

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕЙ ТА НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМБІНАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ВИСОКОЧАСТОТНОГО ІНДУКЦІЙНОГО РОЗРЯДУ**

**студент І.М. Верболоз<sup>1</sup>, студент С.О. Колибашкін<sup>1</sup>, к.т.н., с.н.с., В.Д. Шелягін<sup>2</sup>, к.т.н. А.В. Бернацький<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Механіко-машинобудівний інститут, кафедра ЛТФТТ*

<sup>2</sup>*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України  
E-mail: laser-77@online.ua*

*Анотація. У роботі досліджено основні закономірності процесів модифікування поверхні сталей та нанесення покриттів з використанням комбінації лазерного випромінювання та високочастотного індукційного розряду.*

Найбільш актуальними завданнями діяльності людства у епоху безперервного розвитку сучасної економіки, виступають енерго- та ресурсозбереження. У зв'язку з постійним ростом споживання більшості природних ресурсів, актуальність набуває розвиток сучасних ресурсозаощаджуючих технологій використання нових матеріалів з унікальними характеристиками та нанесення поліфункціональних покриттів. До таких нових технологій належить й сучасні лазерні та плазмові технології поверхневої обробки.

При термічному нанесенні покриттів потрібні підвищені потужності теплового джерела для розігріву часток, що наносять, до температур їхньої пластифікації. При цьому бажано водночас мінімізувати термічний вплив на оброблюваний виріб. Усунення таких недоліків є можливим за рахунок спільного використання плазми і випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера. Ще одним важливим чинником є висока чистота тонких покриттів – недопустимі забруднення, які можуть виникати в процесі їх нанесення за рахунок потрапляння на оброблювану підкладку продуктів ерозії електродів плазмотрону. Для виконання цієї умови доцільно використовувати плазмотрони з високочастотним індукційним розрядом (ВЧІ), як безелектродну конструкцію, що дозволяє одержувати надчисту плазму і підвищувати термін експлуатації за рахунок усунення вигорання електродів.

Ідея дослідження полягає у підвищенні чистоти тонкоплівкових зносо- та корозійностійких покриттів, що наносяться гібридним лазерно-плазмовим способом в атмосферних умовах без застосування вакуумних або реакційних камер, за рахунок використання особливо чистої високочастотної індукційної плазми у конструкції гібридної головки, до складу якої входить співосьовий з лазерним випромінюванням ВЧІ-плазмотрон. Планується, що такий підхід дозволить в подальшому розробити промислові технології синтезу алмазних і алмазоподібних покриттів в атмосферних умовах, а також технології нанесення тонкоплівкових оксидних покриттів, стійких до широкого номіналу видів зношення і корозії.

Метою даної роботи було встановлення основних закономірностей процесів модифікування поверхні сталей та нанесення покриттів з використанням лазерного випромінювання та плазми високочастотного індукційного розряду.

Для досягнення даної мети було створено лабораторний стенд, на якому дію ВЧІ-розряду, одержуваного за допомогою ВЧІ-плазмотрону, поєднали із дією сфокусованого випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера. Під час проведення експериментів на оброблювану поверхню діяло лазерне випромінювання потужністю 3...6 кВт, сфокусоване у пляму Ø 3...6 мм, а також ВЧІ-розряд потужністю 25...40 кВт із розміром порядку Ø20 мм. Дослідження проводили за допомогою ВЧ-генератора із частотою 5,3 МГц і потужністю 50 кВт. ВЧІ-розряд запалювали в середовищі аргону у кварцовому і мідному плазмотронах діаметром 52 і 27 мм, відповідно, за допомогою мідного водоохолоджуваного індуктора із 4 витками. При

проведенні досліджень, у якості джерела лазерного випромінювання використовували CO<sub>2</sub>-лазер моделі «TRIAGON» (потужність до 10,0 кВт) германської фірми «Rofin Sinar».

Для введення оброблюваного матеріалу до лазерно-плазмового розряду було досліджено розповсюдження газових потоків в моделі розрядної камери інтегрованого ВЧІ-плазмотрону, обрано місце введення оброблюваного порошкового матеріалу, орієнтовно визначено його масові витрати, на підставі цих даних створено систему дозування і введення цього матеріалу в камеру, а також апробовано її під час експериментів із лазерно-плазмового нанесення покриттів.

На двох моделях розрядної камери інтегрованого ВЧІ-плазмотрону вивчали можливості мінімізації контакту високотемпературної плазми із стінками камери за рахунок вибору газодинамічного співвідношення потоків плазмоутворюючого і захисного газів. Були встановлені співвідношення витрат осрової подачі плазмоутворюючого та радіальної (тангенційної) подачі захисного потоків газу у камерах різних внутрішніх діаметрів (55 і 27 мм). Одержані результати також дозволяють визначити параметри подачі азоту для процесу лазерного модифікування сталевих поверхонь при їх зміцненні.

Для підвищення ефективності використання енергії інтегрованого ВЧІ-плазмотрону порошковий матеріал доцільно подавати якомога ближче до ВЧІ-розряду, а в певних випадках – і в сам розряд. Однак, конструктивно простіше подавати порошок в районі вихідного сопла. Крім того, частки порошоків системи Ni-Cr-B-Si можуть інтенсивно випаровуватися в гібридному лазерно-плазмовому розряді, що приводить до забруднення розрядної камери. Походячи з цих міркувань для випадку лазерно-плазмового нанесення покриттів порошки системи Ni-Cr-B-Si було вирішено подавати до зрізу вивідного сопла інтегрованого ВЧІ-плазмотрону. З технології лазерно-плазмового нанесення покриттів відомо, що масові витрати таких порошоків повинні точно регулюватись в межах 0,1...1,0 г/с. Тому для їх дозованої подачі до зрізу вивідного сопла було використано вібраційний дозатор із додатковою ежекцією порошку струмом аргону.

В ході проведення досліджень була встановлена можливість зниження рівня залишкових внутрішніх напружень I роду за рахунок модифікації термічного циклу лазерного зміцнення шляхом введення додаткового джерела енергії (струменя плазми ВЧІ-розряду). Досліди проводили на зразках зі сталі 38ХНЗМФА, з яких надалі вирізали темплети розміром 10×10×5 мм із необробленими доріжками зміцнення. Поверхню доріжок досліджували засобами рентгенофазового аналізу за допомогою рентгенівського дефрактометра ДРОН-2 у випромінюванні мідного катоду. Для визначення напружень I роду обрали лінію №211, яка відповідає ~99° (за кутами Вульфа-Брега).

Встановлено, що на поверхні литої зони доріжок зміцнення мають місце напруження розтягування. При лазерній обробці вони становлять 957±48 кГс/мм<sup>2</sup>, а при комбінованій обробці лазерним випромінюванням із ВЧІ-розрядом зменшуються до величини 470±32 кГс/мм<sup>2</sup>, тобто приблизно в 2 рази.

Окрім дослідів з термічного зміцнення проводили дослід з нанесення покриттів із сплавів ПГ-12Н-02 і ПГ-АН6 системи Ni-Cr-B-Si на сталь Ст3пс. Нанесення покриттів також проводилося лазерним і лазерно-плазмовим способами. В нанесених шарах покриттів, також вимірювали напруження I роду рентгенофазовим способом. Для сплавів ПГ-12Н-02 і ПГ-АН6, нанесених лазерним способом, виявили напруження стиснення -200 і -510 МПа, відповідно. В шарах, покриттів нанесених за умови комбінованого лазерно-плазмового підігріву, вони склали +120 і -310 МПа, відповідно.

Таким чином встановлено, що додаткова дія плазми лазерного та ВЧІ-розряду при лазерній обробці міститься у приблизно двократному зниженні залишкових напружень порівняно із звичайною лазерною обробкою поверхні сталей і сплавів. Одержані результати мають вагомe значення для розвитку фундаментальних уявлень про процеси, що відбуваються у металах при спільному застосуванні лазерного випромінювання та плазми високочастотного індукційного розряду.