

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Устименка Павла Романовича
на тему «**Напружено-деформований стан зварних з'єднань за
електродинамічної обробки**»,
представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 – Механічна інженерія
за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

Актуальність теми дисертації.

За останні 100 років зварювання стало однією з основних технологій нероз'ємного з'єднання конструкційних матеріалів і отримало широке застосування практично у всіх галузях промисловості. Висока продуктивність зварювального виробництва, міцність зварних конструкцій, економічна доцільність робить технологію зварювання максимально конкурентоспроможною в машинобудуванні, суднобудуванні, енергетиці, мостобудуванні, магістральному транспорті, авіаційно-космічній техніці і багатьох інших виробництвах. До недоліків технології зварювання можна віднести високий рівень залишкових напружень і деформацій, які можуть суттєво знижувати якість вироблених конструкцій. Залишкові деформації знижують точність зварних конструкцій, залишкові напруження впливають на міцність зварних з'єднань, суттєво знижують опір втомі і корозійному розтріскуванню. Згідно сучасних вимог при обґрунтуванні роботоздатності і ресурсу відповідальних зварних конструкцій необхідно враховувати залишкові технологічні напруження, в тому числі зварювальні. З метою зниження рівня залишкових напружень розроблені різні технологічні засоби, такі як, післязварювальна термообробка, ударна механічна обробка, опресування посудин тиску і трубопроводів та інше. Але ці додаткові технологічні операції є досить трудомісткими, енергозатратними і не завжди достатньо ефективними. Тому постійно продовжуються пошуки і розробки нових підходів і нових засобів зниження рівня зварювальних залишкових напружень. У зв'язку з цим, дисертаційна робота Устименка Павла, спрямованої на аналіз і розвиток технології електродинамічної обробки зварних з'єднань є вкрай актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Здобувач розробив на основі методу скінчених елементів і моделі пружно-пластичного деформування матеріалу математичну модель визначення напружено-деформованого стану в стиковому зварному з'єднанні

тонколистових елементів з алюмінієвого сплаву під дією ударної складової електродинамічної обробки. Розроблена модель дозволяє враховувати основні параметри ударного навантаження електродинамічної обробки, а саме, початкової швидкості і форми електрода-ударника, температури матеріалу, попереднього напруженого стану, наявності підкладки-посередника між електродом і поверхнею з'єднання.

2. В результаті проведення комплексу розрахункових досліджень за допомогою розробленої математичної моделі отримані нові оригінальні дані стосовно впливу швидкості ударної взаємодії електрода-ударника зі стиковим зварним з'єднанням із алюмінієвого сплаву АМгб і форми електрода-ударника (циліндричної зі округленою торцевою поверхнею та у формі прямої чотирикутної призми зі округленою боковою поверхнею) на формування напружено-деформованого стану в матеріалі з'єднання після електродинамічної обробки.

3. Визначено характер і кількісні характеристики впливу використання мідної підкладки-посередника між електродом-ударником і поверхнею матеріалу на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях після електродинамічної обробки і, що також важливо, зменшення пошкодження поверхні.

4. Досліджені закономірності впливу початкового напруження розтягу в зварному з'єднанні та зміни значень параметрів контакту (тривалості) між електродом-ударником та стиковим зварним з'єднанням на глибину вм'ятини в ньому та величини ефективних пластичних деформацій на його лицьовій і тильній поверхнях по лінії удару.

5. Вперше встановлено вплив температури матеріалу зварного з'єднання алюмінієвого зі сплаву АМгб в процесі електродинамічної обробки на його напружено-деформований стан після обробки, що дозволяє обґрунтувати доцільність проведення електродинамічної обробки в процесі зварювання на деякій відстані позаду зварювального джерела нагріву.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Устименка П.Р. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна механіка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Прикладна механіка.

Дисертаційна робота є завершеною оригінальною науковою працею і безумовно свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям дослідження актуальних новітніх проблем механіки суцільного

середовища і механіки (теорії) напружень і деформацій при зварюванні і післязварювальній обробці.

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

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, всі інформаційні матеріали і результати досліджень викладені в логічній послідовності, форма викладення доступна для спеціалістів за даною тематикою, використана термінологія відповідає загальноприйнятій в галузі механіки суцільного середовища і теорії зварювальних напружень і деформацій.

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 207 сторінок.

У *вступі* розкрита і обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, які необхідно виконати для досягнення мети роботи, приведені основні методи дослідження, представлені наукова новизна та практична цінність.

У *першому розділі* за результатами проведеного літературного огляду представлені основні методи визначення напружено-деформованого стану у зварних конструкціях. Зроблений аналіз негативних впливів залишкових напружень і деформацій на експлуатаційні характеристики зварних з'єднань і вузлів. Розглянуто існуючі методи регулювання напружено-деформованого стану у зварних з'єднаннях, в тому числі досить новий метод регулювання залишкових зварювальних напружень і деформацій за використанням електродинамічної обробки. Також надана аналітична інформація стосовно сучасних методів та засобів математичного моделювання напружено-деформованого стану конструкційних елементів під дією різноманітних навантажень, зокрема електродинамічної обробки та її динамічної складової як окремої частини впливу на напружений стан типового стикового зварного з'єднання. Доведена актуальність проблеми вивчення ефективності використання електродинамічної обробки для керування залишковими напруженнями у зварних з'єднаннях. На основі проведеного аналітичного огляду проблеми сформульовано мету та задачі дослідження.

У *другому розділі* представлені результати розробки математичної моделі визначення напружено-деформованого стану пластини з алюмінієвого сплаву за дії динамічної складової електродинамічної обробки на основі рівнянь механіки суцільного середовища та відповідних співвідношень пластичності Прандтля-

Рейсса у двовимірних та тривимірній постановках. Проведено оцінку точності розробленого методу визначення НДС в пластині в умовах її ударної взаємодії з електродом-ударником на швидкостях до 10м/с шляхом порівняння з експериментальними даними динамічної складової електродинамічної обробки ненапруженої модельної пластини з АМгб. Встановлено, що середнє відхилення експериментальних та математичних результатів не перевищує 15%. Окремо було розглянуто питання впливу розміру скінченного елемента та геометричних розмірів модельного зварного з'єднання на точність отриманих результатів у порівнянні з даними експерименту.

В *третьому розділі* дисертаційної роботи представлені результати чисельного дослідження впливу на напружено-деформований стан модельного зварного з'єднання таких параметрів технологічного процесу електродинамічної обробки як початкова швидкість електрода-ударника, його форма, використання мідної підкладки-посередника, початкових напружень розтягу та температури матеріалу з'єднання. За результатами проведених досліджень встановлено особливості формування по товщині з'єднання зони ефективних пластичних деформацій і відповідно розподілу значень повздовжньої і поперечної компонент напруженого стану зварного з'єднання; визначено, що більша ефективність ударної обробки (динамічна складова ЕДО) досягається у випадку використання електрода-ударника вісесиметричної (циліндричної) форми з округлою формою торцевої поверхні; визначений позитивний результат використання мідної підкладки-посередника на формування залишкових напружень у зварних з'єднаннях після електродинамічної обробки з точки зору зменшення як глибини вм'ятини в з'єднанні, так і величину опуклості лицьової поверхні з'єднання; встановлено закономірності, що описують за лінійним законом зміну значень тривалості контакту між тілами, глибини вм'ятини в з'єднанні та ефективних пластичних деформацій на лицьовій і тильній поверхнях з'єднання по лінії удару від величини початкових напружень розтягу; показано, що збільшення величини початкової температури матеріалу зварного з'єднання в процесі ударної взаємодії з електродом-ударником циліндричної форми дозволяє в зоні обробки ефективно регулювати залишкові зварювальні напруження шляхом їх перетворення в розподіл напружень стиску.

У *четвертому розділі* приведені результати експериментального дослідження ефективності застосування електродинамічної обробки стикових зварних з'єднань зі сплаву АМгб в умовах підвищених температур. Доведено, що застосування електродинамічної обробки металу шва, яка виконується в єдиному процесі синхронно із дуговим зварюванням, є більш ефективним у порівнянні із роздільною ЕДО після зварювання, що виражається в більш рівномірному розподілі значень параметрів залишкового напружено-

деформованого стану готового зварного з'єднання на тлі більшого (до 70...80%) зниження рівня залишкових зварювальних напружень розтягу в шві. Також визначено, що ЕДО зразків стикових з'єднань зі сплаву АМгб в процесі зварювання підвищує точність їх виготовлення, що характеризується зниженням рівня їх залишкового поздовжнього жолоблення у порівнянні із ЕДО після зварювання.

Представлені в кінці роботи загальні висновки повністю відповідають найбільш вагомим результатам, які отримані при виконанні досліджень, а також узгоджуються з формулюванням наукової новизни і практичної цінності дисертаційної роботи.

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 дисертації висвітлені у 9 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 6 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 3 статті у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до третього квартилю (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 7 наукових фахових конференціях.

В списку публікацій здобувача на тему дисертації є посилання на всі зазначені вище праці. В тексті дисертації робились відповідні посилання. У більшості публікацій особистим внеском автора зазначені проведення чисельних розрахунків та аналіз результатів. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

В першому розділі при обґрунтуванні актуальності теми є кілька недоліків в формі неточних формулювань, наприклад:

1. Твердження, що на сьогодні немає нормативних документів, які регламентують виконання розрахунків на міцність конструкцій з урахуванням залишкових напружень, не зовсім коректне, оскільки сучасні закордонні стандарти і українські діючі вимоги, наприклад, в атомній енергетиці вимагають врахування залишкових напружень при розрахунковому обґрунтуванні міцності конструкційних елементів, особливо, з виявленими дефектами несучільності матеріалу.

2. В переліку існуючих методів експериментального визначення залишкових напружень не вказаний метод нейтронної дифракції, який на протязі останніх двадцяти років вважається одним із самих ефективних методів неруйнівного контролю напруженого стану конструкційних елементів з отриманням розподілів компонент напружень по товщині.

3. Твердження, що при керуванні залишковим напруженим станом конструкцій доцільно щоби на ділянках з найбільшим навантаженням створити напруження стиску може бути вірним не завжди, а тільки в окремих випадках, наприклад, стосовно розвитку тріщиноподібних дефектів (опору крихкому руйнуванню). Основною метою методів керування залишковими напруженнями являється, в першу чергу, зниження загального рівня залишкових напружень.

При ознайомленні з розділом 2, в якому представлені результати розробки математичної моделі визначення напружено-деформованого стану пластини з алюмінієвого сплаву за дії динамічної складової електродинамічної обробки на основі рівнянь механіки суцільного середовища та відповідних співвідношень пластичності Прандтля-Рейсса виникли наступні питання:

4. Не вказані значення кінематичного деформаційного зміцнення, які були отримані з використанням моделі Каупера-Саймондса, яка масштабує границю текучості в залежності від швидкості деформації. Фактор зміцнення матеріалу є одним із важливих з точки зору забезпечення точності розробленої моделі при досить високих значеннях отриманих пластичних деформацій, і тому заслуговує більшої уваги при розробці моделі.

5. З тексту незрозуміло як отримані середні значення відносної похибки визначення параметрів НДС на основі 2D математичної моделі процесу – до 9,2%, а на основі відповідної 3D моделі – до 11%. За текстом дисертації похибка розробленої моделі визначалась двома шляхами: порівнянням значень розмірів вм'ятини (лунки) на поверхні пластини з результатами вимірювань за допомогою розмірної сітки у мікроскопі твердоміра, і значень напружень на поверхнях пластини з експериментальними даними, визначеними спекл-інтерферометричним методом. При визначенні середніх значень відносної похибки враховувались обидва метода? Треба відзначити, що точність експериментального вимірювання деформацій за допомогою мікроскопа повинна бути значно вище ніж точність визначення напружень методом спекл-інтерферометрії, оскільки це прямі вимірювання.

В розділі 3 роботи також є зауваження:

6. Незрозуміло, представлені результати за залишковими напруженнями після електродинамічної обробки при підвищених температурах отримані при наступному охолодженні до кімнатної температури чи в стані, коли матеріал зварного з'єднання ще знаходиться при підвищеній температурі?

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну 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, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для Механічної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в 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 в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

Офіційний опонент:

Зав. відділу
Математичних методів дослідження
фізико-хімічних процесів при зварюванні
і спецелектрометалургії
Інституту Електрозварювання
ім. Є.О.Патона НАН України,
д.т.н., с.н.с.



Олег МАХНЕНКО

Підпис оф. Опонента д.т.н., с.н.с. О.В.Махненка

Засвідчую

Учений секретар

Інституту Електрозварювання
ім. Є.О.Патона НАН України



Ілля КЛОЧКОВ

М.П.

«23» листопада 2023 року