

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Пелешенка Святослава Ігоровича «Фізико-металургійні та термодетформаційні процеси при зварюванні тонкостінних конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням лазерного випромінювання»,

що представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Представлена до розгляду дисертаційна робота містить вступ, п'ять розділів, загальні висновки, список використаної літератури зі 146 найменувань, 1 додаток обсягом 8 сторінок, 77 рисунків і 26 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 221 сторінку.

Актуальність теми дисертації.

Високоміцні легкі сплави широко використовуються в техніці, зокрема при виготовленні виробів авіаційного та космічного призначення, транспортного машинобудування, суднобудування тощо. Однак швидке поширення таких сплавів стримується складністю їх з'єднання з використанням сучасних традиційних технологій зварювання. Основними проблемами при зварюванні виробів із високоміцних легких сплавів, зокрема алюмінієвих та берилієвих, є їх висока теплопровідність, активна взаємодія з газовим середовищем, летючість низки основних легуючих елементів, незадовільне формування структури та зменшені у порівнянні з основним металом (ОМ) фізико-механічні характеристики зварних з'єднань, схильність до утворення дефектів формування зварних швів, наявність значних післязварювальних напружень та деформацій. Утворення структури зварних з'єднань відбувається в нерівноважних умовах під дією термічного циклу зварювання і супроводжується високошвидкісним нагрівом і охолодженням локальних ділянок при послідовному формуванні зварного шва, що призводить до утворення значних напружень, які в свою чергу впливають на структуроутворення, схильність до утворення дефектів зварних швів, викликають зміну геометричної форми готових виробів. Наявний світовий доробок указує, що використання лазерного випромінювання дозволяє зменшити негативний вплив термічного циклу зварювання на формування структури та напружено-деформованого стану (НДС) зварних з'єднань, проте, наведені в літературі параметри режимів стосуються конкретних сплавів і виробів певної геометричної форми та товщин. Проблема визначення оптимальних параметрів режиму лазерного зварювання ускладнюється тим, що до розглянутого в роботі виробу – гіроскопу космічного призначення висувається низка додаткових вимог, зокрема по максимально допустимій температурі нагріву і точності його геометричної форми, необхідністю ведення процесу з неповним проплавленням. Тому тема дисертаційної роботи присвячена вивченню фізико-металургійних та термодетформаційних процесів при зварюванні тонкостінних конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням лазерного випромінювання є актуальною, а робота своєчасною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів представленої дисертаційної роботи полягає в наступному:

- дисертант вперше дослідив вплив супутнього плазмового підігріву на особливості поглинання лазерного випромінювання поверхнею алюмінієвих сплавів систем алюміній-магній та алюміній-цинк-магній-мідь і запропонував методику прогнозування поглинальної здатності легких сплавів, визначив особливості засвоєння лазерного випромінювання розглянутими в роботі сплавами на основі алюмінію та берилію;

- вперше виявлено, що при зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів з неповним проплавленням збільшення погонної енергії лазерного зварювання або перехід до лазерно-мікроплазмового процесу призводить до зменшення величини

діючих максимальних еквівалентних напружень, що супроводжується збільшенням області їх дії з одночасним зосередженням максимальних еквівалентних напружень вздовж лінії сплавлення та/або в зоні кореня зварного шва;

- дисертантом вперше запропонований комбінований розрахунково-емпіричний метод визначення компонент НДС зварних конструкцій, який був реалізований на основі методу кореляції стерео-цифрових зображень (Stereo Digital Image Correlation). Метод передбачає поділ дослідної конструкції на просторові примітиви та врахування послідовності і параметрів режимів лазерного зварювання алюмінієвих сплавів, глибини проплавлення та допустимої температури нагріву зварюваного виробу. Підтверджена можливість застосування запропонованого методу для прогнозування параметрів режимів лазерного зварювання легких сплавів на основі алюмінію та берилію;

- із застосуванням запропонованого та розробленого комбінованого розрахунково-експериментального методу визначення компонент НДС вперше встановлено, що при лазерному зварюванні циліндричних виробів з легких сплавів двома кільцевими швами з неповним проплавленням із попереднім виконанням чотирьох діаметрально протилежних прихваток залишкові переміщення торців виробу складають 0,02...0,05 мм, після виконання безперервних кільцевих швів зменшуються до 0,01...0,02 мм, а величина залишкових напружень на ділянці шва досягає 200 МПа, у зоні термічного впливу (ЗТВ) діють напруження від 70 до 150 МПа. Встановлено, що похибка між експериментально та розрахунково встановленими значеннями складає 10...20%;

- експериментальні дослідження зварних швів вперше показали, що використання плазмового нагріву під час лазерного зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів сприяє зменшенню схильності металу до утворення пор та оксидних включень, забезпечує формування більш однорідної та у 1,5-2 рази більш дисперсної структури металу зварного шва, знижує мікротвердість металу в ЗТВ до рівня ОМ;

- вперше доведено, що використання супутнього плазмового підігріву під час лазерного зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Si та Al-Mg призводить до зниження на 40–50% витрат енергії лазерного джерела тепла, час існування зварювальної ванни складає 0,03...0,05 с і є близьким до характерного при лазерному зварюванні, що сприяє зменшенню втрат легуючих елементів.

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації визначаються застосуванням автором сучасних перевірених експериментальних методів і методик як для проведення експериментальних, так і розрахункових досліджень, значним обсягом експериментальних даних, які були отримані в результаті проведення прямих експериментів на реальних зразках, доброю збіжністю результатів аналітичних розрахунків і експериментальних досліджень, публікаціями в наукових журналах та представленням основних результатів наукового дослідження на численних міжнародних конференціях.

Викладені положення наукової новизни відповідають поставленим у науковій роботі завданням, вони чітко сформульовані та ретельно розкриті.

Наукові висновки та положення дисертаційної роботи збігаються з існуючими концепціями та загальноприйнятими теоріями, мають достатню обґрунтованість, про що свідчить їх визнання на відомих міжнародних конференціях.

Результати наукового дослідження мають високу достовірність та обґрунтованість, що підтверджується широким спектром проведених експериментів, характеризуються високим науковим значенням і значною практичною цінністю.

Викладені у дисертації висновки, наукові положення та рекомендації відповідають усім встановленим Міністерством освіти і науки України вимогам стосовно дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Представлені у кваліфікаційній роботі відомості свідчать про те, що Пелешенко С.І. успішно вирішив поставлене наукове завдання.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Представлена дисертаційна робота Пелешенка С.І. повністю відповідає вимогам Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна механіка та предметній області, що визначена освітньо-науковою програмою підготовки докторів філософії зі спеціальності 131 – Прикладна механіка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям дослідження новітніх проблем механіки суцільного середовища.

Після аналізу представленого звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна стверджувати, що кваліфікаційна робота Пелешенка С.І. є результатом його власних наукових досліджень. У роботі відсутні ознаки фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату, запозичень або несанкціонованого використання здобувачем результатів інших авторів. Використані дисертантом ідеї, результати та тексти інших авторів чітко відзначені відповідними посиланнями. У дисертаційній роботі наведений перелік виданих за темою дисертації публікацій з наведенням особистого внеску здобувача при проведенні наукових досліджень та підготовці наукових публікацій у співавторстві з іншими дослідниками.

Мова і стиль викладення результатів дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота С.І. Пелешенка укладена українською мовою. Суть дисертаційної роботи подана послідовно, зрозуміло та стисло. Автор використав загальноприйнятну технічну термінологію, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Подані у дисертації результати досліджень систематично розподілені на окремі розділи, що дозволяє іншим ученим чітко розуміти послідовність кроків їх виконання. Представлений графічний матеріал повністю відображає результати експериментальних, аналітичних і розрахункових досліджень.

У вступі викладене обґрунтування актуальності обраної теми дисертаційної роботи, сформульована мета та поставлені завдання досліджень, описані методи, які використовувалися здобувачем під час виконання досліджень, а також визначена наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі встановлена актуальність дослідження, представлені результати аналізу особливостей та проблем, що виникають при зварюванні сплавів на основі алюмінію і берилію. Досліджена можливість використання лазерного випромінювання для зварювання тонкостінних елементів конструкцій з неповним проплавленням, розглянуті актуальні проблеми формування з'єднань. На підставі ретельного аналізу представлених даних сформульовані мета та завдання наукового дослідження.

У другому розділі кваліфікаційної роботи представлені стандартизовані та розроблені автором методики, які використані при проведенні досліджень, наведені необхідні характеристики матеріалів та обладнання для реалізації технологічних, металографічних, інструментальних та розрахункових досліджень.

У третьому розділі дисертації розглянуті результати моделювання процесів лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання модельних зразків, наведена методика визначення оптимальних параметрів режимів зварювання з неповним проплавленням. У розділі подані результати експериментальної перевірки використаної методики та проведених досліджень структурної будови отриманих зварних з'єднань. Також виконаний аналіз типових дефектів та запропоновані шляхи їх уникнення.

Проаналізовані особливості впливу супутнього плазмового підігріву на здатність поверхні алюмінієвих сплавів поглинати лазерне випромінювання, а також було проведено прогнозування особливостей поглинання лазерного випромінювання сплавами на основі берилію. Виявлено, що під час розплавлення легких сплавів частка поглинутого лазерного випромінювання збільшується стрибкоподібно, до п'яти разів для алюмінію і приблизно на двадцять відсотків для берилію. Було доведено,

що погонна енергія лазерного зварювання берилієвих сплавів повинна бути приблизно удвічі більшою, ніж енергія, що потрібна для зварювання сплавів на основі алюмінію. При локальному підігріві зварювальної ванни мікроплазмовим джерелом тепла таке збільшення погонної енергії зменшується до приблизно тридцяти відсотків. Також був встановлений вплив відстані між фокусом лазерного випромінювання і центром анодної плями плазмової дуги на особливості формування швів і ступінь вияву синергетичного ефекту взаємодії цих двох джерел тепла.

Розроблені методики попереднього розрахунку параметрів режимів лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання, а також компонент залишкового НДС модельних виробів зі сплавів на основі алюмінію та берилію. Шляхом співставлення з експериментальними даними була визначена похибка розрахунків, яка складає від 10 до 20 %. Обґрунтована прийнятність запропонованих методик для вирішення висунутих у роботі завдань.

З'ясовано, що існують певні порогові значення потужності та швидкості зварювання. Дослідні дані та розрахунки підтвердили, що ефективним способом поліпшення формування зварних швів під час лазерного зварювання є застосування локального підігріву зварювальної ванни мікроплазмовим джерелом тепла. Цей підхід дозволяє зменшити необхідну для формування зварного шва кількість лазерного випромінювання та одночасно збільшує швидкість зварювання у 1,5-2 рази.

Розрахунковим шляхом визначені прогнозовані параметри технологічного процесу лазерного зварювання сплавів берилію, отримані результати були порівняні з наведеними в літературі відомостями. Виявлено, що через високу теплопровідність берилієвих сплавів для їх зварювання необхідно забезпечити значно більше тепловкладення при формуванні шва, зокрема кількість уведеної енергії має перевищувати енергію для зварювання аналогічних з'єднань із сплавів на основі алюмінію при лазерному зварюванні до ~4 разів, а при лазерно-мікроплазмовому – на 30...50%.

За результатами експериментальних досліджень автором встановлено, що збільшення розміру зерен металу шва у процесі лазерного зварювання високоміцних алюмінієвих сплавів призводить до зниження міцності швів у області сплавлення з ОМ. Підвищення питомої енергії випромінювання призводить до зменшення вмісту летючих легуючих елементів сплаву, таких як Mg, Zn, Li, і як результат виникають характерні дефекти типу внутрішніх пор діаметром 0,05...0,2 мм, а також гарячі тріщини. Особливо небезпечними місцями виникнення тріщин є кратер та дефекти зварного шва. Зменшення схильності металу до утворення тріщин може бути досягнуте шляхом застосування попереднього або супутнього підігріву, зменшенням погонної енергії, введенням присадного металу, поступовим зменшенням величини потужності лазерного випромінювання під час завершення процесу зварювання, видаленням оксидів з поверхні заготовок та застосуванням ОМ з більшою дисперсною структурою.

Виявлено, що застосування супутнього підігріву мікроплазмовою дугою під час лазерного зварювання алюмінієвих сплавів сприяє покращенню формування шва в області підсилення валика, мінімізації схильності до утворення пор, зниженню твердості металу з'єднання до рівня ОМ, а також підвищенню швидкості зварювання та зменшенню розміру зерен металу зварного з'єднання до 1,5-2 разів.

Лазерне зварювання з'єднань високоміцних алюмінієвих сплавів дозволяє отримувати шви з близьким до 1 коефіцієнтом форми шва при мінімальних значеннях погонної енергії у 5...10 Дж/мм та часі існування ванни розплаву 0,02...0,04с.

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що зернистість металу з'єднання при лазерному зварюванні має регулярний характер, зерна металу шва характеризуються рівноосною формою та подовженою формою в області лінії сплавлення, а також у ЗТВ, визначені коефіцієнти форми зерен на різних ділянках.

Мікротвердість металу з'єднання зменшується на 15%, а в ЗТВ збільшується на 8-12% порівняно з ОМ. Основними дефектами є мікротріщини, що утворюються в ЗТВ та залишки оксидних плівок у кореневій частині швів.

Для покращення якості зварних з'єднань пропонується використання лазерно-мікроплазмового процесу зварювання, що дозволяє зменшити розмір зерен, підвищити рівень регулярності їх форми та зменшити мікротвердість металу з'єднання. Для отримання зварних швів необхідної геометричної форми можливе зменшення на 40...50 % використання енергії лазерного випромінювання, для лазерно-мікроплазмового процесу зварювання час існування зварювальної ванни складає 0,03...0,05 с і наближається до характерного для лазерного зварювання.

У четвертому розділі розглянуті експериментально-розрахунковий підхід та методика визначення компонентів НДС за допомогою методу кореляції стереоскопічних цифрових зображень (SDIC) і подані результати розрахункового визначення параметрів залишкового НДС отриманих лазерним та лазерно-мікроплазмовим зварюванням зварних з'єднань високоміцного алюмінієвого сплаву 7005. Із застосуванням розробленого методу встановлено, що після виконання чотирьох діаметрально протилежних точкових прихваток залишкові переміщення торців виробу можуть сягати 0,02–0,05 мм, а після зварювання безперервних кільцевих швів ці переміщення зменшуються до 0,01–0,02 мм. Значення залишкових напружень стиску у площині торців зварного виробу знаходяться в межах 50–60 МПа, на ділянці шва - до 200 МПа, у ЗТВ змінюються від 70 до 150 МПа. Виявлено, що геометричні відхилення від попередньо встановлених точкових прихваток майже не впливають на рівень залишкових напружень.

У п'ятому розділі наведені результати втілення розроблених технологій на практиці, а саме створене автором обладнання для лазерного зварювання та неруйнівного контролю високоточних тонкостінних зварних виробів із алюмінієвих сплавів. Для реалізації лазерного та лазерно-мікроплазмового зварювання зразків-імітаторів гіроскопа були розроблені спеціалізовані зварювальні головки, при проектуванні яких враховані параметри оптичних елементів, діаметри та фокусні відстані, а також визначені параметри потоку плазмоутворювального газу відповідно до конструкції камери з контрольованою захисною атмосферою. Запропонований дисертантом склад технологічного комплексу дозволяє здійснювати зварювання та проводити неруйнівний контроль з можливістю визначення компонент НДС готового виробу. Під час розробки обладнання були використані цифрові фотокамери з високою роздільною здатністю, створена система базування зварювального виробу у складально-зварювальному оснащенні та розроблені алгоритми і програмне забезпечення для вимірювання переміщень та визначення деформацій з подальшим розрахунковим визначенням значень залишкових напружень.

Автором розроблена і покроково представлена технологія герметизації високоточних тонкостінних виробів із легких сплавів лазерним зварюванням з неповним проплавленням. Описана структура, склад і технічні характеристики як складових елементів, так і в цілому розробленого дослідно-промислового комплексу для лазерного зварювання та неруйнівного контролю виробів.

Висновки дисертації.

У висновках дисертації представлені ключові наукові та практичні результати дослідження. Вони відображають нове вирішення актуального науково-технічного завдання щодо встановлення закономірностей впливу параметрів режимів лазерного зварювання та сумісної дії лазерного і плазмового джерел тепла на структуру металу зварного з'єднання, формування дефектів, розвиток фізико-металургійних та термодформаційних процесів при лазерному зварюванні з неповним проплавленням алюмінієво-магнієвих сплавів систем легування Al-Zn-Mg-Cu та Al-Mg, створення на цій основі технології та обладнання для отримання тонкостінних виробів з мінімальним рівнем залишкових напружень та деформацій. Висновки сформульовані чітко, логічно і послідовно, відповідно до змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» повною мірою.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати, що відображені в дисертаційній роботі, представлені в 33 наукових публікаціях автора, зокрема в 5-ти статтях у наукових періодичних виданнях, що включені до переліку фахових видань України, 2-х статтях у періодичних наукових виданнях, які індексуються у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 1 публікації у виданні, індексованому у базах даних Scopus та WoS, 4-х статтях у закордонних наукових періодичних виданнях, а також 8-ми патентах.

Крім того, результати дисертації були представлені на 13 міжнародних наукових конференціях.

Отже, наведені в кваліфікаційній роботі на здобуття наукового ступеня доктора філософії наукові результати повною мірою відображені в наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У різних місцях тексту кваліфікаційної роботи автор визначає процес як лазерно-плазмовий або лазерно-мікроплазмовий, бажано надати пояснення щодо такої класифікації.

2. Наведений у науковому положенні 3 вислів автора «...із розділенням досліджуваної конструкції на просторові примітиви...» бажано додатково пояснити.

3. Бажано пояснити, які конкретні характеристики має на увазі автор, коли посилається на «умови отримання зварних з'єднань».

4. За результатами аналізу літературних джерел автор на стор. 65 сформулював висновок 4, в якому рекомендує в якості заходу зменшення схильності зварних швів до утворення дефектів «...використовувати леговані присадкові матеріали на основі алюмінію», але в роботі вплив складу присадкових матеріалів не розглядається.

5. В розділі 2, на стор. 70, в останньому абзаці при визначенні товщини стінки виробу помилково наведене посилання на рис. 2.1,б. Краще було б посилатися на рис. 2.1,а, оскільки саме тут наведені геометричні розміри виробу.

6. Рис. 2.3,а на стор. 73 дещо складний для сприйняття, його краще було б представити у більшому розмірі.

7. Робота має деякі описки, зокрема на стор. 74, Рис. 2.4 «Загальний вигляд лабораторного стенду щодо попередніх експериментів...»; на стор. 98 «...деталі після зварювання виходитимемо з того, що...»; на стор. 131 «Метою дослідження є визначення залишкових переміщень (з точністю 3,0...3000,0 мкм) зварних примітивів конструкцій...»; стор. 173 «вузол кріплення, юстування та настроювального переміщення фокуруючої лінзи...»; та ін

8. Наведений на стор. 75 вислів автора «Плазмоутворюючий та захисний гази подаються за допомогою системи газопідготовки 4, що дозволяє досить точно виставляти необхідні витрати та тиск» має декларативний характер, необхідно навести відомості щодо точності встановлення витрат газів.

9. На стор. 108-109, у табл. 3.6 наведене порівняння розрахункових параметрів режимів з експериментальними результатами лазерного зварювання сплаву 7075. Бажано додатково пояснити, за якою методикою визначали глибину проплавлення експериментальних зразків, оскільки на більшості з представлених макроструктур наявні відхилення між площиною верхньої частини кришки та торцевою поверхнею стінки виробу.

10. Бажано навести методику визначення «Загальної об'ємної частки (V_D) дефектів у металі шва», яка за твердженням автора «...становить порядку 5 %», стор. 114.

Загальний висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Пелешенка Святослава Ігоровича виконана на тему «Фізико-металургійні та термодформаційні процеси при зварюванні тонкостінних конструкцій із алюмінієвих сплавів з використанням лазерного випромінювання» характеризується високим науковим рівнем та значною практичною цінністю, при її підготовці автор не порушував принципів академічної доброчесності. Представлена кваліфікаційна робота є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує важливе та актуальне наукове завдання, яке має суттєве значення для галузі знань 13 Механічна інженерії, зокрема спеціальності 131 Прикладна механіка.

Дисертаційна робота за своїми актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною у повній мірі відповідає вимогам чинного законодавства України, які сформульовані в п.п. 6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», який затверджений Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. за № 44.

Здобувач Пелешенко Святослав Ігорович повною мірою заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент

доцент, кандидат технічних наук,
завідувач кафедри лазерної техніки
та фізико-технічних технологій
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Олексій КАГЛЯК

Підпис рецензента доцента, кандидата технічних наук, завідувача кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Кагляка Олексія Дмитровича засвідчую:

М.П.

«03» травня 2024 року

