

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації

Ганущака Олега Васильовича

за темою: «Розробка технології стикового плазмово-дугового
багатопрохідного зварювання біметалу «титан-сталь» із нанесенням
бар'єрних покриттів»

поданої на здобуття наукового ступеню **доктора філософії**
за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

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, 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.

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

Наукова новизна отриманих результатів:

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 сталлю утворюється бездефектна перехідна зона.

5. Вперше встановлено, що в результаті нагріву плазмовими 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 плазмово-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 висотою $h = 1$ мм в нижній частині U-подібної розробки при її загальній висоті та ширині 10 мм 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 сталевго 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.

Особистий внесок здобувача.

При безпосередній участі автора отримані результати досліджень та проведено їх аналіз, на основі чого сформульовано положення наукової новизни, згідно відображеним в дисертаційній роботі матеріалами. Автором спільно з науковим керівником сформульовано мету роботи, поставлені задачі

для проведення досліджень та прийнято методики їх вирішення. Автором виконано аналітичний огляд, узагальнено результати та сформульовано основні висновки. За участю автора були підготовлені зразки, сплановано, організовано і проведено експериментальні дослідження процесів зварювання (плазмового, Soft Plasma, CMT, Cold Arc, TIG, MAG), обрано оптимальні режими за критеріями мінімізації погонної енергії та задовільного формування наплавлених валиків. Автор самостійно виконав розрахунки для дослідження і прогнозування утворення інтерметалідної фази у твердій фазі, взяв участь у металографічних дослідженнях зварених зразків, провів оцінку та узагальнення отриманих результатів. Автором було встановлено закономірності впливу величини погонної енергії на товщину перехідної зони, яка утворюється при взаємодії розплаву сталі з титаном в процесах плазмового та дугового наплавлення, розвинено уявлення про особливості структуроутворення при металургійній взаємодії ванадію зі сталлю в процесах плазмового та дугового наплавлення покриття ванадію на сталь, розвинено уявлення про особливості металургійної взаємодії розплаву мідних сплавів (зокрема CuBe_2 і CuSi_3Mn_1) з титаном і сталлю, виявлено особливості металургійної взаємодії на межі «титан – напилене сталеве покриття» при плазмово-дуговому напавленні сталевого дроту на це покриття. Автор самостійно розробив технологічний процес зварювання встик крайок біметалу «титан – сталь», що складається з п'яти основних етапів, експериментально обґрунтував вибір процесу і режимів зварювання на кожному етапі технологічного процесу. Провів проектування основних вузлів дослідно-промислового обладнання для реалізації розробленого технологічного процесу зварювання прямошовних труб і неповоротних стиків труб з листів сталі плакованої титаном. Розроблені автором технологічний процес і конструкційні рішення впроваджені при виготовленні дослідно-промислової лінії зварювання прямошовних труб «титан–сталь» в ТОВ «НВЦ ПЛАЗЕР» (Україна).

Повнота опублікування результатів дисертації. За темою дисертації опубліковано 25 робіт, з них 5 статей у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus, 4 статей у фахових виданнях України, 2 статі у науково періодичних виданнях інших держав, 13 публікацій у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій, отримано 2 патенти України на винахід.

Перелік робіт, в яких опубліковано основні результати дисертації

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

1. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Ganushchak O.**, Peleshenko S., Konoreva O., Demianov O., Shcheretskiy V., Fialko N. (2021). Comparing features in metallurgical interaction when applying different techniques of arc and plasma surfacing of steel wire on titanium. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 4/12 (112), 6–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238634> (**Scopus. Q3**).
2. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., **Ganushchak O.**, Shcheretskiy V., Peleshenko S., Konoreva O., Demianov O., Fialko N. Kvasnytskyi V. (2021). Analyzing metallurgical interaction during arc surfacing of barrier layers on titanium to prevent the formation of intermetallics in titanium-steel compounds. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/12 (113), 69–82. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2021.240154> (**Scopus. Q3**)
3. Korzhyk V., Khaskin V., **Ganushchak O.**, Strohonov D., Illiashenko Y., Fialko N., Guo C., Grynyuk A., Peleshenko S., Alosyn A. (2023). Features of structure formation when depositing steel (iron) on titanium with plasma-sprayed coatings in the technology of obtaining butt joining of bimetallic plates «titanium-steel». *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/12 (122), 6–16. DOI: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2023.275510> (**Scopus. Q3**)
4. Korzhyk V., Khaskin V., Kvasnytskyi V., **Ganushchak O.**, Hos I., Peleshenko S., Demianov O., Konoreva O., Fialko N. (2023). Preparing permanent joints of

- titanium alloys with steel (A review). *Materials Science*, Vol. 59(2), 129–137, 5-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00753-2> (**Web of Science**)
5. Korzhyk V., Zhang Yu., Khaskin V., **Ganushchak O.**, Kostin V., Kvasnytskyi V., Perepichay A., Grynyuk A. (2023). Features of intermetallic formation in the solid phase on a steel–titanium bimetal interface under the conditions of arc welding. *Metals*, Vol.13, 1338. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13081338> (**WoS, Scopus. Q1**)
- Статті у наукових фахових виданнях України:*
6. Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В., Клочков І.М., **Ганущак О. В.**, Xuefen Yu, Huang Liuyi. (2021). Підвищення ефективності роботизованого виготовлення сталевих фермових зварних конструкцій. *Автоматичне зварювання*, №5, 15–20. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.02> (**Фахове видання України**).
7. Тюрін Ю.М., Колісніченко О.В., Коржик В.М., Гос І.Д., **Ганущак О.В.**, Jin Ying, Zhong Fengping. (2021). Імпульсно-плазмове модифікування поверхні сталевих штамів гарячої витяжки виробів із титанового сплаву. *Автоматичне зварювання*, №5, 56–61. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.05.09> (**Фахове видання України**).
8. Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М., Тунік А.Ю., **Ганущак О.В.**, Грищенко О.П. (2023). Ефективність процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного титанового дроту. *Сучасна електрометалургія*, № 1, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.05> (**Фахове видання України**).
9. Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М., **Ганущак О.В.**, Войтенко О.М. (2023). Установка нового покоління для плазмоводугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дротових матеріалів. *Сучасна електрометалургія*, № 3, 19–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.04> (**Фахове видання України**)

Статті у науково періодичних виданнях інших держав:

10. Strohonov D., Illyashenko Y., Voytenko O., Skachkov I., Korzhyk V., Khaskin V., Aloshyn A., **Ganushchak O.**, Peleshenko S., Dolyanivska O. Equipment for plasma-arc and hybrid welding, 3D printing and coating technologies (2023). *Sciences of Europe*, No.112, 56–62. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7708524>
11. Strohonov D., Tereshchenko O., Burlachenko O., Korzhyk V., **Ganushchak O.**, Konoreva O. (2024). The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production. *Sciences of Europe*, No. 147, 116–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13382721>

Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:

12. Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Ілляшенко Є.В., Клочков І.М., **Ганущак О.В.**, Сюефен Ю., Хуан Люї. Підвищення ефективності роботизованого виготовлення сталевих фермових зварних конструкцій // Збірка тез пленарних та стендових доповідей. Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів». (Київ, 31 травня-2 червня 2021 р.). Київ, 2021. – С. 25.
13. Korzhyk V., Demianov O., Grynyuk A., **Ganushchak O.**, Shevchenko V., Sitko O., Popov V., Oleinichenko T. Investigation of the formation of a transition layer of steel on the surface of titanium in obtaining joint "titanium-steel". 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, 517 p. – P.117–119.
14. Voitenko O., Korzhyk V., Demianov O., Shcheretskyi V., Illiashenko Ye., **Ganushchak O.**, Strohonov D., Voitenko O., Gos I. Plasmatron development for plasma-arc spraying of a fusible wire-anode. 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, 403p. – P. 77–79.

15. Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Grynyuk A., **Ganushchak O.**, Shevchenko V., Peleshenko S., Voitenko O. The electrodes of hybrid plasmatron for plasma-gmaw. The 11th International scientific and practical conference "European scientific discussions" (Rome, September 12-14, 2021). Potere della ragione Editore, Rome, Italy, 2021, 337 p. – P.57–60.
16. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Babych O., Illiashenko Ye., Oleinychenko T., **Ganushchak O.**, Popov Ye. Optimization of laser and hybrid laser-gmaw welding of high-strength steels by strength characteristics. The 11th International scientific and practical conference "European scientific discussions" (Rome, September 12-14, 2021). Potere della ragione Editore, Rome, Italy, 2021, 337 p. – P.61–63.
17. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Peleshenko S., Babych O., Illiashenko Ye., Oleinychenko T., **Ganushchak O.**, Popov Ye. Application of laser recovery surface. 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, 1096 p. – P.229–232.
18. Korzhyk V., Illiashenko Y., **Ganushchak O.** 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. 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, 201 p. – P.151–152.
19. Коржик В. М., Гринюк А. А., Хаскін В. Ю., **Ганущак О. В.**, Ілляшенко Є. В., Квасницький В. В., Пелешенко С. І. Аналізування ефективності технологічних прийомів отримання стикових з'єднань біметалевих пластин «титан–сталь» із застосуванням методів зварювання плавленням. Зварювання та споріднені технології: перспективи розвитку: тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції, (Краматорськ, 19–20 жовтень 2021 р.). Краматорськ, Україна, 2021, 75с. – С.37–40.

20. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Peleshenko S., Illiashenko Ye., Shcheretskiy V., **Ganushchak O.** Achievements of the E.O. Paton electric welding institute in the field of welding thin sheet alloys for automotive applications. The 5th International scientific and practical conference "Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects" (Berlin, October 24-26, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2021, 686 p. – P.167-174.
21. Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Shcheretskiy V., Peleshenko S., **Ganushchak O.**, Shevchenko V. Application of laser welding technologies in the automotive industry (review). The 5th International scientific and practical conference "Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects" (Berlin, October 24-26, 2021). MDPC Publishing, Berlin, Germany, 2021, 686 p. – P.175–182.
22. Korzhyk V., Khaskin V., Peleshenko S., Grynyuk A., Hos I., **Ganushchak O.**, Babych O., Strogonov D. Overview of some perspective technical solutions on laser brazing with filler wires. The 3rd International scientific and practical conference "Innovations and prospects of world science" (Vancouver, November 4-6, 2021). Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2021, 848 p. – P.242–253.
23. Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., Peleshenko S., Aloshyn A., **Ganushchak O.** Investigation of the features of the volt-ampere characteristic of the plasma arc of multipolar asymmetric current. The 3rd International scientific and practical conference "Modern science: innovations and prospects" (Stockholm, December 5-7, 2021). SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 2021, 1036 p. – P.242–253.
24. Korzhyk V., Khaskin V., **Ganushchak O.**, Zhang Yupeng, Grynyuk A., Peleshenko S., Illyashenko Ye.P. Prevention of formation of intermetallides in welded joints "titanium-steel" by arc surface of barrier layers. The 35 th International scientific and practical conference "Modern Science" (Great Britain, 16-17 June, 2022). Nika Publishing, Leeds, Great Britain, 2022, 180 p. – p.87–95.

Патенти:

25. Спосіб модифікації поверхні титану: Патент на винахід №127705 Україна; B01J19/08, C23C14/00. Тюрін Ю. М., Колісніченко О.В., Коржик В.М.,

Ганущак О.В., Пелешенко С. І. № а202005972; зареєстровано: 18.09.2020;
опубліковано: 06.12.2023, Бюл. № 49 – 13 с.

Виходячи з аналізу вищенаведених робіт, можна зробити висновок про успішне виконання встановлених вимог щодо необхідної кількості наукових публікацій перед представленням до захисту дисертаційної роботи Ганущака О.В., а також про достатню повноту висвітлення наукових та практичних результатів досліджень в опублікованих матеріалах.

Розглянута дисертація Ганущака Олега Васильовича за темою «Розробка технології стикового плазмово-дугового багатопрохідного зварювання біметалу «титан-сталь» із нанесенням бар'єрних покриттів», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство», є завершеним науковим дослідженням і відповідає вимогам, викладеним у постанові КМУ від 12 січня 2022 р. № 44 «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Робота містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень, які мають певне науково-практичне значення в галузі матеріалознавства, базується на достатній кількості наукових публікацій, не містить текстових запозичень без посилання на джерело (плагіату), і може бути прийнята до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Голова семінару:

академік НАН України,
доктор технічних наук,
професор



Сергій АХОНІН

Секретар семінару:

с.н.с., PhD.

Дмитро СТРОГОНОВ