

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу

Устименка Павла Романовича

на тему «Напружено-деформований стан зварних з'єднань за електродинамічної обробки», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 – Механічна інженерія
за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

Ефективний розвиток аерокосмічної, суднобудівної, автомобільної та інших галузей промисловості вимагає підвищення надійності, несучої спроможності та ефективності роботи елементів конструкцій, що забезпечується застосуванням сучасних матеріалів, які характеризуються високою питомою міцністю та корозійною стійкістю, а також високими характеристиками якості зварних з'єднань елементів конструкцій. Тому перспективність застосування сплавів на основі алюмінію для виготовлення елементів конструкцій не викликає сумнівів. Однак, широке застосування таких матеріалів стримується проблемами забезпечення рівномірності зварних з'єднань основному металу. Характеристики міцності, надійності та несучої спроможності елементів зварних конструкцій пов'язані зі специфікою формування напружено-деформованого стану (НДС) в процесі зварювання, який формується під впливом нерівномірного нагріву при дуговому зварюванні, наявністю залишкових напружень розтягу. Залишкові напруження та зварювальні деформації призводять до відхилення геометричної форми зварних конструкцій від заданої. Одним із сучасних перспективних способів регулювання НДС зварних з'єднань є електродинамічна обробка (ЕДО), яка дозволяє сформувати в зварному шві та навколошовній зоні залишкові напруження стиску, що підвищує несучу спроможність та надійність зварних з'єднань. Застосування експериментальних методів визначення компонент залишкового НДС конструкції характеризується високою вартістю, вимагає використовувати руйнівні методи та не дозволяє отримати значення всіх компонент НДС, а наявні в літературі відомості щодо впливу режимів та умов проведення ЕДО зварних з'єднань сплавів на основі алюмінію не достатньо систематизовані і мають розрізнений характер. Це свідчить про актуальність та своєчасність теми представленої дисертаційної роботи, яка має як науковий, так і практичний інтерес та спрямована на створення математичного методу оцінки НДС зварних з'єднань, що формується при застосуванні динамічної складової електродинамічної обробки.

Про актуальність теми роботи свідчить також її зв'язок з темами наукових досліджень, зокрема виконаних здобувачем на кафедрі динаміки і міцності машин та опору матеріалів КПІ ім. Ігоря Сікорського "Дослідження динаміки, стійкості руху та віброміцності елементів машинобудівних і енерго-машинобудівних конструкцій" (Державний реєстраційний номер: 0116U006244) та спільних наукових досліджень у рамках Договору про співпрацю між КПІ ім. Ігоря Сікорського та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (№Д0001.01/7000.02/65/2020 від 30.12.2020 року) "Підвищення надійності та довговічності елементів конструкцій авіаційної та космічної техніки на основі розвитку автоматизованих методів лазерної діагностики і технологій

електродинамічної обробки та регулювання напружено-деформованих станів зварних з'єднань" (Державний реєстраційний номер: 0117U001182), "Проведення комплексу досліджень і розробка нових технологій зміцнюючих обробок зварних з'єднань імпульсними електромагнітними полями, оптико-електронних методів їх безконтактної діагностики та перспективних конструкцій перетворюваного об'єму, що адаптовані до умов космічного простору" (Державний реєстраційний номер: 0122U001194). Наукові дослідження виконані здобувачем під керівництвом професора кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів д.т.н., проф. Ю.М. Сидоренка.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Вперше створений математичний метод визначення НДС зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМгб, що формується після застосування ударної складової електродинамічної обробки.

Із застосуванням створеного здобувачем розрахункового методу визначення НДС, результатів власних експериментальних досліджень вперше встановлений вплив геометричної форми електрода-ударника та швидкості його ударної взаємодії з модельним стиковим зварним з'єднанням зі сплаву АМгб на формування НДС зварного з'єднання при ЕДО.

Здобувачем вперше запропонована розрахункова методика оцінки впливу проміжної мідної підкладки на формування НДС, рівень залишкових напружень та поверхневе деформування зварних з'єднань зі сплаву АМгб після ЕДО.

Вперше отримані закономірності зміни часу тривалості контакту між електродом-ударником, що рухається зі швидкістю 5 м/с, та модельним стиковим зварним з'єднанням, глибини вм'ятини в модельному зразку та величини ефективних пластичних деформацій на його лицьовій і тильній поверхнях вздовж лінії обробки з урахуванням величини початкових напружень розтягу модельного з'єднання. Встановлено, що величина радіусу вм'ятини при цьому залишається незмінною, а закономірності зміни часу тривалості контакту описують за лінійним законом.

За результатами експериментальних досліджень вперше встановлений вплив температури в процесі ЕДО зварного з'єднання алюмінієвого сплаву АМгб на формування НДС.

Наукова новизна сформульована зрозуміло, з розкриттям суті. Положення наукової новизни відповідають поставленим завданням наукової роботи.

Обґрунтованість та достовірність основних наукових положень, висновків і рекомендацій роботи визначається наступним:

- використанням у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладної механіки;

- верифікацією та доброю збіжністю результатів аналітично-розрахункових і експериментальних досліджень;

- застосуванням автором сучасних апробованих методів та методик експериментального визначення рівня залишкових напружень, зокрема методу спекл-інтерферометрії, результатами механічних випробувань реальних зразків. При виконанні аналітичних розрахунків застосовані методи скінченних елементів,

найменших квадратів, статистичної обробки експериментальних даних, регресійний аналіз;

- значним обсягом отриманих шляхом проведення прямих експериментів експериментальних даних;

- наявністю численних публікацій у фахових виданнях та апробацією основних результатів роботи на всеукраїнських та міжнародних конференціях.

Отримані автором теоретичні закономірності підтверджені дослідженнями реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та накопиченим досвідом. Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями. Їх достатня обґрунтованість підтверджується визнанням на відомих міжнародних конференціях з прикладної механіки, зварювання і споріднених технологій.

Таким чином, основні результати представленого наукового дослідження 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.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання щодо розробки математичного методу визначення НДС зварних з'єднань, що формується при застосуванні динамічної складової електродинамічної обробки, виконане в повному обсязі, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

Представлена дисертаційна робота Устименка П.Р. за своїм змістом повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна механіка та напрямкам досліджень, що визначені в освітній програмі 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 і механіки машин.

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння можна зробити висновок, що дисертаційна робота Устименка Павла Романовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Вона не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані здобувачем ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Наведені в дисертаційній роботі відомості та результати досліджень логічно розподілені здобувачем на окремі розділи. Структура дисертаційної роботи забезпечує можливість іншим дослідникам покроково зрозуміти послідовність етапів виконаних досліджень. Наведений графічний матеріал представлений як власними фотографіями, скріншотами, графіками, що відображають результати експериментальних досліджень і розрахунків, так і загальноприйнятими ілюстраціями. Сутність дисертаційної роботи представлена послідовно, зручно і стисло. Автором використана загальноприйнята технічна термінологія, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури зі 144 джерел та 2 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи 207 сторінок.

У вступі наведене обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі досліджень, наведені відомості щодо методів досліджень застосованих здобувачем при виконанні роботи, сформульовані наукова новизна та практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі визначена актуальність проблеми формування в процесі дугового зварювання в з'єднаннях залишкових напружень, які призводять до зміни геометричної форми виробів і зменшення працездатності та несучої спроможності зварних з'єднань, необхідності застосування методів регулювання компонент НДС. На основі проведеного автором літературного огляду наведені основні методи визначення компонент НДС у зварних конструкціях. Розглянуті існуючі методи регулювання НДС зварних з'єднань. Показано, що одним з перспективних методів регулювання НДС є ЕДО. Розглянутий сучасний стан методів математичного моделювання, які дозволяють визначати компоненти НДС конструкцій та виробів, проводити порівняльну оцінку ефективності різних методів регулювання НДС, зокрема ЕДО та її динамічної складової як окремої частини.

На основі проведеного огляду здобувач сформулював мету та задачі досліджень.

У другому розділі наведений опис підходу щодо створення методу визначення компонент НДС модельного стикового зварного з'єднання під дією динамічної складової ЕДО, якій базується на математичній моделі процесу ударної взаємодії електрода-ударника зі з'єднанням у двовимірній та тривимірній постановках.

Методом скінченних елементів з використанням лагранжевого підходу розв'язана система рівнянь, яка описує поведінку суцільного середовища під впливом зовнішнього навантаження, зокрема рівняння збереження енергії, рівняння нерозривності, збереження кількості руху середовища, а також співвідношення пластичної течії Прандтля-Рейсса. В якості математичної моделі матеріалів, яка характеризує ударну взаємодію, прийнята ідеальна пружно-пластична модель.

Шляхом експериментальних досліджень автором визначені необхідні для проведення математичного моделювання механічні характеристики дослідного алюмінієвого сплаву АМг6.

Проведена оцінка точності запропонованого методу визначення компонент НДС модельного стикового зварного з'єднання при його ударній взаємодії з інструментом ЕДО на швидкостях до 10 м/с шляхом порівняння з отриманими експериментальними даними для сплаву АМг6. Середнє відхилення експериментальних та розрахункових результатів не перевищує 15 %.

У подальшому визначений вплив розміру скінченних елементів та геометричних розмірів модельного зварного з'єднання на точність отриманих результатів.

У третьому розділі дисертації із застосуванням створеного методу проведена математична оцінка впливу на формування компонент НДС модельного зварного з'єднання технологічних параметрів процесу ЕДО. Проведені розрахункові

дослідження щодо впливу початкової швидкості електрода-ударника та його форми на формування НДС модельного зварного з'єднання з алюмінієвого сплаву АМгб товщиною 4 мм. Встановлені математичні залежності, які описують тривалість контакту між тілами в залежності від швидкості їх взаємодії, розподіл по товщині з'єднання зони ефективних пластичних деформацій та напружень. Встановлено, що найбільшу ефективність має застосування електрода-ударника циліндричної форми з округлою поверхнею взаємодії за швидкості від 5 до 10 м/с.

Проведене порівняння компонент НДС зварних з'єднань при застосуванні мідної проміжної підкладки товщиною 1 мм та без неї. Встановлено, що використання підкладки призводить до перерозподілу та зменшення величини пластичних деформацій по контактній поверхні з'єднання, зменшення глибини вм'ятин на 20...30 % при ударній взаємодії та величини опуклості, що виникає на ділянці поверхні взаємодії модельного зразка з ударником.

Для оцінки впливу величини та напрямку дії напружень попереднього розтягу модельного зварного з'єднання на формування НДС після ЕДО розглянута задача ударної взаємодії електрода-ударника циліндричної форми з округлою формою торцевої поверхні при швидкості 5 м/с для зварного з'єднання з АМгб товщиною 4 мм. Оцінений вплив попередніх напружень розтягу зразка, що діють перпендикулярно та вздовж зварного шва. Встановлено, що значення часу тривалості контакту між тілами, глибина вм'ятин та ефективні пластичні деформації на лицьовій та зворотній поверхнях з'єднання залежать від величини початкових напружень розтягу і ці залежності можуть бути описані лінійним законом.

З метою оцінки впливу температури модельного зварного з'єднання на формування НДС після застосування ударної складової ЕДО розглянута задача ударної взаємодії інструменту циліндричної форми з округлою поверхнею контакту з модельним зразком зі сплаву АМгб на швидкості 5 м/с за температур 20, 150 та більше 300 °С. Показано, що незважаючи на суттєве зростання ширини та глибини вм'ятин на поверхні модельного зразка зварного з'єднання, збільшення величини його початкової температури до 300 °С дозволяє ефективно регулювати та змінювати зварні напруження розтягу на напруження стиску із забезпеченням їх практично рівномірного розподілу.

В четвертому розділі представлені результати експериментальної оцінки ефективності застосування ЕДО стикових зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМгб в умовах дії підвищених температур. Автором запропонована методика локального підвищення температури зварного з'єднання за допомогою зовнішнього джерела нагріву. Встановлено, що ЕДО центральної частини зварного шва в умовах дії супутнього підігріву є найбільш ефективною для регулювання залишкових напружень по осі шва у порівнянні з ЕДО без підігріву.

Також досліджений вплив ЕДО для стикового зварного з'єднання пластин з АМгб у процесі зварювання. Автором встановлено, що застосування ЕДО металу шва, яке виконується на певній відстані одночасно із дуговим зварюванням, є більш ефективним у порівнянні із обробкою після закінчення процесу зварювання. Такий підхід забезпечує більш рівномірний розподіл компонент залишкового НДС готового зварного з'єднання. Застосування ЕДО в процесі зварювання для стикових з'єднань зі сплаву алюмінію забезпечує підвищення точності виготовлення листових конструкцій та зменшення їх стрілки прогину.

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

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 9 наукових публікаціях здобувача, зокрема в 6 статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України, 3 статтях у періодичних наукових виданнях, які індексуються у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus та віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації пройшли апробацію на 7 наукових фахових конференціях.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В представлений дисертації наведений перелік опублікованих за темою дисертації робіт з наведенням особистого внеску здобувача при проведенні наукових досліджень та підготовці наукових публікацій із співавторами.

Таким чином, описані в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад на стор. 27 у підписі рис. 1.2 «...біляшовній зоні...»; на стор. 65 «...зона стискальних напружень...» та аналогічно на стор. 106, 107; на стор. 102 «...незначний вплив під вм'ятиною...»; на стор. 158 «...поздовжніх крайків...»; на стор. 167 підпис до рис. 4.5 «Зовнішній вигляд Зразків №1-3 з поздовжніми прогинами f_x крайку Зразків №1-3 після зварювання.» та ін., хоча в цілому написана грамотно логічно та зрозуміло.

2. Представлену на стор. 113 табл. 3.6 «Розрахункові енергетичні параметри взаємодії електрода-індентора з пластиною» бажано доповнити стовпчиком, який би пов'язував наведені значення зі швидкістю руху електрода-ударника, як це зроблено, наприклад, в табл. 3.5.

3. Бажано пояснити, чому в наведеній у підрозділі 3.2 системі координат вертикальна вісь позначена як «у», оскільки в інших підрозділах вона позначена як «z». Це дещо ускладнює сприйняття результатів.

4. Бажано навести додаткові пояснення до висновку 1 по підрозділу 3.2.

5. Було б бажано пояснити наведений на стор. 164 вислів «Тобто, поза межами заднього фронту зварювальної ванни утворюється зона розігрітого металу шва, стан якого змінюється при охолодженні від пластичного до твердого».

6. Наведений на стор. 172 висновок 2 до підрозділу 4.2: «Ширина області в якій залишкові зварні напруження розтягу формуються як напруження стиску не суттєво зменшується, у порівнянні з ЕДО за кімнатної температури шва (20°C), але абсолютні значення компонент напружень залишкового НДС збільшуються у понад 2 рази із доведенням їхнього рівня, який у понад 2,5 рази перевищує рівень початкових напружень» було б бажано пояснити.

7. Висновок 1 до підрозділу 4.3, стор. 173: «Експериментально встановлено, що електродинамічна обробка зварного з'єднання з АМгб в умовах його супутнього підігріву до 150°C є більш ефективною при регулюванні залишкових напружень в центрі зварного шва та менш ефективною по лінії сплавлення і

дозволяє створити в зоні обробки подвійний рівень напружень розтягу» було б бажано додатково пояснити.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну значну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Устименка Павла Романовича на тему «Напружено-деформований стан зварних з'єднань за електродинамічної обробки» виконана на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має суттєве значення для галузі знань Механічна інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені 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», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Устименко Павло Романович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Рецензент:

завідувач кафедри

зварювального виробництва

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»,

доктор технічних наук, професор



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис рецензента завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», д.т.н, проф. Квасницького В.В. засвідчую:

М.П.

«24» листопада 2023 року

