури металу швів отриманих Plasma-MIG та MIG зварюванням підтверджує результати механічних випробувань, як видно з рисунку 4.7 зменшення погонної енергії при Plasma-MIG зварюванні веде до переходу від дендритної (рис. 4.7,б) до субдендритної (рис. 4.7,а) структури металу шва.



*Рисунок 4.7 Мікроструктура металу шва при Plasma-MIG (а) та MIG (б) зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм.*

Також зменшення погонної енергії при Plasma-MIG зварюванні веде до зменшення ширини зони оплавлених зерен в зоні сплавлення металу шва з основним металом (див. рис. 4.8). Ці фактори позитивно впливають на міцність зварних з'єднань отриманих Plasma-MIG зварюванням.

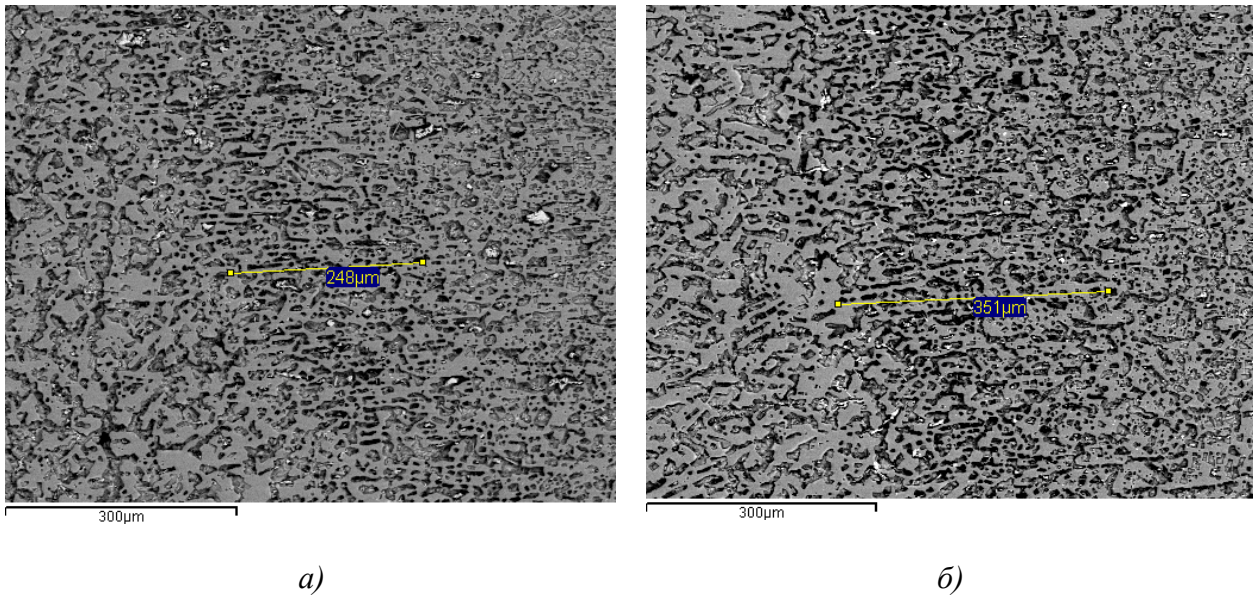


Рисунок 4.8 Мікроструктура зони сплавлення при Plasma-MIG (а) та MIG (б) зварюванні алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм.

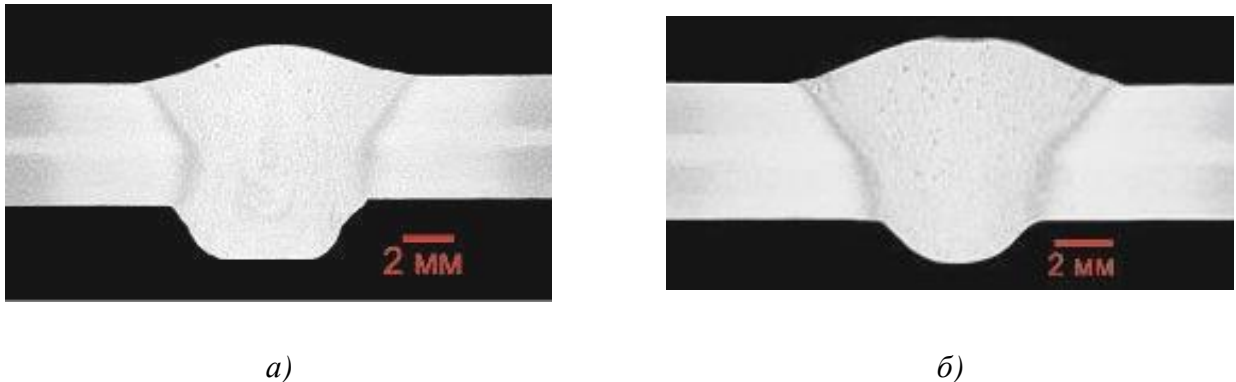
Технологічні можливості процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом дозволяють виконувати зварювання на швидкостях вищих за 60 см/хв. (36 м/год.). Тому був відпрацьований режим гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом листів товщиною 5 мм зі сплаву 1561 на швидкості 100 см/хв (60 м/год). Параметри режиму зварювання приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 Параметри режиму гібридного плазмово-дугового зварювання алюмінієвого сплаву 1561 на швидкості 100 см/хв (60 м/год).

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма				Плавкий електрод			
					Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата плазмостворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, хв.	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата центрального газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1561	5	ER5356	1,6	100 (60)	178	29,2	3,5	30	7,5	154	18,2	4,5



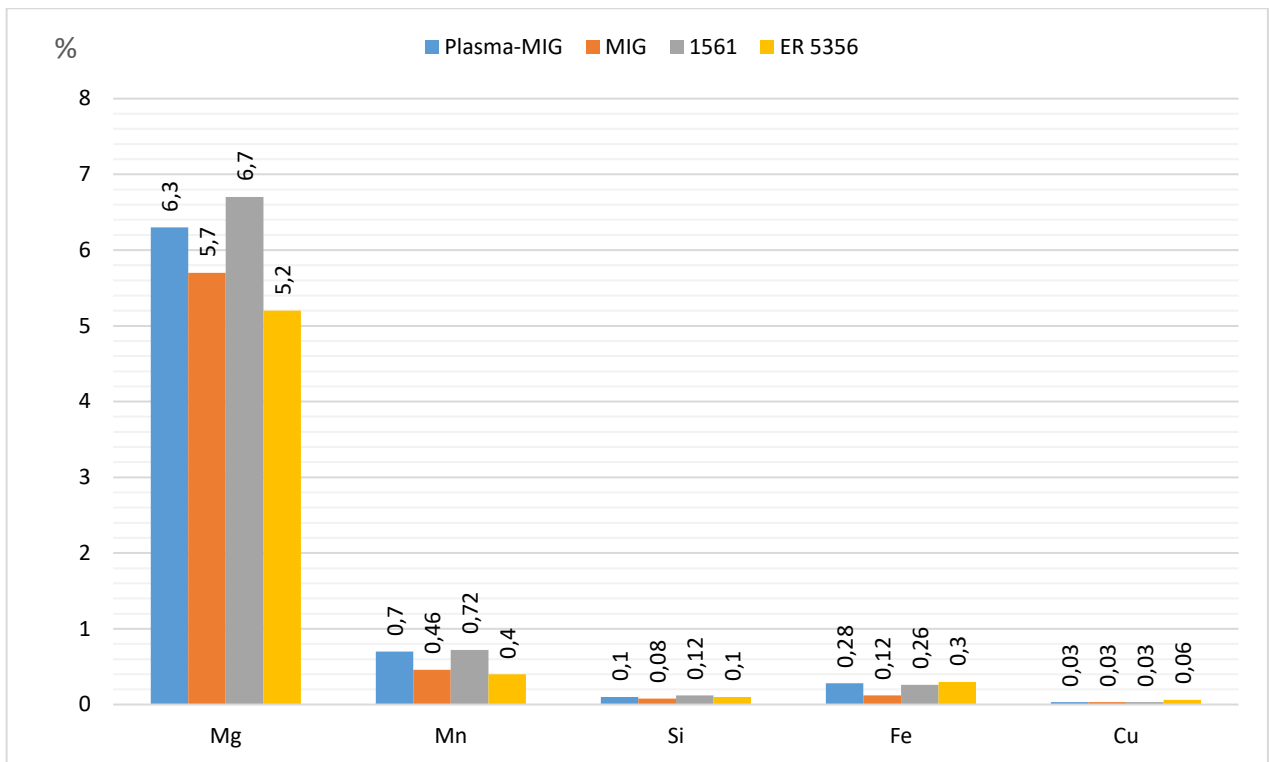
На рисунку 4.9 приведені зображення поперечних шліфів зварних з'єднань листів зі сплаву 1561 товщиною 5 мм виконаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкостях 60 см/хв та 100 см/хв.



*Рисунок 4.9 Фото поперечних шліфів зварних з'єднань листів зі сплаву 1561 товщиною 5,0 мм, виконаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом діаметром 1,6 мм на швидкості 60 см/хв (36 м/год) (а) та 100 см/хв (60 м/год) (б)*

Як видно з таблиць 4.2 та 4.3 при зварюванні зі швидкістю 100 см/хв в сумарній потужності двох дуг переважає складова потужності стисненої плазмової дуги, а швидкість подавання електродного дроту майже не змінилася, завдяки чому використовується на 47% менше електродного дроту порівняно з імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом. Такого результату вдалося досягти завдяки можливостям гібридного плазмово-дугового зварювання по окремому керуванню кількістю вкладеної енергії та об'єму наплавленого металу.

З метою визначення рівня переходу легуючих елементів у метал шва визначили і порівняли хімічний склад металу швів отриманих імпульсно-дуговим зварюванням на режимі вказаному в табл. 4.1 та гібридним плазмово-дуговим зварюванням на режимах вказаних в таблиці 4.2 (№2). Результати спектрального аналізу хімічний склад металу швів наведені на рисунку 4.10



*Рисунок 4.10 Порівняння хімічного складу металу шва деталей отриманих імпульсно-дуговим зварюванням на режимі вказаному в табл. 4.1 та гібридним плазмово-дуговим зварюванням на режимах вказаних в таблиці 4.2 (№2) використанням дроту ER 5356, а також хімічного складу основного металу та металу електродного дроту*

Як видно з результатів аналізу хімічного складу металу швів (рис. 4.10) використання гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом забезпечує порівняно з імпульсно-дуговим зварюванням зменшення втрати вмісту певних легуючих елементів в металі швів (наприклад, Mg на ~5%, Mn до 15% тощо).

Також були відпрацьовані режими гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сплавів 1561 та 5083 товщиною 8 мм з дротом діаметром 1,6 мм на швидкості 40 см/хв.

Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин зі сплаву 1561 товщиною 8 мм приведені в таблиці

Таблиця 4.4 Параметри режиму гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 на швидкостях 40 см/хв (24 м/год).

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма				Плавкий електрод			
					Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата плазموутворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, хв.	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата центрального газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1561	8	ER5356	1,6	40 (24)	175	29	6,5	30	6,5	140	20	4,5
5083	8	ER5356	1,6	40 (24)	182	29,6	6,5	30	6,8	142	19,8	4,5

З метою порівняння приведемо режим імпульсного дугового зварювання плавким електродом листів товщиною 8 мм зі сплаву 1561 (табл. 4.5)

Таблиця 4.5 Параметри режиму імпульсного дугового зварювання плавким електродом алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 8 мм

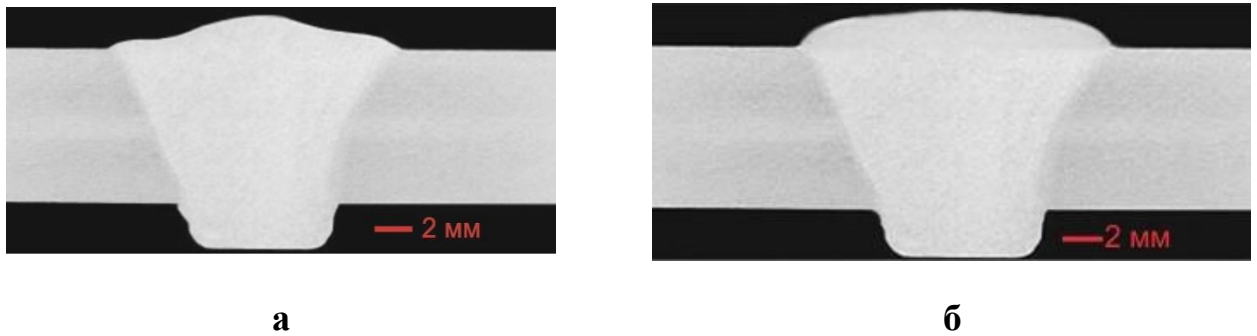
Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плавкий електрод			
					Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата захисного газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1561	8	ER5356	1,6	30 (18)	9,5	250	27	25

Для формування кореня шва як при імпульсному дуговому так і при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом пластин товщиною 8 мм використовували підкладку з аустенітної нержавіючої сталі з формуючою канавкою 8×3 мм.

На рисунку 4.11 приведені зображення поперечних шліфів зварних з'єднань листів зі сплавів 1561 та 5083 товщиною 8 мм виконаних гібридним

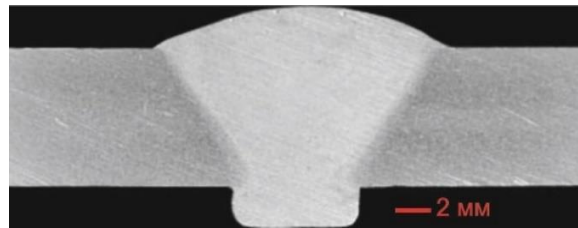


плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на режимах вказаних у таблиці 4.4.



*Рисунок 4.11 Фото поперечних шліфів зварних з'єднань листів зі сплавів 1561 (а) та 5083 (б) товщиною 8,0 мм, виконаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом*

На рисунку 4.12приведене зображення поперечного шліфа зварного з'єднання листів зі сплаву 1561 товщиною 8 мм виконаного імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом на режимах вказаних у таблиці 4.5.

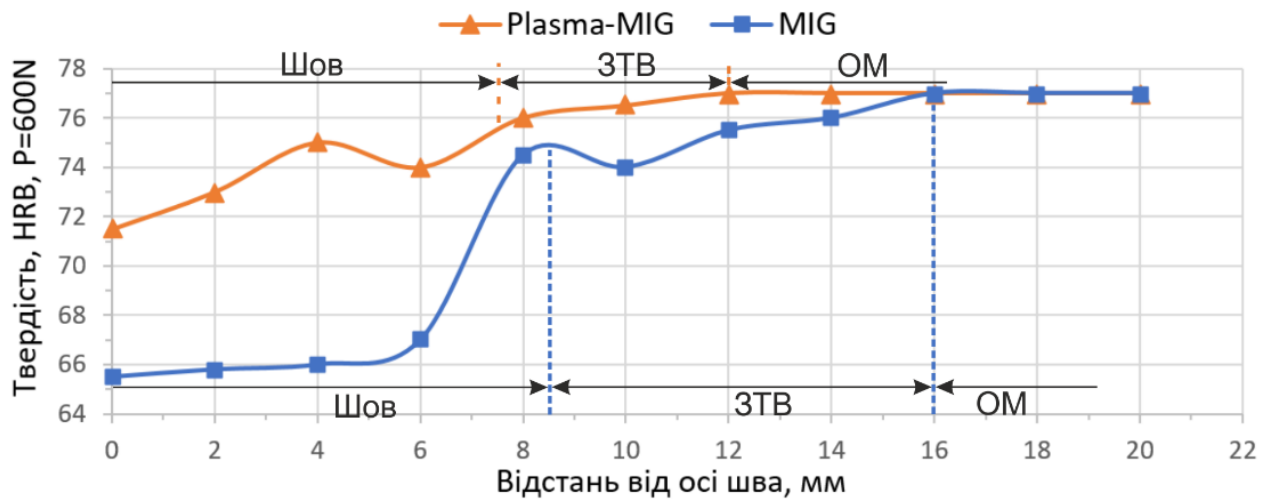


*Рисунок 4.12 Фото поперечного шліфа зварного з'єднання пластин товщиною 8 мм зі сплаву 5083 виконаного імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом*

Аналіз параметрів режимів імпульсного дугового зварювання плавким електродом та гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин з алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 8 мм, а також розмірів отриманих зварних швів показує, що використання плазмово-дугового зварювання дозволяє зменшити ширину шва на 7% (з 16,8 мм до 15,6 мм), знизити кількість використаного електродного дроту на 46%. При цьому на 13% знижується величина погонної енергії, що позитивно вплине на показники міцності зварного з'єднання.

На рисунку 4.13 наведене розподілення твердості в поперечному перетині зварних з'єднань, отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням

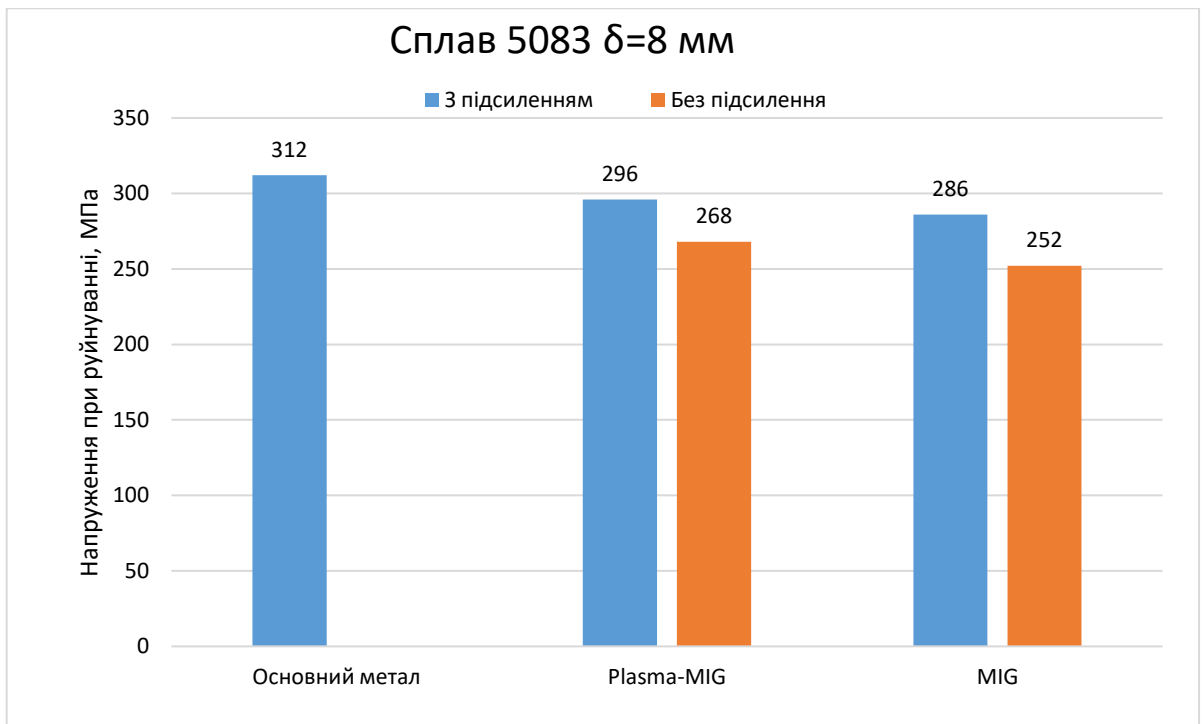
плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 5083 товщиною 8,0 мм, виконаних у нижньому положенні з використанням підкладки з формуючою канавкою.



*Рисунок 4.13 Розподілення твердості в поперечному перетині зварних з'єднань, отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 5083 товщиною 8,0 мм при швидкостях зварювання 30 см/хв та 40 см/хв відповідно.*

На рисунку 4.14 наведені показники міцності зразків зварних з'єднань при статичному навантаженні зі знятим кореневим валиком та зі знятим кореневим валиком і підсиленням шва для випадків імпульсно-дугового зварювання плавким електродом та гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

Як видно з діаграми наведеної на рисунку 4.14 коефіцієнт міцності зварних з'єднань отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом складає 94% від міцності основного металу, тоді як коефіцієнт міцності зварних з'єднань отриманих імпульсним дуговим зварюванням плавким електродом складає 92% від міцності основного металу. Різницю в міцності зварних з'єднань можна пояснити меншим тепловкладенням в метал та меншим об'ємом використаного електродного дроту при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом.



*Рисунок 4.14 Показники міцності зварних з'єднань при статичному навантаженні отриманих традиційним імпульсно-дуговим зварюванням плавким електродом та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на листах зі сплаву 5083 товщиною 8,0 мм при швидкостях зварювання 30 см/хв та 40 см/хв відповідно.*

#### **4.1.2. Гібридне плазмово-дугове зварювання низьколегованих та корозійностійких сталей**

Для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом були відпрацьовані режими зварювання низьколегованої сталі 09Г2С та корозійностійкої сталі AISI304 товщиною 10 мм.

Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин з низьколегованої сталі 09Г2С та корозійностійкої сталі AISI304 товщиною 10 мм приведені в таблиці 4.6. Як видно з наведених даних струм дуги неплавкого електроду не перевищує такий для випадку зварювання алюмінієвих сплавів, тоді як струм дуги плавкого електроду при зварюванні сталей перевищує такий для алюмінієвих сплавів на 25-40%. Це яскраво ілюструє

виявлені у розділі 3 відмінності у Plasma-MIG зварюванні металів з високою і низькою теплопровідністю.

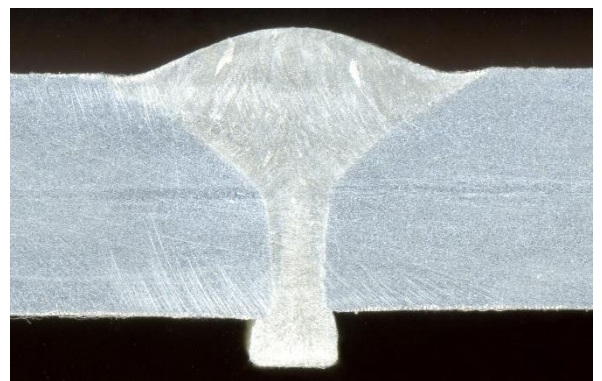
Таблиця 4.6 Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом низьколегованої сталі 09Г2С та корозійностійкої сталі AISI304 на швидкості 38 см/хв (22,8 м/год).

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма				Плавкий електрод			
					Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата плазموутворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, хв.	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата центрального газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
09Г2С	10	ER70S	1,6	38 (22,8)	190	41	6	30	8,2	380	27	5
AISI304	10	ER308L	1,6	38 (22,8)	180	40	6	30	8,2	310	25	5

Фото поперечних шліфів зварних з'єднань з низьколегованої сталі 09Г2С та корозійностійкої сталі AISI304 отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на режимах приведені в таблиці 4.6 показані на рисунку 4.15.



а)



б)

Рисунок 4.15 Фото поперечних шліфів зварних з'єднань листів з низьколегованої сталі 09Г2С (а) та корозійностійкої сталі AISI304 (б) товщиною 10 мм, виконаних гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом

## **4.2 Теоретичний аналіз напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань та розробка підходів до управління залишковими деформаціями при гібридному зварюванні плавким електродом**

Зварювальні деформації і залишкові напруження являються найбільш складними термічними явищами, що виникають в процесі зварювання плавленням. Для того, щоб в повній мірі розібратися в характерних особливостях зварювальних деформацій необхідно провести ряд досліджень з допомогою термічного аналізу і математичного моделювання. Численні експериментальні дослідження, проведені різними вченими всього світу протягом тривалого часу, були направлені на те, щоб вивчити механізми виникнення зварювальних деформацій і залишкових напружень. Для цього використовувалися аналітичні і числові методи прогнозування і кількісної оцінки деформацій та залишкових напружень в процесі зварювання. Точне прогнозування деформацій являє собою значну складність навіть для простих зварних конструкцій і ще більшу складність для об'єктів елементи яких з'єднуються послідовно.

Для моделювання зварювальних деформацій і залишкових напружень отримав широке застосування метод кінцевих елементів (МКЕ). Цей метод універсальний, оскільки дозволяє аналізувати інженерні конструкції зі складною геометрією, дає можливість досліджувати тривимірні задачі. МКЕ дозволяє практично повністю автоматизувати розрахунок механічних систем, хоча, як правило, потребує виконання великої кількості розрахункових операцій. Мережу кінцевих елементів будують без проміжків між з'єднуваними елементами конструкції. Сукупність з'єднаних між собою кінцевих елементів утворює розрахункову схему і є кінцево-елементною моделлю.

Результатом вирішення зв'язаної задачі термо-пружно-пластичності МКЕ буде розподіл температурних полів, напружень і пластичних деформацій в будь-якому перетині конструкції в будь-який момент часу.

#### **4.2.1. Вибір комп'ютерної моделі для аналізу напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань**

Проблема визначення напружено-деформованого стану виникла одночасно з початком практичного застосування зварювання для отримання нероз'ємних з'єднань.

Існуюче уявлення про напружено-деформований стан (НДС) при зварюванні в історичному плані формувалося, в основному, під впливом результатів, отримуваних розрахунковим шляхом при використанні різноманітних інженерних розрахункових методів наближеного визначення залишкового (виникаючого після зварювання і повного охолодження) НДС в геометрично простих з'єднаннях чи одномірних зварних конструкціях.

В багатьох наближених розрахункових методах визначення напружено-деформованого стану зварних конструкцій (Трочуна, Ніколаєва та ін.) для розрахунку термічного циклу зварювання застосовують аналітичні формули академіка Рикаліна М.М. [152], в яких не враховуються структурні перетворення, залежність механічних і теплофізичних властивостей металу від температури, а також приймається додатково цілий ряд спрощень, що обумовлюють ідеалізацію напружено-деформованого стану і, як наслідок, не завжди задовільну відповідність розрахункових і експериментальних результатів.

Вирішення задач механіки тіл що деформуються пов'язане з відомими математичними складнощами внаслідок наявності сингулярних точок. Більшість цих задач ефективно може бути вирішене числовими методами лише з використанням ЕВМ. Серед числових методів при вирішенні задач механіки руйнування найбільш широке розповсюдження отримав метод кінцевих елементів. Викликано це в першу чергу універсальністю методу, добре розробленою теорією і наявністю значної кількості розрахункових програм, що реалізують МКЕ.

Метод кінцевих елементів заснований на припущенні, що тіло можна представити у вигляді набору елементів, що з'єднані одне з одним лише у вузлах. Зв'язок вузлових зусиль з вузловими переміщеннями задається за допомогою

матриці жорсткості елемента. Об'єднання матриць жорсткості окремих елементів в глобальну матрицю жорсткості тіла дозволяє записати умови рівноваги тіла. При заданих діючих навантаженнях чи переміщеннях і при відомій глобальній матриці жорсткості, вирішення системи рівнянь рівноваги дозволяє знайти всі вузлові зусилля, а по ним напруження і переміщення в межах кожного елемента. так визначають напружено-деформований стан тіла [142].

Необхідно пам'ятати, що МКЕ – наближений метод. Точність рішень залежить від припущень, зроблених в межах типів елемента і сітки.

Дрібна сітка потрібна там, де є зміни напружень і деформацій. Більша – в областях з достатньо постійними за величиною напруженнями, або в зонах, які не цікавлять користувача.

Точність результатів знижується, якщо розміри сусідніх елементів в районі концентраторів напружень сильно відрізняються. Також на точність впливає сама форма кінцевих елементів.

В загальному вигляді схема вирішення задач механіки тіл що деформуються методом кінцевих елементів складається з наступних етапів:

- побудова геометричної моделі;
- створення сітки кінцевих елементів;
- моделювання граничних умов;
- числове рішення системи рівнянь;
- аналіз результатів.

В останні роки активно розвиваються розрахункові комплекси засновані на МКЕ (ABAQUS, ANSYS, SYSWELD, «SIMUFACT WELDING» та ін.), що дозволяють моделювати різноманітні процеси, в тому числі і утворення НДС при зварюванні, без вказаних вище припущень.

У зв'язку з цим, побудова і числова реалізація нових ефективних моделей процесу зварювання рухомим джерелом нагріву з урахуванням закріплення зварного з'єднання в складально-зварювальній оснастці будуть сприяти більш ефективному і обгрунтованому вирішенню задач механіки твердого здатного до

деформації тіла про напружено-деформований стан при зварюванні і подальшому розвитку методів розрахунку НДС зварних конструкцій з урахуванням впливу температури на термомеханічні властивості матеріалу, виду напруженого стану і тривалості нагріву.

Для вивчення причин, що викликають переміщення в зварних конструкціях необхідно проаналізувати напружено-деформований стан, який виникає в конструкціях зварених на рекомендованих в роботі [118] режимах з використанням закріплення пластин в жорсткій оснастці. Таке закріплення протидіє переміщенням пластин в процесі зварювання і сприяє виникненню зварювальних переміщень, які з'являються по закінченні зварювання і знятті закріплення. При використанні жорсткого закріплення в процесі зварювання і наступного розкріплення конструкції залишкові переміщення все ж утворюються, однак досягають значно менших величин, ніж при зварюванні без жорсткого закріплення.

Для виконання аналізу НДС, що виникає після гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом тонкої (5 мм) пластини з алюмінієвого сплаву 1561, був обраний програмний комплекс «Simufact welding». Це програмне забезпечення дозволяє виконати комп'ютерне моделювання зварювальних процесів при різних конфігураціях параметрів і умов зварювання. Для моделювання зварювального джерела застосовувалася модель J. Goldak [13].

#### **4.2.2. Проведення математичного моделювання напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням в порівнянні із іншими методами зварювання плавленням**

У даній роботі був проведений аналіз НДС пластин з алюмінієвого сплаву 1561 товщиною 5 мм, звареного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом із забезпеченням якісного формування шва при жорсткому



їх закріпленні з використанням складально-зварювальної оснастки що забезпечує мінімізацію НДС стикових зварних з'єднань. Для досягнення даної мети в роботі вирішувалися наступні задачі дослідження:

— вирішення методом кінцевих елементів зв'язаної температурної пружно-пластичної задачі про залишковий НДС при гібридному плазмово-дуговому нагріві стикового симетричного з'єднання рухомим зварювальним джерелом тепла по моделі J. Goldak [13];

— отримання розрахункових даних відносно характеру розподілу параметрів залишкового НДС в симетричному стиковому зварному з'єднанні з алюмінієвого сплаву 1561;

— аналіз ефективності гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з точки зору забезпечення якісного формування шва при жорсткому закріпленні зварюваних пластин.

Геометрична модель стикового зварного з'єднання створена на основі розмірів, знятих з макрошліфа (рис. 4.16 б). Для розрахунку в програмному комплексі «Simufact welding» створена кінцево-елементна модель (рис. 4.16,в) стикового зварного з'єднання з двох пластин алюмінієвого сплаву 1561 розмірами  $400 \times 200 \times 5$  мм.

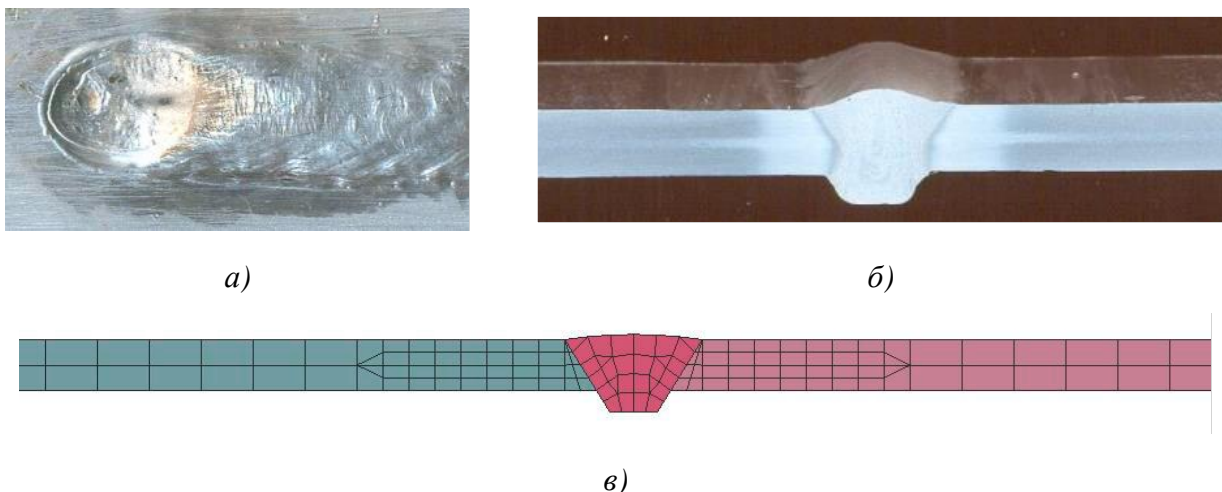


Рисунок 4.16 Зварювальна ванна (а), макрошліф поперечного перетину зварного з'єднання (б) і кінцево-елементна модель (в) з'єднання пластин з алюмінієвого сплаву 1561  $400 \times 200 \times 5$  мм.

Для розрахунку параметрів залишкового НДС зі стандартної бази розрахункового програмного комплексу обрано присадковий дріт, який за хімічним складом і механічними властивостями є аналогом сплаву 1561. Підкладка дозволяє якісно сформувати зворотню сторону зварного з'єднання, а дві притискні пластини оснастки забезпечують жорстку фіксацію зварюваних пластин. Використані для розрахунку параметри режиму зварювання, що впливають на величину погонної енергії приведені в таблиці 4.7. Коефіцієнти корисної дії (ККД) процесів плазмового і дугового зварювання взяті з роботи [10]. Моделювання процесу зварювання виконано з урахуванням геометричних параметрів зварювальної ванни (табл. 4.8) і просторового положення теплового джерела.

Таблиця 4.7 Параметри режиму гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом пластин зі сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм) з дротом  $\varnothing 1,6$  мм з використанням аргону у якості плазмоутворюючого та захисного газів (18-20 л/хв).

Плазма			Дуга плавкого електроду (MIG)			Швидкість зварювання, мм/хв
Зварювальний струм стисненої дуги, А	Напруга стисненої дуги, В	ККД стисненої дуги	Зварювальний струм дуги плавкого електроду, А	Напруга на дузі плавкого електроду, В	ККД дуги плавкого електроду	
100	24,6	0,6	165	17,9	0,85	600
Погонна енергія 148 Дж/мм			Погонна енергія 251 Дж/мм			
Повна погонна енергія ~400 Дж/мм						

Таблиця 4.8 Геометричні параметри зварювальних ванн для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм)

	Довжина, мм	Ширина, мм	Глибина, мм
Плазма	10	8	5
Дуга плавкого електроду (MIG)	12	12	3,5

В результаті вирішення термо-пружно-пластичної задачі отримали температурні поля для досліджуваного симетричного стикового зварного з'єднання з алюмінієвого сплаву 1561 розмірами  $400 \times 400 \times 5$  мм (рис. 4.17, б). Аналіз розподілу температурних полів при наявності фіксуєючої тепловідводної оснастки показав, що на відстані  $\sim 50$  мм від осі зварного шва температура складає близько  $100^\circ\text{C}$ . В обраних умовах закріплення оснастка відбирає на себе тепло, чим зменшує область з можливістю розвитку пластичних деформацій. Подальше зменшення відстані між фіксуєючими пластинами ускладнене в зв'язку з розмірами зварювальної головки [109]

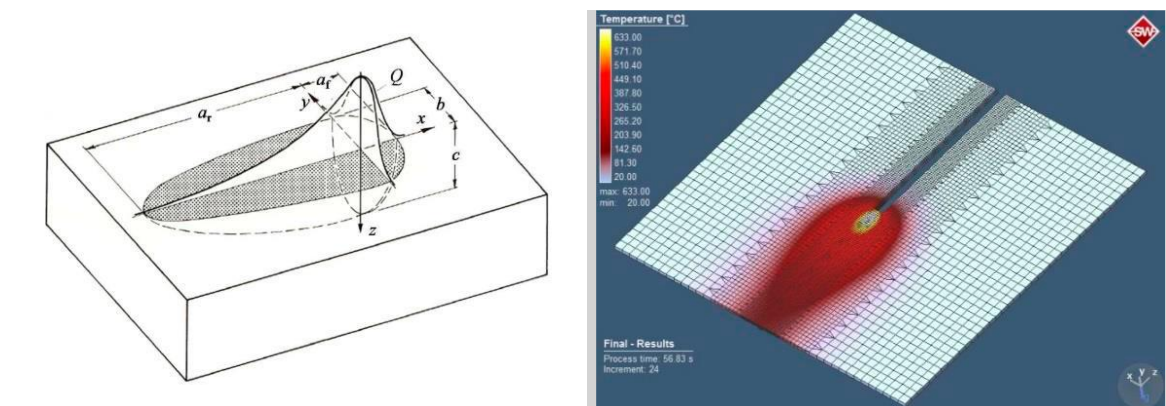


Рисунок 4.17 Схема (а) моделі розподіленого об'ємного джерела нагріву, що має форму подвійного еліпсоїду [13], і результат (б) моделювання температурних полів плазмово-дугового зварювання сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм) в програмному комплексі «Simufact welding».

Дія фіксуєючої оснастки в кінцевоелементній моделі реалізована жорстким закріпленням зварюваних пластин у площині. При цьому до розкріплення зразка з жорсткої оснастки рівень поздовжніх напружень у вільній від закріплення зоні (в області зварного шва) досить високий ( $\sim 330$  МПа), а в зоні дії оснастки напруження майже нульові ( $\sim 10$  МПа). Розкріплення зварного з'єднання призводить до перерозподілу напружень, характеризується зниженням їх рівня в області зварного шва до  $\sim 180$  МПа і утворенням стискаючих напружень за межами зони пластичних деформацій порядку  $-50$  МПа з наступним переходом в область розтягнення  $\sim 5$  МПа на правому торці паралельно зварному шву (рис. 4.18).

Жорстка фіксуєча оснастка в процесі охолодження призводить до утворення значних (близьких до межі міцності сплаву – 377 МПа) поздовжніх напружень на осі шва. Це пов'язано з наявністю фіксуєчої оснастки, яка запобігає переміщенню закріплених частин пластини, внаслідок чого можливі переміщення тільки вільної від закріплення області, що в порівнянні зі зварюванням у вільному стані сприяє збільшенню ширини пластичної зони. Розкріплення зварного з'єднання після зварювання дозволяє знизити до ~40% рівень напружень на осі шва.

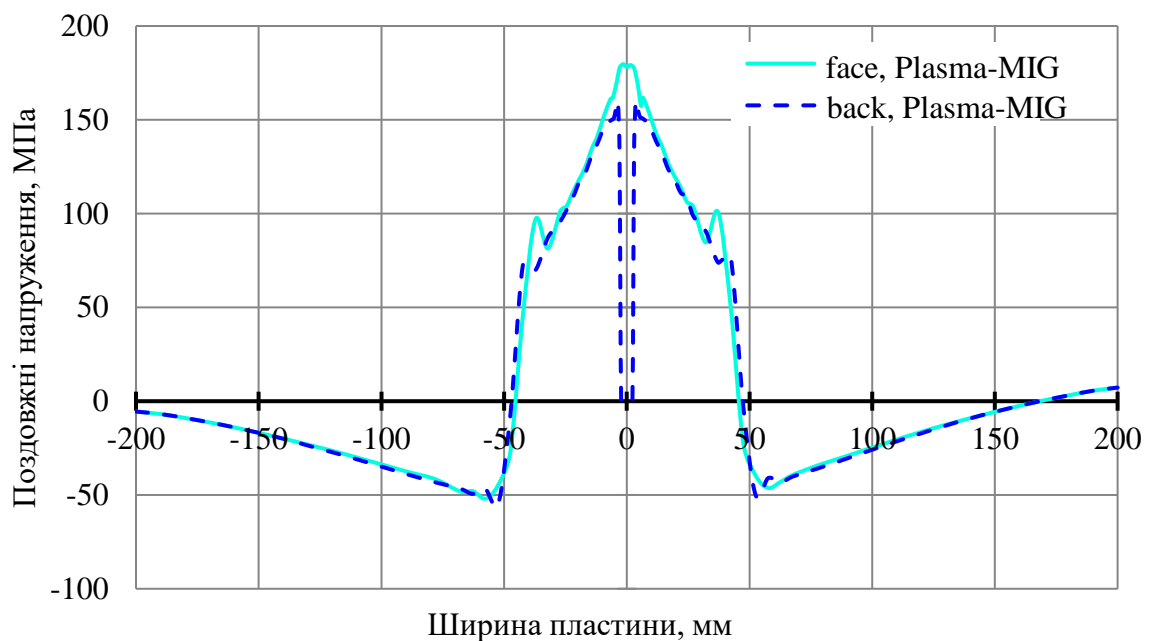


Рисунок 4.18 Розподіл поздовжніх нормальних напружень в середньому перетині пластини після розкріплення з оснастки (тут і далі лицьова – «face PAW-MIG» і зворотня – «back PAW-MIG» сторони зварного з'єднання)

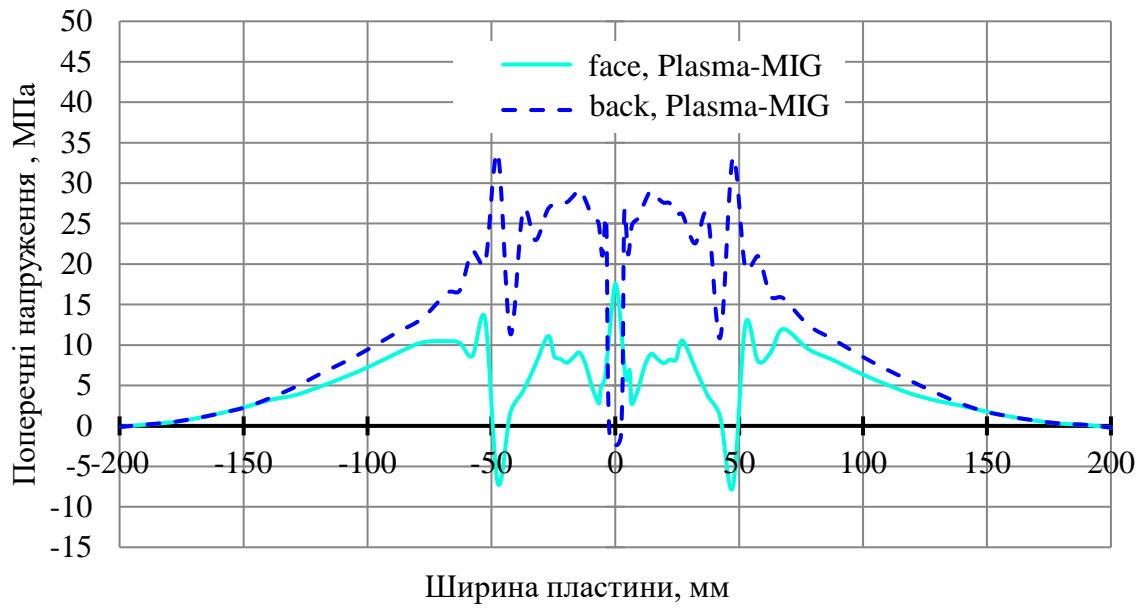
Поля поперечних нормальних напружень при дії фіксуєчої оснастки мають мінімальне значення ~30 МПа на поверхнях контакту з оснасткою. В межах вільної від закріплення області напруження значно більші – до ~330 МПа, на осі шва дещо нижче – до ~260 МПа. Це можна пояснити розвитком поперечних пластичних деформацій розтягнення, виниклих в процесі охолодження через неможливість вільного поперечного скорочення. Розкріплення зварного з'єднання призводить до значного (до ~93%) зниження рівня поперечних напружень (з 260 МПа до ~20 МПа) на осі шва.

Дослідження розподілу поперечних нормальних напружень в середньому поперечному і поздовжньому перетинах для лицьової і зворотної поверхонь зварного з'єднання показали, що на вільних поверхнях (торцьові поверхні вздовж зварного шва) поперечні напруження рівні нулю (рис. 4.19,а), що добре погоджується з теорією напружень і деформацій [151, 132].

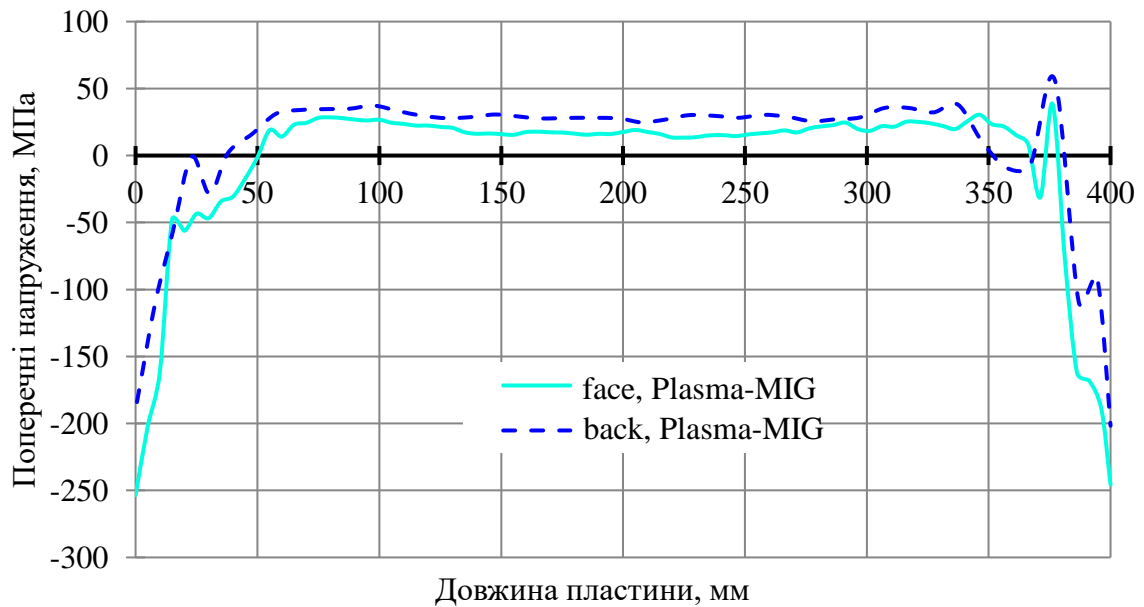
Середня величина напружень на лицьовій поверхні не перевищує 15 МПа, а на зворотній – менше 30 МПа. При цьому на обох поверхнях в місцях закріплення зварюваних пластин можна спостерігати стрибки напружень – до, приблизно, 7,6 МПа на лицьовій стороні і 11...33 МПа на зворотній стороні з'єднання. На осі зварного шва спостерігається стрибок до 26 МПа на лицьовій стороні і провал до, приблизно, -1,1 МПа на зворотній (рис. 4.19,а). Такі зміни можна пояснити впливом фіксуючої оснастки на свободу переміщень зварюваних кромek в поперечному напрямку. В середній частині з'єднання величина поперечних напружень рівна приблизно 17...19 МПа на лицьовій поверхні і 35...38 МПа на зворотній (рис. 4.19,б). Початок зварного шва характеризується стисненням до -245 МПа, а закінчення зварного шва – до -200 МПа на лицьовій і зворотній поверхнях зварного з'єднання.

Для лицьової і зворотної поверхонь зварного з'єднання характер зміни еквівалентних пластичних деформацій в середньому поперечному перетині практично однаковий за виключенням точок, що лежать на осі зварного шва (рис. 4.20).

На лицьовій поверхні, в точках на осі зварного шва по всій довжині зварного з'єднання, за виключенням прикінцевих областей, спостерігаються пікові значення деформації  $\sim 0,1$ , у той час як на зворотній стороні у цих же точках величина деформації знижується до 0. В середньому по ширині пластичної зони величина еквівалентних пластичних деформацій не перевищує  $\sim 0,02$ , а їх розподілення можна вважати практично рівномірним, за виключенням точок на осі шва.



a)



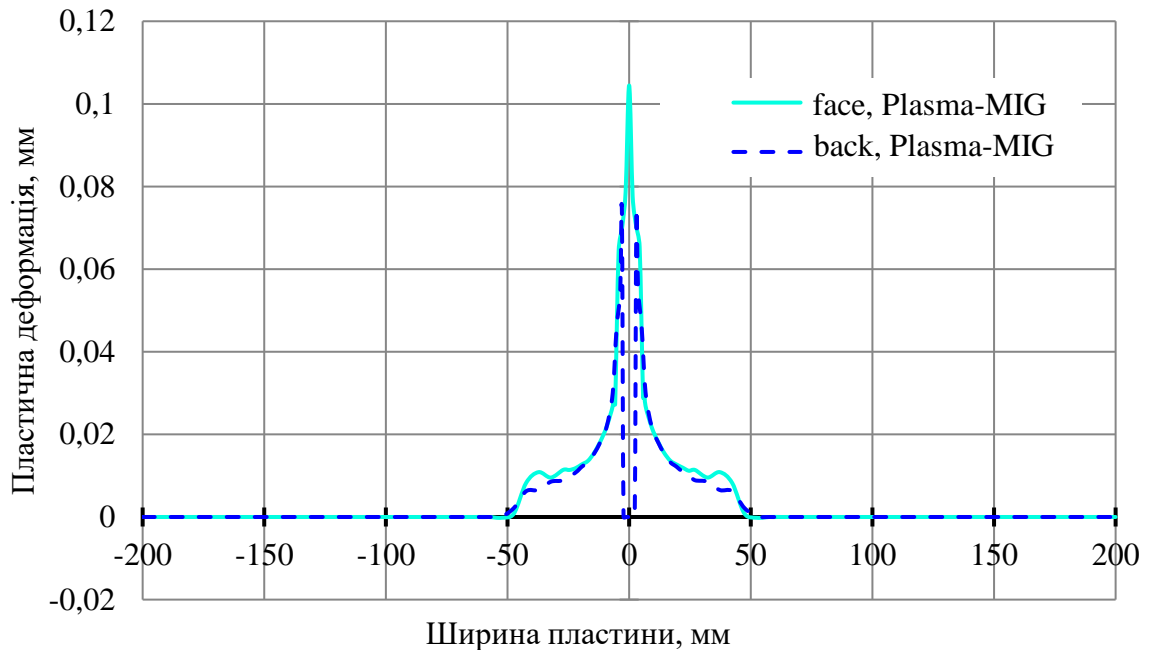
б)

Рисунок 4.19 Розподілення поперечних нормальних напружень в середньому поперечному перетині (а) і по довжині (б).

Межі зони в якій розвивалася пластична деформація є однаковими зліва і справа від осі зварного шва внаслідок симетрії і складають по 50 мм.

Дія фіксуєчої оснастки під час зварювання та охолодження приводить до мінімального (- 0,05...0,03 мм) поздовжнього вкорочення зафіксованих областей зварного з'єднання і максимальним поздовжнім вкороченням початку (0,46 мм)

і кінця (- 0,40 мм) зварного шва. Після розкріплення з оснастки поздовжні вкорочення збільшуються: до 0, 12 мм в областях, де діяла оснастка, а також до 0,49 мм на початку і – 0,54 мм у кінці зварного шва.



*Рисунок 4.20 Розподіл еквівалентних пластичних деформацій по Мізесу в середньому поперечному перетині.*

По ширині зварного з'єднання область максимальних переміщень відповідає базі закріплення зварюваних пластин. Розподіл поздовжніх переміщень по довжині шва для лицьової та зворотної сторін зварного з'єднання після розкріплення з оснастки показує, що обидві сторони вкорочуються практично симетрично відносно середини шва (рис. 4.21).

Поля поперечних переміщень при наявності фіксуючої жорсткої оснастки відповідають практично рівномірному (0,39 мм) поперечному вкороченню на всій довжині вільної від оснастки області зварного з'єднання. Після розкріплення зварного з'єднання права і ліва частини симетрично вкоротилися на 0,5 мм.

Найменші за величиною поперечні переміщення в середньому поперечному перетині зварного з'єднання після розкріплення з жорсткої оснастки (-0,14 мм ліворуч і 0,08 мм праворуч) виникають на торцях, паралельних осі шва, а збільшення починається на межі хони пластичних

деформацій (рис. 4.22) і досягає максимуму для точок, розташованих в зоні термічного впливу (-0,38 мм ліворуч і 0,32 мм праворуч).

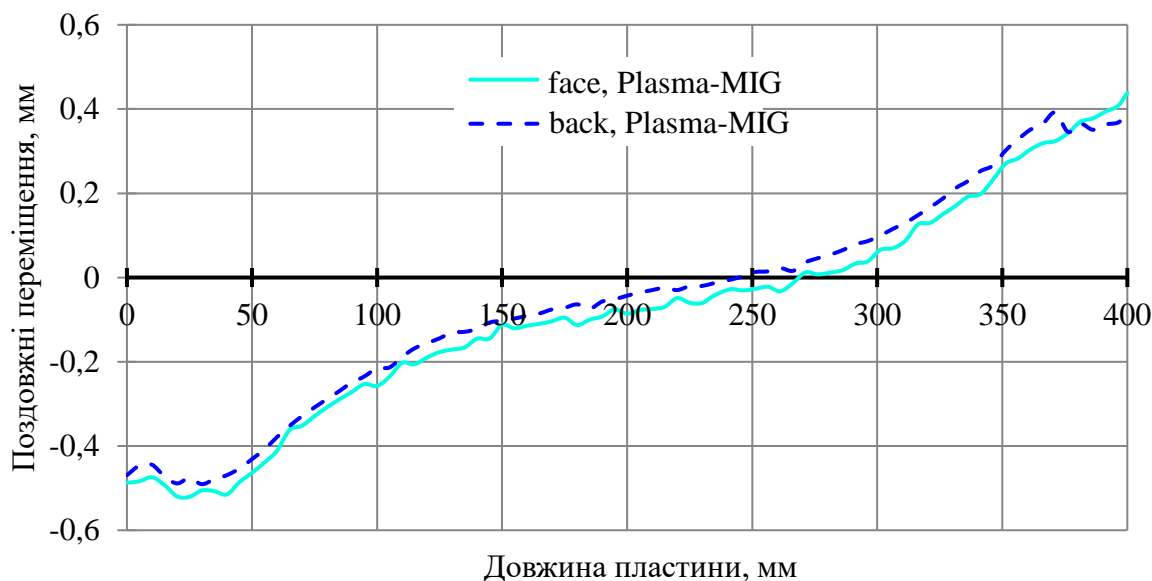


Рисунок 4.21 Розподілення поздовжніх переміщень по довжині шва.

При цьому поперечні вкорочення на лицьовій і зворотній сторонах з'єднання ідентичні. Нерівномірність розподілу переміщень по ширині з'єднання пов'язана з нерівномірністю розподілу температур по ширині зварного з'єднання, що викликає вигин пластин з площини в незакріпленій частині з'єднання.

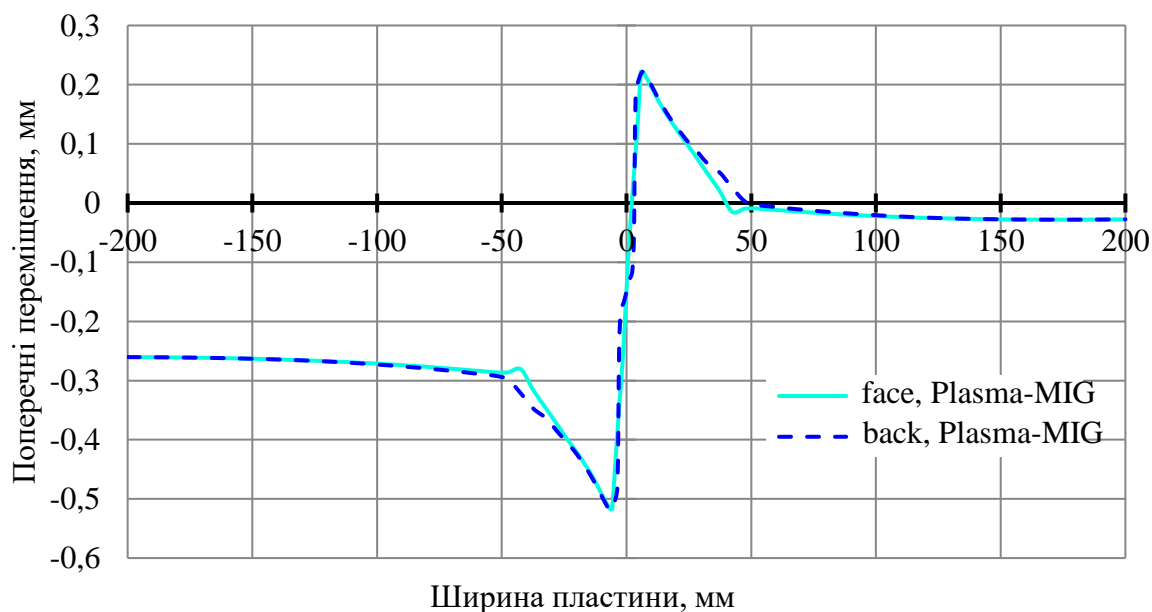


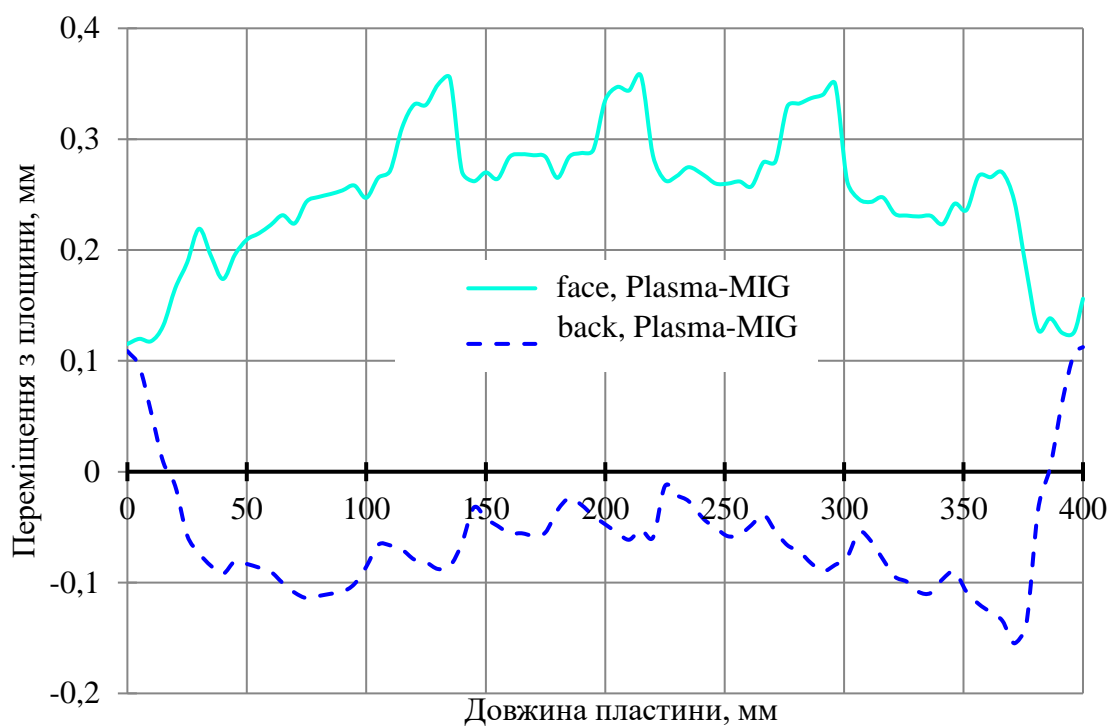
Рисунок 4.22 Розподіл поперечних переміщень в середньому поперечному перетині



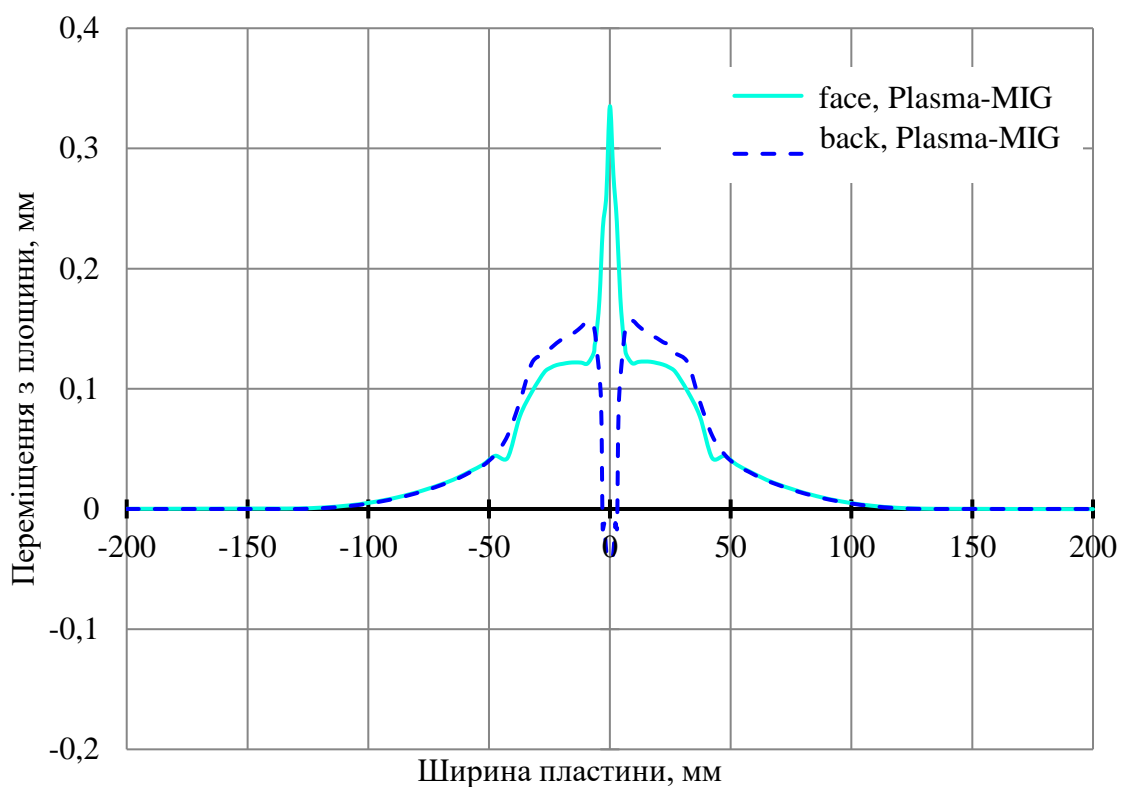
Переміщення з площини зварюваних листів при наявності жорсткої оснастки, в межах області вільної від закріплення, складають від 0,13 мм на краях до 0,37 мм на осі шва. В областях контакту зварюваних пластин з оснасткою переміщення мінімальні (0,03 мм). Після розкріплення зварного з'єднання відбувається розширення зони з величинами переміщень 0,09 мм по всій довжині з'єднання, а їх значення на осі шва не перевищують 0,35 мм.

Після розкріплення зварного з'єднання з оснастки на лицьовій стороні величина переміщень з площини по довжині шва досягає 0,36 мм в середній частині і 0,11...0,15 мм на початку і в кінці шва відповідно (рис. 4.23а). На зворотній стороні зварного з'єднання величина переміщень коливається приблизно від -0,06 до -0,09 мм в середній частині зварного шва і дещо більше (0,1 мм) на початку і в кінці зварного шва. Переміщення на лицьовій стороні позитивні і більші за величиною, ніж на зворотній, де вони негативні і не перевищують -0,1 мм в середній частині шва (рис. 4.23,а). Такий розподіл свідчить про наявність вигину поздовжньої осі зварного з'єднання з утворенням «випучування» середини з'єднання і «будиночків» на краях через поперечну усадку в області зварного шва. Переміщення з площини по ширині зварного з'єднання після розкріплення з оснастки досягають на лицьовій стороні 0,34 мм на осі шва і -0,02 мм на зворотній стороні (рис. 4.23, б).

На обох сторонах зварного з'єднання характер розподілу переміщень в області дії оснастки однаковий. У вільній від оснастки зоні зварного з'єднання відбувається витіснення металу на лицьову вільну сторону через поперечну усадку серединних шарів, що охолоджуються. На зворотній стороні зварного з'єднання такі переміщення неможливі через наявність перешкоджаючої цьому підкладки. Такі розподілення переміщень з площини в середньому поперечному перетині зварного з'єднання і вздовж по осі шва свідчать про наявність вигину не закріпленої в оснастці області зварного з'єднання опуклістю вгору.



a)



б)

Рисунок 4.23 Розподіл переміщень з площини по довжині (а) і ширині (б) зварного з'єднання.

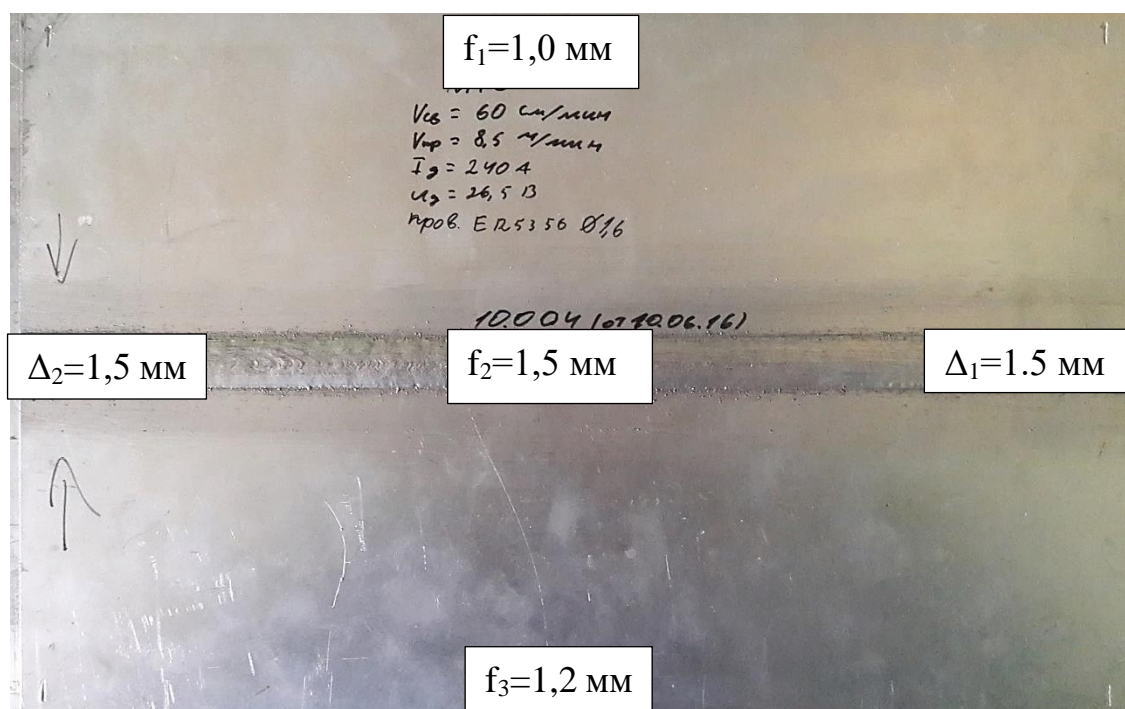
### 4.3 Проведення експериментальних досліджень напружено-деформованого стану стикових зварних з'єднань, отриманих гібридним плазмово-дуговим зварюванням в порівнянні із іншими методами зварювання плавленням

Досліджували напружено-деформований стан зварних з'єднань, виконаних дуговим зварюванням плавким електродом (MIG), та гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом (PLASMA-MIG). У якості об'єкту дослідження використовували зварні з'єднання з алюмінієвого сплаву 1561 розмірами 320×205×5 мм з поздовжнім стиковим зварним швом (рис. 4.24). Зовнішній вигляд макрошліфів зварних з'єднань показаний на рис. 4.25. Режими зварювання і геометричні характеристики пластин представлені в таблиці 4.9

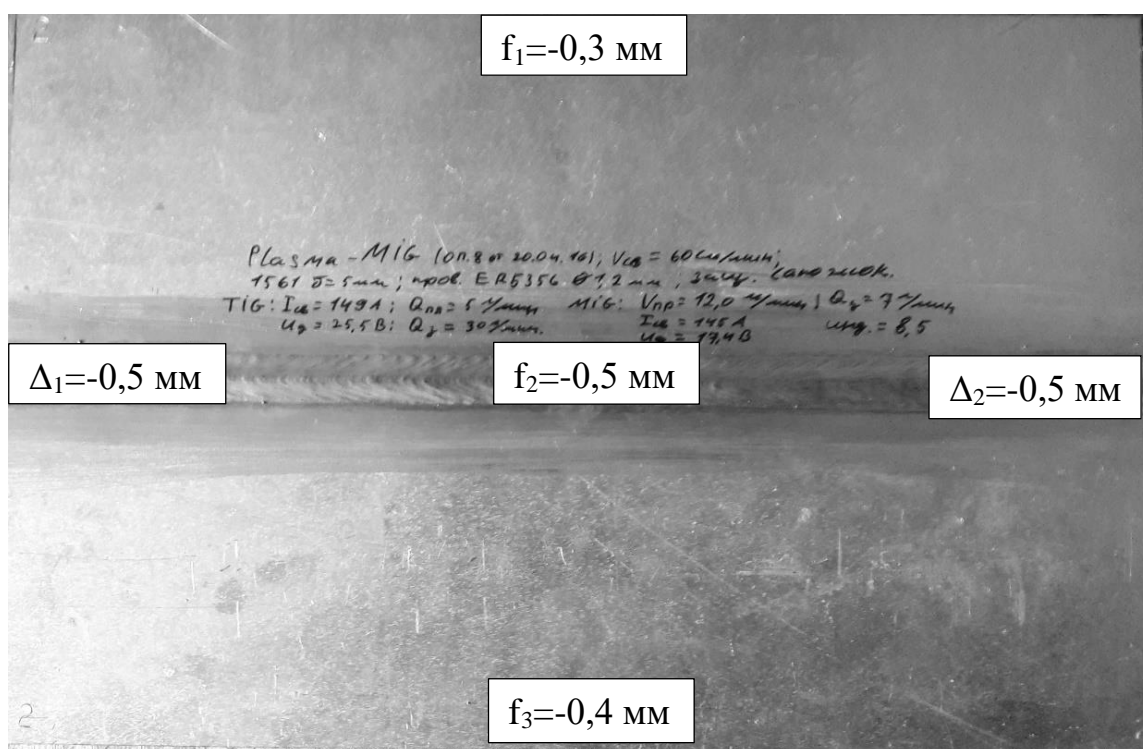
Таблиця 4.9 Режими зварювання (MIG), та PLASMA-MIG і геометричні характеристики зварних пластин зі сплаву 1561

Вид зварювання											
MIG						Plasma-MIG					
V <sub>зв</sub> , мм/с	I <sub>д</sub> , А	U <sub>д</sub> , В	d <sub>др</sub> , мм	f <sub>1</sub> / f <sub>2</sub> / f <sub>3</sub> , мм	Δ <sub>1</sub> / Δ <sub>2</sub>	V <sub>зв</sub> , мм/с	I <sub>д</sub> , А	U <sub>д</sub> , В	d <sub>др</sub> , мм	f <sub>1</sub> / f <sub>2</sub> / f <sub>3</sub> , мм	Δ <sub>1</sub> / Δ <sub>2</sub>
10	240	26,5	1,6	1,0/ 1,5/ 1,2	1,5/ 1,5	10	149- 145	25,5- 17,4	1,2	-0,3/ -0,5/ -0,4	-0,5/ -0,5

Напружений стан зразків поздовжніх стикових зварних з'єднань вимірювали безконтактним методом електронної спекл-інтерферометрії (див. розділ 2)



а)



б)

Рисунок 4.24 Зовнішній вигляд та геометричні характеристики зварних пластин зі сплаву 1561, де  $f_1 \dots f_3$  — поздовжні прогини,  $\Delta_1 \dots \Delta_2$  — поперечні прогини, відповідно, на початку і в кінці з'єднання: а) зварювання MIG; б) зварювання Plasma-MIG.

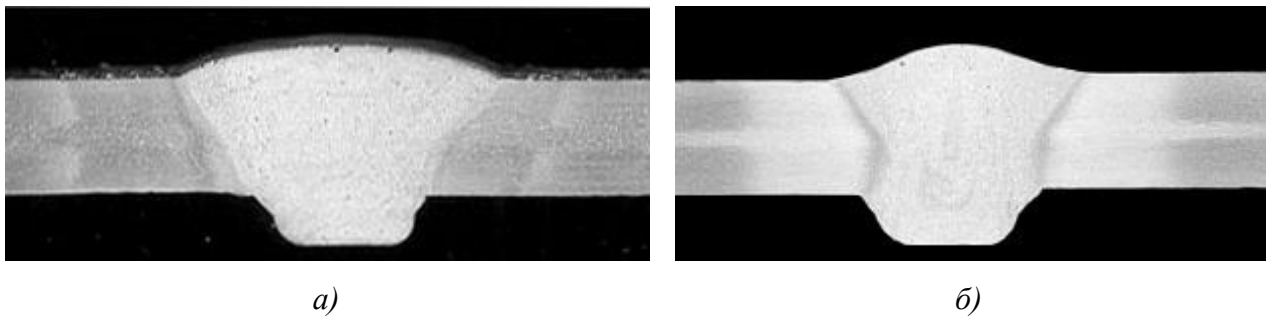
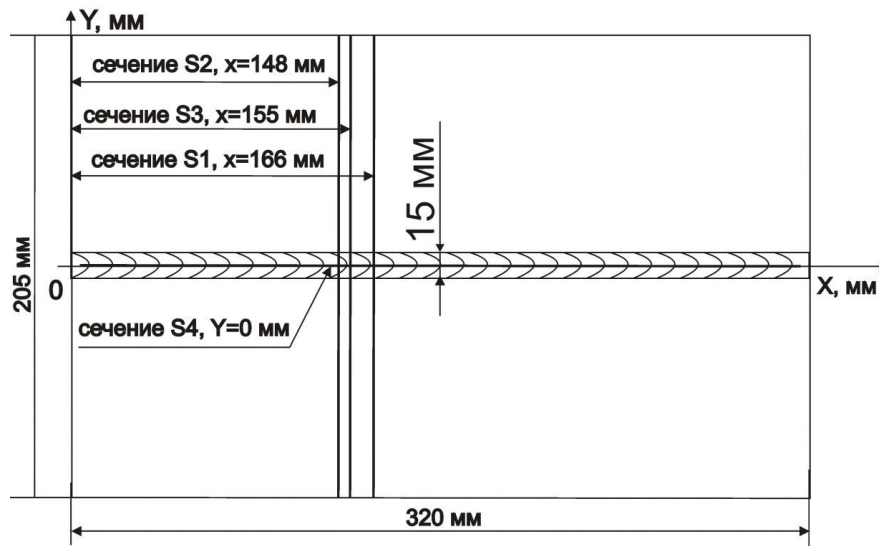


Рисунок 4.25 Зовнішній вигляд макрошліфів зварних з'єднань пластин зі сплаву 1561: а) зварювання MIG; б) зварювання Plasma-MIG.

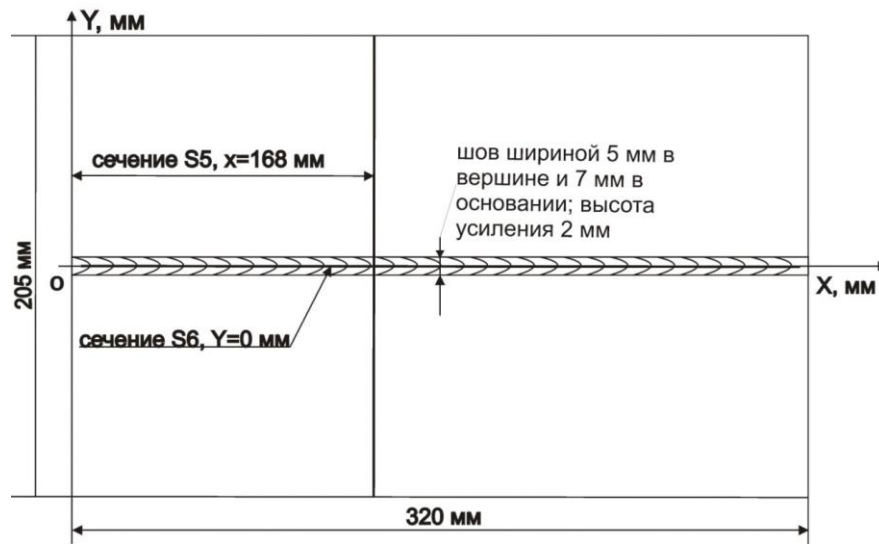
Вибір методу обумовлений необхідністю збереження цілісності зразка після реєстрації його початкового напруженого стану. Співставляючи параметри напруженого стану і параметри залишкової формозміни на конкретному зразку зварного з'єднання, виконаного зварюванням MIG і гібридним зварюванням Plasma-MIG, визначали ефективність кожного з процесів з позицій напружено-деформованого стану.

Геометричні розміри пластин і зварного з'єднання, виконаного зварюванням MIG, а також схеми вимірювання залишкових напружень, представлені на рис. 4.26. Вимірювання поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  плоского напруженого стану виконували в трьох перетинах S1-S3 на лицьовій стороні пластини (рис. 4.26, а), і в одному перетині S5 — на зворотній (рис. 4.26, б). Дублювання вимірювань  $\sigma_x$  на лицьовій стороні пластини здійснювали з метою забезпечення достовірності результатів. Значення поперечної компоненти  $\sigma_y$  реєстрували лише на лицьовій стороні в перетині реєстрували лише на лицьовій стороні в перетині S3.

Аналізуючи дані таблиці 4.9 і рисунків 4.24,а та 4.25,а можна бачити, що зразок, виконаний зварюванням MIG має поздовжні прогини f1-f3 в діапазоні значень 1,0-1,5 мм, направлені в сторону від лицьової поверхні. Значення поперечних прогинів  $\Delta 1$ - $\Delta 2$  стабільні по довжині зварного з'єднання і складають 1,5 мм.



а)



б)

Рисунок 4.26 Схеми вимірювання залишкових напружень на стикових зварних з'єднаннях з алюмінієвого сплаву 1561, виконаних зварюванням MIG та Plasma-MIG: а) зовнішньої сторони, де перетини S1-S3 вимірювання поперек шва, S4 — вздовж лінії шва; б) S5 — поперек шва, S6 — вздовж шва.

Особливості даної формозміни визначаються формою проплавлення шва (рис. 4.25 а), що характеризується неспівпадінням лінії прикладання усадкового вкорочення і нейтральної осі перетину. Результатом даної невідповідності є згинаючий момент, що викликає короблення пластини в поздовжньому напрямку. Стабільність значень  $\Delta$  по довжині пластини пов'язане з її геометричними характеристиками, що забезпечують рівномірне

тепловідведення з поверхні протягом зварювального термомеханічного циклу.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень  $\sigma_x$  в поперечних перетинах зварної пластини після MIG зварювання представлений на рисунку 4.27.

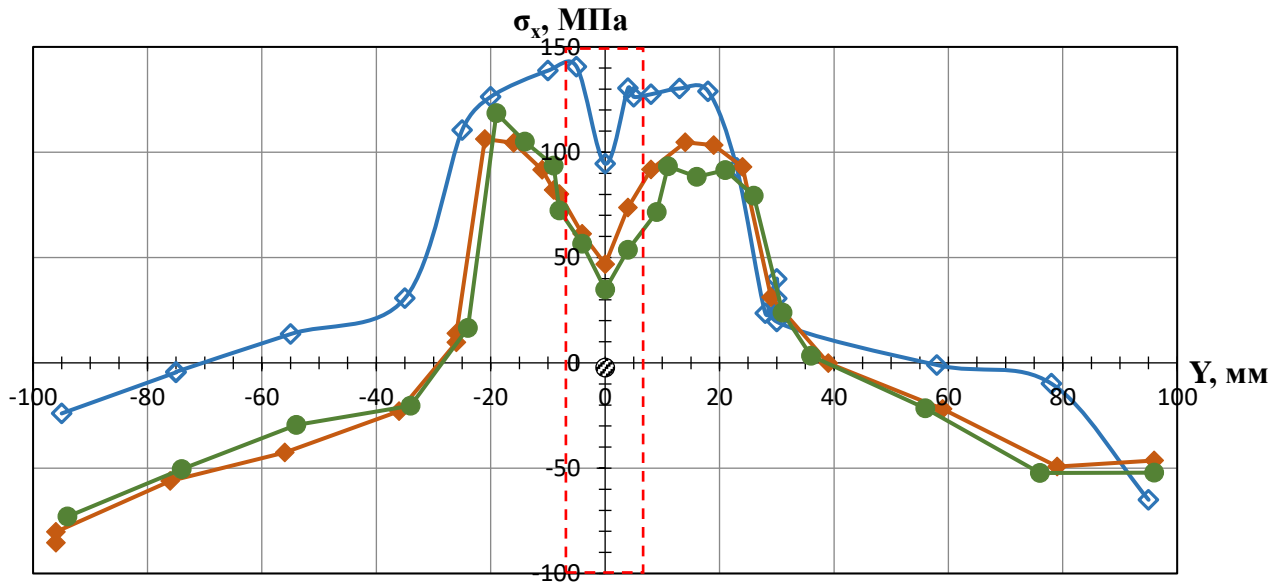
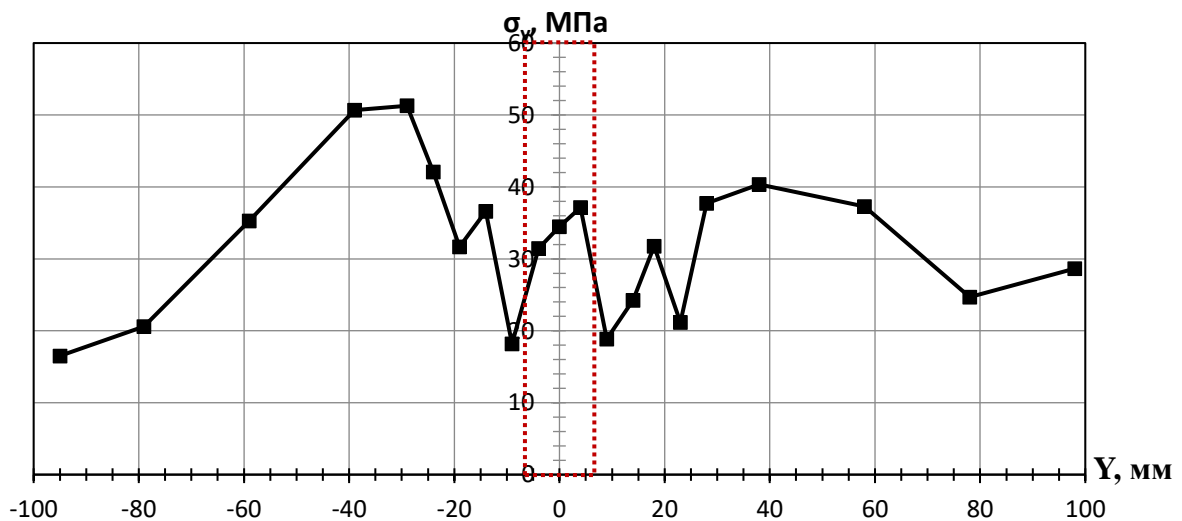


Рисунок 4.27 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням MIG, в поперечних перетинах S1 - ◆ та S2 - ● (схема на рис. 4.26 а і зворотній стороні – в перетині S5 - ◆ (схема на рис. 4.26 б), де штриховою лінією показані контури зварного шва (лицьової сторони).

З рисунку 4.27 можна бачити, що в центрі шва на лицьовій та зворотній поверхнях пластини має місце локальне зниження розтягуючих напружень  $\sigma_x$  відповідно до 45...50 МПа і 100 МПа. Пікові значення  $\sigma_x$  на лицьовій і зворотній поверхнях пластини мають місце в зоні сплавлення і сягають відповідно 100 МПа і 140 МПа. Реактивні стискаючі  $\sigma_x$  на лицьовій і зворотній поверхнях досягають максимальних значень на поздовжніх кромках пластини, відповідно, -50...-80 МПа і -25...-60 МПа. Дана форма епюри стискаючих  $\sigma_x$  пов'язана з малою шириною пластини, при якій стискаючі напруження в її поперечному перетині не досягають нульових значень. При співставленні епюр  $\sigma_x$  на обох сторонах пластини можна бачити, що має місце значна згинаюча складова напружень, що підтверджує отриману форму короблення зразка.

Результати оцінки поперечної складової розтягуючих напружень  $\sigma_y$  представлені на рисунку 4.28, з якого можна бачити, що рівень  $\sigma_y$  значно нижче, ніж  $\sigma_x$  і не перевищує 40...50 МПа, а знак напружень не змінюється вздовж вимірюваного перетину. При цьому має місце локальне зниження  $\sigma_y$  на лінії сплавлення, а пікові значення напружень відповідають зонам перетину на відстані 30...40 мм від центру шва.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень  $\sigma_x$  в зварній пластині вздовж лінії шва (рис. 4.29) підтверджують результати отримані для поперечного перетину S1 (рис. 4.27). З рисунку 4.29 можна бачити, що епюри  $\sigma_x$  на обох сторонах пластини характеризуються різницею пікових значень, що визначає значну згинаючу складову напружено-деформованого стану пластини і підтверджує характеристики її формозміни.



Рисунк 4.28 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_y$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням MIG, в поперечному перетині S3 (схема на рис. 4.26), де штриховою лінією показані контури зварного шва.

Аналізуючи дані таблиці 4.9 та рисунків 4.24,б і 4.25,б, можна бачити, що зразок виконаний гібридним плазмово-дуговим зварюванням Plasma-MIG, має поздовжні прогини f1-f3 зі значеннями -0,3...-0,5 мм, направлені в сторону до лицьової поверхні. Значення поперечних прогинів  $\Delta 1$ - $\Delta 2$  стабільні по довжині зварного з'єднання і також рівні -0,5 мм. Особливості даної формозміни



визначаються формою проплавлення шва (рис. 4.25,б), що характеризується практичним співпадінням лінії прикладення усадкового вкорочення і нейтральної осі перетину зварного шва. При порівнянні форми шва на рисунках 4.25,а і 4.25,б, можна бачити, що площа перетину зварного шва при Plasma-MIG зварюванні на 30% менша, ніж при MIG зварюванні. З рисунку 4.25 видно, що пластина виконана Plasma-MIG зварюванням характеризується меншим об'ємом поздовжнього усадкового вкорочення металу шва і, відповідно, меншим значенням поздовжньої усадкової сили  $P_{yc}$ , ніж зразок після зварювання MIG.

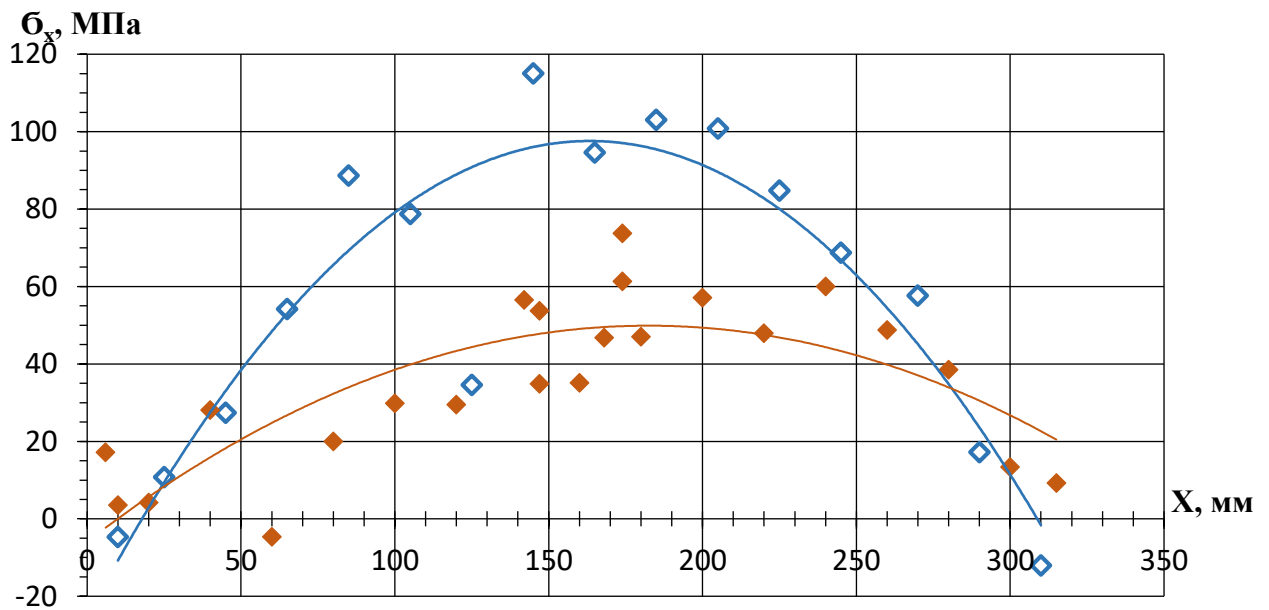


Рисунок 4.29 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням MIG, в поздовжньому перетині вздовж лінії шва S4 -  $\blacklozenge$  і зворотній в перетині S6 -  $\blacklozenge$  (схеми на рис. 4.26).

Враховуючи практичне співпадіння лінії прикладання  $P_{yc}$  і поздовжньої нейтральної осі, а також менше значення  $P_{yc}$ , можна зробити висновок, що пластина, зварена методом Plasma-MIG, піддається значно меншому згинаючому моменту, ніж після MIG. Даний факт пояснює меншу величину (до трьох разів) короблення пластини в поздовжньому напрямку, ніж при зварюванні MIG. Стабільність  $\Delta$ , по довжині пластини, як і їх малі значення після Plasma-MIG зварювання, пов'язані з формою шва, що характеризується більш рівномірним (у порівнянні з MIG) проплавленням по товщині пластини, а також з

геометричними характеристиками зразка, які забезпечують стабільне тепловідведення з його поверхні протягом зварювального термомодеформаційного циклу.

Розподіл залишкових поздовжніх напружень  $\sigma_x$  в поперечних перетинах зварної пластини після Plasma-MIG зварювання відповідно на її лицьовій та зворотній сторонах представлені на рисунках 4.30 і 4.31, а їх співставлення на рисунку 4.32. З рисунків можна бачити, що в центрі шва на лицьовій і зворотній поверхнях пластини має місце локальне зниження розтягуючих  $\sigma_x$  відповідно до 45...50 МПа і 100 МПа. Пікові значення  $\sigma_x$  на лицьовій і зворотній поверхнях мають місце в зоні сплавлення і досягають відповідно 140 і 150 МПа. Реактивні стискаючі  $\sigma_x$  на лицьовій і зворотній поверхнях досягають максимальних значень на поздовжніх кромках пластини -20...-40 МПа. Дана форма епюри стискаючих  $\sigma_x$ , як і у випадку зварювання MIG, пов'язана з малою шириною пластини, при якій стискаючі напруження в її поперечному перерізі не досягають нульових значень. При співставленні епюр  $\sigma_x$  на обох сторонах пластини можна бачити, що, на відміну від MIG зварювання, згинаюча складова напружень в реактивній зоні епюри незначна, що визначає меншу величину короблення зразка порівняно з MIG зварюванням (табл. 4.9).

Варто відмітити, що при аналізі залишкових напружених станів пластин, виконаних методами MIG та Plasma-MIG, епюри  $\sigma_x$  яких представлені відповідно на рисунках 4.27 та 4.32, можна бачити деяку невідповідність між рівнем розтягуючих напружень і значеннями прогинів. Так, пікові значення розтягуючих  $\sigma_x$  для даних способів зварювання, на відміну від значень прогинів, досить близькі, як і величини згинаючої складової напружень в активній зоні (в центрі шва). Даний факт можна пояснити малою поздовжньою жорсткістю досліджуваних зварних пластин, а також особливостями напружено-деформованих станів, які задаються MIG та Plasma-MIG зварюванням. Можна бачити, як згадано вище, епюри стискаючих  $\sigma_x$  в реактивній зоні напружень виходять на вільні поздовжні крайки (рис. 4.27 та 4.32). При цьому значення напружень на крайках пластини при зварюванні Plasma-MIG істотно нижче, ніж

при MIG, що викликає її менші поздовжні прогини і, відповідно, більш високий рівень розтягуючих  $\sigma_x$ . Таким чином рівень розтягуючих  $\sigma_x$  в зігнутій пластині після MIG зварювання співставний з рівнем  $\sigma_x$  в плоскій пластині після Plasma-MIG. Можна зробити висновок, що при співставленні напружених станів пластин, виконаних Plasma-MIG і MIG зварюванням, величини прогинів у яких будуть рівними, значення  $\sigma_x$  в останній будуть вищі.

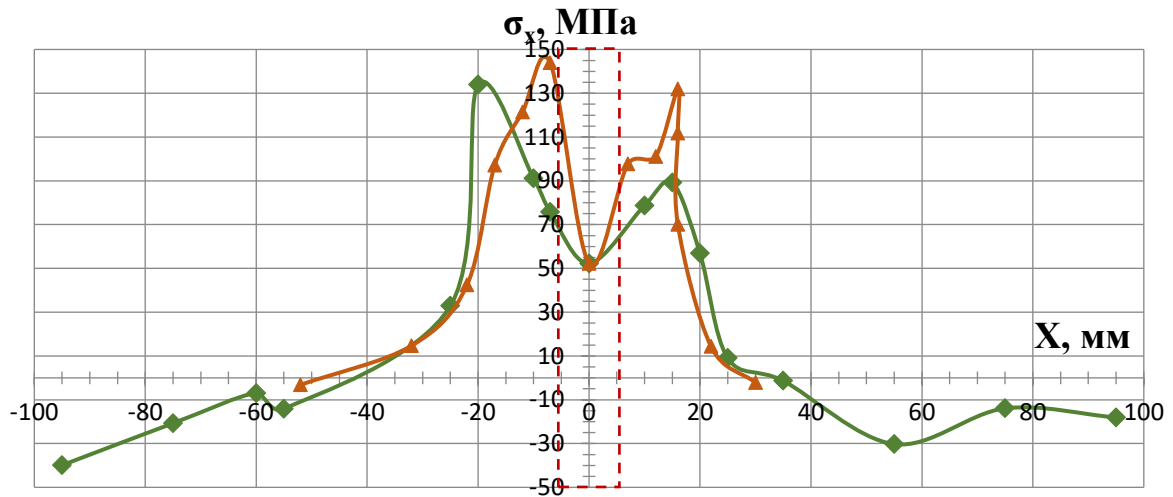


Рисунок 4.30 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням Plasma-MIG, в поперечних перетинах S1 - ▲, S2 - ◆ (схеми на рис. 4.26,а), де штриховою лінією показані контури зварного шва .

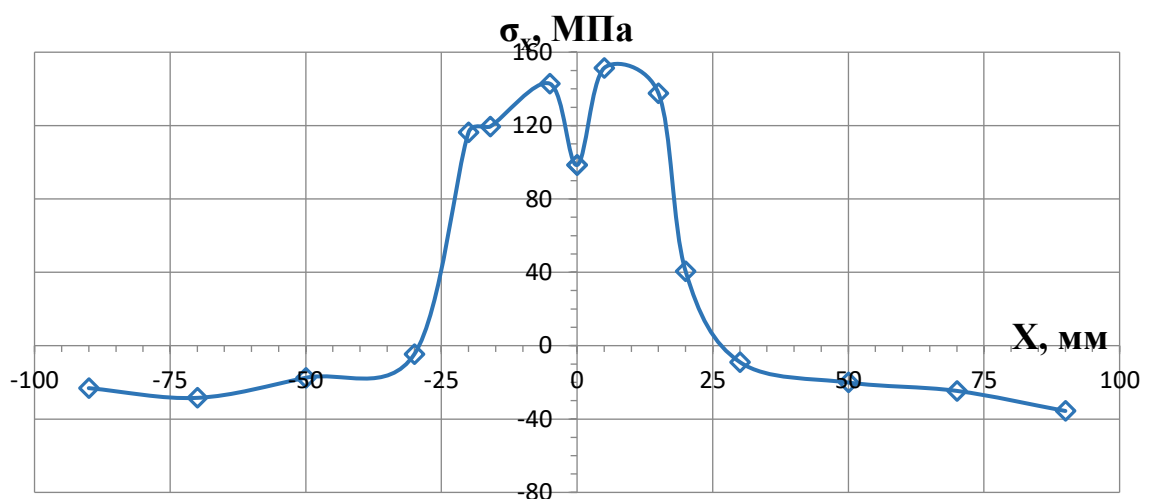


Рисунок 4.31 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на зворотній стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням Plasma-MIG, в поперечному перетині S5 - ◆ (схеми на рис. 4.26,б).

Для підтвердження даного факту в подальших дослідженнях слід передбачити оцінку напружено-деформованих станів пластин з розмірами 500x500 мм, де напруження стиснення при виході на крайку будуть близькими до нуля.

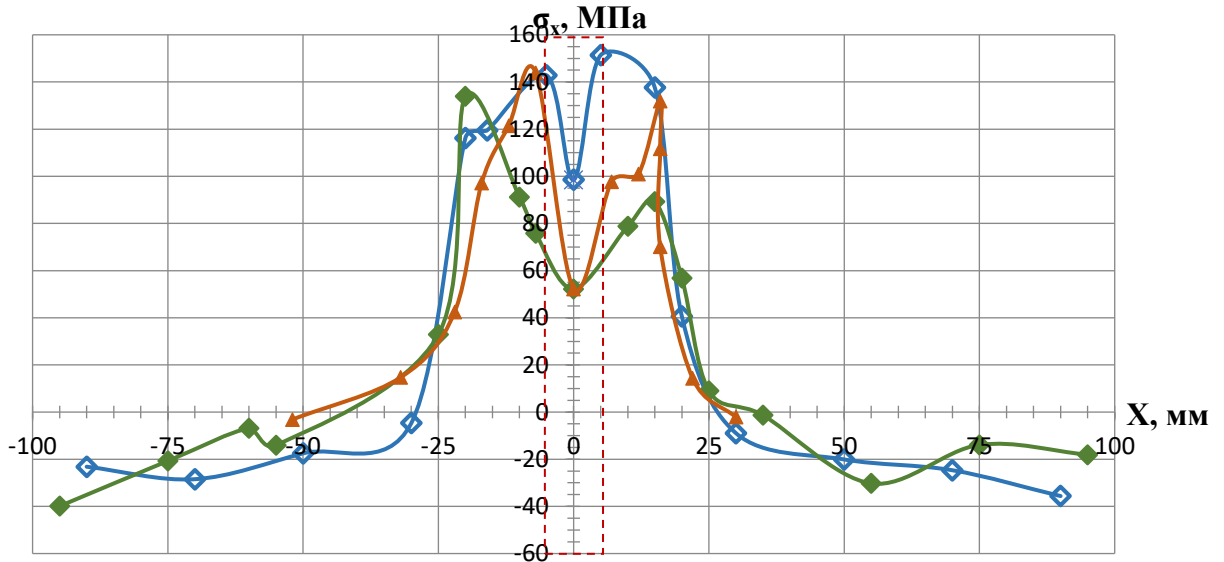


Рисунок 4.32 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням Plasma-MIG, в поперечних перетинах S1 -  $\blacktriangle$  і S2 -  $\blacklozenge$  (схеми на рис. 4.26,а) і зворотній – в перетині S5 -  $\blacklozenge$  (схеми на рис. 4.26,б), де штриховою лінією показані контури зварного шва.

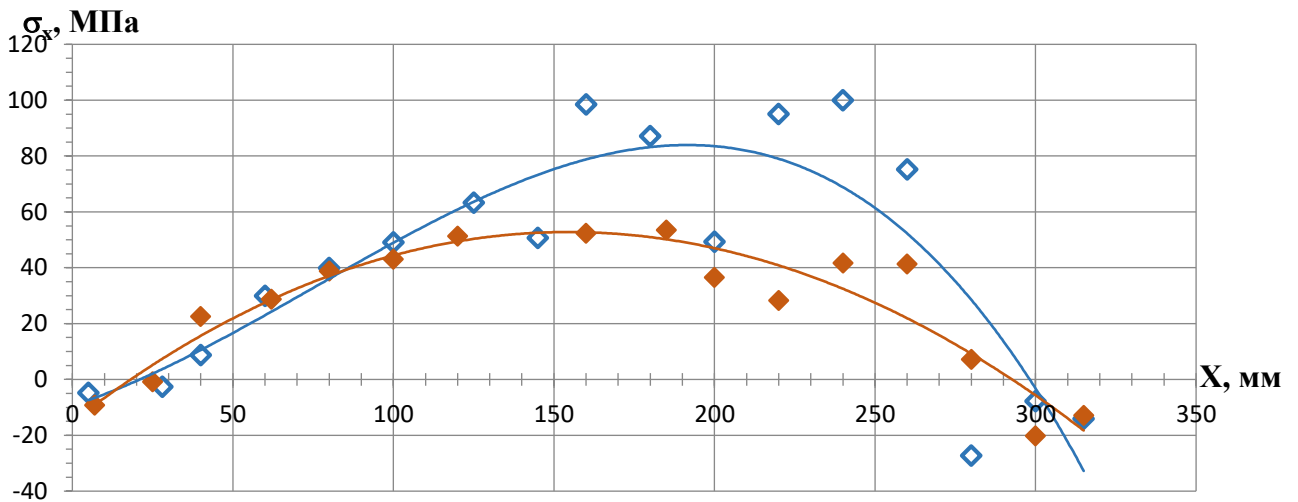


Рисунок 4.33 Залишкові зварювальні напруження  $\sigma_x$  на лицьовій стороні зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561, виконаного зварюванням Plasma-MIG, в поздовжньому перетині вздовж лінії шва S4 -  $\blacklozenge$  і зворотній – в перетині S6 -  $\blacklozenge$  (схеми на рис. 4.26,а,б).

Розподіл залишкових поздовжніх напружень  $\sigma_x$  в зварній пластині вздовж лінії шва (рис. 4.33) підтверджує результати, отримані для поперечного перетину S1 (рис. 4.32). З рисунку можна бачити, що епюри  $\sigma_x$  на обох сторонах пластини, отриманої Plasma-MIG зварюванням, характеризуються меншою різницею пікових значень ніж при MIG зварюванні, що визначає згинаючу складову напружено-деформованого стану пластини і підтверджує характеристики її формозміни (табл. 4.9).

#### 4.4 Висновки по розділу 4

1. Механічні властивості зварних з'єднань при гібридному плазмодуговому зварюванні алюмінієвих сплавів вищі за такі для імпульсно-дугового зварювання, зокрема міцність з'єднань на розрив складає до 94% від показників основного металу, тоді як при імпульсно-дуговому зварюванні показники на 3-5% нижчі.
2. Зниження погонної енергії на 10-20% при гібридному плазмодуговому зварюванні порівняно з імпульсним MIG зварюванням (при рівних швидкостях) дозволяє на 5-10% зменшувати розміцнення з'єднань алюмінієвих сплавів.
3. Застосування гібридного плазмодугового зварювання дозволяє зменшувати втрати вмісту певних легуючих елементів в металі швів (наприклад, Mg на ~5%, Mn до 15% тощо).
4. У порівнянні з MIG зварюванням витрати електродного дроту для випадку Plasma-MIG можуть бути знижені на 10-30%, а погонна енергія – до 20...25%.
5. Відпрацьовано режими гібридного плазмодугового зварювання плавким електродом для алюмінієвих сплавів 5083 і 1561 товщинами до 8 мм, та сталей 09Г2С і AISI 304L товщиною 10 мм.

6. Для визначення залишкового напружено-деформованого стану після зварювання пластин алюмінієвого сплаву 1561 ( $\delta=5$  мм) за допомогою програмного комплексу «Simufact welding» було проведено моделювання теплових процесів при MIG і Plasma-MIG зварюванні.

7. Аналіз моделювання теплових процесів при MIG і Plasma-MIG зварюванні за допомогою програмного комплексу «Simufact welding» для визначення залишкового напружено-деформованого стану після зварювання тонкої (5 мм) пластини з алюмінієвого сплаву 1561, звареної гібридним плазмово-дуговим зварюванням з плавким електродом із забезпеченням якісного формування шва при її жорсткому закріпленні, показав, що жорстке закріплення впливає на формування залишкових напружень і переміщень з площини. При цьому після розкріплення з оснастки поздовжнє і поперечне вкорочення знижуються до  $\sim 0,5$  мм, а вигин зварного з'єднання опуклістю вгору не перевищує  $\sim 0,4$  мм.

8. Розкріплення зварного з'єднання сприяє перерозподілу поздовжніх напружень і характеризується зниженням рівня залишкових напружень в області зварного шва до  $\sim 180$  МПа і утворенням стискаючих напружень за межами зони пластичних деформацій порядку  $\sim -55$  МПа з наступним переходом в область розтягнення  $\sim 7,2$  МПа на правому торці паралельному до зварного шва.

9. Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану для MIG і Plasma-MIG зварювання перевіряли шляхом їх фізичного вимірювання методом спекл-інтерферометрії. Було встановлено, що залишкові деформації у разі Plasma-MIG зменшуються на 20-40% порівняно з імпульсним MIG зварюванням. Залишкові напруження приблизно на рівні таких для MIG, але характер їх розподілу свідчить про те, що за умови зварювання пластин більшого розміру напруження при Plasma-MIG будуть нижчі затаки для MIG.

10. Співставлення розрахункових та експериментальних даних, отриманих методом спекл-інтерферометрії, встановлено, що похибка в рівні залишкових поздовжніх і поперечних нормальних напружень не перевищує 15...20%, що є прийнятним результатом.

## **РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТА ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ГІБРИДНОГО ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ**

### **5.1 Образно-знакова модель промислового обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом**

У лінійках зварювального обладнання більшості світових виробників в останні роки чітко прослідковується тенденція переходу до блочно-модульної компоновки зварювальних комплексів. Блочно-модульна компоновка дозволяє отримувати обладнання з високим рівнем гнучкості у налаштуваннях та переналадці під різноманітні задачі. При цьому зберігаючи можливість простого і відносно дешевого розширення функціональних можливостей за рахунок додавання нових модулів, чи заміни застарілих на більш новітні без зміни усього комплексу обладнання.

Такий підхід видається розумним і раціональним, тож було вирішено проектувати комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання саме за блочно-модульною схемою. На рисунку 5.1 наведена блок-схема компоновки дослідно-промислового комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

Наявність автономної системи керування дозволяє використовувати комплекс з різноманітними зварювальними маніпуляторами, як то: столи-маніпулятори, зварювальні колони, обертачі, і т.д. та керувати маніпулятором в автоматизованому режимі. А також забезпечує можливість роботи комплексу з промисловими роботами-маніпуляторами різних виробників, даючи широкі можливості взаємодії робота з комплексом.



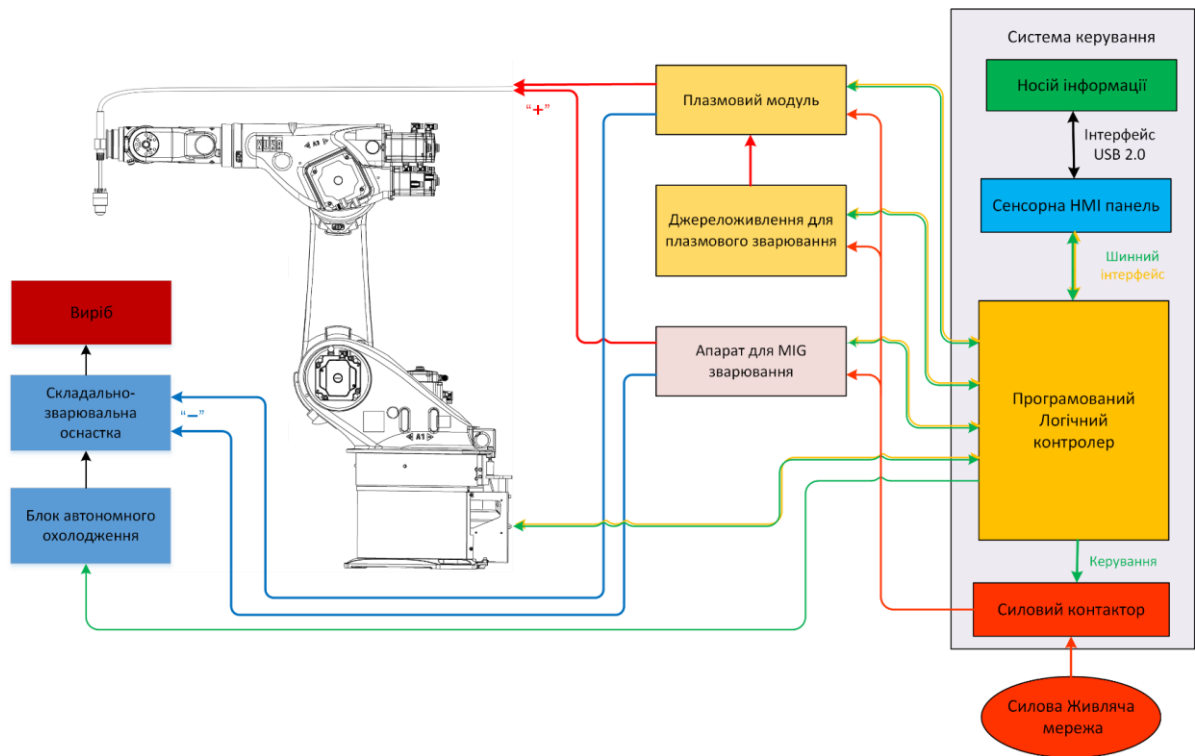


Рисунок 5.1 Блочна схема компоновки комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.

## 5.2 Розробка промислового варіанту плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом із підвищеним ресурсом роботи

Виходячи з існуючих літературних даних по гібридному плазмово-дуговому зварюванню плавким електродом [1, 3, 5, 8, 12, 14, 25, 31, 55, 74, 88, 116, 133, 134, 158, 163, 168] та власного досвіду зварювання корозійностійких сталей, алюмінієвих та магнієвих сплавів, для зварювання яких найбільш перспективна дана технологія, було встановлено, що для забезпечення зварювання за один прохід листів товщиною до 12 мм доцільно використовувати пальники сумарною потужністю до 650 А при використанні постійного струму оберненої полярності. При складанні технічного завдання на розробку конструкції промислового плазмотрону виходили із забезпечення максимального навантаження струму у 300 А для плазмової частини пальника та 350 А для частини пальника плавкого електроду. У таблиці 5.1 наведено базові технічні характеристики промислового плазмотрону для гібридного плазмово-

дугового зварювання плавким електродом, на які орієнтувалися при його проектуванні.

Таблиця 5.1 Технічні характеристики промислового плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

Назва параметра	Значення
Максимальний сумарний зварювальний постійний струм оберненої полярності для стисненої дуги неплавкого та дуги плавкого електродів при ПВ 100%, А	550
Максимальний сумарний зварювальний постійний струм оберненої полярності для стисненої дуги неплавкого та дуги плавкого електродів при ПВ 60%, А	650
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для стисненої дуги неплавкого електроду при ПВ 100%, А	250
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для стисненої дуги неплавкого електроду при ПВ 60%, А	300
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для дуги плавкого електроду при ПВ 100%, А	300
Максимальний зварювальний постійний струм оберненої полярності для дуги плавкого електроду при ПВ 60%, А	350
Струм чергової дуги, А	5 - 50
Плазмоутворюючий газ	Ar
Витрати плазмоутворюючого газу, л/хв	1 - 20,0
Захисний газ	Ar; Ar+18%CO <sub>2</sub> ; Ar+2%CO <sub>2</sub> ; Ar+2%H <sub>2</sub>
Витрати захисного газу л/хв.	8 - 40
Фокусуючий газ	Ar
Витрати фокусуючого газу, л/хв.	1 - 15
Охолодження плазмового електроду	Рідинне пряме
Охолодження плазми утворюючого сопла	Рідинне пряме
Охолодження захисного сопла	Рідинне пряме
Діаметр електродного дроту, мм	1,0; 1,2; 1,6; 2,0

На основі аналізу результатів ресурсних випробувань, спостережень та досвіду експлуатації лабораторного плазмотрону було обрано такі основні напрямки доопрацювання конструкції гібридного плазмотрону:

- підвищення ресурсу роботи окремих вузлів і деталей плазмотрону;
- підвищення зручності обслуговування, ремонтпридатності та технологічності виготовлення деталей плазмотрону.

### **5.2.1. Проектування основних вузлів плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з підвищеним ресурсом роботи**

Тестування дослідного прототипу гібридного плазмотрону показали, що найменш стійкими до руйнування в процесі експлуатації є електрод плазмової частини і плазмоутворююче сопло. Причинами руйнування, як правило, є електроерозія та оплавлення у наслідок перегріву.

Для підвищення ресурсу роботи електроду плазмової частини прийнято і реалізовано ряд рішень. Вузол плазмового електроду і сам електрод перепроєктовано таким чином, щоб забезпечити пряме рідинне охолодження електроду, що значно покращило відведення від нього тепла.

На рисунку 5.2, а показано розріз моделі дослідного плазмотрону з непрямым охолодженням, де охолоджуюча рідина підводиться в корпус тримача електроду, а відведення від електроду відбувається через контактні поверхні і різьбове з'єднання. Такий спосіб відведення тепла був не достатньо ефективним, тому електродний вузол перепроєктовано таким чином, щоб охолоджуюча рідина омивала безпосередньо корпус електроду якомога ближче до робочої поверхні (рис. 5.2, б).

Запроваджені модифікації дозволили значно підвищити ефективність охолодження електроду порівняно з дослідним плазмотроном.

На рисунку 5.2, в наведено фото зовнішнього вигляду спроектованого промислового плазмотрону для Plasma-MIG зварювання.

Підвищити стійкість торця електроду до оплавлення та електричної ерозії також можливо у випадку використання для його виготовлення більш тугоплавкого матеріалу ніж мідь. Найбільш тугоплавким з доступних матеріалів є вольфрам, проте він має занижку теплопровідність для забезпечення надійного відведення тепла, яке виділяється на торці електроду. Провівши аналіз властивостей різноманітних матеріалів у якості матеріалу для вставки електроду

було обрано вольфрамово-мідний композит, який має значно вищу температурну стійкість ніж мідь і кращу теплопровідність ніж вольфрам [94, 97, 131].

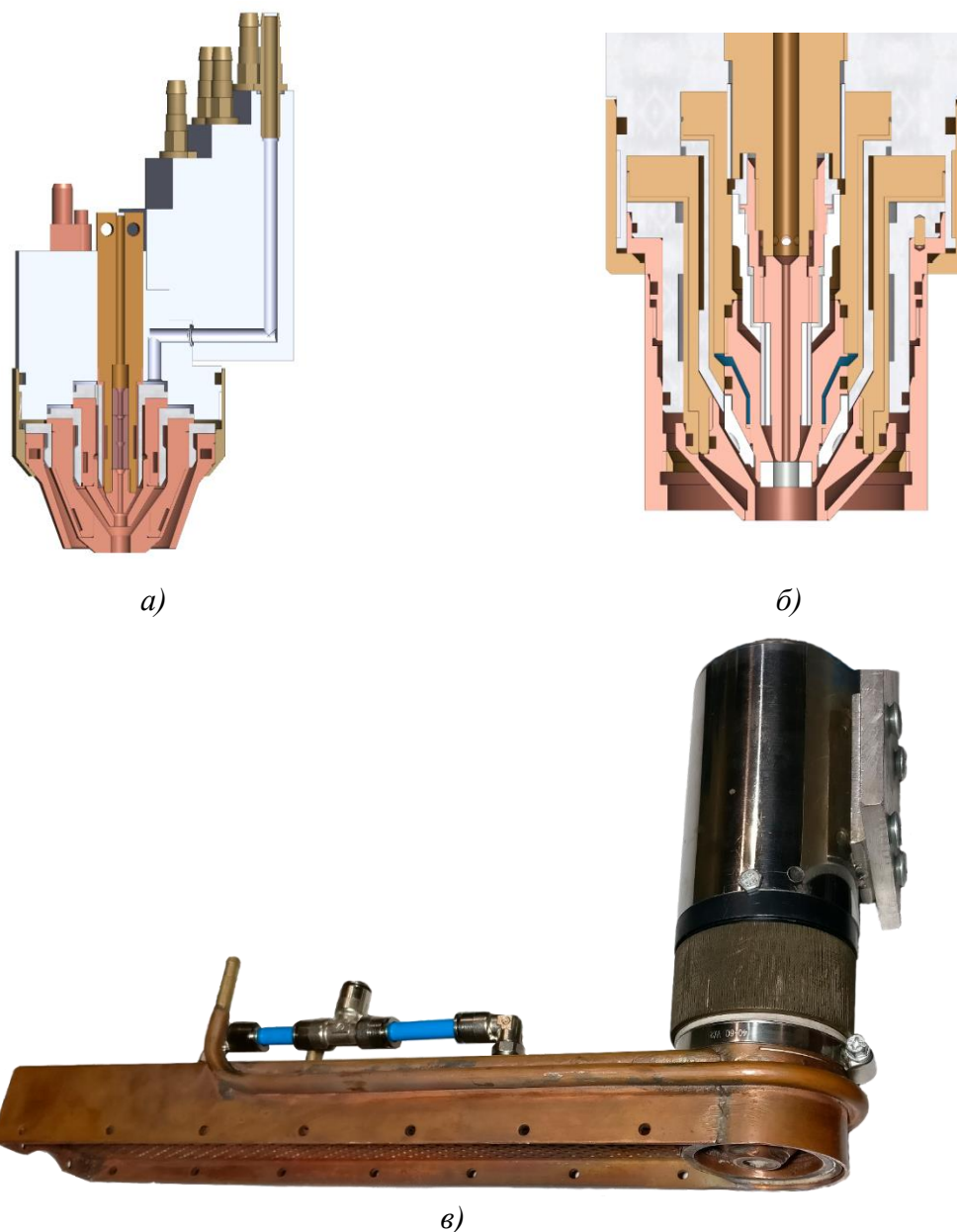
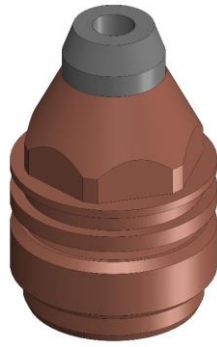


Рисунок 5.2 Розріз моделі дослідного плазмоторну (а) та промислового плазмоторну з підвищеним ресурсом роботи (б). Зовнішній вигляд промислового плазмоторну для Plasma-MIG зварювання (в).

Модель та фото кільцевого неплавкого електроду з композитною тугоплавкою вставкою показана на рисунку 5.3.

Конструкція промислового гібридного плазмоторну спроектована таким чином, що забезпечується пряме рідинне охолодження захисного сопла, а також швидкий доступ для обслуговування чи заміни сопел, електродів, ізоляторів, які потенційно можуть вийти з ладу при експлуатації плазмоторну.



а)



б)

*Рисунок 5.3 Модель (а), та фото (б) кільцевого неплавкого електроду з композитною тугоплавкою вставкою*

Досвід використання дослідного плазмотрону показав, що має місце нерівномірна ерозія кільцевого неплавкого електроду. Таку проблему при експлуатації плазмотронів для гібридного плазмово-дугового зварювання відмічають і інші дослідники [116]. Дуга часто прив'язується в одній точці кільцевого електроду, що призводить до перегріву і руйнування в місці прив'язки (див. рис. 5.4).



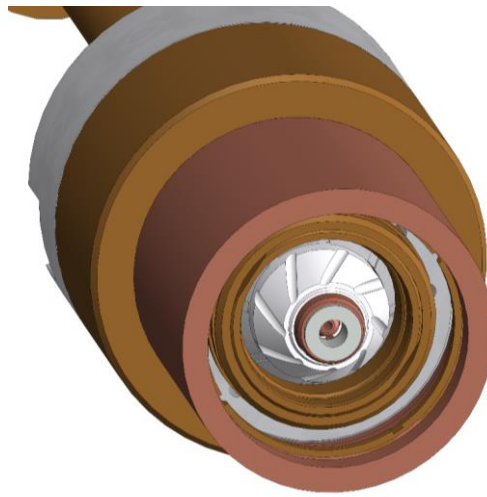
а)



б)

*Рисунок 5.4 Фото зруйнованих плазмових електродів дослідного плазмотрону.*

Для рівномірного розподілу тепла, що виділяється на електроді необхідно забезпечити постійний рух анодної плями по робочому торцю електроду. Цього можна досягти двома шляхами: зміщувати дугу за допомогою зовнішнього магнітного поля або за допомогою газових потоків. Автором було обрано другий варіант. Для досягнення необхідної газодинаміки в зоні торця електроду було спроектовано завихрювач, що встановлюється в зазор між електродом та плазмоутворюючим соплом. Зображення моделі завихрювача приведені на рисунку 5.5.



*Рисунок 5.5 3Д модель завихрювача встановленого в плазмотрон.*

Застосування описаних вище конструктивних змін та доповнень дало можливість збільшити ресурс роботи кільцевого неплавкого електроду до 3-4 годин (у 16-20 разів порівняно з дослідним варіантом).

### **5.2.2. Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки у плазмотроні для гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом**

Для оптимізації конструкції завихрювача та перевірки його ефективності автор використовував моделювання газових потоків із застосуванням кінцево-елементного аналізу за допомогою програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation [80, 95, 96, 143, 150]. Цей пакет використовує для моделювання один з підрозділів розрахункової газодинаміки — механіку суцільних середовищ, що включає сукупність фізичних, математичних і числових методів, призначених для вирахування характеристик потокових процесів. Враховуючи наявність тертя і стискуваності середовища для побудови рівнянь використовується система рівнянь Нав'є-Стокса, доповнена рівнянням для врахування турбулентності [111, 143, 150]. На основі цих рівнянь складається система диференціальних рівнянь другого порядку енергії [111, 143, 150].

Газодинамічне розподілення газів в плазмотроні важливе для розуміння і перевірки наступних процесів:

- швидкість протікання газу в мінімальному зазорі в якому має відбуватися ініціювання дуги, можливість і стабільність такого ініціювання;
- швидкість виходу потоку газу з плазмоутворюючого сопла, ламінарність вихідного потоку та контроль того, щоб швидкість руху потоку в каналі сопла була найбільшою, відносно усєї магістралі, гарантуючи стабілізацію і вірне орієнтування дуги;
- швидкість, тиск і траєкторія руху газу на виході із захисного сопла, як параметр важливий для формування надійного захисту зони зварювання та перегрітого металу навколошовної зони від контакту з навколишньою атмосферою.

Моделювання газових потоків проводили для нормальних умов (вплив електричного розряду на температуру газу не враховували). Результати моделювання дозволили спрогнозувати напрямок та інтенсивність газових потоків в області робочого торця електроду плазмової частини гібридного плазмотрону. На рисунку 5.6 приведені результати моделювання руху газових потоків (траєкторія та швидкість руху) у каналі плазмоутворюючого газу.

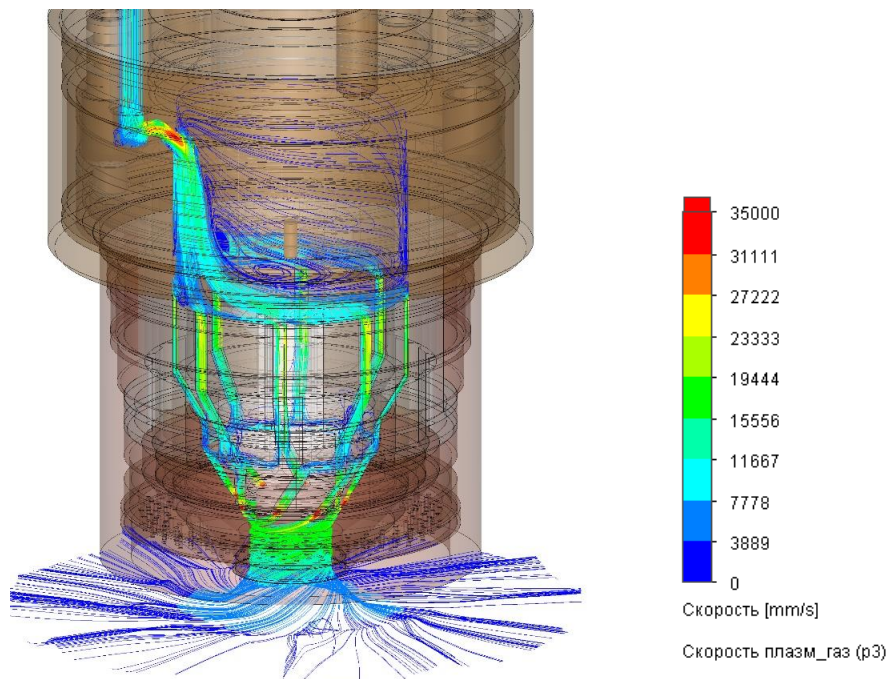


Рисунок 5.6 Результати моделювання руху газових потоків (траєкторія та швидкість руху) у каналі плазмоутворюючого газу.



Детальний аналіз результатів моделювання показує, що застосування завихрювача даної конструкції забезпечує рух потоків плазмоутворюючого газу в зоні робочого торця електроду зі швидкостями 15...20 м/с (при витратах плазмоутворюючого газу 8...10 л/хв) та закручування потоків під кутом  $35^{\circ}$ ... $55^{\circ}$  до поздовжньої осі плазмотрону.

Проведене моделювання взаємодії газових потоків центрального, плазмоутворюючого та захисного газів з метою перевірки ступеню впливу завихрювання плазмоутворюючого газу на якість газового захисту рідкої ванни та перегрітого металу зварного з'єднання. Результати моделювання (див. рис. 5.7) показують, що значного негативного впливу на якість газового захисту завихрювання не створює.

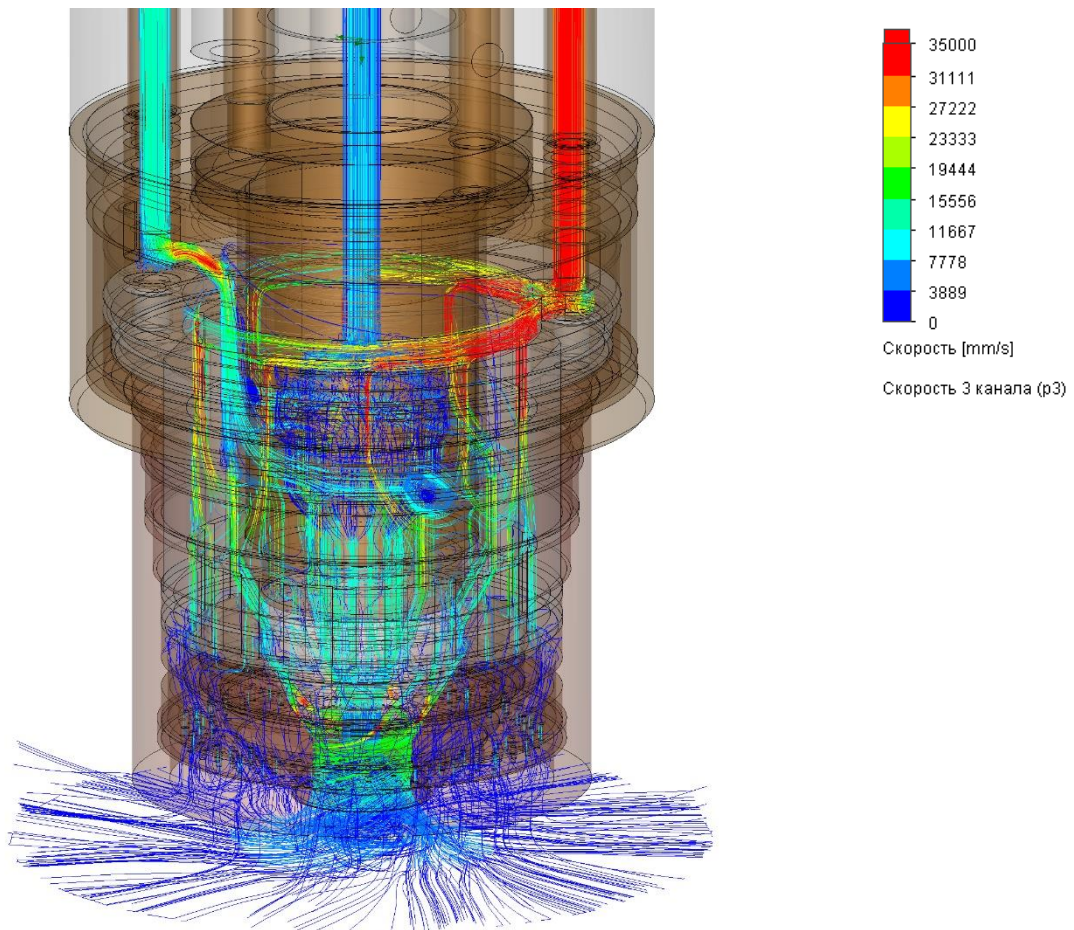
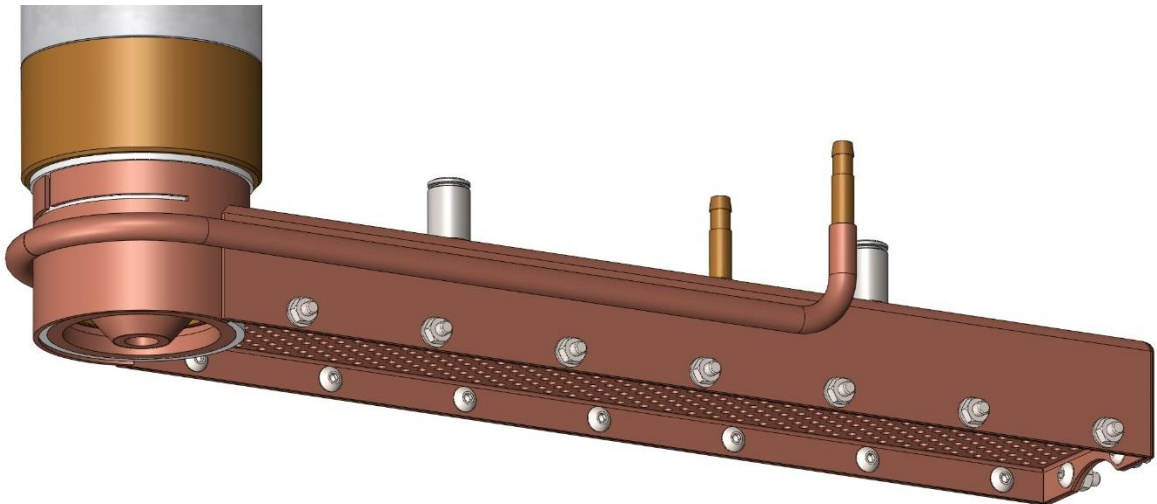


Рисунок 5.7 Результати моделювання взаємодії газових потоків (траєкторія та швидкість руху) центрального, плазмоутворюючого та захисного газів.



### 5.2.3. Комп'ютерне моделювання процесів газодинаміки у додатковому захисному соплі плазмотрону для гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом

Зважаючи на високу швидкість зварювання і значне тепловкладення, які забезпечуються при гібридному плазово-дуговому зварюванні плавким електродом, при зварюванні цим способом корозійностійких сталей, титанових та алюмінієвих сплавів зварне з'єднання потребує додаткового газового захисту. Тому автором було спроектовано додаткове захисне сопло «чобіток» з рівномірним розподілом газу по всій площі вихідного отвору сопла. Зображення моделі додаткового захисного сопла приведене на рисунку 5.8.



*Рисунок 5.8 3Д модель додаткового захисного сопла «чобіток», для гібридного плазово-дугового зварювання плавким електродом.*

З метою оптимізації конструктивних параметрів захисного сопла та перевірки рівномірності розподілу захисного газу по площі вихідного отвору, було проведене моделювання потоків захисного газу. Результати моделювання, які приведені на рисунку 5.9 показують, що застосовані конструктивні рішення дозволили досягти рівномірного розподілу захисного газу по площі вихідного отвору сопла.

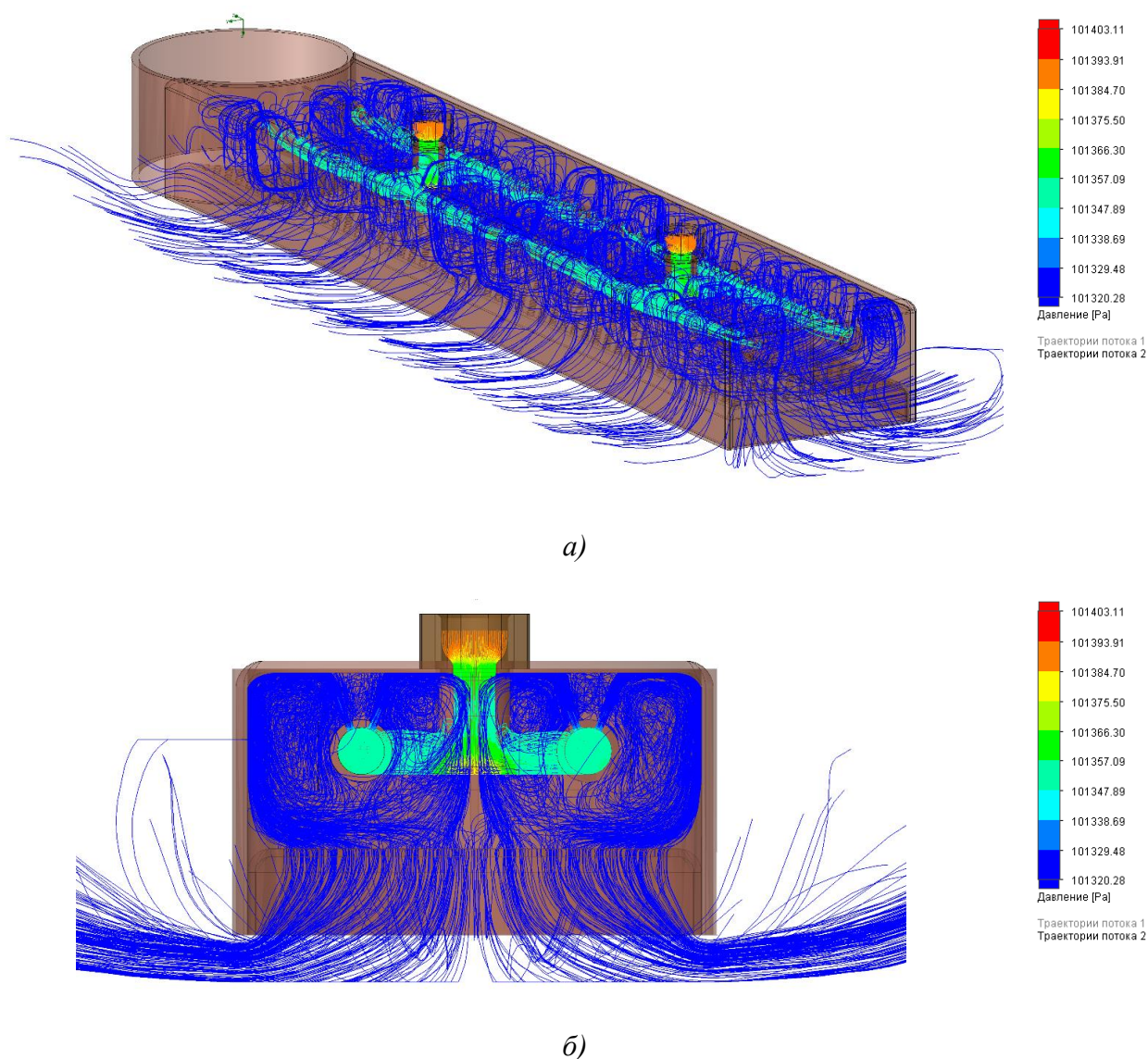


Рисунок 5.9 Результати моделювання газових потоків (траєкторія та тиск) у додатковому захисному соплі.

### 5.3 Рекомендації до джерел живлення для реалізації промислових технологій гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

Проаналізувавши результати математичного моделювання взаємодії дуг плавкого та неплавкого електродів при гібридному плазмово-дуговому зварюванні наведені у розділі 3 цієї роботи, а також лабораторних зварювань можна дійти висновку, що вимоги до джерел живлення необхідних для реалізації

цього процесу дещо відрізняються від вимог до традиційного плазмового зварювання та дугового зварювання плавким електродом.

Зокрема напруга на дузі неплавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні в середньому на 3-5 В вища за таку при плазмовому зварюванні, що треба враховувати при розробці, чи виборі джерела живлення для дуги неплавкого електроду.

Для живлення дуги неплавкого електроду у промисловому комплексі гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом було обрано джерело живлення Sebora AC-DC TIG EVO 450T (див. рис. 5.10), яке відповідає більшості вимог, а саме:

- забезпечує достатньо високу напругу дуги (до 40В) у режимі плазмового зварювання;
- підтримує дистанційне керування параметрами режиму зварювання;
- забезпечує зворотній зв'язок за рівнем зварювального струму, напругою на дузі та режимом роботи джерела живлення.



*Рисунок 5.10 Зовнішній вигляд джерела живлення дуги неплавкого електроду для процесу гібридного плазмово-дугового зварювання (Sebora AC-DC TIG EVO 450T)*

Основні характеристики джерела живлення Seborga AC-DC TIG EVO 450T наведено у таблиці 5.2

Напруга на дузі плавкого електроду при гібридному плазмово-дуговому зварюванні на 2-4 В нижча за таку при дуговому зварюванні плавким електродом і співвідношення струм/напруга також значно відрізняються від традиційного процесу, що робить неможливим використання закладених у серійних джерелах живлення шаблонів синергетичних налаштувань параметрів режиму.

Таблиця 5.2 Основні характеристики джерела живлення Seborga AC-DC TIG EVO 450T

Назва параметру	Значення
Напруга трифазного змінного струму частотою 50/60 Гц, В	400
Споживаний струм, А, не більше	23
Діапазони регулювання зварювального струму в режимі Plasma DC, А	5-400
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	400
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	310
Напруга холостого ходу джерела живлення, В	70
Робоча напруга джерела живлення в режимі Plasma DC, В	0-40
Діапазони регулювання стартового струму, % від робочого	0-100
Діапазони регулювання струму заварки кратеру, % від робочого	0-100
Діапазон регулювання частоти модульованого струму, Гц	0,25-2000

Джерело живлення дуги плавкого електроду для гібридного плазмово-дугового зварювання повинно мати можливість зовнішнього керування швидкістю подавання дроту, напругою на дузі та, бажано, іншими параметрами режиму зварювання без задіяння синергетичного керування.

Для живлення дуги плавкого електроду у промисловому комплексі гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом було обрано джерело живлення Seborga MIG EVO SPEED STAR 520/TS (див. рис. 5.10), яке відповідає більшості вимог, а саме:

- має достатній діапазон робочих струмів для живлення дуги плавкого електроду;
- підтримує дистанційне керування параметрами режиму зварювання без задіяння синергетичного керування;

— забезпечує зворотній зв'язок за рівнем зварювального струму, напругою на дузі та режимом роботи джерела живлення.



*Рисунок 5.11 Зовнішній вигляд джерела живлення дуги плавкого електроду для процесу гібридного плазмово-дугового зварювання (Cebora MIG EVO SPEED STAR 520/TS)*

Основні характеристики джерела живлення Cebora MIG EVO SPEED STAR 520/TS наведено у таблиці 5.3

Таблиця 5.3 Основні характеристики джерела живлення Cebora MIG EVO SPEED STAR 520/TS

Назва параметру	Значення
Напруга трифазного змінного струму частотою 50/60 Гц, В	400
Споживана потужність, кВА, не більше	26
Діапазони регулювання зварювального струму в режимі Plasma DC, А	10-520
Номінальна сила струму при ПВ 40%, А	500
Номінальна сила струму при ПВ 60%, А	470
Номінальна сила струму при ПВ 100%, А	440
Напруга холостого ходу джерела живлення, В	70
Робоча напруга джерела живлення в режимі Plasma DC, В	0-40
Діапазони регулювання стартового струму, % від робочого	0-100
Діапазони регулювання струму заварки кратеру, % від робочого	0-100
Діапазон регулювання частоти модульованого струму, Гц	0,5-500

## **5.4 Розробка системи автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом**

Реалізація процесу гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом потребує синхронізації пуску та роботи джерел живлення плазмової дуги та дуги плавкого електроду, блоку генерації чергової дуги та подачі робочих газів. Функцію синхронізації роботи усіх елементів комплексу виконує система автоматизованого керування процесом.

Система автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом побудована на базі промислового програмованого логічного контролера (ПЛК). Вона забезпечує синхронізацію роботи джерел живлення, модуля генерації чергової дуги, модуля підготовки та подачі газів, маніпулятора та периферійного обладнання. Окрім каналів керування між системою керування та іншими вузлами комплексу передбачені зворотні зв'язки, які дають можливість моніторингу, обробки, архівації та, за необхідності, коригування параметрів режиму зварювання. Також зворотні зв'язки використовуються для оперативного реагування на виникнення можливих аварійних ситуацій. На рисунку 5.12 приведена принципова схема взаємозв'язків системи керування з іншими елементами зварювального комплексу.

Для створеної системи автоматизованого керування було розроблене спеціалізоване програмне забезпечення яке дозволяє реалізовувати процес гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом та керувати цим процесом. Програма дає оператору широкі можливості з налаштування синхронізації роботи вузлів комплексу. Критичними в плані синхронізації є моменти пуску та зупинки процесу, в які потрібно дотримуватися чіткої послідовності роботи елементів комплексу і оператор має змогу детально запрограмувати цю послідовність. Окрім функцій керування програма виконує функцію реєстрації, обробки та архівації вхідних сигналів таких як виміряні струми зварювання та напруги на дугах плавкого і неплавкого електродів,

витрата плазмоутворюючого газу та інші. Ця функція буде корисною при зварюванні відповідальних конструкцій, де необхідний 100% контроль дотримання параметрів режиму зварювання.

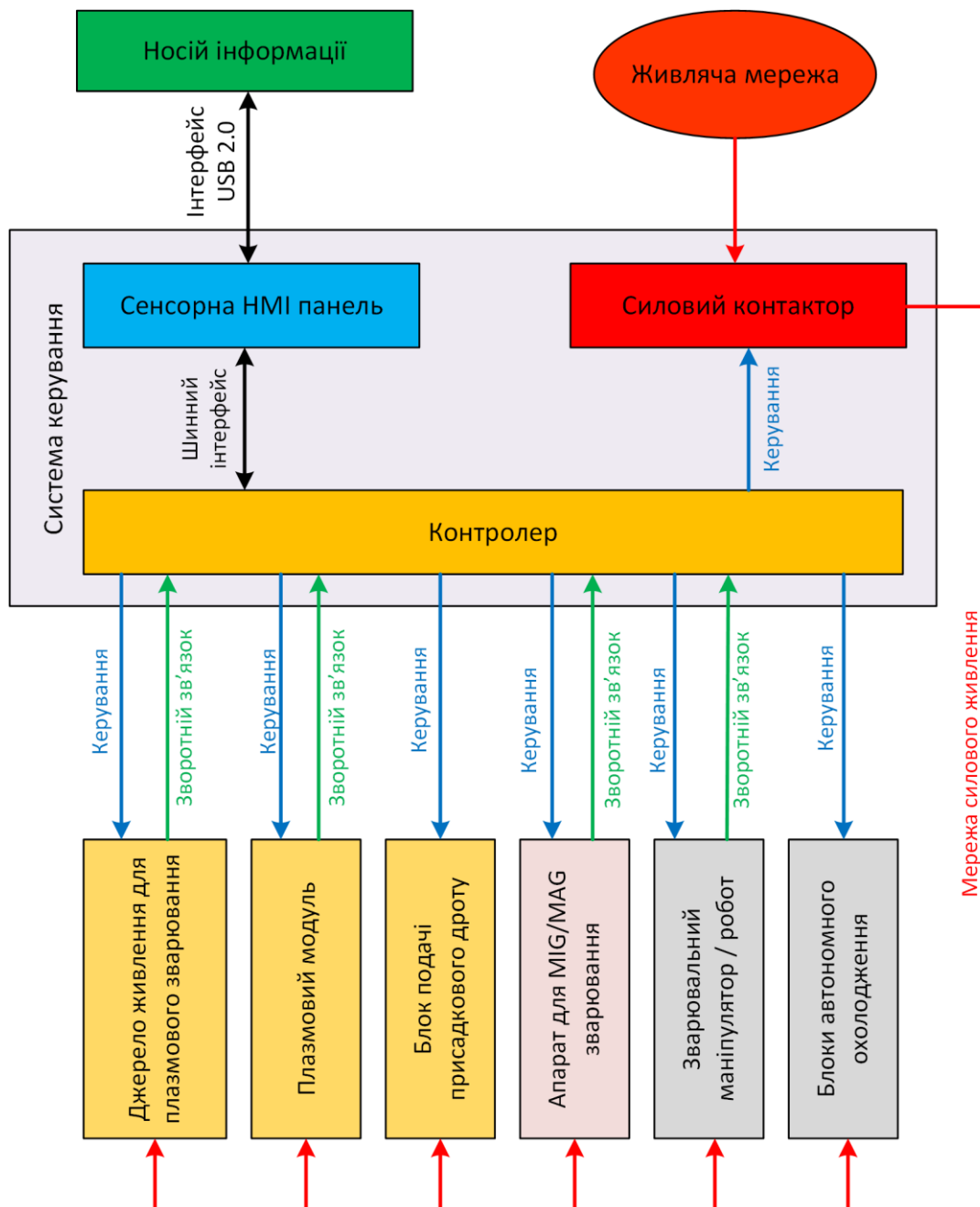


Рисунок 5.12 Принципова схема взаємозв'язків системи керування з іншими елементами зварювального комплексу.

На рисунку 5.13 наведено зображення головного вікна програми системи автоматизованого керування зварювального комплексу «Plazer PW-Hybrid TC».



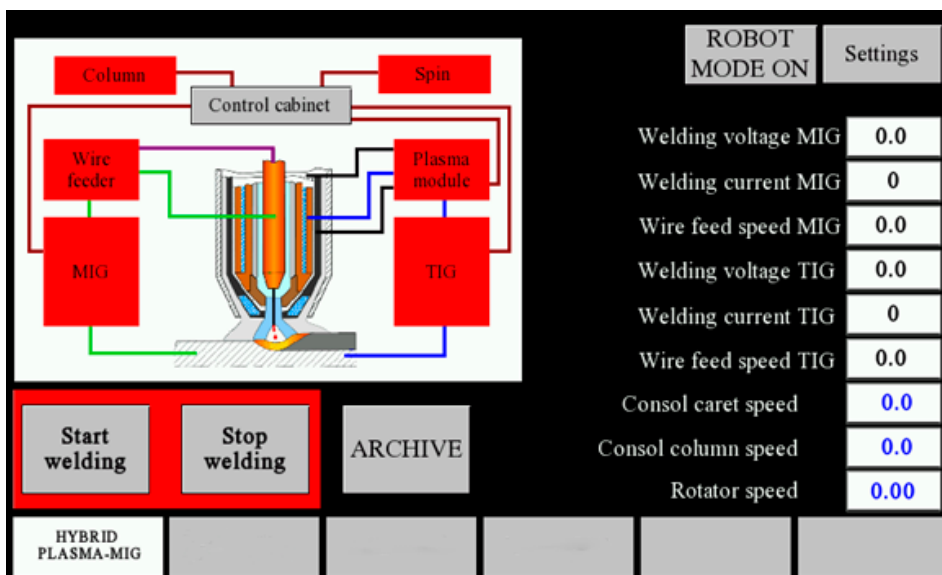


Рисунок 5.13 Зображення головного вікна програми системи автоматизованого керування зварювального комплексу «Plazer PW-Hybrid TC»

На рисунку 5.14 приведений зовнішній вигляд системи автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.



Рисунок 5.14 Зовнішній вигляд системи автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.



## 5.5 Промисловий комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом

На базі розробленої системи керування та обраних джерел живлення було скомпоновано промисловий комплекс обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Plazer PW-Hybrid TC». У таблиці приведено повний склад комплексу.

Таблиця 5.4 Склад промислового комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Plazer PW-Hybrid TC»

1	Загальна система керування	Розробка ІЕЗ ім. Є.О. Патона
2	Плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом	Розробка ІЕЗ ім. Є.О. Патона
3	Джерело живлення для плазмової дуги неплавкого електроду	Cebora AC-DC EVO 450/T
4	Джерело живлення для дуги плавкого електроду	Cebora MIG EVO SPEED STAR 520/TS
5	Плазмовий модуль	Fronius FPM 10
6	Зварювальна колона	Carpano AllPower 15
7	Зварювальний обертач	M 11020 (ВІСП)

На рисунку 5.15 приведено фото загального вигляду комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Plazer PW-Hybrid TC»

Окрім описаного вище обладнання до складу комплексу входять наступні вузли.

— Плазмовий модуль Fronius FPM-10 технічні характеристики якого наведені у таблиці 5.5 виконує функції генерування чергової дуги, подачі та вимірювання витрат плазмоутворюючого газу.



Рисунок 5.15 Фото загального вигляду комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Plazer PW-Hybrid TC»

Таблиця 5.5 Технічні характеристики плазмового модуля Fronius FPM-10

Струму чергової дуги, А	5-50
Витрата плазموутворюючого газу,	0,1-10
Точність регулювання витрати плазموутворюючого газу, л/хв	0,1

— Зварювальна колона Carpano AllPower 15, технічні характеристики якої наведені у таблиці 5.6 виконує функції переміщення плазмотрону як зі зварювальною так і з маршевою швидкостями вздовж осей X та Z.

Таблиця 5.6 Технічні характеристики зварювальної колони Carpano AllPower 15

Назва параметру	Значення
Напруга трифазної живлячої мережі змінного струму з частотою 50/60 Гц, В	400 (±15 %)
Сумарна потужність маніпулятора, кВт	2
Хід каретки (стріли) лінійного переміщення по осі X, мм	1500
Швидкість переміщення по осі X, мм/с	0,05 - 32
Хід каретки (стріли) лінійного переміщення по осі Z, мм	1500
Швидкість переміщення по осі Z, мм/с	0,05 - 32
Вантажопідйомність каретки, кг	10
Привід переміщення по X та Z	сервопривід

Зварювальний обертач М 11020 (ВИСП), технічні характеристики якого приведені в таблиці 5.7 виконує функцію обертання зі зварювальною або маршевою швидкістю деталей з кільцевими поворотними швами.

Таблиця 5.7 Технічні характеристики зварювального обертача М 11020 (ВИСП)

Назва параметру	Значення
Вантажопідйомність обертача, кг	100
Крутний момент, Нм	125
Швидкість обертання планшайби, об/хв	0,01-6
Діаметр зварюваної деталі, мм	20 - 500
Привід обертання	сервопривід

## 5.6 Приклади практичного застосування розробленого обладнання та технології в промисловості

На базі потужностей ТОВ «НВЦ«ПЛАЗЕР» (Україна) налагоджено серійне виробництво даного комплексу. Обладнання було впроваджене в Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР), а також в Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР).

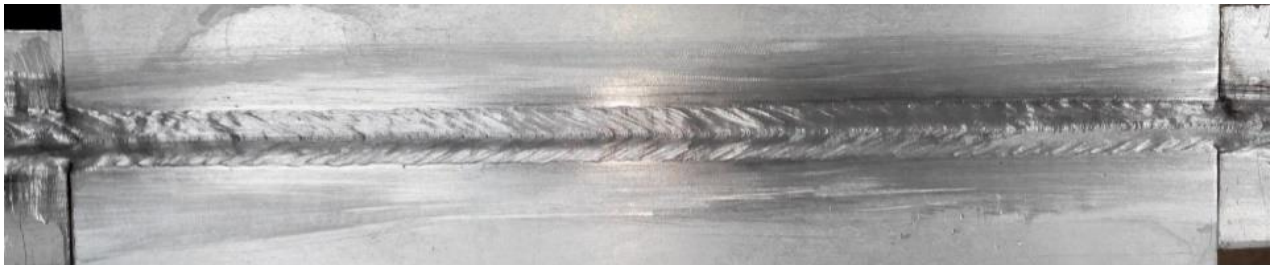
Були проведені пуско-налагоджувальні роботи і введення зварювальних комплексів в експлуатацію.

На одному з комплексів, встановленому в Гуандунському інституті зварювання, було впроваджене розроблені технології Plasma-MIG зварювання, за допомогою яких виготовлено партію листових елементів судових конструкцій з алюмінієвих сплавів 1561 і 7075 товщиною 5-8 мм та сталей товщиною до 12 мм за один прохід без розробки крайок (рис. 5.16-5.20). Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом листових елементів судових конструкцій наведені у таблиці 5.8.

Отримані зварні конструкції були передані замовнику (судноверфі Guangzhou Shipyard International (м. Гуанчжоу, КНР) для проведення подальших випробувань.

Таблиця 5.8 Параметри режимів гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом листових елементів судових конструкцій зі сплавів 1561, 5083 та 7075

Марка сплаву	Товщина, мм	Марка електродного дроту	Діаметр електродного дроту, мм	Швидкість зварювання, см/хв (м/год.)	Плазма				Плавкий електрод			
					Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата плазмоутворюючого газу, л/хв	Витрата захисного газу, хв.	Швидкість подавання дроту, м/хв.	Струм зварювання, А	Напруга на дузі, В	Витрата центрального газу, л/хв
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1561	5	ER5356	1,6	100 (60)	178	29,2	3,5	25	7,5	154	18,2	4,5
1561	8	ER5356	1,6	40 (24)	175	29,0	6	30	6,8	140	20	5
5083	8	ER5356	1,6	40 (24)	190	29,6	6	30	6,8	142	19,8	5
7075	8	ER5356	1,6	40 (24)	204	305	6	30	7,2	170	19,9	5
AISI 304	12	ER 308L	1,6	25 (15)	240	39	6	30	7,5	300	28	6



а)



б)

Рисунок 5.16 Фото лицьової (а) та зворотної (б) частини стикового зварного з'єднання пластин товщиною 5 мм з алюмінієвого сплаву 1561 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкості 60 см/хв



а)



б)

*Рисунок 5.17 Фото лицьової (а) та зворотної (б) частини стикового зварного з'єднання пластин товщиною 8 мм з алюмінієвого сплаву 1561 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкості 40 см/хв*



а)



б)

*Рисунок 5.18 Фото лицьової (а) та зворотної (б) частини стикового зварного з'єднання пластин товщиною 8 мм з алюмінієвого сплаву 7075 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкості 40 см/хв*



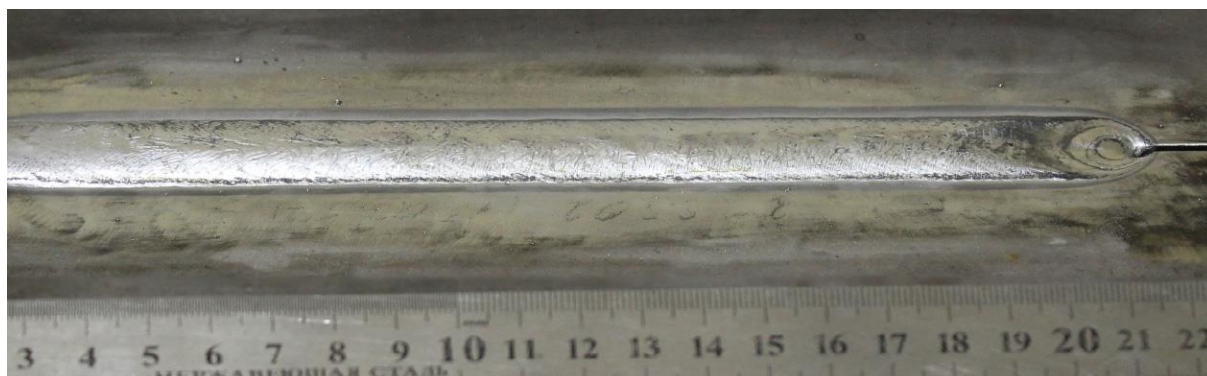


а)



б)

*Рисунок 5.19 Фото лицьової (а) та зворотної (б) частини стикового зварного з'єднання пластин товщиною 8 мм з алюмінієвого сплаву 5083 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкості 40 см/хв*



а)



б)

*Рисунок 5.20 Фото лицьової (а) та зворотної (б) частини стикового зварного з'єднання пластин товщиною 12 мм з корозійностійкої сталі AISI 304 виконаного гібридним плазмово-дуговим зварюванням плавким електродом на швидкості 25 см/хв*

Також на ділянці замовника була відпрацьована взаємодія комплексу «Plazer PW-Hybrid TC» зі зварювальним роботом маніпулятором Kuka KR60 та проведені тестові зварювання (рис. 5.21)



*Рисунок 5.21 Плазматрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом зі зварювального комплексу «Plazer PW-Hybrid TC» закріплений на «руці» робота-маніпулятора Kuka KR60*

### **5.7 Порівняння економічних показників гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом та дугового зварювання плавким електродом в інертному газі**

Для випадку однопрохідного зварювання сплаву 1561 ( $\delta=8$  мм) було виконано порівняння вартості 1 погонного метру шва для класичного дугового зварювання плавким електродом в інертному газі (MIG) і гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом (Plasma-MIG).

Вихідні дані для розрахунку вартості 1 м/п зварного шва наведено в таблиці 5.9

Таблиця 5.9 Вихідні дані для розрахунку вартості 1 м/п зварного шва

Вихідні дані для розрахунку вартості 1 м/п зварного шва				
Вартість 1 кВт год електроенергії, грн	Вартість 1 кг зварювального дроту ER5356, грн	Вартість 1 нормогодини зварювальних робіт, грн.	Вартість 1 м/п підготовки крайок, грн	Вартість 1 м/п зачистки шва
2,36	300	200	30	10

Результати розрахунку (табл. 5.10) показують, що для класичного дугового зварювання плавким електродом в інертному газі ціна 1 м/п зварного з'єднання склала 91,89 грн, а для гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом – 36,14 грн (за цінами 2020 р.). Таким чином, заміна імпульсного MIG зварювання гібридним Plasma-MIG сприятиме зниженню собівартості 1 п/м в 2-3 рази.

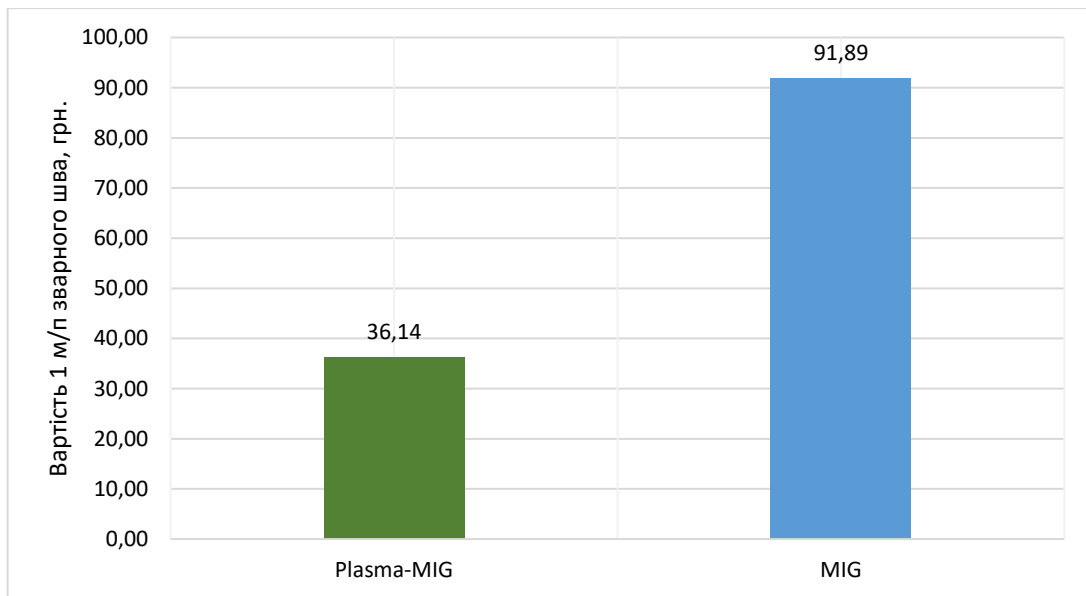
Таблиця 5.10 Результати розрахунку вартості 1 м/п зварного шва для класичного дугового зварювання плавким електродом в інертному газі (MIG) і гібридного плазмо-дугового зварювання плавким електродом (Plasma-MIG)

Спосіб зварювання	Марка сплаву	Товщина металу, мм	Марка дроту	Діаметр дроту, мм	Швидкість зварювання, мм/хв	Сумарна погонна енергія, Дж/мм	Витрата дроту на м.п. шва, г/м	Час зварювання 1 м/п шва, год.	Витрати електроенергії на 1 м/п шва, кВт/год	Підготовка крайок	Зачистка шва	Вартість 1 м/п виконання шва, грн.
Plasma-MIG	1561	8	5356	1,6	400	1230	90	0,0417	0,34194	0	0	36,14
MIG	1561	8	5356	1,6	300	1355	170	0,0556	0,37669	30	10	91,89

На рисунку 5.22 представлена діаграма, яка ілюструє різницю у вартості виконання 1 м/п зварного шва виконаного гібридним плазмо-дуговим



зварюванням плавким електродом та класичним дуговим зварюванням плавким електродом в інертному газі.



*Рисунок 5.22 Порівняння вартості 1 м/п зварного шва виконаного гібридним плазмо-дуговим зварюванням плавким електродом та класичним дуговим зварюванням плавким електродом в інертному газі*

## 5.8 Висновки по розділу 5

1. Запропоновано образно-знакову модель промислового комплексу обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом.
2. Спроектовано, виготовлено і протестовано новий промисловий плазмотрон для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з підвищеним у 16-20 разів (порівняно з дослідним) ресурсом роботи.
3. Розроблено систему автоматизованого керування процесом гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з широкими можливостями по автоматизації та інтеграції у різноманітні виробничі лінії.
4. На базі потужностей ТОВ «НВЦ«ПЛАЗЕР» (Україна) налагоджено серійне виробництво комплексу для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом «Plazer PW-Hybrid TC». Обладнання було впроваджене в

Гуандунському інституті зварювання (м. Гуанчжоу, КНР), а також в Зварювальній акціонерній компанії «HUAHENG» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР).

5. З використанням комплексу «Plazer PW-Hybrid TC» виготовлено і передано замовнику дослідно-промислому партію листових елементів судових конструкцій зі сплавів 1561, 5083 та 7075 (товщиною 5 і 8 мм) та з корозійностійкої сталі AISI 304 товщиною 12 мм.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На підставі дослідження фізичних та металургійних властивостей гібридного плазмово-дугового зварювання сталей і алюмінієвих сплавів показано особливості поведінки дуги з плавким електродом в умовах впливу на неї плазмової дуги, що покладено в основу підходів до мінімізації погонної енергії та покращення розподілу легуючих елементів в швах при гібридному плазмово-дуговому зварюванні.

2. З метою зменшення витрат електродного дроту та покращення механічних властивостей зварних з'єднань зі сталей та алюмінієвих сплавів створено технологічні прийоми гібридного плазмово-дугового зварювання, які порівняно з MIG процесом дозволяють знизити погонну енергію на 40%, зменшити ефект вигорання таких легуючих елементів, як Mg (на ~5%), Mn (майже на 15%) тощо.

3. Аналіз особливостей гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом показав, що наявність плазмової дуги призводить до майже повної відсутності розбризування електродного металу, рівномірного розподілу дуги з плавким електродом по всій поверхні краплі, що формується при масопереносі, зниження щільності струму на поверхні краплі та, як наслідок, значного зниження перегріву її поверхні та зменшення рівня вигорання легуючих елементів електродного дроту.

4. Встановлено, що вплив модифікації газодинаміки плазмоутворюючого газу створює умови циклічного переміщення анодної плями на робочому торці кільцевого неплавкого електроду, що значно підвищує ресурс його експлуатації; стиснена плазмова дуга оберненої полярності зменшує в розмірі дугу з плавким електродом та заглиблює її у зварюваний метал, що дозволяє одержувати глибоке проплавлення зразку і знижує схильність до утворення внутрішніх пор та несплавлень.

5. Створено математичну модель, яка дозволяє спрогнозувати динаміку плавлення електродного дроту за наявності оточуючої плазмової дуги і визначити

вплив дуги плавкого електроду на ВАХ плазмової дуги; на підставі даної моделі сформульовано рекомендації зі створення джерел живлення комплексу гібридного плазмово-дугового зварювання.

6. Встановлено, що при гібридному плазмово-дуговому зварюванні плавким електродом алюмінієвих сплавів АМг6, 1561, 5083, 7075 товщиною до 8 мм із швидкостями 15-60 м/год. погона енергія на 25-40% менша ніж при MIG зварюванні, що дозволяє забезпечити міцність з'єднань на рівні 85-95% та їх відносне видовження до 80% від показників основного металу у сполученні із залишковими деформаціями приблизно на 20-40% меншими за такі для MIG зварювання і залишковими напруженнями на рівні таких для MIG зварювання з потенційною можливістю їх зниження.

7. Розроблено конструкцію плазмотрону для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом з можливістю завихрювання потоків плазмоутворюючого газу та прямим рідинним охолодженням неплавкого електроду, придатного до промислового застосування. Плазмотрон у складі зварювального комплексу пройшов апробацію.

8. Створено обладнання для гібридного плазмово-дугового зварювання плавким електродом сталей і алюмінієвих сплавів з єдиною системою керування, яка дозволяє синхронізувати роботу джерел живлення, засобів переміщення та периферійного обладнання забезпечуючи можливість автоматизації і гнучкого налаштування зварювального циклу. Організовано його серійний випуск. За допомогою цього обладнання виконано зварювання партії елементів судових конструкцій зі сталей товщиною до 12 мм і алюмінієвих сплавів товщиною до 8 мм за один прохід без розробки крайок.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Alves de Resende A., Ferraresi V. A., Scotti A., Dutra J. C. Influence of welding current in plasma–MIG weld process on the bead weld geometry and wire fusion rate. *Welding International*. 2011. №25 (12), P. 910–916. DOI: 10.1080/09507116.2010.527481.
2. Alves de Resende A., Scotti A. Influence of current levels, the tilt angle of the torch and the distance between the torch and the part on the geometry of the weld bead using «Plasma-MIG» with concentric arcs. *Welding International*. 2017. №31 (10). P. 747–757. DOI: 10.1080/09507116.2016.1218628.
3. Asai S., Ogawa T., Ishizaki Y., Minemura T., Minami H., Iyazaki S. M. Application of Plasma-MIG hybrid welding to dissimilar joints between copper and steel. *Weld World*. 2012. №56 (1-2). P. 37–42. DOI: 10.1007/BF03321143.
4. Bai Y., Gao H.-M., Qiu L. Droplet transition for plasma-MIG welding on aluminium alloys. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*. 2010. №20, P. 2234–2239. DOI: 10.1016/S1003-6326(10)60634-6.
5. Bai Y., Gao H.-M., Wu L., Ma Z.-H., Cao N. Influence of plasma-MIG welding parameters on aluminum weld porosity by orthogonal test. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2010. №20 (8). P. 1392–1396. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60310-1.
6. Bofang Zhu. *The Finite Element Method: Fundamentals and Applications in Civil, Hydraulic, Mechanical and Aeronautical Engineering: tutorial*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 2018. 872 pp.
7. Da Cunha T. V., Dutra J. C. Processo Plasma-MIG – Contribuição do Arco Plasma na Capacidade de Fusão do Arame. *Soldagem Insp. São Paulo*. 2007. Vol. 12, № 2. P. 89–96.
8. Dedyukh R. I. Special features of consumable electrode plasma welding (review). *Welding International*. 2014. №29 (5). P. 397–401. DOI: 10.1080/09507116.2014.934541.

9. Demchenko V. F., Krivtsun I. V., Krikent I. V., et al. Force interaction of arc current with self magnetic field. *Ibid.* 2017. №3. P. 15–24.
10. Dupont J. N., Marder A. R. Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding Journal*. 1995. vol. 74. P. 406s-416s.
11. Essers W. G., Walter R. Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and Plasma-GMA welding. *Welding Journal*. 1981. № 2. P. 37–42.
12. Gao H.-M., Bai Y., Wu L. Comparison between Plasma-MIG and MIG Procedures on 5A06 Aluminum Alloy. *Mat. Sci. Forum*. 2008. vol. 575-578. P. 1382-1388.
13. Goldak J. A.; Akhlaghi M. Computational welding mechanics: monography. O.: Springer, USA, 2005. 325 pp.
14. Guo Y., Pan H., Ren L., Quan G. An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018. №72 (9–12), P. 1-8. DOI: 10.1007/s00170-018-2206-4.
15. Häßler M., Rose S., Füssel U. The influence of arc interactions and a central filler wire on shielding gas flow in tandem GMAW. *Weld World*. 2016. P. 1-6. DOI:10.1007/s40194-016-0337-5
16. Hertel M., Füssel U., Schnick M. Numerical simulation of the plasma–MIG process—interactions of the arcs, droplet detachment and weld pool formation. *Weld World*. 2014. №58 (1), P. 85–92. DOI: 10.1007/s40194-013-0095-6.
17. Hirata Y., Onda M., Nagaki H., Ohji T. In-situ measurement of metal drop temperature in GMA short circuiting welding. *J. High Temp. Soc.* 2004. Vol. 30, № 3, P. 140–147.
18. Hong H., Han Y., Du M., Tong J. Investigation on droplet momentum in VPPA-GMAW hybrid welding of aluminum alloys. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016. №86 (5-8), P. 2301–2308. DOI: 10.1007/s00170-016-8381-2.
19. Iwata M., Shibuya M. Effects of arc current and electrode size on electrode erosion in ac plasma torches. *Elect. Eng. Jpn.* 1998. №124 (4), P. 10–17. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6416(199809)124:4<10:AID-EEJ2>3.0.CO;2-N.

20. Katayama T., Tashiro S., Tanaka M. Improvement of bead formation of plasma MIG welding in pure argon atmosphere. *Quarterly journal of the Japan welding society*. 2011. №29 (3), P. 39s-42s. DOI: 10.2207/qjjws.29.39s.
21. Khaskin V.Yu., Korzhyk V.M., Peleshenko S.Y., Wu B. Evaporation of alloying elements in the material to be welded using laser radiation. *Первый независимый научный вестник*. №3. 2015. С. 108-114.
22. Krikent I. V., Krivtsun I. V., Demchenko V. F. Simulation of electric arc with refractory cathode and evaporating anode. *Ibid.* 2014. №9, P. 17–24.
23. Krivtsun I. V., Demchenko V. F., Krikent I. V. Model of the processes of heat, mass and charge transfer in the anode region and column of the welding arc with refractory cathode. *The Paton Welding Journal*. 2010. №6. P. 2–9.
24. Krivtsun I., Demchenko V., Lesnoi A. et al. Modelling of electromagnetic processes in system «welding arc evaporating anode»: Part 1 Model of anode region. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010. №10. P. 457–462.
25. Lee H.-K., Chun K.-S., Park S.-H., Kang C.-Y. Control of surface defects on plasma-MIG hybrid welds in cryogenic aluminum alloys. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2015. №7 (4), P.770–783. DOI: 10.1515/ijnaoe-2015-0054.
26. Lee H.-K., Park S.-H., Kang C.-Y. Effect of plasma current on surface defects of plasma-MIG welding in cryogenic aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. №223, P. 203–215. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.04.008.
27. 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.
28. Lowke J. J. Physical basis for the transition from globular to spray modes in gas metal arc welding. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2009. Vol. 42., № 13. P. 1–7.

29. M.F. Zhukov and I.M. Zasytkin Thermal plasma torches. Design, Characteristics, Applications : monography, Cambridge : Cambridge International Science Publishing, 2007. 610 p.
30. Mahrle A., Rose S., Schnick M., Beyer E., Füssel U. Laser-assisted plasma arc welding of stainless steel. *Journal of Laser Applications*. 2013. Vol. 25, №3. P. 032006-1–032006-8.
31. Mamat S. B. A Study on Characterization of the Plasma MIG Welding Process: doctoral diss.: Osaka, 2018. 143 p. DOI: 10.18910/70761.
32. Mamat S. B., Afandi A. A. M., Abu Bakar M. B., Masri M. N., Mohamed M., Razab M. K. A. A., Yuji T., Tashiro S., Tanaka M. Effect of plasma flow in Plasma MIG welding process to the microstructure refinement at heat affected zone of as-welded carbon steel. *MSF*. 2020. №1010, P. 15–20. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1010.15.
33. Mamat S. B., Tashiro S., Masri M. N., Hong S. M., Bang H.-S., Tanaka M. Application of pulse plasma MIG welding process to Al/steel dissimilar joining. *Weld World*. 2020. №64 (5). P. 857–871. DOI: 10.1007/s40194-020-00879-2.
34. Mamat S. B., Tashiro S., Tanaka M. Observation of metal transfer in Plasma-MIG welding process. *Quarterly journal of the Japan welding society*. 2017. №35 (2). P. 33s-37s. DOI: 10.2207/qjws.35.33s.
35. Mamat S. B., Tashiro S., Tanaka M., Yusoff M., Study on factors affecting the droplet temperature in plasma MIG welding process. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. №51 (13). 180210. P. 1-56. DOI: 10.1088/1361-6463/aab128.
36. Matsuda F., Nakagawa H., Nakata K., Ayani R. Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of aluminum alloys (Report I). Investigation on GTA weld metal of thin sheet. *Osaka University Knowledge Archive*. 1978. №7 (1). P. 111-127.
37. Matthes K.-J., Kohler T. Electrical Effects and Influencing Quantities in the Case of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Welding & Cutting*. 2002. vol. 2, P. 87-90.



38. Matthes K.-J., Kusch M. Plasma-MIG-Schweißen. *Praktiker*. 2000. № 5. P. 182–188.
39. McIntosh C., Chapuis J., Mendez P. Effect of ArCO<sub>2</sub> Gas blends on droplet temperature in GMAW. *Welding Journal*. 2016. №8. P. 273-279.
40. Method and device for Plasma-MIG-Welding: pat. 4,147,919 US: B23k9/00. Jelmorini G.; U.S. Philips Corporation, 1979.
41. Method and torch for sustaining multiple coaxial arcs: pat. 4,048,465 US: B23k9/00. Manz A. F.; Union Carbide Corporation, 1977.
42. Method of and device for arc welding: pat. 4,039,800 US: B23k9/00. Essers W. G.; U.S. Philips Corporation, 1977.
43. Method of and device for arc welding: pat. 4,174,477 US: B23k9/00. Essers W. G., Jelmorini G., Tichelaar G. W.; U.S. Philips Corporation, 1979.
44. Method of and device for plasma arc welding: pat. 3,612,807 US: B23k9/00. Liei'kens A. C. H. J., Essers W. G.; U.S. Philips Corporation, 1971.
45. Method of and device for Plasma MIG-Welding: pat. 4,233,489 US: B23k9/00. Essers W. G.; U.S. Philips Corporation, 1980.
46. Method of Plasma-MIG Welding: pat. 3,891,824 US: B23k9/00. Essers W. G., Jelmorini G.; U.S. Philips Corporation, 1975.
47. MIG-Plasma Welding: pat. 2005/0199593A1 US: B23k9/12. Ignatchenko G., Dykhno I.; Plasma Laser Technologies Ltd, 2005.
48. Murphy A. B. Influence of metal vapour on arc temperatures in gas–metal arc welding: convection versus radiation. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. № 22. P. 224004.
49. Murphy A. B. The effects of metal vapour in arc welding. *Ibid.* 2010. №43, 434001. 31 p.
50. Nemchinsky V. A. Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode. *Phys. D: Appl. Phys.* 1994. №27. P. 1433–1442.
51. Neyka S., Kusch M., Mayr P. Progress in High Performance Hardfacing Processes Tandem-Gas-Metal-Arc- Welding and Plasma-MIG Hybrid Welding. *Trends in*

- Welding Research, Proceedings of the 9th International Conference*. June 4–8, 2012, , Illinois, USA. 2012. Chicago, 2012. P. 784-789.
52. Nishiyama H., Sawada T., Takana H. et al. Computational simulation of arc melting process with complex interactions. *ISIJ International*. 2006. №46. P. 705–711.
  53. Ogino Y., Hirata Y., Murphy A. B. Numerical simulation of GMAW process using Ar and an Ar–CO<sub>2</sub> gas mixture. *Weld. World*. 2016. Vol. 60. № 2. P. 345–353.
  54. Oliveira M. A., Dutra J. C. Electrical model for the plasma-MIG hybrid welding process. *Welding and Cutting*. 2007. №6. P. 324-328
  55. Ono K., Liu Z., Era T., Uezono T., Ueyama T., Tanaka M., Nakata K. Development of a plasma MIG welding system for aluminium. *Welding International*. 2009. №23 (11). P. 805–809. DOI: 10.1080/09507110902836945.
  56. Padmanabham G., Pandey S., Schaper M. Pulsed gas metal arc welding of Al–Cu–Li alloy. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. №10. P. 67–75. DOI: 10.1179/174329305X19358.
  57. Pentegov I. V., Sydorets V. N. Energy parameters in a mathematical model of a dynamic welding arc. *Welding International*. 1990. №4, P. 272–275. DOI: 10.1080/09507119009447722.
  58. Pentegov I. V., Sydorets V. N. Quasistatic and Dynamic Volt-Ampere Characteristics and Time Constant of Blown and Moving Arcs. *The Paton Welding J*. 1991. №5. P. 361–364.
  59. Pentegov I.V., Sydorets V.N. Comparative Analysis of Models of Dynamic Welding Arc. *The Paton Welding Journal*. 2015. №12, P. 45-48.
  60. Plasma MIG welding with plasma torch and with MIG torch: pat. 6,693,252 US: B23k10/00. Zhang L., Matus T.; Illinois Tool Works Inc, 2004.
  61. Plasma-MIG/MAG-Schweissbrenner: pat. 10327911A1 2005.01.20 DE: B23k10/02. Merkle W.; Merkle GmbH, 2005.
  62. Sahasrabudhe O. S., Raut D. N., Shinde D. K. Particle Tracing for Metal Transfer in Hybrid TIG MAG Arc Welding Process of Interacting Heat Sources.

- International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE2017)*. 2017. P. 1-6 DOI: 10.2139/ssrn.3101593
63. Schnick M., Dreher M., Zschetzsche J., Fuessel U., Spille-Kohoff A. Visualization and optimization of shielding gas flows in arc welding. *Welding in the World*. 2012. Vol. 56. P. 54–61.
  64. Schweissbrenner zum Plasma-MIG-Schweissen: pat. 0168810A1 EP: B23k28/00. Blechert P.; Suddeutsche Kuhlerfabrik Julius Behr GmbH & Co, 1985.
  65. Semenov I. L., Krivtsun I. V., Reisgen U. Numerical study of the anode boundary layer in atmospheric pressure arc discharges. *Phys. D: Appl. Phys.* 2016. №49, 105204. 12 p.
  66. Semenov O., Demchenko V., Krivtsun I. et al. A dynamic model of droplet formation in GMA welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2012. №20, 045003. 14 p.
  67. Seyffarth P., Krivtsun I.V. Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment : Welding and Allied Processes. London: Taylor and Francis Books, 2002. Vol. 1. – 200 p.
  68. Simpson S.W., Zhu P., Lin Q., Li X. Metal transfer measurements in gas metal arc welding. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2001.Vol. 34. P. 347–353.
  69. Sydorets V. N., Zhernosekov A. M. Numerical simulation of the system of power source-consumable-electrode arc. *The Paton Welding J.* 2004. №12, P. 9–15.
  70. Sydorets V., Korzhyk V., Babych O. On the Plasma Temperature in the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 872. P. 61-66.
  71. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Berdnikova O. On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 906, P. 63-71. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.906.63.

72. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Bondarenko O. Electrical Characteristics of the Equipment for the Hybrid Plasma-MIG Welding. *Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON)*. 12-13 October 2017. Riga: IEEE. P. 1-6.
73. Tashiro S., Tanaka M. Development of plasma MIG brazing process for dissimilar metal joining of aluminum to steel. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2014. №61. P. 12018. DOI: 10.1088/1757-899X/61/1/012018.
74. Ton H. Physical properties of the plasma-MIG welding arc. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1975. №8. P. 922–933. DOI: 10.1088/0022-3727/8/8/006.
75. Tsujimura Y., Tanaka M., Numerical Simulation of heat source property with metal vapor behavior in GMA Welding. *J. Japan Weld. Soc.* 2012. Vol. 30, №1, P. 68–76.
76. URL: <https://weldobot.com/>
77. Valensi F. et al. Study of the spray to globular transition in gas metal arc welding: a spectroscopic investigation. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. № 224005. P. 1–12.
78. Van Nguyen A., Tashiro S., Van Hanh B., Tanaka M. Development of Plasma-MIG hybrid welding process. *Quarterly journal of the japan welding society*. 2017. №35 (2), P. 132-136. DOI: 10.2207/qjjws.35.132s.
79. Vennekens R., Schevers A. Plasma-MIG welding of copper and copper alloys. *Welding and Metal Fabrication*. 1997. Vol. 7, No 4. P. 227-235.
80. Verma G. SolidWorks Flow Simulation 2018 Black Book : tutorial, Eastman : CAD/CAM/CAE Works, 2018. 212 p.
81. Wang J., Nishimura H., Katayama S., Mizutani M. Evaporation phenomena of magnesium from droplet at welding wire tip in pulsed MIG arc welding of aluminium alloys. *Sci. Technol. Weld. Join.* 2011. №16. P. 418-425.
82. Wang P. C. Modelling and analysis of metal transfer in gas metal arc welding. *J. Phys. D Appl. Phys.* 2003. Vol. 36. P. 1143–1152.

83. Welding torch: pat. 2004/0188406A1 US: B23k9/173. Brabader W. A. J.; Troutman Sanders LLP, 2004.
84. Xin Z., Yang Z., Zhao H., Chen Y. Comparative Study on welding characteristics of Laser-CMT and Plasma-CMT Hybrid welded AA6082-T6 aluminum alloy butt joints. *Materials (Basel, Switzerland)*. 2019. №12 (20). DOI: 10.3390/ma12203300.
85. Yamazaki K., Yamamoto E., Suzuki K., Koshiishi F., Waki K., Tashiro S., Tanaka M., Nakata K. The measurement of metal droplet temperature in GMA welding by infrared two-colour pyrometry. *Welding International*. 2010, №24 (2). P. 81–87. DOI: 10.1080/09507110902842950.
86. Yang T., Chen H., Zhuang Y., Xiong J., Gao H., Chen Y. Research on Properties of Arcs Interaction for Plasma-MIG Hybrid Arc Welding Process. *J. comput. theor. nanosci.* 2016. №13 (4), P. 2407–2412. DOI: 10.1166/jctn.2016.4594.
87. Yang T., Gao H., Zhang S., Shi J., Wu L. The study on plasma-MIG hybrid arc behavior and droplet transfer for mild steel welding. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2013. №33. P. 459–464.
88. Yang T., Xiong J., Chen H. Effect of process parameters on tensile strength in plasma-MIG hybrid welding for 2219 aluminum alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. №84 (9-12), P. 2413–2421. DOI: 10.1007/s00170-015-7901-9.
89. Yang T., Xu K., Liu Y., Gao H., Wu L. Analysis on Arc Characteristics of Plasma-MIG Hybrid Arc. *Welding Hanjie Xuebao* Trans. of the China Weld. Ins. 2013. vol. 34(5). P. 62-66.
90. Zielińska S., Musiol K., Dzierżęga K., Pellerin S., Valensi F., Izarra C. D., Briand F. Investigations of GMAW plasma by optical emission spectroscopy. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2007. Vol. 16. № 4. P. 832–838.
91. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий: 2-е изд., перераб. и доп.: учебн. пособие. Москва: Наука, 1976. 280 с.

92. Акулов А.И., Ронский В.Л. Причины нарушения процесса совместного горения плазменной дуги и дугового разряда при плазменно-дуговой сварке. *Сварочное производство*. 1988. №1. С. 38-40.
93. Анахов С.В. и др. Особенности теплофизического проектирования плазмотронов для резки металлов. . *Сварочное производство*. 2011. № 1. С. 25–30.
94. Анахов С.В. Принципы и методы проектирования плазмотронов: монография. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2018. 165 с.
95. Анахов С.В., Матушкин А.В. Новые конструктивные способы повышения эффективности плазменной резки металлов. *Сварка. Реновация. Триботехника*. IX Уральская научно-практическая конференция, Нижний Тагил, 21 января 2019. Екатеринбург, 2019. С. 30-36.
96. Анахов С.В., Пыкин Ю.А., Матушкин А.В. Методические основы автоматизированного газодинамического проектирования в электроплазменных технологиях. *Вестник ПНИПУ*. 2018. Т. 20, № 1. С. 62-70. DOI: 10.15593/2224-9877/2018.1.07.
97. Аношин В.А., Илюшенко В.М., Минакова Р.В., Баньковский О.И., Василега О.П., Шалунов Е.П., Матросов А.Л. Жаропрочные материалы на основе меди. Способы получения. Свойства. Применение. *Электрические контакты и электроды*: Киев, ИПМ НАН Украины, 2010. С. 212-219.
98. Бабич А.А., Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Донг Ч., Цай Д., Хан Ш., Лоо З. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке Plasma-MIG. *Colloquium-journal*. 2020. №17(69). С. 33-40.
99. Бабич О.А., Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., Dong С., Han S. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. №7. С. 11-22.
100. Багрянский К.В., Добротина З.А., Хренов К.К. Теория сварочных процессов: учебн. пособие. Киев: Вища школа, 1976. 424 с.

101. Бакурская М.А., Колосова Н.А. Процесс плазма-МИГ и его промышленное применение за рубежом. *Электротехнологическая промышленность. Электросварка*. 1984. №6. С. 11-15.
102. Боженко Б.Л., Шалимов В.Н. Особенности физико-химического взаимодействия газовой и жидкой фаз при плазменной сварке. *Инженерно-физический журнал*. 1991. Т.61, № 1, С. 15-20.
103. Болотов Г. П., Болотов М. Г. Джерела живлення для дугового та плазмового зварювання і різання : навч. посіб. Чернігів : ЧНТУ, 2017. 179 с.
104. Брунов О.Г., Солодский С.А. Физико-математическое моделирование перехода капли электродного металла в сварочную ванну. *Сварочное производство*. 2008. №4. С. 16-19.
105. Гецкин О.Б., Полосков С.И., Ерофеев В.А., Витько О.П. Физико-математическая модель системы «источник питания - дуга» для сварки плавящимся электродом в защитных газах. *Тяжелое машиностроение*. 2008. №6. С. 18-20.
106. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка: монография. Киев: Екотехнология, 2007. 292 с.
107. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №11. С. 39-51.
108. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №11. С. 39-51.
109. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., Бабич А.А., Пелешенко С.И. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-135.

110. Дресвин С. В., Зверев С. Г. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии: монография. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 208 с.
111. Елизарова Т. Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. Лекции по математическим моделям и численным методам в динамике газа и жидкости :Москва : Научный Мир, 2007. 350 с.
112. Заяров Ю.В., Рябиченко Б.Р., Виноградов В.А., Боженко Б.Л., Елизаров Ю.Д. Температура плазмы при гидродинамическом воздействии на дугу. *Физика и химия обработки материалов*. 1997. №2. С. 118-120.
113. Киренский М.Е., Аммосов А.П., Попов В.В. Нарушение стабильности горения сжатой дуги. *Сварочное производство*. 1997. №4. С. 23-24.
114. Клименко А.А., Ляпин Г.К. Конструкции электродуговых плазмотронов: монография. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 56 с.
115. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. Москва: Металлургия, 1981. 120 с.
116. Кондрашов К.А. Усовершенствование процесса плазма-МИГ наплавки порошковой проволокой изделий, работающих в условиях термоциклических нагрузок : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06. Мариуполь, 2001. 192 с.
117. Коржик В.М., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И., Коротенко В.В., Бабич А.А. Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-134.
118. Коржик В.Н., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., Бабич А.А. Гибридная плазменно-дуговая сварка тонкостенных панелей из алюминиевого сплава. *Первый независимый научный вестник*. 2016. №12-13. С. 28-36.
119. Коржик В.Н., Квасницкий В.В., Хаскин В.Ю., Прохоренко Д.В., Переписчай А.А., Гринюк А.А., Бабич А.А. Влияние закрепления в жесткой оснастке на формирование остаточного напряженно-деформированного состояния



- стыковых соединений пластин из сплава 1561 при MIG, PAW и гибридной PAW-MIG сварке. *American Scientific Journal*. 2017. №17(1). С. 14-29.
120. Коржик В.Н., Пащин Н.А., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., Бабич А.А., Хаскин В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. №4. С. 32-37.
121. Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Хан Ш., Бабич А.А., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю. Создание роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки тонкостенных конструкций. *Автоматическая сварка*. 2017. №5-6. С. 72-82.
122. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Бабич А.А., Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Sciences of Europe*. 2016. №6(6). С. 45-51.
123. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Бабич А.А., Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Изучение порообразования при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *East European Scientific Journal*. 2016. №12(16). С. 104-110.
124. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Бабич А.А., Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *American Scientific Journal*. 2016. №5. С. 36-43.
125. Коржик В.Н.; Квасницкий В.В.; Пащин Н.А.; Перепичай А.А.; Прохоренко Д.В.; Гринюк А.А.; Бабич А.А.; Хаскин Д.В. Остаточное напряженно-деформированное состояние при гибридной плазменно-дуговой сварке тонкостенных панелей из сплава 1561 в жесткой оснастке. *Sciences of Europe*. 2017. № 15. С. 82–91.
126. Корниенко А.Н., Макаренко Н.А., Кондрашов К.А., Грановский А.В. Универсальный источник питания для плазма-МИГ сварки и наплавки. *Сварочное производство*. 2001. № 9. С. 25-26.

127. Крампит Н.Ю. Способы управления плавлением и переносом электродного металла (обзор). *Сварочное производство*. 2009. №3. С. 31-36.
128. Кривцун И. В., Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Шулым В. Ф., Терновой Е. Г. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2007. № 5. С. 49–53.
129. Кривцун И.В. Анодные процессы в сварочных дугах. *Автоматическая сварка*. 2018. №11-12. С. 103-117. DOI : <https://doi.org/10.15407/as2018.12.10>
130. Кривцун И.В., Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Цзыи Ло Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2015. № 7. С. 44-50.
131. Крячко Л. А., Лаптев А. В., Толочин А. И., Бега Н. Д., Евич Я. И., Головкова М. Е., Лебедь А. В. Структура и свойства композита W—50%(об. )Cu, полученного с применением порошка вольфрама, активированного размолом в шаровой мельнице. *Электрические контакты и электроды. Серия : Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия*. 2014. С. 75-89.
132. Лобанов Л.М., Єрмолаєв Г. В., Квасницький В.В., Махненко О.В., Єгоров Г.В., Лабарткава А.В. Напруження та деформації при зварюванні і паянні : підручник / за загальною редакцією Л.М. Лобанова. Миколаїв : НУК, 2016. 248 с.
133. Макаренко Н. А. Развитие научных и технологических основ плазменной сварки и наплавки плавящимся и неплавящимся электродами : дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.06. Мариуполь, 2006. 437 с.
134. Макаренко Н. А. Разработка плазменного процесса с аксиальной подачей порошковой проволоки для наплавки пресс-форм : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06. Мариуполь, 1999. 215 с.
135. Макаренко Н. А., Неведомский В. А. Термические циклы при Плазма-МИГ наплавке. *Автоматическая сварка*. 2003. № 1. С. 45–47.
136. Макаренко Н.А. Плазменная наплавка с аксиальной подачей порошковой проволоки. *Автоматическая сварка*. 1998. № 12. С. 52-53.

137. Макаренко Н.А., Грановский А.В., Кондрашов К.А. Улучшение технологических характеристик плазма-МИГ наплавки порошковых проволок. *Автоматическая сварка*. 2001. № 6. С. 53-55.
138. Макаренко Н.А., Кондрашов К.А. Разработка математической модели теплового процесса в порошковой проволоке при plasma-MIG наплавке. *Інтегровані технології та енергозбереження. Харків, ХДПУ*. 2000. № 4. С. 36-40.
139. Максимов А.И. Плазмохимия неравновесных процессов: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2010. 114 с.
140. Матушкин А.В. Совершенствование системы газовихревой стабилизации электродуговых плазмотронов для резки металлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.10 – сварка, родств. проц. и технол. / ФГАОУ ВПО «УрФУ им. Первого Президента России Б.Н.Ельцина». Екатеринбург, 2017. 132 с.
141. Микроплазменная сварка: монографія / Патон Б.Е. и др. / под ред. Б.Е. Патона. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
142. Морозов Е. М., Никишков Г. П. Применение метода конечных элементов в механике разрушения. *ФХММ*. 1982. № 4. С. 13-29.
143. Ошовский В.В. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов, возникающих в сужающем устройстве. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія*. 2013. № 2(21). С. 168-168.
144. Пашацкий Н.В., Молчанов Е.О. О характеристиках расщеплённого дугового разряда в потоке газа. *Сварочное производство*. 1997. №7. С. 3-4.
145. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Квазистатические и динамические вольт-амперные характеристики и постоянная времени обдуваемых и движущихся сварочных дуг. *Автоматическая сварка*. 1991. №5. С. 38-41.
146. Пентегов И.В., Сидорец В.Н. Энергетические параметры в математической модели динамической сварочной дуги. *Автоматическая сварка*. 1988. №11. С. 36-40.
147. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов: монографія / за ред. Б.Е. Патона. Москва: Наука, 1973. 243 с.

148. Плазменные технологии и оборудование в металлургии и литейном производстве: монография / Б.Е. Патон и др. Киев: Наукова думка, 2013. 465 с.
149. Плазмотрон для сварки плавящимся электродом: пат. 1557833a1 СССР: МКИЗ В23К9/16. Каика В. И., Кутырь А. С., Мерхин В. М., Остиловский О. А.; Черкасское научно-производственное объединение по защите металлов от коррозии, сварочному и раскройно-заготовительному производству. 1992. Бюл. № 40.
150. Попов А.Ю. Компьютерное моделирование гидродинамических эффектов. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 3. С. 35-38.
151. Прохоренко В.М., Прохоренко О.В. Напруження та деформації у зварних з'єднаннях і конструкціях : монографія, Київ : НТУУ «КПІ», 2009. 268 с.
152. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке : монография, Москва : Машгиз, 1951. 296 с.
153. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Анищенко Л.М. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы : учебн. пособие. Москва : Наука, 1986. 172 с.
154. Спосіб гібридного плазмо-дугового зварювання з імпульсною подачею газу: пат. 120542 Україна. № 201713005; заявл. 28.12.2017; опубл. 140.07.2019, Бюл. №24. 6 с.
155. Спосіб лазерно-плазмового зварювання: пат. 129895 Україна. №201604845; заявл. 29.04.2016; опубл. 26.11.2018, Бюл. №22. 4 с.
156. Способ плазменной сварки плавящимся электродом и плазмотрон: пат. 1816250А3 СССР: МКИЗ В23К10/00. Каика В. И., Ронский В. Л., Кузьменков Л. Г., Шинкаренко Н. И., Ефименко А. А.; Черкасское НПО «Прогресс», 1993. Бюл. № 18.
157. Тарасенко Е.Н., Кирсанов Ю.К. Методика измерения плотности тока и теплового потока в пятне нагрева дуги с полым неплавящимся катодом. *Сварочное производство*. 1985. №3. С. 124-128.

158. Терентьев С. А. Разработка технологии и оборудования аддитивного производства металлических изделий плазменной наплавкой плавящимся электродом : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.10. Пермь, 2019. 134 с.
159. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением: монография / под ред. акад. Б.Е. Патона. Москва: Машиностроение, 1974. 768 с.
160. Черный О.М. Действие силы поверхностного натяжения на перенос электродного металла. *Сварочное производство*. 1994. №7 С. 30-32.
161. Черный О.М. Поверхностное натяжение при струйном переносе электродного металла. *Сварочное производство*. 1996. №4 С. 28-29.
162. Черных А.В., Черных В.В. Расчет температуры электродных капель при дуговой сварке плавящимся электродом с помощью метода конечных элементов. *Сварочное производство*. 2008. №3. С. 6-7.
163. Чигарев В.В., Кондрашов К.А., Макаренко Н.А. Воропай Н.М. Особенности плавления электродного металла и формирование валика при плазма-МИГ наплавке порошковой проволокой. *Вісник ПДТУ. Маріуполь, ПДТУ*. 2001. № 11. С. 172-174.
164. Чигарев В.В., Макаренко Н.А., Кондрашов К.А. Повышение стойкости наплавленного слоя к термоциклическим нагрузкам при plasma-MIG наплавке. *Вісник ПДТУ. Маріуполь, ПДТУ*. 2000. № 10. С. 190-191.
165. Чигарев В.В., Макаренко Н.А., Кондрашов К.А., Воропай Н.М. Особенности плавления электродной проволоки при наплавке способом плазма-МИГ. *Автоматическая сварка*. 2001. № 8. С. 12-15.
166. Шелягин В.Д., Хаскин В.Ю. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки. *Автоматическая сварка*. 2002. № 6. С. 28–33.
167. Шпаков П. С., Попов В. Н. Статистическая обработка экспериментальных данных: учебное пособие. Москва: Московский государственный горный университет, 2003. 261 с.

168. Щицын Ю. Д. Совершенствование конструкций плазмотронов и технологии плазменной обработки металлов на обратной полярности : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06. Пермь, 2005. 154 с.
169. Щицын Ю. Д., Тюткин Ю. М. Плазменная сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*. 1986. № 5. С. 1–2.
170. Щицын Ю. Д., Щицын В. Ю., Херольд Х. Плазменная сварка алюминиевых сплавов. *Сварочное производство*. 2003. № 5. С. 36–42.
171. Эсибян Э.М. Плазменно-дуговая аппаратура: монография. Киев: Техника, 1971. 164 с.

## ДОДАТОК А

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

**Статті у наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз даних.**

1. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Berdnikova O. On the Thermal and Electrical Characteristics of the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 906, P. 63-71.

2. Sydorets V., Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Bondarenko O. Electrical Characteristics of the Equipment for the Hybrid Plasma-MIG Welding. *Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON)*. 12-13 October 2017. Riga: IEEE. P. 1-6.

3. Sydorets V., Korzhyk V., Babych O. On the Plasma Temperature in the Hybrid Plasma-MIG Welding Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2017. Vol. 872. P. 61-66.

**Статті у наукових фахових виданнях України.**

4. **Бабич О.А.**, Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Dong C., Han S. Гібридне зварювання алюмінієвих сплавів 1561 та 5083 з використанням плазмової дуги і дуги плавкого електрода (Plasma-MIG). *Автоматичне зварювання*. 2020. №7.

5. **Бабич А.А.**, Коржик В.Н., Хаскін В.Ю., Донг Ч., Цай Д., Хан Ш., Лоо З. Исследование напряженно-деформированного состояния симметричных стыковых сварных соединений при автоматической гибридной сварке Plasma-MIG. *Colloquium-journal*. 2020. №17(69). С. 33-40..

6. Коржик В.Н., Сидорец В.Н., Хан Ш., **Бабич А.А.**, Гринюк А.А., Хаскін В.Ю. Создание роботизированного комплекса для гибридной плазменно-дуговой сварки тонкостенных конструкций. *Автоматическая сварка*. 2017. №5-6. С. 72-82.

7. Коржик В.Н., Пашин Н.А., Миходуй О.Л., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Хаскин В.Ю. Сравнительная оценка способов дуговой и гибридной плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевого сплава 1561. *Автоматическая сварка*. 2017. №4. С. 32-37.

8. Коржик В.Н., Квасницкий В.В., Хаскин В.Ю., Прохоренко Д.В., Перепичай А.А., Гринюк А.А., **Бабич А.А.** Влияние закрепления в жесткой оснастке на формирование остаточного напряженно-деформированного состояния стыковых соединений пластин из сплава 1561 при MIG, PAW и гибридной PAW-MIG сварке. *American Scientific Journal*. 2017. №17(1). С. 14-29.

9. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Особенности формирования швов при гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *American Scientific Journal*. 2016. №5. С. 36-43.

10. Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Исследование технологических особенностей гибридной плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Sciences of Europe*. 2016. №6(6). С.

11. . Коржик В.Н., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., **Бабич А.А.**, Сутковой А.Д., Олейниченко Т.В. Изучение порообразования при гибридной плазменно-дуговой сварке алюминиевых сплавов. *East European Scientific Journal*. 2016. №12(16). С. 104-110.

12. Коржик В.Н., Гринюк А.А., Хаскин В.Ю., **Бабич А.А.** Гибридная плазменно-дуговая сварка тонкостенных панелей из алюминиевого сплава. *Первый независимый научный вестник*. 2016. №12-13. С. 28-36.

13. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И. Гибридные технологии сварки алюминиевых сплавов на основе дуги с плавящимся электродом и сжатой дуги. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-135.



14. Гринюк А.А., Коржик В.Н., Шевченко В.Е., **Бабич А.А.**, Пелешенко С.И., Чайка В.Г., Тищенко А.Ф., Ковбасенко Г.В. Основные тенденции развития плазменно-дуговой сварки алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2015. №11. С. 39-51.

15. Коржик В.М., Хаскин В.Ю., Гринюк А.А., Ткачук В.И., Пелешенко С.И., Коротенко В.В., **Бабич А.А.** Трехмерная печать металлических объемных изделий сложной формы на основе сварочных плазменно-дуговых технологий. *Автоматическая сварка*. 2016. №5-6. С. 127-134.

### **Патенти України на винахід та корисну модель**

16. Спосіб гібридного плазмо-дугового зварювання з імпульсною подачею газу: пат. 120542 Україна. № 201713005; заявл. 28.12.2017; опубл. 14.07.2019, Бюл. №24. 6 с.

17. Спосіб лазерно-плазмового зварювання: пат. 129895 Україна. №201604845; заявл. 29.04.2016; опубл. 26.11.2018, Бюл. №22. 4 с.

### **Міжнародні та українські науково-технічні конференції і семінари на яких на яких докладалися основні положення і результати дисертації**

18. 70-th International Institute of Welding, June 26-30, 2017, Shanghai, China;

19. PolyWeld–2019: збірник тез доповідей міжнародної конференції «Іноваційні технології та інжиніринг у зварюванні», „КПІ імені Ігоря Сікорського”, 2019, Київ, Україна;

20. Proceedings of IEEE 58th International Scientific Conference of Riga Technical University on Power and Electrical Engineering (RTUCON), 12-13 October 2017, Riga, Latvia;

21. Презентація по новим матеріалам і технологіям зварювання між країнами СНД і районом високотехнологічних новітніх виробництв у м. Чжаоцін 2017 року, 22-25 травня 2017, м. Чжаоцін, КНР;

22. Виставка-конференція з лазерної техніки і технології, 19.09.2017, м. Гуанчжоу, КНР;

23. Форум-саміт галузі морських матеріалів, 2 сесія, 18-19.06.2017, м. Далянь, КНР;
24. Зустріч-презентація зарубіжних спеціалістів і проектів, 27-29.09.2016, м. Лонгян, КНР;
25. Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні промислові матеріали для морських технологій», 23-25.06.2016, м. Ухань, КНР;
26. DISTC: DongGuan International Science and Technology Cooperation Week, 11-12.12.2015, DongGuan, China;
27. VIII міжнародна конференція молодих учених і спеціалістів «Зварювання і споріднені технології», 20-22 травня 2015 р., ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, Україна.