

## ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

### TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 621.793

- Балушок К. Б. канд. техн. наук, головний інженер АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: motor@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-8212-9275
- Петрик І. А. канд. техн. наук, головний зварник АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ogc.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0001-6600-1661
- Чигілейчик С. Л. провідний інженер АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-2372-9078
- Марченко Ю. А. начальник бюро зварювання УГМет АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ua.marchenko125@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2189-0976
- Сахно С. С. начальник бюро досліджень УГМет АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-3388-2663

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ДЛЯ ГЕРМЕТИЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКИХ ФОЛЬГ ПРИ ВИКОРИСТАННІ В КОНСТРУКЦІЯХ МЕМБРАННОГО ТИПУ

**Мета роботи.** Розробка оптимальної технології зварювання тонкостінних оболонок зі сталі 12X18H10T ( $\delta = 0,15$  мм), що працюють при знакозмінних навантаженнях.

**Методи дослідження.** Для автоматичного аргонно-дугового зварювання (ААДЗ) використовувалось устаткування для орбітального зварювання, до складу якого входить джерело струму MW 2600 (фірми FRONIUS) із блоком програмного керування й зварювальна голівка закритого типу MW40. Дослідні роботи показали, що при даному виді зварювання для настільки малих товщин не вистачає концентрації зварювальної дуги, що не дозволяє стабільно формувати ванну й одержати суцільний рівномірний шов.

Для мікроплазмового зварювання використовувався спеціальний роботизований комплекс STARWELD 190H, до складу якого входять: джерело живлення чергової дуги INV 50; джерело живлення основної дуги INV 190; блок управління SIEMENS Simatic S 7-300; робот CR3-535M (MITSUBISHI); маніпулятор та плазмотрон НРН 80.

Контроль якості зварювання проводили візуальним оглядом та металографічним дослідженням. Враховуючи умови експлуатації деталей, згідно технічних умов креслення також був передбачений пневмогідравлічним метод контролю.

**Отримані результати.** Візуальний огляд зовнішньої поверхні зварних швів показав відсутність дефектів у вигляді пор, тріщин, раковин, не сплавлень, підрізів та ін. Геометричні розміри зварного шва відповідали вимогам нормативної документації, діючої на підприємстві. Проведені металографічні дослідження коробок мембранних, з'єднаних мікроплазмовим зварюванням, дали позитивний результат. Дефектів металургійного характеру в зварних швах не виявлено.

**Практична цінність.** Визначений оптимальний спосіб зварювання, що може бути застосований для виготовлення тонкостінних мембранних конструкцій, з огляду технологічності та економічної доцільності. Встановлено, що мікроплазмове зварювання дозволяє одержувати герметично щільний шов, при товщині деталей, що зварюються, близько 0,15 мм. Підтверджена працездатність зварних мембранних коробок у складі баростатичного клапана авіаційного двигуна. Встановлено, що мікроплазмове зварювання може бути застосоване при виготовленні тонкостінних оболонок зі сталі 12X18H10T ( $\delta = 0,15$  мм), що працюють при знакозмінних навантаженнях. Технологічний процес зварювання впроваджений у серійне виробництво.

**Ключові слова:** авіаційний двигун, баростатичний клапан, коробка мембранна, мікроплазмове зварювання, технологічний цикл, зварний шов.

## Вступ

Заходи, спрямовані на зниження ваги й підвищення експлуатаційних характеристик турбореактивних авіаційних двигунів, є першорядними при розробці та проектуванні. Зменшення витрат повітря, стабільність подачі палива, своєчасне змащення тертьових вузлів в експлуатації, значною мірою підвищують міжремонтний ресурс авіаційного двигуна. Поряд із цим, виготовлення відмінних конструкцій вхідних деталей і вузлів вимагає розробки енергоємних і економічно доцільних технологій, що включають у себе застосування новітніх методів зварювання, пайки, напилування та ін. [1–3].

Маслосистема авіаційного газотурбінного двигуна, для маневрених літаків, вимагає ряду технічних доробок і поліпшень, що дозволяють виключити масляне голодування тертьових пар, в момент здійснення польоту на висотах більш 13 км, переверненому польоті або польоті з негативними перевантаженнями. У цьому зв'язку, для зменшення ступеня розрідження масла в коробці приводів масляної системи, була спроектована відмінна конструкція баростатичного клапану, до складу якої ввійшли 8 тонкостінних мембранних коробок.

Для з'єднання матеріалів при виготовленні тонкостінних конструкцій деталей авіаційного двигуна, як правило, використовують зварювання висококонцентрованим джерелом нагріву, а саме електронно-промене, лазерне або мікроплазмове зварювання.

Лазерне зварювання – це високоточний зварювальний процес, у якому використовуються високотехнологічні машини та передові технології для фокусування концентрованого пучка світла, який генерується лазером та використовується для сплавлення металів або термопластів.

До переваг лазерного зварювання можна віднести:

- точність, оскільки лазерне зварювання чудово забезпечує складні та точні зварні шви навіть у складних геометріях. Ця точність має важливе значення для застосувань, які вимагають дрібних деталей і жорстких допусків;

- мінімальна зона термічного впливу. Сфокусований лазерний промінь генерує локалізоване тепло, що призводить до меншої зони термічного впливу порівняно з традиційними методами зварювання. Це дозволяє отримувати мінімальну деформацію металу та зменшує потребу в значному рихтуванні деталей після зварювання;

- чисті та міцні зварні шви. Лазерне зварювання створює чисті зварні шви без бризок та з мінімальною пористістю, а отримане з'єднання є міцним і надійним;

- швидкість і ефективність. Концентрована енергія лазерного променя забезпечує швидке нагрівання та охолодження, що забезпечує швидкий процес зварювання. Така ефективність сприяє підвищенню продуктивності виробництва.

- зменшення відходів матеріалу. Точність лазерного зварювання мінімізує кількість матеріалу, що піддається впливу тепла, що призводить до зменшення відходів під час процесу зварювання.

Плазмове зварювання – це сучасна техніка зварювання, яка використовує концентрований потік іонізованого газу для створення високотемпературної дуги. Ця дуга розплавляє зварюваний матеріал, після чого розплавлений метал охолоджується та твердіє, утворюючи міцне та довговічне з'єднання. Плазмове зварювання використовується в багатьох галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну та обробну промисловість.

Однією з головних переваг плазмowego зварювання є можливість створення точних і якісних швів. Концентрована дуга створює вузьку сфокусовану зону нагріву, що дозволяє краще контролювати процес зварювання. Така точність робить плазмове зварювання ідеальним для зварювання тонких матеріалів, а також для зварювання складних форм і з'єднань.

Ще однією перевагою плазмowego зварювання є його універсальність. Цю техніку можна використовувати для зварювання широкого діапазону металів, включаючи нержавіючу сталь, алюміній, титан і мідь. Крім того, плазмове зварювання можна використовувати в різних сферах зварювання, включаючи ручне зварювання, автоматичне та роботизоване зварювання. Завдяки своїй точності та універсальності плазмове зварювання швидко стає популярним вибором для зварювання в багатьох галузях промисловості [4–6].

Зварювальні технології лазерним променем, в основному, використовуються для з'єднання компонентів з малою товщиною (~ до 0,8 мм) тонкими зварними швами й низькою тепловою деформацією. У той же час, діапазон застосування лазерного зварювання охоплює номенклатуру деталей від зварювання прецизійних деталей в атомній промисловості, таких як сильфони, різні датчики, до несучих конструкцій у машинобудуванні й наплавлення при виготовленні форм із високоміцного чавуну, а також зварювання великогабаритних тонкостінних конструкцій з нержавіючої сталі. При цьому, експлуатація устаткування для лазерного зварювання є дорогою, що значно підвищує собівартість виготовлення виробів [7–8]. У цьому зв'язку, з метою зниження собівартості виготовлення коробок мембран, були проведені дослідні роботи з відпрацювання технології ААДЗ) і мікроплазмowego зварювання мембран.

Мета роботи – розробити оптимальну технологію зварювання тонкостінних оболонок з 12Х18Н10Т ( $\delta = 0,15$  мм), що працюють при знакозмінних навантаженнях.

## Матеріали і методики

Коробка мембранна складається з двох мембран фігурного тарілчастого типу (рис. 1) із привареними до неї крапковим контактним зварюванням опорами. Товщина мембрани становить 0,15 мм, а товщина опор –

0,3 мм. З'єднання опори з мембраною виконують за допомогою коротко-імпульсного контактного зварювання на чотири зварювальні крапки. Діаметр крапки ~ 0,5 мм. Матеріал деталі – конструкційна нержавіюча сталь марки 12X18H10T. У складі двигуна пакет з 8 коробок мембранних встановлюється в баростатичний клапан, і налаштовується на необхідний робочий тиск. При перевищенні тиску клапан відкривається та відбувається скидання надлишкового тиску масла до рівня робочого. Пакет коробок мембранних працює при значиміших навантаженнях, у рідкому масляному середовищі.

Для зварювання ААДЗ використовувалось устаткування для орбітального зварювання, до складу якого входить джерело струму MW 2600 (фірми FRONIUS) із блоком програмного керування й зварювальна голівка закритого типу MW40. Дослідні роботи показали, що при даному виді зварювання, для настільки малих товщин не вистачає концентрації зварювальної дуги, що не дозволяє стабільно формувати ванну й одержати суцільний рівномірний шов.

Для мікроплазмового зварювання використовується спеціальний роботизований комплекс STARWELD 190H, в склад якого входять: джерело живлення чергової дуги INV 50; джерело живлення основної дуги INV 190; блок управління SIEMENS Simatic S 7-300; робот CR3-535M (MITSUBISHI); маніпулятор та плазмотрон НРН 80

Основні параметри процесу мікроплазмового дугового зварювання включають: зварювальний струм, швидкість зварювання, швидкість потоку робочого газу, швидкість потоку захисного газу, довжину дуги, діаметр сопла, коефіцієнт отвору сопла та виліт вольфрамового електроду. Разом ці параметри визначають якість зварювання та форму шва [9–12]. Зварювання дослідних зразків проводилося на режимах, наведених у таблиці 1.

**Таблиця 1** – Параметри режиму мікроплазмового зварювання коробок мембранних

Параметри режиму	Значення
Струм зварювання	2,7–2,9 А
Струм пілотної дуги	1,0 А
Витрата пілотної газу (аргону)	0,6–0,8 л/хв
Витрата захисного газу (аргону)	3,0 л/хв
Витрата плазмоутворюючого газу (аргону)	0,9 л/хв
Швидкість зварювання	10 мм/сек
Діаметр отвору сопла захисного газу	0,8 мм
Діаметр вольфрамового електроду	2,0 мм

Завдяки високому ступеню іонізації газу в плазмотроні, при використанні вольфрамових електродів діаметром 1–2 мм плазмова дуга може горіти при досить малих струмах, починаючи з 0,1 А. Мікроплаз-

мове зварювання є досить ефективним методом з'єднання виробів малої товщини до 1,5 мм. Як правило, надтонкі пластини важко піддаються зварюванню і вимагають високої точності збирання. Завдяки тонкій товщині пластини мають характеристики одностороннього зварювання та одночасно двостороннього формування. Крім того, вони особливо чутливі до підведення тепла в процесі зварювання, через що можуть виникати такі дефекти як прогорання та деформація, що безпосередньо впливає на якість зварювання. Діаметр плазмової дуги становить близько 2 мм, що дозволяє сконцентрувати тепло на обмеженій ділянці виробу, нагрівати зону зварювання, не ушкоджуючи сусідні ділянки [13, 14].



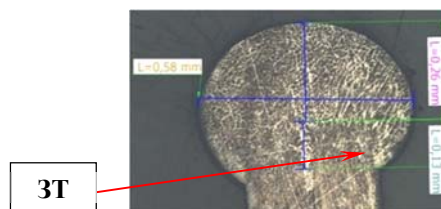
**Рисунок 1.** Зовнішній вигляд коробки мембранної: 1 – опора ( $\delta = 0,3$  мм); 2 – мембрана ( $\delta = 0,15$  мм);

#### Аналіз отриманих результатів

Контроль якості зварювання проводили візуальним оглядом та металографічним дослідженням. Враховуючи умови експлуатації деталей, згідно технічних умов креслення також був передбачений пневмогідралічним методом контролю.

Візуальний огляд зовнішньої поверхні зварних швів показав відсутність дефектів у вигляді пор, тріщин, раковин, не сплавлень, підрізів та ін. Геометричні розміри зварного шва відповідали вимогам нормативної документації діючої на підприємстві.

Проведені металографічні дослідження коробок мембранних, зварених мікроплазмовим зварюванням, дали позитивний результат. Дефектів металургійного характеру в зварних швах не виявлено. Зовнішній вигляд макрошліфа представлено на рисунку 2.



**Рисунок 2.** Макрошліф зварного шва мікроплазмовим зварюванням ( $\times 200$ )

Контроль стабілізації та герметизації мембран після зварювання виконувався пневмогідралічним методом, а саме:

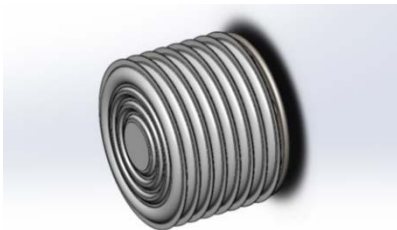
- десятикратним додаванням рівнорозподіленого

навантаження (10–12 кгс) до поверхні опори мембранної в період до 10 хвилин;

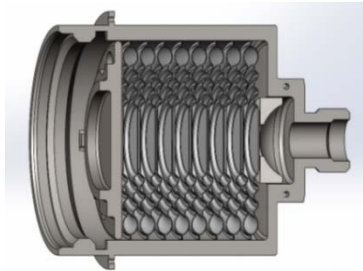
- зануренням у рідину з температурою 80–100 °C на час не менше 2 хвилин.

Результати пневмогідравлічного контролю позитивні. Виготовлені деталі відповідають нормам технічних вимог.

Для проведення комплексу випробувань з підтвердження працездатності коробок мембранних у складі баростатичного клапану, зварених мікроплазмовим зварюванням, був виготовлений комплект деталей у кількості 8 шт. Зварювання й контроль якості зварювання відповідали вимогам інструкції, діючої на підприємстві.



**Рисунок 3.** Складання коробок мембранних для встановлення в клапан баростатичний



**Рисунок 4.** Установка блоку в елемент корпусу клапана баростатичного

За підсумками, коробки мембранні в складі клапану баростатичного (рис. 3, 4) задовільно пройшли стендові випробування

На підставі отриманих результатів випробувань, підтверджена працездатність коробок, виготовлених із застосуванням методу мікроплазмового зварювання.

### Висновки

1. Визначений оптимальний спосіб зварювання, що може бути застосований для виготовлення тонкостінних мембранних конструкцій, з огляду технологічності та економічної доцільності.

2. Встановлено, що мікроплазмове зварювання дозволяє одержувати герметично щільний шов, при товщині деталей, що зварюються близько 0,15 мм.

3. Підтверджена працездатність зварних мембранних коробок у складі баростатичного клапану авіаційного двигуна.

4. Встановлено, що мікроплазмове зварювання може бути застосоване при виготовленні тонкостінних оболонок зі сталі 12X18H10T ( $\delta = 0,15$  мм), що працюють при знакозмінних навантаженнях. Технологічний процес зварювання впроваджений у серійне виробництво.

### Список літератури

1. Братухін А. Г. Сучасні авіаційні матеріали: технологічні й функціональні особливості / Братухін А. Г. – М. : Авиатехінформ, 2003. – 154 с.

2. Y. K. Abbas. Development the oil system of aircraft / Y. K. Abbas, J. Abas // International Journal of Advanced Research in Engineering. – Vol. 6, February 2015. – P. 28–35.

3. A. Lalis. Ontology-based reliability analysis of aircraft engine lubrication system / A. Lalis, S. Bolcekova, O. Stumbauer // Transportation Research Procedia. – Vol. 51, December 2020. – P. 37–45.

4. Лазерне зварювання. Застосування в промисловості [Електронний ресурс]. – URL:<http://lasercwm.com/blog/lasersvarka>

5. Welding of thin stainless-steel sheets using a QCW green laser source / E. Haddad, F. Poggenburg, A. Hausler, A. Olowinsky // Scientific Reports, Vol. 14, February 2024, art. 4105.

6. Мікроплазмове зварювання / Б. Е. Патон, В. С. Гвоздецкий, Д. А. Дудко та ін. – К. : Наук. думка, 1979. – 248 с.

7. Effect of post welding heat treatment on the weld quality of micro plasma arc welded SS-316L thin sheet. Soldagem and Inspegao. – Vol. 27, March 2022. – P. 9–12.

8. In-process monitoring of lack of fusion in ultra-thin sheets edge welding using machine vision / Y. Hong, B. Chang, G. Peng et al. // Sensors Signal Processing and Visual Computing. – Vol. 18, July 2018. – P. 38–45.

9. K. S. Prasad Study on effect of welding speed on micro structure and mechanical properties of pulsed current micro plasma arc weldel AISI 304L sheets / K. S. Prasad, C. S. Rao, D. N. Rao // Journal of Manufacturing Science and Production. – Vol. 12, August 2012. – P. 123–128.

10. A. K. Sahu. Influence of current pulsation on solidification parameters during micro-plasma arc welding of thin sheet Alloy 718 / A. K. Sahu, S. Bag // Welding in the World. – No 12. – 2021. – Vol. 65. – P. 2403–2419. <https://doi.org/10.1007/s40194-021-01191-3>

11. K. Ansari. Estimation of mechanical properties of microplasma welding of 0,5 mm SS304 sheets / K. Ansari, M. Baruah // Soldagem and Inspegao. – Vol. 28, April 2023. – P. 17–26.

12. V. Haldar. Formability of micro-plasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint / V. Haldar, S. Kumal Biswal, S. Pal // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – Vol. 44, October 2022, art. 564.

13. The effect of welding parameters is micro-plasma arc welding of stainless steel 304 thin sheet / S. Prasad, B. Kumar, R. Pritbaitha, S. Singh // Journal of Manufacturing Processes. – Vol. 45, January 2024. – P. 218–222.

14. Analysis of weld characteristics of micro-plasma arc welding and tungsten inert gas welding of thin stainless steel (304L) sheet. Proceeding of the Instruction of

Mechanical Engineers Part L / S. Batool, M. Khan, S. Jaffery, A. Khan // Journal of Materials Design and Applications 230 (6).

Одержано 23.09.2024

## DETERMINATION OF OPTIMAL CONDITIONS FOR HERMETIC WELDING OF THIN FOILS WHEN USED IN MEMBRANE-TYPE STRUCTURES

- Balushok K.** Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: motor@motorsich.com*, ORCID: 0000-0002-8212-9275
- Petrik I.** Candidate of Technical Sciences, Chief Welder at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: motor@motorsich.com*, ORCID: 0000-0001-6600-1661
- Chigileychik S.** Leading engineer of UGMet at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: tb.ugmet@motorsich.com*, ORCID: 0000-0002-2372-9078
- Marchenko Y.** Head of welding bureau UGMet at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: ua.marchenko125@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-2189-0976
- Sakhno S.** Head of the research bureau UGMet at JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: seregass9369@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-3388-2663

**Purpose.** Development of optimal technology for welding thin-walled shells made of 12X18H10T steel ( $\delta=0.15$  mm), working at alternating loads. Research methods.

**Research methods.** For welding automatic argon-arc welding (AAAW) equipment was used for orbital welding, which includes a MW 2600 current source (FRONIUS) with software control unit and welding head of closed type MW40. Research works showed that this type of welding is not enough for such small thicknesses concentration of the welding arc, which does not allow stable forming of the bath and obtaining solid uniform seam.

A special robotic complex was used for microplasma welding STARWELD 190H, which includes: a power source for the regular arc INV 50; source main arc power supply INV 190; SIEMENS Simatic S 7-300 control unit; robot CR3-535M (MITSUBISHI); manipulator and HPH 80 plasmatron. Welding quality control was carried out by visual inspection and metallographic examination.

Taking into account the conditions of operation of the parts, according to the technical conditions of the drawing, it was also provided pneumohydraulic control method.

**Obtained results.** Visual inspection the outer surface of the welds showed the absence of defects in the form of pores, cracks, shells, no fusions, undercuts, etc. The geometric dimensions of the weld met the requirements of the standard documentation valid at the enterprise. Metallographic studies of the boxes membranes, welded by microplasma welding, gave a positive result. Defects of metallurgical character were not found in the welds.

**Practical value.** The optimal method of welding that can be applied is determined for the manufacture of thin-walled membrane structures, from the point of view of manufacturability and economy expediency It has been established that microplasma welding allows obtaining a hermetically tight seam, when the thickness of parts to be welded is about 0.15 mm. The performance of welded membrane boxes is confirmed in the barostatic valve of an aircraft engine. It is established that micro plasma welding can be used in the manufacture of thin-walled shells made of 12X18H10T steel ( $\delta=0.15$  mm), which work at variable loads. The technological process of welding is introduced into the series production.

**Key words:** aviation engine, barostatic valve, membrane box, microplasma welding, technological cycle, weld.

### References

1. Bratuxin A .G. (2003). Suchasni aviacijni materialy: te-xnologichni j funkcional`ni osobly`vosti. Moscow: Avy`atexinform,154.
2. Y. K. Abbas, J. Abas. (2015). Development the oil system of aircraft. International Journal of Advanced Research in Engineering, 6, 28–35.
3. A. Lalis, S. Bolcekova, O. Stumbauer. (2020). On-



tology-based reliability analysis of aircraft engine lubrication system. *Transportation Research Procedia*, 51, December, 37–45.

4. Lazerne zvaryuvannya. Zastosuvannya v promy'slovosti [Elektronnyj resurs]. URL:<http://laserw.com/blog/lasersvarka>

5. E. Haddad, F. Poggenburg, A. Hausler, A. Olowinsky. (2024). Welding of thin stainless-steel sheets using a QCW green laser source. *Scientific Reports*, 14, 4105.

6. B. E. Paton, V. S. Gvozdeczkyj, D. A. Dudko et al. (1979). *Mikroplazmove zvaryuvannya*. Ky'yiv : Nauk. dumka, 248.

7. Effect of post welding heat treatment on the weld quality of micro plasma arc welded SS-316L thin sheet. (2022). *Soldagem and Inspegao*, 27, 9–12.

8. Y. Hong, B. Chang, G. Peng, Z. Yun, X. Hou, vB. Xue, D. Du. (2018). In-process monitoring of lack of fusion in ultra-thin sheets edge welding using machine vision. *Sensors Signal Processing and Vissual Computing*, 18, July, 38–45.

9. K. S. Prasad, C. S. Rao, D. N. Rao. (2012). Study on effect of welding speed on micro structure and mechanical properties of pulsed current micro plasma arc weldel

AISI 304L sheets. *Journal of Manufacturing Science and Production*, 12, 123–128.

10. A. K. Sahu, S. Bag. (2021). Influence of current pulsation on solidification parameters during micro-plasma arc welding of thin sheet Alloy 718. *Welding in the World*, 65, 2403–2419.

11. K. Ansari, M. Baruah. (2023). Estimation of mechanical properties of microplasma welding of 0,5 mm SS304 sheets. *Soldagem and Inspegao*, 28, 17–26.

12. V. Haldar, S. Kumal Biswal, S. Pal. (2022). Formability of micro-plasma arc-welded AISI 316L stainless steel thin sheet joint. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 44, 564.

13. S. Prasad, B. Kumar, R. Pritbaita, S. Singh. (2024). The effect of welding parameters is micro-plasma arc welding of staines steel 304 thin sheet. *Journal of Manufacturing Processes*, 45, January, 218–222.

14. S. Batool, M. Khan, S. Jaffery, A. Khan. Analysis of weld characteristics of micro-plasma arc welding and tungsten inert gas welding of thin stainless steel (304L) sheet. *Proceeding of the Instruction of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications* 230 (6).