

УДК 621.791.725

**О. В. Сіора; В. Ю. Хаскін, д. т. н.; А. В. Бернацький, к. т. н.;**  
**В. А. Лукашенко, к. т. н.; І. В. Сіора, к. х. н.**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ**

*У статті розглянуто питання розробки прийомів лазерного зварювання нових легких композиційних матеріалів підвищеної міцності на основі алюмінієвих сплавів, які мають волокнисте, дисперсне та шарувате зміцнення. Отримання їх нероз'ємних з'єднань потребує застосування таких інноваційних рішень, які зможуть бути достатньо ефективно впроваджені в промисловості. Одним із рішень може бути процес лазерного зварювання.*

*В статті досліджувалися особливості лазерного зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію та проводилися необхідні експерименти для розробки технологічних прийомів отримання якісних з'єднань. Встановлено, що серед параметрів структури композиційних матеріалів на основі алюмінію, найбільш істотно впливає на процес зварювання об'ємна частка волокнистого матеріалу у матриці. Аналіз результатів досліджень показує, що зі зростанням вмісту волокон вище 30%, процес зварювання ускладнюється. Основними перешкодами для утворення якісного з'єднання є високі погонна енергія й різниця у температурі плавлення матеріалів композиту. У результаті інтенсивного нагрівання, існує велика ймовірність руйнування волокон й утворення інтерметалідних сполук. Якість нероз'ємних з'єднань, отриманих зварюванням плавленням, може бути підвищена при строгому дозуванні погонної енергії. Проведені дослідження дозволили встановити особливості лазерного зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію, що мають наповнювачі матриці різних видів. Так, було визначено, що наявність волокон бору з одного боку покращує зварювальні властивості алюмінієвого композиту і дозволяє отримати бездефектні шви, але з іншого боку – погіршує механічні властивості отриманого з'єднання. Дисперсне легування алюмінієвого композиту частками окислу алюмінію  $Al_2O_3$  призводить до утворення пор у зварних з'єднаннях, отриманих лазерним зварюванням. Наявність сталевих волокон покращує зварювальні властивості але призводить до утворення інтерметалідних сполук. Для з'єднання композитів із зміцнювачами у вигляді волокон, або окремих часток, необхідно використовувати додаткові технологічні прийоми, наприклад зварювання-пайку. Цей тип зварювання рекомендується здійснювати з максимально можливою швидкістю (для зменшення питомого енерговкладання). Іншим спеціальним прийомом для зварювання алюмінієвих композитів усіх розглянутих видів, є використання імпульсно-періодичної модуляції випромінювання з частотою в межах 200 – 330 Гц при скважності 1,5, а також зварювання з алюмінієвою проставкою або зварювання на підкладці із зазором між крайками ~0,6 мм та його заповнення шляхом плавлення присаджувального дроту.*

**Ключові слова:** металеві композиційні матеріали, алюмінієві композити, композити з дисперсно легованою матрицею, композити армовані волокном, лазерне зварювання, зварювання-паяння.

### **Вступ**

Розробка нових матеріалів потребує застосування інноваційних рішень для отримання їх нероз'ємних з'єднань. Це обумовило розвиток нового напрямку в галузі зварювання різнорідних металів – зварювання композиційних матеріалів на металевій основі (МКМ) різних типів: волокнистих, дисперсно-зміцнених, шаруватих.

Як відзначають автори робіт [1 – 5], при зварюванні МКМ між собою, існують особливості в утворенні литої зони, що вимагає уточнення критеріїв якості зварювання порівняно із прийнятими для гомогенних сплавів.

Очевидно, що серед інших параметрів структури МКМ, найбільш істотно впливає на процес зварювання об'ємна частка волокнистого матеріалу у матриці. Аналіз результатів досліджень робіт [2, 5] показує, що зі зростанням вмісту волокон вище 30%, процес

зварювання ускладнюється. Основними перешкодами для створення якісного з'єднання є високі погонна енергія й різниця у температурі плавлення матеріалів композиту. В результаті інтенсивного нагрівання, існує велика ймовірність руйнування волокон й утворення інтерметалідних сполук. Якість нероз'ємних з'єднань, отриманих зварюванням плавленням, може бути підвищена при точному дозуванні погонної енергії. Порівняно з гомогенними матеріалами для МКМ, у меншому ступені, характерні дефекти у вигляді тріщин, пор, розшарувань, які є наслідком усадки матеріалу в зоні зварювання.

**Метою цієї роботи** було встановлення особливостей лазерного зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію шляхом виконання експериментальних досліджень з використанням додаткових технологічних прийомів для отримання якісних нероз'ємних з'єднань.

### **Матеріали та методи дослідження**

Для досягнення поставленої мети на першому етапі було підготовлено технологічне обладнання та оснащення, а також обрано досліджуваний матеріал – тонколистові композити з алюмінієвою матрицею і зміцнюючим наповнювачем у вигляді окремих волокон ( $\text{Ø}150 - 160$  мкм) або дисперсних часток.

При підготовці зразків були обрані наступні композитні матеріали на основі алюмінію: алюміній армований сталевими волокнами, алюміній армований волокнами бору, пластинчатий алюмінієво-сталевий композит, алюмінієві сплави дисперснолеговані карбідом кремнію SiC або окисом алюмінію  $\text{Al}_2\text{O}_3$  у різному процентному відношенні. Підготовка зразків включала ретельну підгонку крайок у разі зварювання стиків, усунення забруднень, усунення окисної плівки з крайок і поверхонь зразків (як у разі зварювання стиків, так і у разі проварів суцільних зразків). Усунення вказаної плівки виконувалося механічним шабренням безпосередньо перед проведенням процесу зварювання.

Експерименти проводилися за допомогою лабораторного обладнання, яке включало технологічний  $\text{CO}_2$ -лазер ЛТ-104 та двокоординатний маніпулятор, який переміщував лазерну фокусуєчку головку відносно зразка, жорстко зафіксованого у складально-зварювальній пристосуванні (струбцині). Технологічне оснащення і лазерну фокусуєчку головку було виготовлено з урахуванням особливостей зварювання алюмінієвих сплавів. До таких особливостей відносяться необхідність забезпечення якісного захисту зварювальної ванни, усунення ефекту екранування лазерного випромінювання аргоною плазмою, яка утворюється над ванною, жорстка фіксація деталей, що зварюються, наявність у складально-зварювальному пристосуванні підкладки із канавкою для формування зворотного валика підсилення.

Була сконструйована та виготовлена зварювальна струбцина, яка дозволяє робити стикові та напускові з'єднання пластин розміром  $300 \times 100 \times 8$  мм. Зразки з металевих композиційних матеріалів на основі алюмінію мали плоску форму і фіксувалися у зварювальній струбцині, яка була обладнана системою газового захисту кореню шву і мала можливість заміни цієї системи сталеву підкладкою з канавкою для формування зворотного валика підсилення.

На Рис. 1 наведено загальний вигляд стенду для лазерного зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію у складі зварювальної головки з системами кріплення додаткового оснащення (захисту зварювальної ванни), а також зварювальної струбцини з системою захисту кореню шва.

### **Результати та обговорення**

Були проведені технологічні дослідження, які дозволили встановити особливості зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію. Так, наявність волокон бору з одного боку покращує зварювальні властивості алюмінієвого композиту і дозволяє отримати

бездефектні шви, але з іншого боку – погіршує механічні властивості отриманого з'єднання. Дисперсне легування алюмінієвого композиту окисом алюмінію  $Al_2O_3$  призводить до утворення пор у швах. Наявність сталевих волокон покращує зварювальні властивості але призводить до утворення в переплавленому металі шва інтерметалідних сполук Al-Fe, що становлять собою тверді крихкі голчасті структури з додатковим легуванням алюмінієвої матриці бором або вуглецем, які призводять до утворення тріщин. Для мінімізації цього ефекту нами було використано наступні технологічні прийоми.



Рис. 1. Стенд для лазерного зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію

Зварювання проводили з максимально можливою швидкістю (для зменшення питомого енерговкладення) за два проходи з двох боків зразка так, щоб матеріал проварювався неповністю, але більш ніж на половину товщини для гарантованого перекриття коренів швів. Іншим спеціальним прийомом для зварювання алюмінієвих композитів усіх видів було використання імпульсно-періодичної модуляції випромінювання з частотою в межах 200 – 330 Гц при скважності 1,5.

Експериментально встановлено, що важливе значення при зварюванні МКМ на основі алюмінію, має подача захисного газу. З позицій збільшення глибини провару газ краще подавати спереду по ходу зварювання під кутом до  $30^\circ$  до площини зразку. Але з позицій підвищення якості литої зони швів та усунення окислів доцільно реалізувати подачу газу коаксіально лазерному випромінюванню, хоча такий прийом зменшує глибину провару до 50%.

Порівняно з легуванням бором і оксидом алюмінію кращим з позицій механічних характеристик, відсутності внутрішніх дефектів та геометрії швів, є легування кремнієм і його карбідом.

Для з'єднання композитів із зміцнюючими наповнювачами у вигляді волокон, раціонально використати комбіновані способи. Одним з них є одночасне здійснення процесів зварювання й пайки, так званий процес зварювання-пайки.

Для реалізації цього процесу енергетичні параметри зварювання вибирали такими, щоб

пошкодження волокон було мінімальним. При цьому дотримувалися вимог, типових для лазерного зварювання алюмінієвих сплавів за критеріями формоутворення шва й глибини проплавлення заготовок, що зварюють. В якості додаткових умов розглядалися забезпечення складу звареного шва, близького до складу металу матриці, а також мінімізація розміру зони термічного впливу.

Зразки під зварювання збирали у складально-зварювальному пристосуванні затискали масивними затискачами. Для забезпечення щільної підгонки крайок, що зварюють, використовували додаткові затискачі, розташовані в площині зразка з обох сторін стику на мінімально можливій відстані один від одного. В результаті заготовки щільно притискали до підкладок, що забезпечувало надійний тепловідвід від зони нагрівання.

Зразки зварювали вздовж довгої сторони, паралельно напрямку укладання армуючих волокон. При цьому переслідувалась мета отримання зварного шва, за складом близького до складу металу матриці, з мінімальною зоною термічного впливу. Завдяки обраній схемі підготовки й стикування заготовок, що зварюють, вдалося забезпечити умови, близькі до умов зварювання гомогенних матеріалів, що дозволило отримати високоякісні з'єднання з гарантованими розмірами зворотного валика.

Подальші технологічні дослідження лазерного зварювання алюмінієвих композиційних матеріалів показали, що зварювання плавленням без застосування присаджувального матеріалу не забезпечує належної якості з'єднань. В усіх таких випадках було наявне певне розплавлення матриці основного матеріалу, руйнування зміцнюючих волокон, утворення інтерметалідів і різке зростання крихкості з'єднань. Структура отриманих з'єднань, мала складний фазовий склад. На межі з'єднання кристалізувався твердий розчин на основі алюмінію, окремі зерна якого розташовувалися й у середині шва. У міжзерновому просторі спостерігалася вироджена евтектика типу твердий розчин – інтерметаліди.

На підставі металографічних досліджень зварних зразків встановили, що для отримання з'єднань з міцністю, близькою до міцності основного матеріалу, слід уникати твердих крихких голчастих структур, які утворюються у ванні розплаву за рахунок легування алюмінієвої матриці бором або вуглецем. Це є можливим при використанні імпульсно-періодичного випромінювання і мінімізації ЗТВ, а також при зварюванні з алюмінієвою проставкою або зварювання на підкладці із зазором між крайками ~0,6 мм та його заповненні шляхом плавлення присаджувального дроту. Тому замість лазерного зварювання композитних матеріалів була запропонована їх лазерна шовна пайка.

Форму елементів, що розплавляють, вибирали залежно від товщини заготовок, що зварюють, і виду обробки крайок під зварювання. Формування шва відбувалося за рахунок оплавлення крайок заготовок і їх сплавлення з розплавом присаджувального матеріалу. Наприклад, для зварювання композиту товщиною 2 мм, армованого вуглецевими волокнами діаметром 150 – 160 мкм (з односпрямованим розташуванням волокон) можна рекомендувати наступний режим: потужність сфокусованого на зразок випромінювання 2,5...2,7 кВт; швидкість 200 м/год; проставка з алюмінієвого сплаву АМг5 ( $\delta=2,5$  мм); газовий захист – за допомогою коаксiального сопла з витратами аргону 20 л/хв. Аналіз структури шва, наведеного на Рис. 2, показав, що при лазерному зварюванні-паянні в середовищі аргону відбувається сплавлення кромки композита з металом вставки без руйнування композитного матеріалу. При цьому контакт волокон з розплавленим металом зводиться до мінімуму. У зоні звареного шва карбідні фази відсутні.

Встановлено, що для забезпечення стабільного й задовільного формування металу шва, частка присаджувального матеріалу у шві повинна становити не менш 90%. При цьому армуючі волокна в металі шва відсутні. Кращим способом підготовки крайок МКМ є механічна обробка алмазно-абразивним кругом без застосування емульсій, оскільки їхнє потрапляння в МКМ призводить у процесі зварювання до утворення пор і непроварів у

зварному з'єднанні.

Зварювання плавленням дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів має низку особливостей:

1. Наявність рівномірно розподілених часток у матеріалі призводить до того, що в'язкість металу розплавленої ванни виявляється досить високою. Це призводить до недостатнього перемішування зварювальної ванни за наявності присаджувального матеріалу (дроту).

2. За високої температури відбуваються реакції взаємодії на границі частка-матриця; можливе розкладання частки (якщо це частка вуглецю – до з'єднання  $Al_4C_3$ ) і розчинення її в матриці. Фаза  $Al_4C_3$  крихка й схильна до корозії; вона має голчасту форму, що може бути причиною концентрації напруг за наступного прикладання навантаження.

3. Сегрегація зміцнювача спостерігається у швах, виконаних зварюванням у захисних газах. Під час лазерного зварювання це явище не спостерігається завдяки високим швидкостям охолодження.

Для зварювання в стик дисперсно-зміцнених композитів  $Al+8\%Si$  та  $Al+15\%SiC$  (сплав 6063) товщиною 1 мм неперервним випромінюванням  $CO_2$ -лазера обрано наступний режим: швидкість зварювання 72 м/год; потужність сфокусованого на зразок випромінювання 1,5 кВт; заглиблення фокусу до 1 мм; захисний газ – аргон. Погіршення механічних властивостей у випадку лазерного зварювання композита зв'язані із утворенням литої структури й розчиненням Si. Термообробка після зварювання повинна сприяти збереженню міцності й пластичності зварного з'єднання.

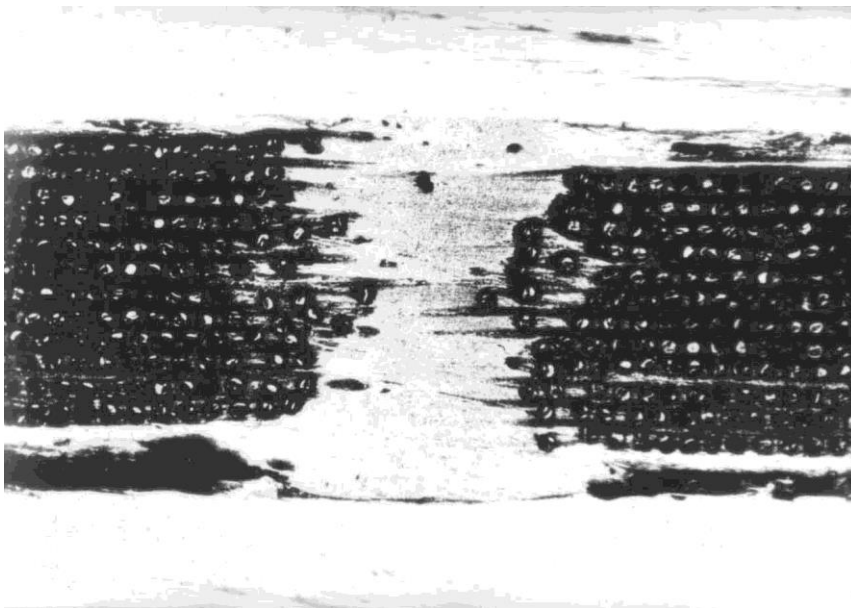


Рис. 2. Структура з'єднання композиту з алюмінієвою матрицею ( $\delta=2$  мм), армованого вуглецевими волокнами ( $\varnothing 150-160$  мкм), одержаного лазерним зварюванням з проставкою з  $AMg5$  ( $\delta=2,5$  мм),  $\times 25$

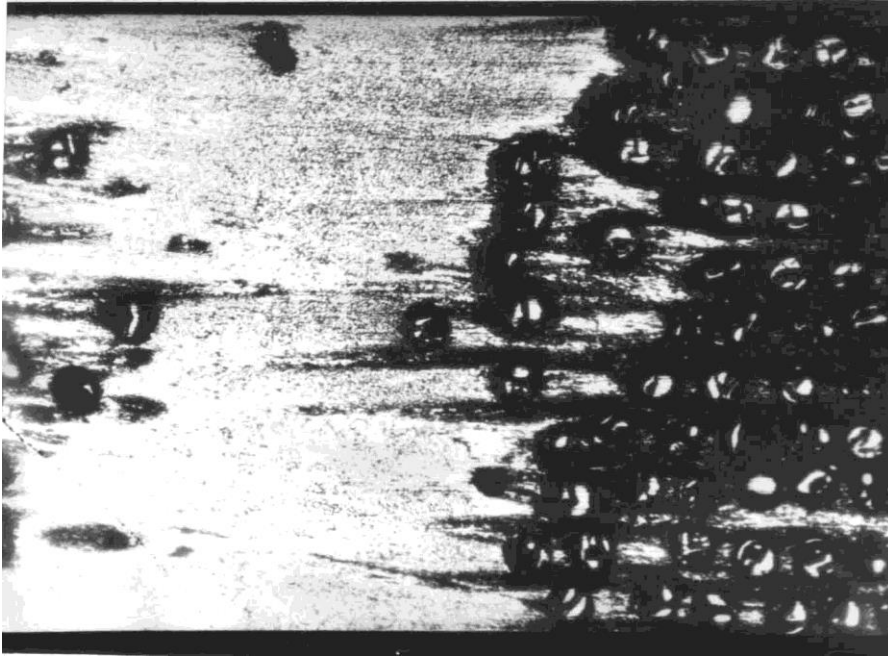


Рис. 3. Структура перехідної зони з'єднання композиту з алюмінієвою матрицею ( $\delta=2$  мм), армованого С-волокнами ( $\text{Ø}150 - 160$  мкм), отриманого лазерним зварюванням з проставкою з АМг5 ( $\delta=2,5$  мм),  $\times 64$

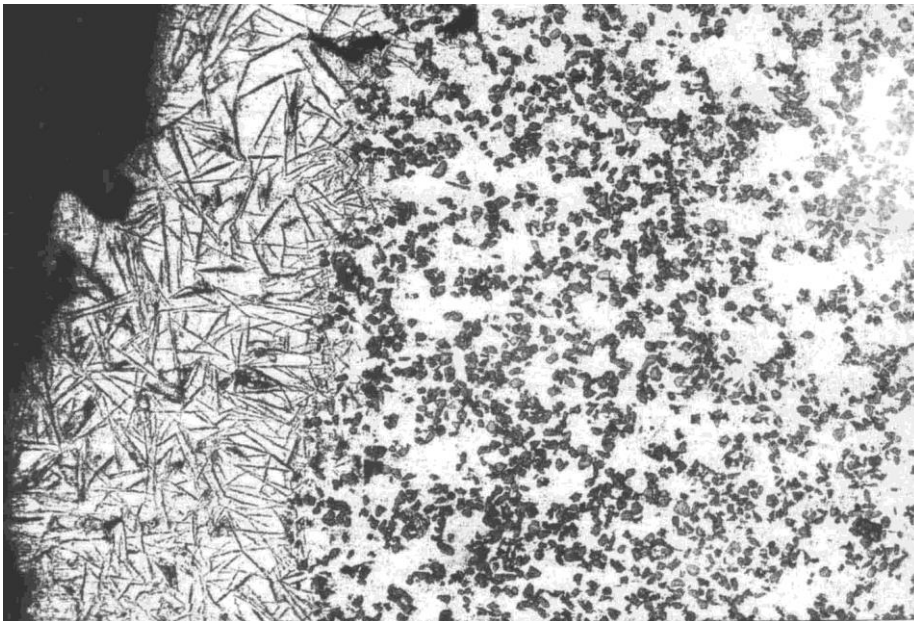


Рис. 4. Структура перехідної зони зварного з'єднання композиту з алюмінієвою матрицею ( $\delta=1$  мм), армованого SiC-дисперсними частками ( $\text{Ø}150 - 160$  мкм),  $\times 150$

Серед заходів, спрямованих на поліпшення якості формування стикових з'єднань, було випробувано зміну погонної енергії, повторне проплавлення, зміну обробки крайок під зварювання, складання крайок із зазором під зварювання, додатковий захист аргоном зони зварювання знизу.

Аналіз результатів металографічних досліджень зварених з'єднань показав, що лазерне зварювання-паяння, в комплексі із раціональними методами підготовки крайок, а також з більш ефективним захистом зони зварювання, дозволяє отримати якісні з'єднання.

## Висновки

1. Проведено технологічні дослідження, які дозволили встановити особливості зварювання композиційних матеріалів на основі алюмінію. Так, наявність волокон бору з одного боку покращує зварювальні властивості алюмінієвого композиту і дозволяє отримати бездефектні шви, але з іншого боку – погіршує механічні властивості отриманого з'єднання. Дисперсне легування алюмінієвого композиту окислом алюмінію  $Al_2O_3$  призводить до утворення пор у швах. Наявність сталевих волокон покращує зварювальні властивості але призводить до утворення інтерметалідних сполук.

2. Для з'єднання композитів із зміцнювачами у вигляді волокон, або окремих часток, необхідно використовувати додаткові технологічні прийоми. Одним з них є одночасне здійснення процесів зварювання й пайки, так званий процес зварювання-пайки. Зварювання-пайку рекомендується виконувати з максимально можливою швидкістю (для зменшення питомого енерговкладення). Іншим спеціальним прийомом для зварювання алюмінієвих композитів усіх розглянутих видів, є використання імпульсно-періодичної модуляції випромінювання з частотою в межах 200 – 330 Гц при скважності 1,5, а також зварювання з алюмінієвою проставкою або зварювання на підкладці із зазором між крайками ~0,6 мм та його заповненням шляхом плавлення присаджувального дроту.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Latest development sin modeling and characterization of joining metal based hybrid materials / S. Khoddam, L. Tian, T. Sapanathan [et al.] // *Advanced Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 20, №. 9. – P. 1800048. <https://doi.org/10.1002/adem.201800048>.
2. Properties of metal-based and nonmetal-based composite materials: A brief review / N. Y. Makhkamov, G. U. Yusupov, T. Tursunov [et al.] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 614, №. 1. – P. 012068. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012068>.
3. Zhang Y. Analysis on the Development Status of Automobile Light weight Welding Technology / Y. Zhang // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1750, №. 1. – P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1750/1/012001>.
4. Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies / V. D. Shelyagin, I. V. Krivtsun, Yu. S. Borisov [et al.] // *Paton Welding Journal C/C of Avtomaticheskaja Svarka*. – 2005. – Vol. 2005, №. 8. – P. 44.
5. Compression brazing of SiC p/Al composite using a semisolid Zn-Al-Cu filler metal based on the strain-induced meltactivation process / J. Xiao, S. Li, S. Bai [et al.] // *JOM*. – 2019. – Vol. 71, №. 12. – P. 4931 – 4939. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03791-3>.

Стаття надійшла до редакції 25.09.2021.

Стаття пройшла рецензування 27.09.2021.

**Сіора Олександр Васильович** – науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання.

**Хаскін Владислав Юрійович** – д. т. н. ст. н. с., провідний науковий співробітник відділу електротермічних процесів обробки матеріалів.

**Бернацький Артемій Володимирович** – к. т. н., с. д., завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання.

**Лукашенко Володимир Андрійович** – к. т. н., науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання.

Інститут електрозварювання ім. С. О. Патона Національної академії наук України.

**Сіора Ірина Вікторівна** – к. х. н., науковий співробітник відділу біомедичних проблем поверхні.

Інститут хімії поверхні ім. О. О. Чуйка Національної академії наук України.