

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук Костіна Валерія Анатолійовича на дисертаційну роботу **Ілляшенка Євгенія Володимировича**за темою: «Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера»подану до захисту на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Вуглецеві, а також нержавіючі сталі широко застосовують у багатьох галузях сучасної промисловості. Так, вуглецеві сталі використовують для задач виробництва автомобілів, вагонів, приладів, побутової техніки тощо. З нержавіючих сталей виготовляють вироби хімічної та харчової промисловості. В останні десятиріччя для покращення якості одержуваних зварних з'єднань та підвищення продуктивності почали застосовувати гібридні лазерно-дугові процеси. Однак процеси зварювання у поєднанні лазерного випромінювання та дуги неплавкого електроду (у т.ч. лазерно-плазмові) поки-що не отримали достатнього поширення.

Лазерно-плазмозварювання з використанням волоконних джерел лазерного випромінювання, що своєю нижчою вартістю та вищою ефективністю, поступово витісняють з ринку CO₂ та Nd: YAG лазери у зварюванні. Разом з тим, деякі проблеми лазерно-плазмового зварювання пов'язані майже з відсутністю комплексних досліджень процесів лазерно-плазмових зварювання сталей із використанням волоконного лазера. Досі не розв'язано **декілька питань**: виявлення можливості та ступеню взаємодії випромінювання волоконного лазера із стисненою дуговою плазмою; порівняння такої взаємодії для інших типів лазерного випромінювання; встановлення особливостей структуроутворення зварних з'єднань в результаті спільної дії лазерного випромінювання і плазмової дуги; особливості протікання термодформаційних процесів, формування рівня і розподілу залишкових напружень та визначення фізико-механічних властивостей отриманих з'єднань.

В силу вищезазначеного дисертаційна робота Є.В. Ілляшенко спрямована на розширення уявлень про особливості лазерно-плазмового зварювання та поглиблення наукових основ лазерно-плазмового зварювання з використанням волоконного лазерного випромінювання, а також на практичну розробку дослідно-промислових зразків зварювального обладнання. Все це робить актуальним та своєчасним виконання даної дисертаційної роботи.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.

Основні результати дисертації є достовірними та обґрунтованими, що підтверджується великим обсягом проведених досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, відповідають всім вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

Автором доцільно визначено об'єкт та предмет дослідження, його мету, точно сформульовано завдання дослідження. В роботі виконано ґрунтовний літературний огляд із залученням широкого спектру літературних джерел. Ступінь обґрунтованості наукових положень, сформульованих у дисертаційній роботі, висновків та практичних рекомендацій є достатньо високим.

Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено використанням у роботі праць визнаних вчених і фахівців у галузі лазерного, плазмового та гібридного зварювання; застосуванню добре апробованих методів та методик дослідження та розробці власних. У роботі використано методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального аналізу, методів комп'ютерного моделювання, методів статистичної обробки та аналізу експериментальних результатів.

3. Достовірність та наукова новизна здобутих результатів.

Достовірність наукових положень, висновків і результатів доведено збіжністю результатів аналітично-розрахункових та експериментальних досліджень, використанням в експериментальних дослідженнях сучасних методів і методик, трактуванням одержаних результатів, які не суперечать загальноприйнятим науковим положенням, а також досвідом їх практичного використання. Достовірність одержаних результатів підтверджується їх успішним застосуванням в ході дослідно-промислової перевірки.

До найвагоміших результатів дисертаційної роботи, які відповідають ознакам наукової новизни, можна віднести наступне:

1. Вперше встановлено, що в процесі зварювання нелегованих і легованих (нержавіючих) сталей при використанні плазмової дуги і випромінювання волоконного лазера, в порівнянні із плазмовим зварюванням, має місце зростання напруги на дузі на величину 1-3 В, а також збільшення поглинутої металом енергії на 6% відносно суми окремої дії складових, при цьому спостерігається збільшення в 2,06-2,25 рази площі поперечного перерізу

провару порівняно із сумою площ перерізів лазерного і плазмового проварів, а також підвищення глибини проплавлення на 20-30% відносно лазерного зварювання.

2. Отримало подальший розвиток уявлення про вплив типу лазерного випромінювання на ефективність процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання, а саме показано, 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%, CO₂-лазера – на 40%.

3. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості формування структури зварних з'єднань, отриманих з використанням волоконного лазера, а саме – на прикладі нержавіючої сталі показано, 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, при цьому для гібридного процесу в зварному шві спостерігається видовження зерен (в $\sim 1,7$ раз) та підвищення мікротвердості (на 20...40%) порівняно із лазерним зварюванням.

4. Одержало подальший розвиток уявлення про структуроутворення при гібридному лазерно-плазмовому зварюванні нержавіючої сталі, зокрема виявлено формування субзеренної структури в зварному шві з розмірами субзерен меншими порівняно із лазерним (в 1,6 разів) та плазмовим (в 2 рази) зварюванням, при цьому у всіх зонах зварного з'єднання, отриманого лазерно-плазмовим способом, спостерігається формування безградієнтних комірчастих структур переважно рівноосної форми, а при лазерному зварюванні в металі шва формуються субструктури подовженої форми.

5. Отримало подальший розвиток уявлення про особливості протікання термодформаційних процесів при формуванні зварних швів із використанням концентрованих джерел енергії, а саме встановлено, що в стикових з'єднаннях із нержавіючої сталі товщиною 2 мм характер розподілу напружень при лазерно-плазмовому зварюванні близький до розподілу при лазерному зварюванні, при цьому пікові значення напружень сконцентровані зоні термічного впливу і в більшій мірі залежать від погонних енергій зварювання, ніж від максимальної температури нагріву зварювальної ванни.

4. Значущість отриманих результатів для науки та практичного використання.

У результаті виконання досліджень вирішено важливе науково-технічне завдання у галузі гібридного (лазерно-плазмового зварювання із використанням волоконного лазера) зварювання. Визначені особливості та закономірності лазерно-плазмового зварювання дозволили розширити уявлення про процес гібридного зварювання і на основі цього розробити практичні рекомендації по проектуванню зварювальних головок та плазмотронів для лазерно-плазмових процесів та зварювального обладнання,

розробити та оптимізувати технологічні параметри лазерно-плазмового зварювання сталей.

Практична цінність роботи полягає у наступному.

1. *Оптимізовано* технології лазерно-плазмового зварювання низько-вуглецевих низьколегованих та нержавіючих сталей товщиною 2-6 мм з використанням присаджувального дроту та без нього за критерієм якісного формування швів при мінімальному вкладанні погонної енергії.
2. *Розроблено* 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.
3. *Розроблено* технологію двостороннього лазерно-плазмового зварювання сталі AISI 304 товщиною 10 мм в інтервалі потужності лазерного випромінювання до 2 кВт.
4. *Модернізовано та розроблено* нові дослідно-промислові конструкції плазмотронів для гібридного-лазерно плазмового зварювання сталей.
5. *Розроблено* зразки дослідно-промислових установок блочно-модульного типу для автоматичного гібридного лазерно-плазмового зварювання, які в залежності від потреб виробництва, можуть базуватися на зварювальних маніпуляторах та антропоморфних роботах.

5. Повнота вкладу результатів дисертаційного дослідження та наукових положень в опублікованих працях.

За темою дисертації опубліковано 32 роботи, з них 4 статті у науково періодичних виданнях, що входять до науко метричної бази SCOPUS, 6 статей у фахових виданнях України, 5 статей у науково періодичних виданнях інших держав, 15 публікації у збірниках наукових праць і матеріалах конференцій, отримано 1 патент України на корисну модель та 1 патент України на винахід.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві, зазначена у дисертації.

Апробація роботи: основні наукові положення та результати досліджень доповідалися на 15 науково-технічних конференціях.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року.

6. Структура, оцінка мови, стилю та оформлення.

Дисертація Є.В. Ілляшенко складається із анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 219 сторінок, 134 рисунки, 29 таблиць, список використаних джерел з 115 найменувань, 1 додатка про впровадження розробленого обладнання.

Автором дисертації усі наукові результати одержано самостійно.

Дисертацію виконано на високому науково-технічному рівні, вона містить достатній обсяг виконаних досліджень та оформлена згідно з вимогами до змісту і об'єму дисертаційних робіт. Структура кваліфікаційної роботи погоджується з метою та завданнями дослідження.

Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені, і нові науково-обґрунтовані результати досліджень та задовольняє паспорт спеціальності 132 «Матеріалознавство», галузь знань 13 «Механічна інженерія».

Текст дисертації написаний українською мовою з використанням загальноприйнятої термінології. Анотація та текст дисертації оформлено згідно вимог діючого «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. №167.

7. Академічна доброчесність.

Здобувач дотримується вимог академічної доброчесності, дисертація не містить елементів плагіату та запозичень, має посилання на відповідні джерела інформації у випадку використання ідей, результатів та текстів інших авторів. Автор дотримується норм законодавства про авторське право, надає повну та достовірну інформацію про результати наукової діяльності, а також використання методики досліджень.

8. По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. **Актуальність.** Актуальність роботи сформульована не досить чітко. Актуальність роботи не може бути пов'язана з тим, що проводиться мало досліджень гібридного лазерно-плазмового зварювання сталей з використанням волоконного джерела лазерного випромінювання. Актуальність роботи повинна бути пов'язана з ПРОБЛЕМАМИ які ще розв'язані при використанні цього методу зварювання.
2. **Мета дослідження.** Автор вказує що *«Мета роботи – дослідження спільного впливу випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги на*

ефективність передачі тепла від джерела енергії, особливості структуро-утворення зварних швів, особливості формування та розподілу напружено-деформованого стану та механічні властивості зварних з'єднань». Мені здається що, метою роботи не може бути – «дослідження». «Дослідження» – це шлях який використовує автор, а «мета роботи» - це вирішення конкретної практичної задачі шляхом дослідження спільного випромінювання волоконного лазера і плазмової дуги, дослідження особливостей структуроутворення, напружено-деформованого стану, механічних властивостей.

3. **Методи дослідження.** Все гарно. Використано багато методів дослідження. Особисто мені не вистачило використання методів рентгеноструктурного та методів дослідження структуроутворення, як зазначено у меті роботи. На рис.2.12 приведено модернізований з цифровою системою реєстрації зображень оптичний мікроскоп Neophot - 30 (а не Neophot -32).
4. **Наукова новизна.** Дуже широкі міркування, не можливо відразу зрозуміти сенс – що є головним. У четвертому пункті наукової новизни позначено « у шві ... отриманого лазерно-плазмовим способом, спостерігається формування безградієнтних **комірчастих структур** переважно рівноосної форми, а при лазерному зварюванні в металі шва формуються **субструктури подовженої форми**». Це важливо з матеріалознавчої точки зору, але чому так відбувається автор не пояснює.
5. **Практичне значення.** Дуже гарно. Отримано два патенти - на корисну модель та на винахід.
6. **Структура дисертації.** Структура дисертації побудована логічно та підпорядкована вирішенню мети роботи. Повний обсяг дисертації занадто великий - 219 сторінок.
7. **Перший розділ.** Більша частина першого розділу присвячена аналізу робіт присвячених процесу гібридного лазерно-плазмового зварювання (технології, обладнанню та режимам лазерно-плазмового зварювання) та аналізу синергетичного ефекту при гібридному зварюванні. Особисто мені у цьому розділі не вистачило аналізу мікроструктури, що формується при гібридних методах зварюванні. У чому їх особливості відносно мікроструктур, що формуються при традиційних методах зварювання? Як на мікроструктуру шва та металу ЗТВ впливає тип (склад) сталі, що зварюється?
8. **Другий розділ.** У роботі використано дві сталі Q235 та AISI304. Автор вказує, що сталь Q235 є аналогом сталі 09Г2С, сталь AISI304 – сталі 08Х18Н10Т. Але це не так. Сталь Q235 (виробництва КНР) є аналогом

сталі СтЗкп або СтЗпс. А сталь AISI304 є аналогом сталі 08X18H10, тобто без титану!

9. **Третій розділ** присвячено дослідженню синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні з використанням волоконного лазера. Отримано дуже цікаві та важливі результати. Автор вказує *«Наявність синергетичного ефекту при лазерно-плазмовому зварюванні забезпечують підвищене вкладення теплової енергії, гідродинаміка зварювальної ванни і тиск плазмової дуги, яка подовжується і проникає у кейхол при глибокому лазерному зварюванні»*. Виникає декілька питань: звідки береться ця зайва тепла енергія? Як змінюється гідродинаміка ванни (швидкість рідкої ванни, температура, її взаємодія з кейхолом)? Чому підвищується тиск плазмової дуги, чому відбувається контрагування дуги на кейхолі?
10. **Четвертий розділ** присвячено дослідженню мікроструктури та властивостей зварних з'єднань. Нажаль у цьому розділі досліджено тільки зварні з'єднання нержавіючої сталі AISI304, яка має однорідну повністю аустенітну структуру. Не досліджено зварні з'єднання конструкційної вуглецевої сталі звичайної якості Q235 з ферито-перлітною структурою. Було би цікаво порівняти їх мікроструктуру після лазерно-плазмового зварювання. Також не зрозуміло, що це за друга фаза (чорні плями) з'являються у чисто аустенітній структурі металу шва (рис.3.55, рис.3.60, рис.3.64) після лазерно-плазмового зварювання?
11. **Четвертий розділ. Математичне моделювання.** Це дуже гарно, що автор намагається промодельовувати процеси, що відбуваються при лазерно-плазмовому зварюванні. Але при моделюванні температурного поля (рис.4.30, рис.4.32) автор отримує температуру металу!!! (не рідкої ванни), у середньому поперечному перерізі 3400°C, що значно вище температури плавлення та випаровування. Тому здається, що у такому спрощеному формулюванні розрахункової задачі моделювання лазерно-плазмового зварювання, яке запропонував автор, отримати надійні результати по напружено-деформаційному стану майже не можливо.

ВИСНОВОК

Відмічені недоліки та зауваження, зроблені до окремих положень дисертації, нестосуються кваліфікаційних ознак роботи в цілому і не знижують її загального наукового рівня. Дисертаційна робота Є.В. Ілляшенка на тему: «Гібридне зварювання сталей з використанням плазмової дуги та випромінювання волоконного лазера» є самостійним та завершеним науковим дослідженням на актуальну тему. Вона виконана на достатньо високому теоретичному та методичному рівні, має перспективи подальших досліджень, які стосуються підвищення технології та експлуатаційних властивостей металу, що отримано гібридним лазерно-плазмовим зварюванням з використанням волоконного лазера.

Робота відповідає вимогам пунктів 6, 8 та 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор - **Ілляшенко Євгеній Володимирович** - заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Рецензент:

провідний науковий співробітник відділу
фізико-хімічних досліджень матеріалів
ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



Валерій КОСТИН

Підпис Валерія КОСТИНА засвідчую
Вчений секретар ІЕЗ ім. Є. О. Патона



Ілля КЛОЧКОВ