

АНОТАЦІЯ

Ганущак О.В. Розробка технології стикового плазмово-дугового багатопрохідного зварювання біметалу «титан-сталь» із нанесенням бар'єрних покриттів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ – 2024.

Дисертаційна робота присвячена вивченню металургійних особливостей процесів плазмово-дугового багатопрохідного зварювання біметалу титан-сталь із нанесенням бар'єрних прошарків для мінімізації або повного усунення інтерметалідних фаз (ІМФ), які зазвичай утворюються при взаємодії титану та сталі у нагрітому до певних температур стані. Вивчення зазначених металургійних особливостей дозволить створити технології одержання зварних з'єднань прийнятної якості, які використовуються в хімічній промисловості та магістральних трубопроводах.

Для підвищення експлуатаційного ресурсу труби таких трубопроводів виготовляють зі сталі, плакованою із внутрішньої сторони труби шаром титану або титанового сплаву. Наявність титанового шару і високі вимоги до міцності та корозійної стійкості зварних швів, викликають ряд проблем при виборі способів зварювання. Актуальною є задача вибору спеціальних технологічних прийомів, способу зварювання та розробки відповідної технології з'єднання листів плакованої титаном сталі, яка за порівняно невисоких витрат дозволить отримувати трубні вироби необхідної якості.

Об'єкт дослідження – процеси плазмового і дугового зварювання конструкційної низьковуглецевої сталі, плакованої шаром титану, із застосуванням бар'єрних покриттів.

Предмет дослідження – формування стикового зварного з'єднання біметалу «титан-сталь» при багатопрохідному зварюванні.

Мета роботи – дослідження ефективності застосування бар’єрних покриттів з різних матеріалів та їх нанесення на титан та сталь з використанням різних методів плазмово-дугового наплавлення і напилювання для мінімізації утворення інтерметалідних фаз при зварюванні встик сталевих листів, плакованих шаром титану, розробка технології одержання таких стикових з’єднань.

До **наукової новизни** дослідження відносяться наступні положення:

1. Вперше встановлено закономірності впливу величини погонної енергії E на товщину перехідної зони, що утворюється при взаємодії розплаву сталі з титаном в процесах плазмового та дугового наплавлення сталі на титан, і включає інтерметалідні фази Ti-Fe, а саме – при значенні E в інтервалі 45–60 Дж/мм ця величина становить 10–60 мкм, а при збільшенні величини E до 60–100 Дж/мм – досягає 450 мкм і більше із утворенням значної кількості мікротріщин та інших дефектів.

2. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості структуроутворення при металургійній взаємодії ванадію зі сталлю в процесах плазмового та дугового наплавлення покриття ванадію на сталь і сталі на це покриття, встановлено, що в перехідній зоні між наплавленим ванадієвим покриттям і сталлю утворюється інтерметалідний прошарок змінної концентрації (40–75 мас.% V і 60–25 мас.% Fe) і підвищеної твердості (до 5520 МПа), що призводить до тріщиноутворення.

3. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості металургійної взаємодії розплаву мідних сплавів з титаном і сталлю, а саме – встановлено умови нанесення бар’єрного покриття із сплаву CuSi3Mn1 на титанову пластину, при яких взаємна дифузія елементів на межах розділу «титан-CuSi3Mn1-сталь» не призводить до утворення крихких фаз та тріщиноутворення.

4. Вперше виявлено особливості металургійної взаємодії на межі «титан – плазмово напилене сталеве покриття» при плазмово-дуговому наплавленні сталевого дроту на це покриття, а саме – умови мінімізації його

товщини (не менше 400 мкм) і величини погонної енергії наплавлення на це покриття (до 200–250 Дж/мм), при яких між напиленим покриттям і титаном утворюється бездефектна перехідна зона.

5. Вперше встановлено, що в результаті нагріву плазовими і дуговими зварювальними джерелами при заповненні розробки стикового з'єднання біметалу «титан-сталь» в процесі багатопрохідного зварювання до 900–1300°C в зоні контакту титану і сталі в твердій фазі утворюється бездефектна перехідна зона товщиною від 1 мкм до 10 мкм, в якій при подальшому підвищенні температури до 1430°C утворюється суміш інтерметалідів з мікротвердістю HV 600–800 та інтегральним хімічним складом, що відповідає формулі Ti_2Fe .

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблено технологічний процес багатопрохідного стикового плазово-дугового зварювання біметалевих пластин «титан-сталь», що являють собою низьковуглецеву сталь товщиною 10 мм, плаковану титаном товщиною 2 мм, який забезпечує отримання з'єднань із показниками міцності на статичний розрив, що досягають до 85% міцності відповідних складових біметалу.

2. Оптимізовані конструктивні параметри U-подібної розробки крайок для стикового зварювання біметалевих пластин «титан-сталь», зокрема, запропоновано виготовлення в розробці порогу в нижній частині розробки із розмірами для забезпечення стикування крайок титанового шару перед їх зварюванням.

3. Розроблено спеціальний плазмотрон для зварювання титанового шару в U-подібній розробці, який відрізняється видовженим плазмоутворюючим соплом заданої довжини, що повторює форму U-подібної розробки.

4. Встановлені оптимальні технологічні параметри імпульсно-дугового наплавлення сталевих шару плавким електродом на бар'єрне покриття із мідного кремній-марганцевого сплаву, які забезпечують

формування бездефектної структури перехідної зони між мідним сплавом і сталлю, а саме: товщини наплавленого сталевго шару – 1,5–2,5 мм, діаметри сталевго присадного дроту 0,8–1,0 мм, форма імпульсу зварювального струму – трапецеїдальна зі співвідношенням часу імпульсу до часу паузи 2:1 та частотою імпульсів в діапазоні 3–10 Гц,.

5. Розроблені рекомендації по створенню дослідно-промислової лінії виготовлення прямошовних труб «титан-сталь» із застосуванням розробленої технології багатопрохідного стикового зварювання біметалу «титан-сталь» впроваджені в ТОВ «НВЦ ПЛАЗЕР» (Україна) при розробці та виготовленні дослідно-промислового комплексу для повздовжньошовного й орбітального зварювання заготовок біметалевих труб.

У **першому розділі** приведено результати аналізу особливостей отримання зварних біметалевих з'єднань титану та сталі з використанням сучасних зварювальних технологій і технологічних прийомів. Розглянуто технологічні особливості зварювальних процесів і структурні особливості формування таких зварних з'єднань, визначено характерні дефекти їх утворення. Сформульовано базову проблематику отримання з'єднань титану та сталі зварюванням плавленням. На основі проведеного аналізу визначені мета та завдання досліджень.

У **другому розділі** наведено опис застосованих стандартизованих та оригінальних методів проведення дослідження. Вказано матеріали, що застосовувались в процесі досліджень. Проведено опис технологічного зварювального обладнання для виконання експериментів і металографічних досліджень.

У **третьому розділі** приведено технологічні та металографічні дослідження для виявлення ступеню впливу дугового або плазмово-дугового джерела наплавлення сталевго шару на титановий шар, встановлено залежність параметрів формування ІМФ прошарку від погонної енергії зварювального процесу. З урахуванням отриманих даних надалі обрано найбільш перспективні зварювальні та споріднені технології для наплавлення

і напилювання бар'єрних шарів, призначених для усунення ІМФ прошарку. Проведено металографічні дослідження структуроутворення у перехідних зонах після нанесення бар'єрних покриттів на титан, після нанесення бар'єрних покриттів на сталь і після наплавлення тонкого сталевого шару на нанесені покриття. За результатами металографічних досліджень обрано найбільш перспективні матеріал і технологію нанесення на титан бар'єрного покриття із наступним наплавленням сталевого шару. Основний критерій вибору – повне або часткове усунення ІМФ прошарку, мінімізація товщини ІМФ прошарку до 10 мкм.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи досліджено структурні особливості вихідних зразків біметалу титан-сталь, з яких надалі планується зварювати трубні конструкції. Приведені результати математичного та фізичного моделювання процесу нагріву в твердій фазі зразків біметалевого листа титан-сталь, який відбувається при дуговому або плазмово-дуговому зварюванні. Проаналізовано особливості утворення ІМФ у твердій фазі залежно від температури нагріву зони термічного впливу (ЗТВ) при зварюванні.

У **п'ятому розділі** представлено результати практичної реалізації проведених досліджень, а саме: розроблено ряд технологій, послідовне застосування яких дозволяє одержати зварне з'єднання біметалу титан-сталь відповідної якості, розроблено структурно-апаратні схеми та сконструйовано відповідне обладнання для впровадження цих технологій.

Ключові слова: біметал титан-сталь, зварювання плавленням, інтерметалідні фази, погонна енергія, бар'єрні покриття, мікроструктура, мікротвердість, дефекти, зварювальне обладнання.

ABSTRACT

Ganushchak O.V. Development of a technology for butt plasma-arc multi-pass welding of the titanium-steel bimetal with application of barrier coatings. – A qualifying scientific manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 132 Materials Science. – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv – 2024.

This dissertation is dedicated to studying the metallurgical features of plasma-arc multi-pass welding processes for titanium-steel bimetals using barrier interlayers to minimize or completely eliminate intermetallic phases (IMPs) that typically form during the interaction of titanium and steel under certain temperature conditions. The investigation of these metallurgical features enables the development of technologies for producing welded joints of acceptable quality, suitable for chemical industries and main pipelines.

To enhance operational lifespan, pipes for such pipelines are manufactured using steel lined with a layer of titanium or titanium alloy on the inner surface. The presence of a titanium layer and the stringent requirements for the strength and corrosion resistance of the welded joints pose challenges in choosing appropriate welding methods. There is an urgent need for the development of specific technological techniques, welding methods, and a technology for joining steel sheets lined with titanium, which would ensure the production of pipe products of the required quality at relatively low costs.

Object of research – Plasma and arc welding processes of structural low-carbon steel clad with a layer of titanium using barrier coatings.

Subject of research – Formation of a butt-welded joint of titanium-steel bimetal during multi-pass welding.

The purpose of the work – To investigate the efficiency of applying barrier coatings made of various materials to titanium and steel using plasma-arc surfacing and spraying methods to minimize the formation of intermetallic phases during butt

welding of steel sheets lined with titanium. The ultimate goal is to develop a technology for producing such butt joints.

The **scientific novelty** of the research includes the following provisions:

1. For the first time, the regularities of the influence of the value of the linear energy E on the thickness of the transition zone formed by the interaction of the steel melt with titanium in the processes of plasma and arc surfacing of steel on titanium, and including intermetallic phases Ti-Fe, namely, at a value of E in the range of 45-60 J/mm, this value is 10-60 μm , and with an increase in the value of E to 60-100 J/mm, it reaches 450 μm and more with the formation of a significant number of microcracks and other defects.

2. The understanding of the peculiarities of structure formation during the metallurgical interaction of vanadium with steel in the processes of plasma and arc surfacing of vanadium coating on steel and steel on this coating was further developed, it was found that in the transition zone between the deposited vanadium coating and steel an intermetallic layer of variable concentration (40-75 wt.% V and 60-25 wt.% Fe) and increased hardness (up to 5520 MPa) is formed, which leads to crack formation.

3. The idea of the peculiarities of metallurgical interaction of copper alloy melt with titanium and steel was further developed, namely, the conditions for applying a barrier coating of CuSi3Mn1 alloy to a titanium plate were established, under which the mutual diffusion of elements at the "titanium-CuSi3Mn1-steel" interface does not lead to the formation of brittle phases and crack formation.

4. For the first time, the features of the metallurgical interaction at the interface "titanium - plasma sprayed steel coating" during plasma-arc welding of a steel wire on this coating were revealed, namely, the conditions for minimizing its thickness (at least 400 μm) and the value of the linear energy of welding on this coating (up to 200–250 J/mm), in which a defect-free transition zone is formed between the sprayed coating and titanium.

5. It was established for the first time that as a result of heating with plasma and arc welding sources during the filling of the development of the titanium-steel

butt joint in the process of multi-pass welding up to 900–1300°C in the contact zone of titanium and steel in the solid phase, a defect-free transition zone with a thickness of 1 µm to 10 µm, in which a mixture of intermetallics with a microhardness of HV 600–800 and an integral chemical composition corresponding to the formula Ti_2Fe is formed when the temperature is further increased to 1430°C.

Practical significance of the obtained results.

1. A technological process for multi-pass butt plasma arc welding of titanium-steel bimetallic plates, consisting of 10 mm thick mild steel clad with 2 mm thick titanium, has been developed, which provides joints with static tensile strengths reaching up to 85% of the strength of the corresponding bimetallic components.

2. The design parameters of the U-shaped edge development for butt welding of titanium-steel bimetallic plates were optimized, in particular, it was proposed to manufacture a threshold in the lower part of the development with dimensions to ensure the joining of the edges of the titanium layer before welding.

3. A special plasma torch for welding a titanium layer in a U-shaped development has been developed, which is characterized by an elongated plasma-forming nozzle of a given length that repeats the shape of the U-shaped development.

4. The optimal technological parameters of pulsed arc surfacing of a steel layer with a consumable electrode on a barrier coating of a copper silicon-manganese alloy have been established, which ensure the formation of a defect-free structure of the transition zone between the copper alloy and steel, namely thickness of the deposited steel layer - 1.5-2.5 mm, diameter of the steel filler wire - 0.8-1.0 mm, welding current pulse shape - trapezoidal with a ratio of pulse time to pause time of 2:1 and pulse frequency in the range of 3-10 Hz.

5. The developed recommendations for the creation of a pilot production line for the manufacture of longitudinal titanium-steel pipes using the developed technology of multi-pass butt welding of titanium-steel bimetal have been implemented at SPC PLASER LLC (Ukraine) in the development and manufacture of a pilot complex for longitudinal and orbital welding of bimetallic pipe blanks.

The first section presents the results of an analysis of the peculiarities of producing welded bimetallic joints of titanium and steel using modern welding technologies and techniques. The technological features of welding processes and structural features of the formation of such welded joints are considered, and the characteristic defects of their formation are identified. The basic problems of producing titanium and steel joints by fusion welding are formulated. Based on the analysis, the goal and objectives of the research are defined.

The second section describes the standardized and original methods used in the study. The materials used in the research process are specified. The technological welding equipment used to perform experiments and metallographic studies is described.

In the third chapter, presents technological and metallographic studies to determine the degree of influence of an arc or plasma-arc surfacing source on the titanium layer, and the dependence of the parameters of the formation of the IMF layer on the welding process energy. Taking into account the data obtained, the most promising welding and related technologies for surfacing and sputtering barrier layers intended to eliminate the IMF layer were selected. Metallographic studies of structure formation in the transition zones after applying barrier coatings to titanium, after applying barrier coatings to steel, and after surfacing a thin steel layer on the applied coatings were performed. Based on the results of metallographic studies, the most promising material and technology for applying barrier coatings to titanium followed by surfacing a steel layer were selected. The main selection criterion was the complete or partial elimination of the IMF layer and minimization of the IMF layer thickness to 10 μm .

In the fourth chapter of the dissertation investigates the structural features of the initial samples of titanium-steel bimetal, which are planned to be used for welding pipe structures. The results of mathematical and physical modeling of the heating process in the solid phase of titanium-steel bimetallic sheet samples, which occurs during arc or plasma-arc welding, are presented. The peculiarities of IMF

formation in the solid phase depending on the heating temperature of the heat affected zone (HAZ) during welding are analyzed

The fifth chapter presents the results of the practical implementation of the conducted research, namely: a number of technologies have been developed, the consistent application of which allows obtaining a welded joint of titanium-steel bimetal of appropriate quality, structural and hardware schemes have been developed, and appropriate equipment for the implementation of these technologies has been constructed.

Key words: bimetal titanium-steel, fusion welding, intermetallic phases, linear energy, barrier coatings, microstructure, microhardness, defects, welding equipment.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Comparing features in metallurgical interaction when applying different techniques of arc and plasma surfacing of steel wire on titanium / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk, **O. Ganushchak**, S. Peleshenko, O. Konoreva, O. Demianov, V. Shcheretskiy, N. Fialko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, No. 12(112). P. 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238634> (**Scopus. Q3**)

2. Analyzing metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk, **O. Ganushchak**, V. Shcheretskiy, S. Peleshenko, O. Konoreva, O. Demianov, N. Fialko V. Kvasnytskyi. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5, No. 12(113). P. 69–82. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240154> (**Scopus. Q3**)

3. Features of structure formation when surfacing steel (iron) on titanium with plasma sprayed coatings in the technology of obtaining butt joint of bimetallic plates "titanium – steel" / V. Korzhyk, V. Khaskin, **O. Ganushchak**, D. Strohonov, Y. Illiashenko, N. Fialko, C. Guo, A. Grynyuk, S. Peleshenko, A. Aloslyn. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 2, No. 12(122). P. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275510> (**Scopus. Q3**)

4. Preparing permanent joints of titanium alloys with steel (A review) / V. Korzhyk, V. Khaskin, V. Kvasnytskyi, **O. Ganushchak**, I. Hos, S. Peleshenko, O. Demianov, O. Konoreva, N. Fialko. *Materials Science*. 2023. Vol. 59, No. 2. P. 129–137, 5-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00753-2> (**Web of Science**)

5. Features of intermetallic formation in the solid phase on a steel–titanium bimetal interface under the conditions of arc welding / V. Korzhyk,

Yu. Zhang, V. Khaskin, **O. Ganushchak**, V. Kostin, V. Kvasnytskyi, A. Perepichay, A. Grynyuk. *Metals*. 2023. Vol. 13. P. 1338. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13081338> (WoS, Scopus. Q1)

Статті у наукових фахових виданнях України:

6. Підвищення ефективності роботизованого виготовлення сталевих фермових зварних конструкцій / В.М. Коржик, А.А. Гринюк, В.Ю. Хаскін, Є.В. Ілляшенко, І.М. Ключков, **О.В. Ганущак**, Yu Xuefen, Li. Huang. *Автоматичне зварювання*. 2021. № 5. С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.02>

7. Імпульсно-плазмове модифікування поверхні сталевих штампів гарячої витяжки виробів із титанового сплаву / Ю.М. Тюрін, О.В. Колісніченко, В.М. Коржик, І.Д. Гос, **О.В. Ганущак**, Jin Ying, Zhong Fengping / *Автоматичне зварювання*. 2021. №5, С. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.09>

8. Ефективність процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного титанового дроту / В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, А.Ю. Тунік, **О.В. Ганущак**, О.П. Грищенко. *Сучасна електromеталургія*. 2023. № 1. С. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.05>

9. Установа нового покоління для плазмоводугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дротових матеріалів / В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, **О.В. Ганущак**, О.М. Войтенко. *Сучасна електromеталургія*. 2023. № 3. С. 19–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.04>

Статті у науково періодичних виданнях інших держав:

10. Equipment for plasma-arc and hybrid welding, 3D printing and coating technologies / D. Strohonov, Y. Illyashenko, O. Voytenko, I. Skachkov, V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Aloslyn, **O. Ganushchak**, S. Peleshenko, O. Dolyanivska. *Sciences of Europe*. 2023. No. 112. P. 56–62. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7708524>

11. The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production / D. Strohonov, O. Tereshchenko, O. Burlachenko, V. Korzhyk, **O. Ganushchak**, O. Konoreva. *Sciences of Europe*. 2024. No. 147. P. 116–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13382721>

Патенти:

12. Спосіб модифікації поверхні титану / Тюрін Ю. М., Колісніченко О.В., Коржик В.М., **Ганущак О.В.**, Пелешенко С. І.: патент на винахід 127705 Україна; В01J19/08, С23С14/00. № а202005972; заявл. 18.09.2020; опубл. 06.12.2023, Бюл. № 49. 13 с.

13. Спосіб 3D-друку полегшених об'ємних конструкцій зварюванням / Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Пелешенко С.І., Ілляшенко Є., **Ганущак О.В.**, Альошин А.О.: патент на винахід 127706 Україна; В33У10/00, В23К26/34, В23К11/10. № а202006528; заявл. 09.10.2020; опубл. 06.12.2023, Бюл. № 49. 6 с.

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

14. Підвищення ефективності роботизованого виготовлення сталевих фермових зварних конструкцій / В. Коржик, А. Гринюк, В. Хаскін, Є. Ілляшенко, І. Клочков, **О. Ганущак**, Ю. Сюефен, Л. Хуан. *Сучасні технології з'єднання матеріалів: збірка тез пленарних та стендових доповідей міжнародної конференції* (м. Київ, 31 травня - 2 червня 2021 р.). Київ, 2021. С. 25.

15. Investigation of the formation of a transition layer of steel on the surface of titanium in obtaining joint "titanium-steel" / V. Korzhyk, O. Demianov, A. Grynyuk, **O. Ganushchak**, V. Shevchenko, O. Sitko, V. Popov, T. Oleinichenko. *The 6th International scientific and practical conference – Results of modern scientific research and development* (Madrid, August 22-24, 2021). Barca Academy Publishing, Madrid, Spain, 2021. P. 117–119.

16. Plasmatron development for plasma-arc spraying of a fusible wire-anode / O. Voitenko, V. Korzhyk, O. Demianov, V. Shcheretskyi, Ye. Illiashenko, **O. Ganushchak**, D. Strohonov, I. Gos. *The 3rd International scientific and*

practical conference "Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects" (Berlin, August 29-31, 2021). MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2021. P. 77–79.

17. The electrodes of hybrid plasmatron for plasma-gmaw / V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Babych, A. Grynyuk, **O. Ganushchak**, V. Shevchenko, S. Peleshenko, O. Voitenko. *The 11th International scientific and practical conference "European scientific discussions"* (Rome, September 12-14, 2021). Potere della ragione Editore, Rome, Italy, 2021. P. 57–60.

18. Optimization of laser and hybrid laser-gmaw welding of high-strength steels by strength characteristics / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk, O. Babych, Ye. Illiashenko, T. Oleinychenko, **O. Ganushchak** Ye. Popov. *The 11th International scientific and practical conference "European scientific discussions"* (Rome, September 12-14, 2021). Potere della ragione Editore, Rome, Italy, 2021. P. 61–63.

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

20. Application of laser recovery surface Comparison of features of formation of structure of a transition layer "Steel-Titanium" at plasma-arc spraying and surfacing of a steel layer / V. Korzhyk, Y. Illiashenko, **O. Ganushchak**. *Abstracts of IV international scientific and practical conference "Problems of practice, science and ways to solve them"* (Milan, October 11 – 13, 2021). Milan, Italy, 2021. P. 151–152.

21. Аналізування ефективності технологічних прийомів отримання стикових з'єднань біметалевих пластин «титан–сталь» із застосуванням методів зварювання плавленням / В. М. Коржик, А. А. Гринюк, В. Ю. Хаскін, **О. В. Ганущак** Є. В. Ільяшенко, В. В. Квасницький, С. І. Пелешенко. *Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку: тези доповідей*

V Міжнародної науково-технічної конференції (Краматорськ, 19–20 жовтень 2021 р.). Краматорськ, Україна, 2021. С. 37–40.

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

23. Application of laser welding technologies in the automotive industry (review) / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grynyuk, V. Shcheretskiy, S. Peleshenko, **O. Ganushchak**, V. Shevchenko. *The 5th International scientific and practical conference "Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects"* (Berlin, October 24-26, 2021). MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2021. P. 175–182.

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

25. Investigation of the features of the volt-ampere characteristic of the plasma arc of multipolar asymmetric current / V. Korzhyk, A. Grynyuk, V. Khaskin, S. Peleshenko, A. Alosyn, **O. Ganushchak**. *The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects"* (Stockholm, December 5-7, 2021). SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 2021. P. 242–253.

26. Prevention of formation of intermetallides in welded joints "titanium-steel" by arc surface of barrier layers / V. Korzhyk, V. Khaskin, **O. Ganushchak**, Yu. Zhang, A. Grynyuk, S. Peleshenko, Ye. Illyashenko. *The 35 th International scientific and practical conference "Modern Science"* (Great Britain, 16-17 June, 2022). Nika Publishing, Leeds, Great Britain, 2022. P. 87–95.