

## **ВИСНОВОК**

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації

**Войтенка Олександра Миколайовича**

**За темою «Мікроплазмове адитивне наплавлення просторових виробів з металевих матеріалів»**

поданої на здобуття наукового ступеню **доктора філософії**

за спеціальністю **132 – Матеріалознавство**

Дисертаційна робота Войтенка Олександра Миколайовича присвячена дослідженню закономірностей впливу технологічних параметрів адитивного мікроплазмового наплавлення просторових об'єктів із використанням сталевих дротових і порошкових присаджувальних матеріалів на формування мікроструктури і напружено-деформованого стану (НДС) матеріалу об'ємних виробів і створення на основі цього інтелектуальних апаратно-програмних засобів для автоматичного 3D друку просторових металевих виробів із заданою структурою і прогнозованим напруженим станом.

### **Актуальність роботи**

Здобувачем Войтенко Олександром Миколайовичем, спільно із науковим керівником, на основі аналізу 134 джерел міжнародного та вітчизняного рівнів визначено актуальність теми, яка полягає у вирішенні проблем використання адитивних технологій створення 3D-об'єктів із металевих матеріалів з можливістю швидкої зміни типорозмірів деталей, що виготовляються, та створення гнучких безвідходних технологій. При цьому існують вимоги значного підвищення продуктивності адитивних технологій 3D-друку просторих металевих виробів (наприклад в порівнянні із процесом селективного лазерного плавлення (SLM) при виконанні певних вимог до точності форми та мінімізації механічної обробки. У випадку потреби у великих серіях таких деталей актуальним підходом є застосування традиційних технологій наплавлення для пошарового нарощення металу із долученням, у певних випадках, супутньої або фінішної механічної обробки. Одним з перспективних процесів, що певною мірою задовольняє вказаним вимогам, є мікроплазмове наплавлення, яке, з одного боку, може використовувати широкий спектр витратних (присадних) металевих матеріалів у вигляді порошків та дротів, і з другого боку, оптимально поєднувати показники продуктивності, точності формоутворення, заданого рівня фізико-механічних властивостей та залишкових напружень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Войтенко Олександр Миколайович був співвиконавцем наступних НДР в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України:

1. 0118U100524. Дослідження закономірностей протікання фізико-металургійних процесів та утворення інтерметалідних фаз при плазмово-дуговому зварюванні біметалу «сталь-титан» із нанесеними захисними прошарками. 01.2019 – 12.2021.
2. 0117U001186. Дослідження фізико-металургійних процесів при гібридному та комбінованому зварюванні з поєднанням плазми і дуги плавкого електрода та створення програмно-апаратного забезпечення для реалізації технології зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів та суднобудівних сталей. 01.2017 – 12. 2021.
3. 0122U001952. Дослідження процесів сфероїдизації крапель-дисперсних частинок і закономірностей формування структури гранул і порошків із складнолегованих сплавів та інтерметалідів при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних порошкових дротів. 01.2022 – 12.2024.
4. 0122U00895. Розробка адитивних технологій отримання об'ємних виробів промислового та біомедичного призначення із сплавів та біметалів методами плазмово-дугового та електронно-променевого наплавлення. 01.2022 – 12.2022.
5. 0115U006699. Дослідження закономірностей впливу складу плазмоутворюючого середовища на процеси взаємодії дуги з електродними та оброблюваними матеріалами при плазмовому різанні на прямій та зворотній полярностях. 01.2016 – 12.2018.
6. 0118U005289. Доопрацювання тандем-процесу «плазмово-дугове зварювання - ЕДО» та технологічної оснастки для його реалізації. 09.18 – 12.19.
7. 0120U103885. Спільні дослідження фізико-металургійної взаємодії нанорозмірних порошків з розплавами при отриманні зварювальних алюмінієвих дротів. 01.2019 – 12. 2020.

#### **Наукова новизна отриманих результатів**

Здобувачем Войтенко О.М. встановлено, що в процесі неперервного пошарового мікроплазмового наплавлення об'ємних виробів із металевих матеріалів в інтервалі зварювальних струмів 20-30 А для базових форм типу «циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус», «паралелепіпед» з максимальними габаритами 40-65 мм і товщиною стінки до 3 мм залишкові напруження зменшуються у кожному наступному наплавленому валику на 7–20% і при цьому не перевищують межі міцності матеріалу, а максимальні значення деформацій (переміщень) знаходяться в діапазоні 0,22–0,28 мм. Встановлена тенденція збільшення розміру зерен металу стінки, що пошарово наплавляється мікроплазмовим способом з використанням дроту низьковуглецевої сталі, приблизно до 10 разів порівняно із першим шаром (тобто зростає від 15-20 мкм до 150-200 мкм), доки

не виходить на сталий рівень на висоті стінки, близької до 10 розмірів її ширини; також при наплавленні даним способом встановлена тенденція зменшення твердості нижніх шарів до 15-20% порівняно з верхнім шаром через відпалювання шарів нижчого рівню шарами вищих рівнів. Для пошарового формування просторових форм типу «циліндр», «трикутна призма», «квадратна призма», «розширений конус», «звужений конус», «паралелепіпед» з максимальними габаритами 40-65 мм і товщиною стінки до 3 мм адитивним мікроплазмовим наплавленням порошків сталей (грануляцією до 150 мкм) з кількістю шарів не менше 10, встановлено оптимальний інтервал погонних енергій 80-90 Дж/мм, що на 40-50% менше погонних енергій мікроплазмового наплавлення сталевими дротами ( $\varnothing$ 0,8-1,2 мм), і в межах якого досягається зменшення розміру зони сплавлення шарів (до 0,1-0,3 мм), розміру зерен (на 15-30%), розміру стінки (до 3 мм) і збільшення твердості шарів (до 500-600 МПа) та однорідності їхньої структури порівняно із застосуванням присаджувальних дротів. Встановлено, що адитивне мікроплазмове наплавлення присаджувальним дротом низьковуглецевої сталі порівняно із процесом WAAM (з дугою з плавким електродом) при застосуванні одних й тих самих дротів дозволяє досягти зменшення розміру зерен по висоті стінки, що наплавляють, в 2-3 рази, наближення коефіцієнту форми зерна до 1 (тобто покращення рівновісності), уникнення трансшарової пористості, зменшення залишкових напружень по висоті виробу в середньому на 50-150 МПа.

Створено новий підхід до розробки і реалізації апаратурно-програмного забезпечення адитивного мікроплазмового наплавлення, який включає поєднання самонавчальних нейронних мереж, системи збору даних і системи автоматичного керування джерелом живлення, формування бази даних, що забезпечує при наплавленні тривимірного об'єкту заданих параметрів і матеріалів можливість автоматично генерувати керуючі програми, які генерують і автоматично підстроюють режими наплавлення, що забезпечує виготовлення відповідного металевих виробу із заданими геометричними параметрами, розміром зерна та прогнозованим рівнем залишкового НДС.

### **Практичне значення роботи**

У роботі було визначено вплив технологічних параметрів на особливості формування та структуроутворення наплавлених шарів при адитивному мікроплазмовому наплавленні порошкових і дротових сталевих присаджувальних матеріалів. Це дало можливість прогнозування НДС виробів, що отримують, а також визначення параметрів режимів процесу.

Встановлені в роботі оптимальні діапазони значень погонної енергії (80-90 Дж/мм та 160-200 Дж/мм, з точки зору забезпечення заданої структури та якості наплавленого металу, можуть використовувати в якості критеріїв

оптимізації режимів мікроплазмового адитивного наплавлення металевих об'ємних виробів.

Для апаратної реалізації адитивного вирощування об'ємних виробів із металевих матеріалів було розроблено та виготовлено інноваційні плазмотрони для мікроплазмового наплавлення (що використовують в якості присаджувальних матеріалів, як металеві порошки, так і дроти), а також 3D принтери з робочими полями від 300×200×200 до 1000×900×900 мм,

З метою автоматизації виготовлення виробів адитивним мікроплазмовим наплавленням вперше було створено інтелектуальне обладнання, що включає систему автоматичного моніторингу із вдосконаленою системою автоматичного регулювання плазмової дуги та відповідним програмним забезпеченням із використання самонавчальних нейронних мереж для генерування керуючих програм. Вказані програми в автоматичному режимі забезпечують вибір оптимальних параметрів мікроплазмового наплавлення і, відповідно, задану структуру та рівень внутрішніх напружень в просторовому металевому виробі. Реалізовано підхід та розроблено апаратне забезпечення для інтеграції вказаної системи автоматичного моніторингу із 3D принтерами та зварювальними роботами, яке впроваджено на ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР»» (Україна). З допомогою такого підходу виготовлено 4 комплекти обладнання для реалізації інтелектуального процесу мікроплазмового наплавлення просторових виробів із металевих матеріалів, два з яких поставлено на експорт в КНР.

#### **Повнота викладу результатів роботи в наукових фахових виданнях**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, із яких 10 – статті у наукових фахових виданнях України і періодичних виданнях іноземних держав, 3 з яких включених до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 3 патенти України на винахід, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

Провідний внесок за обсягом роботи у матеріалах публікацій належить здобувачу. Войтенко О.М. брав активну участь в постановці завдань, проведенні та обговоренні експериментальних досліджень, обробці та аналізі одержаних результатів, підготовці матеріалів до друку.

#### **Перелік робіт, в яких опубліковано основні результати дисертації**

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, із яких 10 – статті у наукових фахових виданнях України і періодичних виданнях іноземних держав, 2 з яких включених до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS, 3 патенти України на винахід, та 5 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

Провідний внесок за обсягом роботи у матеріалах публікацій належить здобувачу. Войтенко О.М. брав активну участь в постановці завдань,

проведенні та обговоренні експериментальних досліджень, обробці та аналізі одержаних результатів, підготовці матеріалів до друку.

**Перелік робіт, в яких опубліковано основні результати дисертації**

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

1. Welding Technology in Additive Manufacturing Processes of 3D Objects / V. Korzhyk, V. Khaskin, O. Voitenko, V. Sydorets, O. Dolianovskaia // Materials Science Forum, Vol. 906, 2017 – P. 121-130. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121>
2. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review) / Peleshenko S., Korzhyk V., Voitenko O., Khaskin V., Tkachuk V. // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 3/1(87), 2017. – P. 42-52. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>
3. Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials / Kvasnytskyi V., Volodymyr Korzhyk., Ivan Lahodzinkyi., Yevhenii Illiashenko., Sviatoslav Peleshenko., Oleksandr Voitenko // IEEE International Conference on “Nanomaterials: Applications & Properties” (NAP-2020) Sumy, Ukraine, 9-13 Nov. DOI: <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309696>

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

4. Особливості лазерно-плазмового зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 з використанням лазера / В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, Є.В. Ілляшенко, А.В. Бернацький, С.І. Пелешенко // Журнал «Автоматичне зварювання», № 12, 2021, с. 18-26. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.04>
5. Development of automated equipment for manufacturing 3D metal products based on additive technologies / V.N. Korzhik, A.N. Vojtenko, S.I. Peleshenko, V.I. Tkachuk, V.Yu. Khaskin and A.A. Grinyuk // Avtomaticheskaya Svarka (Automatic Welding), #6, 2017, pp. 91-98. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.06.15>

*Статті у науково періодичних виданнях інших держав:*

6. Моделирование лазерно-плазменной сварки нержавеющей и углеродистых тонколистовых сталей методом конечных элементов / В.Ю. Хаскин, В.Н. Коржик, А.А. Бабич, А.В. Бернацкий, А.Н. Войтенко // Colloquium-journal, №13(24), 2018. – С. 55-61.
7. Analysis of features of technological schemes of processes of laser-plasma cutting and welding / V. Khaskin, V. Korzhyk, A. Bernatsky, I. Gos, S. Kostash, O. Voitenko // Austria-science, №20, 2018. – P. 34-43.
8. Особенности лазерной сварки титановых сплавов стыковыми и прорезными швами / В.Ю.Хаскин, В.М.Коржик, В.П.Лихошва, В.И.Ткачук, С.И.Пелешенко, А.А.Бабич, А.Н.Войтенко // Sciences of Europe, №4, 2016. – С. 13-20.

9. The process of laser and laser-plasma cladding / V.Yu. Khaskin, V.N. Korzik, V.Tkachuk, S. Peleshenko, O. Voitenko, T. Oleinychenko // **American Scientific Journal**, №2 (2), 2016. – P. 74-78.

10. Резка листовых углеродистых сталей лазерным излучением / В.Ю.Хаскин, В.М.Коржик, В.Е.Шевченко, В.И.Ткачук, С.И.Пелешенко, А.А.Бабич, А.Н.Войтенко, Т.В.Олейниченко // *Scientia. Техника*, №1, 2016. – С. 13-18.

#### *Патенти*

11. Спосіб лазерно-дугового зварювання металевих деталей підвищених товщин / В.Ю. Хаскін, В.М. Коржик, В.Ю. Шевченко, О.М. Войтенко, С.І. Пелешенко, І.Д. Гос, С.М. Костащ, О.А. Бабич // Патент України на винахід UA 122817 від 06.01.2021.

12. Спосіб гібридного лазерно-плазмового різання і зварювання / Хаскін В.Ю., Коржик В.М., Бабич О.А., Пелешенко С.І, Войтенко О.М., Ткачук В. І. // Патент України на винахід UA 121907 від 10.08.2020.

#### *Матеріали, що засвідчують апробацію дисертації:*

13. Formation of spatial products by additive layer-by-layer arc and plasma surfacing / Korzhyk V., Khaskin V., Grynyuk A., Voitenko O., Shcheretskiy V., Illiashenko Ye., Sitko O. // The 7th International scientific and practical conference — Topical issues of modern science, society and education (January 29-31, 2022) SPC — Sci-conf.com.ua, Kharkiv, Ukraine. 2022. 1899 p. – P. 382-388.

14. Estimation of influence of duration of current flow at direct and inverse polarity on quality of formation and geometrical parameters of seams / Korzhyk V., Grynyuk A., Khaskin V., Peleshenko S., Shcheretskiy V., Hos I., Illiashenko Ye., Voitenko O., Konoreva O. // The 6th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (January 13-15, 2022) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. – 2022. – 705 p. – P. 185-190.

15. Improvement design of the electrodes of hybrid plasmatron for plasma-GMAW / Korzhyk V., Khaskin V., Babych O., Grynyuk A., Ganushchak O., Shevchenko V., Peleshenko S., Voitenko O. // The 11th International scientific and practical conference “European scientific discussions” (September 12-14, 2021) Potere della ragione Editore, Rome, Italy. 2021. 337 p. – P. 57-60.

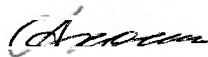
16. Nano-scale non-metallic microstructure modifier in materials for aluminum welding and 3D printing / Korzhyk V. M., Shcheretskyi V. O., Demianov O. I., Grynyuk A. A., Voitenko O. M., Strohonov D. V // The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” (NANO-2021). Abstract Book of participants of International research and practice conference, 25 – 27 August 2021, Lviv. Edited by Dr. Olena Fesenko. – Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2021. – 854 p. – P.159.

17. Plasmatron development for plasma-arc spraying of a fusible wire-anode / Voitenko O., Korzhyk V., Demianov O., Shcheretskyi V., Illiashenko Ye.,

Ganushchak O., Strohonov D., Gos I // The 3rd International scientific and practical conference "Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects" (August 29-31, 2021) MDPC Publishing, Berlin, Germany. – 2021. – 403p. – P. 77-79.

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

Розглянута дисертація **Войтенка Олександра Миколайовича** за темою **«Мікроплазмове адитивне наплавлення просторових виробів з металевих матеріалів»**, 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, вона базується на достатній кількості наукових публікацій, не містить текстових запозичень без посилання на джерело (плагиату), і може бути прийнята до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

Голова семінару  
академік НАН України, д.т.н., проф. 

Сергій АХОНІН

Секретар семінару  
д.т.н., с.н.с.

Анатолій ЖЕРНОСЕКОВ

