

## ВІДГУК

Вх. № 69/24  
24 09 23

офіційного опонента д.т.н., проф. Головка Леоніда Федоровича на дисертаційну роботу Ілляшенко Євгенія Володимировича: «Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

### Загальна структура роботи.

Дисертаційна робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі визначення особливостей та підвищення ефективності процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання сталей з використанням волоконного джерела лазерного випромінювання.

Робота, яка рецензується, викладена на 219 сторінках друкованого тексту, включаючи список цитованої літератури з 115 найменувань, 134 рисунка, 29 таблиць, один додаток, містить вступ, п'ять розділів, загальні висновки.

### Актуальність обраної теми дисертації.

Для зварювання матеріалів широко застосовуються висококонцентровані джерела енергії (електричний розряд, плазма, лазерне випромінювання й інші), які стрімко розширюють межі свого використання. Проте, маючи великі потенційні резерви з продуктивності зварювання, з точки зору можливостей концентрації енергії, ці методи мають певні границі застосування.

Так, продуктивність обробки дуговим розрядом обмежується з однієї сторони стійкістю електродів, тобто граничними значеннями густини потужності, з іншої - нестабільним горінням електричної дуги, при перевищенні визначених критичних швидкостей зварювання.

Продуктивність обробки лазерним випромінюванням також обмежена як потужністю лазерного випромінювання, так і вартістю відповідного лазерного устаткування.

На доцільність комбінування лазерного джерела енергії з більш дешевими

такими, як електрична дуга, плазмовий струмінь й інші, вперше ще в 1979 році звернув увагу провідний фахівець в області лазерної технології професор Вільям Стін. Потім цей напрямок досліджень був розвинутий його учнями, вченими Німеччини, Японії, Китаю і України. Було показано, що ця комбінація дозволяє значно розширити технологічні можливості як обробки електричною дугою, так і обробки лазерним випроміненням. Результати наукових досліджень і досвід використання таких гібридних джерел енергії в промисловості свідчить тому, що лазерне випромінювання сприяє стабілізації процесу горіння електричної дуги і таким чином, дозволяє в 3-4 рази підвищити швидкість зварювання, полегшити процес підпалювання дуги, значно збільшити, внаслідок наявності синергетичного ефекту, енерговклад у процес зварювання, підвищити продуктивність обробки, практично не збільшуючи його вартості, .

Значний ривок в розробці і застосуванні такий комбінований процес зварювання набув з появою волоконних лазерів, потужність випромінення яких в ближній інфрачервоній області спектру стрімко зросла і зараз продовжує зростати практично за експонентою. Потужність випромінення від 0,5 до 20 кВт, к. к. д. більше (40...60)%, режим випромінювання – як імпульсний, так і безперервний, габаритні розміри – умовно, в межах розмірів письмового стола. Такі, й інші особливості випромінення волоконних лазерів і властивості плазмової дуги безумовно впливають на формування гібридного джерела енергії, його просторово-часовий розподіл інтенсивності, механізм розплавлення зварювальних складових, особливості течії розплаву та його кристалізації й інше.

У вітчизняних і закордонних публікаціях міститься інформація, яка частково висвітлює окремі питання комплексного застосування лазерного випромінення і плазмової дуги при вирішенні конкретних завдань промисловості. Безумовно ці результати є важливими, але вони розрізнені, стосуються конкретних матеріалів, конкретних умов експлуатації виробу і т. ін.

Обрана тема дисертації, яка зараз розглядається, охоплює практично весь перелік питань, які потрібно вирішити в процесі дослідження і впровадженні результатів роботи у промисловість, що безумовно є свідченням її актуальності.

**Метою роботи** є встановлення закономірностей впливу випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги на ефективність процесу зварювання, особливості структурно-фазових перетворень, формування напружено-деформованого стану та фізико-механічних властивостей отриманих зварних з'єднань й розробка на їх основі базових технологічних процесів і обладнання для лазерно-плазмового зварювання.

**У вступі** автором обгрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, визначено задачі і методи досліджень, відзначено наукову новизну та практичне застосування отриманих результатів.

**У першому розділі** проведено критичний аналіз способів виготовлення нероз'ємних конструкцій шляхом застосування процесів зварювання з використанням лазерного випромінювання і плазмової дуги, а також їх комбінації в одному процесі, який отримав назву гібридного, при якому за рахунок сполучення двох джерел енергії досягають покращення якості одержуваних з'єднань, або підвищення продуктивності їх виготовлення.

Показано, що спільне використання випромінювання волоконного лазера і плазми дозволяє значно зменшити лазерну складову загального джерела енергії, знизити вартість обладнання і собівартість процесу зварювання. Показано, що підвищення ефективності зварювання гібридним джерелом енергії пов'язано з наявністю синергетичного ефекту, механізм якого (термічний, гідродинамічний чи інший) поки що не встановлено.

На підставі виконаного аналізу визначена мета та сформульовані завдання досліджень.

**У другому розділі** наведено дані про комплекс обладнання, який було створено для лабораторних досліджень, що включає гібридну лазерно-плазмову головку, яка дозволяла виконувати дослідження трьох способів зварювання: лазерного (із потужністю до 2,0 кВт), плазмового (при струмі до 100 А) і гібридного лазерно-плазмового. При дослідженні процесів зварювання застосовувалися волоконний лазер моделі MFSC 2000W з довжиною хвилі 1080

ном, потужністю випромінювання до 2,0 кВт. Обладнання для плазмового зварювання було укомплектоване плазмовим модулем з максимальним значенням зварювального струму 320 А та трьох-координатним маніпулятором.

Експериментальні дослідження проводились на листових зразках нержавіючої AISI 304 і вуглецевої сталей 09Г2С

Кількість поглинутої енергії, визначали за допомогою методу калориметрування.

Визначення термічних циклів при зварюванні проводили за допомогою фіксації температури в реальному часі під час виконання лазерного, плазмового та гібридного зварювання,

Структурні зміни у металі швів та зонах термічного впливу вивчалися методом світлової мікроскопії ( Neophot-32 ). Мікротвердість металу вимірювалася на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні 0,1 кг.

Механічні випробування зварних з'єднань на статичне одновісне розтягнення проводилися згідно вимог ГОСТ 6996-66. Міцність зварних з'єднань оцінювалася за результатами випробувань трьох зразків з кожного з'єднання в умовах одновісного розтягнення.

Напружений стан зразків зварних з'єднань вимірювався методом електронної спектр-інтерферометрії. Метод базується на вимірюванні переміщень при пружному розвантаженні об'єму металу в досліджуваних точках на поверхні разка, викликаних свердленням ненаскрізних отворів діаметром близько 1-го мм.

**У третьому розділі** наведено визначення ефективності поглинання енергії та проплавлення при гібридному лазерно-плазмового зварюванні з використанням випромінювання волоконного лазера. Встановлено, що в процесі лазерно-плазмового зварювання сталей, з використанням випромінювання волоконного лазера, поглинута металом енергія є близькою до арифметичної суми поглинутих енергій при окремій дії лазерного випромінювання та плазмової дуги. Цей показник для лазерно-плазмового зварювання є на 6% вищим від суми показників для окремих складових процесу.

Показано, що найбільше вкладення теплової енергії у зварюваний зразок відбувається при лазерно-плазмовому зварюванні. Енергія, що поглинута металом, при лазерно-плазмовому зварюванні, на 1-3 кДж перевищує суму енергій лазерної та плазмової складових, при окремій їх дії. Ефективність передачі енергії при лазерно-плазмовому зварюванні становить 66-67%, що перевищує аналогічні показники плазмового та теплопровіднісного лазерного зварювання. Реалізація синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні в т. ч. з використанням волоконного лазерного випромінювання відбувається головним чином за рахунок гідродинамічних процесів в зварювальній ванні.

Порівняння площ поперечних перерізу проварів, виконаних в пластині із нержавіючої сталі AISI304 лазерним, плазмовим та лазерно-плазмовим зварюванням свідчить про наявність при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера синергетичного ефекту. Визначено, що проявлення цього ефекту залежить від швидкості зварювання.

На відміну від гібридного зварювання з використанням випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера, при гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера, плазмова складова незначно впливає на глибину проплавлення, однак вона сприяє усуненню характерних для лазерного зварювання дефектів формування поверхні зварного шва, а також підвищує ефективність процесу зварювання. В діапазоні швидкостей 0,25...4,0 м/хв при потужності випромінювання волоконного лазера від 0,8 до 2,0 кВт та зварювальному струмі до 100 А має місце прямо пропорційне збільшення глибини проплавлення від 2 до 8 мм.

З'ясовано, що лазерно-плазмове зварювання нержавіючої сталі з використанням випромінювання волоконного лазера відрізняється від аналогічних процесів з використанням випромінювання діодного, Nd:YAG-, CO<sub>2</sub>-лазерів, а саме, – дозволяє збільшити глибину проплавлення. Показано, що при використанні потужності лазера і плазми по ~2 кВт при швидкості ~1,5 м/хв. глибина провару з використанням волоконного лазера в гібридному процесі

збільшується порівняно з використанням діодного лазера на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO<sub>2</sub>-лазера – на 40%.

**У четвертому розділі** встановлено закономірності впливу параметрів режимів лазерного, плазмового, лазерно-плазмового зварювання зразків зі сталі AISI 304 різної товщини на мікротвердість та параметри зеренної структури субструктури зварних з'єднань. Показано, що мікротвердість, параметри зеренної та субзеренної структур матеріалу зварних з'єднань різняться за розмірами кристалітів, зерен, субзерен, що пов'язано з різними температурними умовами формування зварних швів.

Проведено детальне дослідження різних варіантів лазерного, плазмового і лазерно-плазмового зварювання зразків товщиною 6 мм і 2 мм при різних високих, середніх і низьких швидкостях обробки. Для кожного варіанту зварювання визначені особливості формування зварного шва і зони термічного впливу: характер мікроструктури на різних ділянках досліджуваної зони та розподіл мікротвердості. Таким чином було створено базу даних для оптимізації процесів зварювання.

Показано, що при зварюванні сталі AISI 304 найбільш сприятлива структура, з точки зору фізико-механічних характеристик, формується в металі зварних з'єднань, що отримані лазерно-плазмовим зварюванням.

Дослідження напруженого стану показали, що максимальні, пікові значення напружень сконцентровані в ЗТВ. Максимальні напруження утворюються у зразку після лазерного зварювання, після плазмового – менші і після лазерно-плазмового – середні пікові. Середнє значення напружень при лазерно-плазмовому зварюванні складає 173 МПа, що є на 20% більше напружень при лазерному зварюванні та на 40% менше при плазмовому. 10. Встановлено, що напружено-деформований стан при лазерно-плазмовому зварюванні, є менш локалізованим ніж при лазерному, та характеризується нижчим рівнем залишкових напружень відносно варіанту плазмового зварювання.

В цьому розділі викладені результати співставлення результатів розрахункової методики прогнозування напружено-деформованого стану зварних з'єднань, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням і експериментальних даних.

По результатам механічних випробувань виявлено що при одновісному розтягненні зварних з'єднань із сталі AISI 304 товщиною 2 та 6 мм, отриманих лазерно-плазмовим зварюванням, їх руйнування відбувається в зоні переходу від лінії сплавлення до зони термічного впливу, в якій спостерігається тенденція збільшення довжини кристалітів. Показано, що міцність зварних з'єднань отриманих лазерно-плазмовим зварюванням становить ~97% від міцності основного металу.

У п'ятому розділі, приведено опис технологічних особливостей лазерно-плазмового зварювання та розробленої технології двостороннього гібридного зварювання нержавіючої сталі товщиною 10 мм, та виявлені закономірності під час виконання технологічних експериментів. Оцінено можливість застосування лазерно-плазмового процесу в режимі різання, та висвітлено основні складнощі для його реалізації. Наведено базові технологічні прийоми лазерно-плазмового зварювання та розробки дослідно промислового обладнання для лазерно-плазмового зварювання з використанням різних потужностей лазерних та плазмових джерел.

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

- В роботі показано, що в процесі зварювання нелегованих і легованих (нержавіючих) сталей при використанні плазмової дуги і випромінювання волоконного лазера, в порівнянні із плазмовим зварюванням, має місце збільшення поглинутої металом енергії на 6% відносно суми окремої дії складових. При цьому спостерігається збільшення площі поперечного перерізу провару порівняно із сумою площ перерізів лазерного і плазмового проварів, а також підвищення глибини проплавлення на 20-30% відносно лазерного зварювання.

- Важливим є результат, отриманий автором, що використання випромінювання волоконного лазера при потужності лазера і плазми по ~2 кВт глибина провару нержавіючої сталі збільшується, порівняно із застосуванням діодного лазера – на 60%, Nd:YAG-лазера – на 30%, CO<sub>2</sub>-лазера – на 40%.

- Новим результатом, отриманим в роботі є те, що при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні в металі шва, по лінії сплавлення і в зоні термічного впливу формується зеренна структура, близька до лазерного зварювання із розмірами в 2-3 рази меншими, ніж при плазмовому зварюванні.

- Представляє певний інтерес результат, що стосується оцінки напруженого стану зварного шва при різних способах зварювання. Показано, що в стикових з'єднаннях із нержавіючої сталі характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному зварюванні. При цьому пікові значення напружень сконцентровані в зоні термічного впливу і в більшій мірі залежать від погонної енергії зварювання, ніж від максимальної температури нагріву зварювальної ванни.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

- Розроблено технології лазерно-плазмового зварювання низьковуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей товщиною 2-6 мм, що оптимізовану за критерієм якісного формування швів при мінімальному вкладанні погонної енергії.

- Запропоновано технологічні прийоми гібридного лазерно-плазмового зварювання, які дозволяють отримувати зварні з'єднання з нержавіючих сталей в діапазоні 2...6 мм, з міцністю до 97% від міцності основного металу.

- Розроблено та випробувано технологію двостороннього лазерно-плазмового зварювання сталі AISI 304 товщиною 10 мм в інтервалі потужності лазерного випромінювання до 2 кВт.

- Модернізовано та розроблено нові дослідно-промислові конструкції плазмотронів для гібридного-лазерно плазмового зварювання сталей.



### **Впровадження результатів роботи.**

Розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технологія і зразок промислового обладнання впроваджено На підприємстві ТОВ «Науково виробничий центр «ПЛАЗЕР» та організовано серійне виробництво комплексів для лазерно-плазмового зварювання сталей і сплавів.

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

Основні результати досліджень дисертації опубліковано в 15 наукових роботах, 4 з яких - у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus; 6 - у виданнях, які входять до переліку ВАК України, як фахові, 5 - у науково періодичних виданнях інших держав; 14 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій. Отримано 1 патент на винахід і 1 патент на корисну модель. Результати роботи достатньо широко висвітлені публікаціями у вітчизняних та закордонних виданнях.

Висновки дисертації відображають найважливіші наукові та практичні результати роботи,

### **Зауваження та коментарі по дисертації**

1. На відміну від гібридного зварювання з використанням випромінювання CO<sub>2</sub>-лазера, при гібридному зварюванні із використанням випромінювання волоконного лазера, плазмова складова, спираючись на інформацію наведену в дисертації, незначно впливає на глибину проплавлення. Це ствердження потребує пояснення. При дії лазерного випромінення на розплав, утворений плазмовою дугою, різко збільшується градієнт температур, що обумовлює підвищення швидкості циркуляції розплаву і інтенсивності поглинання ним енергії плазми. Глибина проплавлення повинна зростати, причому ще більше, чим при дії випромінення CO<sub>2</sub> лазера, оскільки випромінення з цією довжиною хвилі краще поглинається металами навіть при наявності турбулентності розплаву.

2. В роботі наведені дані, які свідчать про те, що передача енергії плазми електричної дуги металу при комбінованій дії з лазерним

випромінюванням відбувається більш ефективно, чим без лазерного опромінювання. Цей факт дійсно має місце, але потребує обґрунтування.

3. Яке співвідношення енергії лазерного випромінювання і плазмової дуги є оптимальним при зварюванні мало вуглецевих, легованих і високолегованих нержавіючих сталей. Є різниця ?. Як що є, то в чому вона полягає.

4. В роботі відмічається, що при гібридному процесі в зварному шві спостерігається в  $\sim 1,7$  рази збільшення видовження зерен та підвищення мікротвердості (на 20...40%) у порівняно із лазерним зварюванням, але пояснення чому це так, немає, хоча це не так очевидно.

5. При зварюванні використовуються лазерні пучки з різним розподілом інтенсивності випромінювання в зоні фокусування у залежності від конструкції системи фокусування (лінзова, дзеркальна). Яка система фокусування найбільш ефективна при гібридному лазерно - плазмовому зварюванні?

6. В тексті дисертації є помилки (стор. 4, 5, 31 і т.д.; невдалі стилістичні вирази (Як слідує ...) стор.36; «Під час лазерного цей лазер продемонстрував...» стор.31; занадто точні дані «спостерігається збільшення в 2,06-2,25 рази площі поперечного перерізу провару» стор.3 і таке інше.

Відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи, вдалого використання методів дослідження, представлення і інтерпретації їх результатів та цінності отриманих даних.

Дисертація відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України. Назва та зміст дисертації відповідають напрямку наукового дослідження освітньо-наукової програми КІІ ім. Ігоря Сікорського зі спеціальності 132 Матеріалознавство.

### **Загальний висновок.**

Розглянуті вище результати дають підстави вважати, що дисертаційна робота Ілляшенка Євгенія Володимировича: «Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера», яка

подана на здобуття ступеня доктора філософії, є завершеною науково-дослідною розробкою, яка присвячена актуальній проблемі підвищенню ефективності зварювання мало вуглецевих і легованих сталей комплексним використанням енергії лазерного випромінювання і плазмової дуги в одному гібридному процесі.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів представлена робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затверджену постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, а її автор Ілляшенко Євгеній Володимирович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 - Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук,  
професор кафедри лазерної  
техніки та фізико-технічних  
технологій

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Леонід ГОЛОВКО

Підпис Леоніда ГОЛОВКА засвідчую:

кандидат технічних наук,  
Вчений секретар  
Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря Сікорського»



Валерія ХОЛЯВКО