

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
Царика Богдана Романовича  
на тему «**Залишкові напруження та деформації зварних з'єднань і  
конструкцій із алюмінієвих сплавів при зварюванні тертям з  
перемішуванням**»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
в галузі знань 13 – Механічна інженерія  
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

### **Актуальність теми дисертації.**

Завдяки низькій щільності, високій питомій міцності та корозійній стійкості легкі алюмінієві та магнієві сплави набувають все більшого поширення в різних галузях промисловості, включаючи аерокосмічну, автомобільну, залізничну, суднобудівну та інші. Для ефективного використання цих матеріалів необхідні надійні та високоякісні методи їхнього з'єднання.

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) є одним із найперспективніших методів для з'єднання легких сплавів, особливо тих, що важко зварюються традиційними методами. До переваг ЗТП у порівнянні з іншими процесами зварювання легких сплавів можна віднести високу якість з'єднання і низький рівень залишкових напружень та деформацій. ЗТП забезпечує формування міцних, щільних та однорідних зварних з'єднань з мінімальною кількістю дефектів. Процес відбувається в твердій фазі, що запобігає утворенню ливарних дефектів, характерних для зварювання плавленням. Також до переваг ЗТП можна віднести можливість з'єднання різнорідних матеріалів. ЗТП дозволяє ефективно з'єднувати різні марки алюмінію, а також алюміній з магнієм або міддю. Крім того, процес характеризується високою екологічністю і не потребує використання присадних матеріалів, захисних газів та не утворює шкідливих викидів.

При проектуванні технологічного процесу виготовлення конструкцій існує необхідність здійснення попередньої оцінки впливу застосованих технологій зварювання на геометричну точність, рівень залишкових напружень та деформацій отриманих виробів. Тому, математичне моделювання процесу зварювання тертям з перемішуванням легких сплавів є важливим напрямком досліджень та розробок.

Якість зварного з'єднання при ЗТП значною мірою залежить від вибору оптимальних параметрів процесу, таких як швидкість обертання інструменту, швидкість переміщення, осьове зусилля, геометрична форма інструменту тощо. Експериментальне визначення оптимальних параметрів є трудомістким та дорогим процесом. Математичне моделювання дозволяє отримати важливу інформацію про розподіл температури, напружень, деформацій та інших параметрів в зоні з'єднання. Це дає змогу краще зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються під час ЗТП, прогнозувати якість зварного з'єднання та оптимізувати параметри процесу без проведення великої кількості експериментів. Моделювання може допомогти у розробці нових інструментів для ЗТП та вдосконаленні існуючих технологій, сприяти ширшому

впровадженню ЗТП у промисловість для з'єднання легких сплавів. Сучасні обчислювальні потужності та програмне забезпечення дозволяють створювати дедалі точніші та складніші математичні моделі процесів зварювання, включаючи ЗТП. Таким чином, математичне моделювання процесу зварювання тертям з перемішуванням легких сплавів є надзвичайно актуальним напрямком.

Про актуальність представленої роботи свідчить також її зв'язок з науковими програмами, що виконувались в рамках наукової тематики ІЕЗ імені Є.О. Патона НАН України, зокрема: 1.6.2.34.5 (34/5) «Розробка нового покоління математичних моделей, розрахункових алгоритмів і комп'ютерних програм для експертного аналізу напружено-деформованого стану, міцності та роботоздатності великогабаритних зварних конструкцій об'єктів енергетики, авіакосмічної техніки та транспорту» (2019-2021 рр.); 1.6.34.37 (34/37) «Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану конструктивних елементів ракетно-космічної техніки у вигляді циліндричних оболонок складної геометрії та неоднорідної структури за статичних і динамічних навантажень» (2023-2024 рр.).

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше визначені основні фактори, що впливають на точність розрахункового визначення залишкових напружень і деформацій при ЗТП. Результатами розрахункових та експериментальних досліджень доведено, що внаслідок впливу термічного циклу зварювання спостерігається ефект знеміцнення матеріалу алюмінієвого сплаву 2219-T81, який суттєво впливає на розподіл залишкових напружень. Встановлено, що не врахування ефекту знеміцнення матеріалу призводить до суттєвого збільшення (більш ніж на 30%) розрахункових максимальних повздовжніх залишкових напружень;

- отримані за допомогою розробленої математичної моделі розрахункові результати при зварюванні пластин товщиною 8 мм зі сплаву АМг6 і 2219-T81 показали, що при ЗТП алюмінієвих сплавів утворюються досить високі залишкові напруження, які можуть сягати рівня значення межі текучості матеріалу у відпаленому стані, а залишкові деформації бути меншими ніж при традиційних дугових способах зварювання. Зокрема, встановлено, що поздовжня компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за величиною в 1,5-2 рази нижче і розподілена в більш вузькій області, ніж при дуговому зварюванні. Поперечна компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за величиною також в 2-3 рази менша у порівнянні з дуговим зварюванням.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене науково-технічне завдання виконане повністю, а здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Царика Б. Р. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 – Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Матеріалознавство».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені в ній результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у розвиток наукового напрямку з Матеріалознавства.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Царика Богдана 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 фахівців з даної тематики, використана термінологія відповідає загальноприйнятій в галузі Механічної інженерії, напрямках механіки суцільного середовища і теорії зварювальних напружень і деформацій.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури. Загальний обсяг дисертації 156 сторінок машинописного тексту. Робота містить 110 рисунків, 13 таблиць, список літератури із 50 найменувань.

**У вступі** розкрита і обґрунтована 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** роботи наведені результати проведеного аналітичного огляду сучасного стану проблеми математичного моделювання для визначення температурних полів при формуванні зварних з'єднань зварюванням тертям з перемішуванням. Представлений аналіз існуючих математичних моделей, визначені їх основні особливості та параметри необхідні для прогнозування напружено-деформованого стану. Проаналізовані методи та експериментальні данні вимірювання залишкових напружень і деформацій при ЗТП алюмінієвих сплавів.

**У другому розділі** представлена технологія зварювання тертям з перемішуванням дослідних зразків з термічно зміцненого алюмінієвого сплаву 2219-T81 авіаційного та космічного призначення, надані результати виконаних випробувань зразків для визначення механічних властивостей матеріалу та вимірювань значень величин залишкових напружень зварного з'єднання з алюмінієвого сплаву 2219-T81.

**У третьому розділі** наданий опис розробленої математичної моделі визначення зварювальних напружень і деформацій в з'єднаннях, виконаних зварюванням тертям перемішуванням, яка розроблена на основі загального методу термопластичності і методу скінчених елементів. Запропонована модель знеміцнення алюмінієвого сплаву 2219-T81 при зварювальному нагріві, що

суттєво впливає на точність визначення залишкових напружень і деформацій. Математичним моделюванням визначений рівень залишкових зварювальних напружень і пластичних деформацій з'єднань з алюмінієвого сплаву 2219-T81, які виконані ЗТП. Здійснені верифікація і валідація розробленої математичної моделі за результатами експериментального вимірювання залишкових напружень. Наведене порівняння результатів математичного моделювання залишкового напружено-деформованого стану з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг6 при ЗТП з дуговими процесами зварювання.

**У четвертому розділі** розроблена методологія моделювання зварювальних залишкових напружень і деформацій великогабаритних циліндричних ємностей за методом функції усадки. Досліджена можливість отримання параметрів функції усадки (пластичних деформацій) та розподілів залишкових напружень для кільцевих і повздовжніх стикових зварних з'єднань великогабаритної циліндричної оболонки на спрощених моделях обмеженого розміру методами термопластичності. Виконані верифікація та валідація математичної моделі визначення величин зварювальних деформацій для великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвого сплаву. Наведені результати математичного моделювання загальних деформацій великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвого сплаву при використанні ЗТП і дугового зварювання, здійснено їх порівняння.

Представлені в роботі 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 4 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 3 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 1 стаття у виданні, віднесеному до четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Також результати дисертації були апробовані на 4 наукових фахових конференціях.

В списку публікацій здобувача на тему дисертації є посилання на всі зазначені вище праці. При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В тексті дисертації зроблені відповідні посилання. У більшості публікацій особистим внеском автора зазначені проведення чисельних розрахунків та аналіз результатів. Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повною мірою висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

#### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.**

1. Робота має деякі неточності в застосуванні термінів та помилки, наприклад, на стор. 11 «...зварювання з тертям з перемішуванням...»; на стор. 12 в умовних позначеннях одночасно використовуються «...умовна межа текучості...», «...межа плинності матеріалу...» та «...істинна умовна границя текучості...»; на стор. 13 «...податливість об'ємного стиснення...»; на стор. 33, рис. 1.14 в підписі під рисунком «...повздовжнє січення площиною ABCD): 1-стальний вал приводу...»; на стор. 55 «...стискувальні залишкові напруження...»; на стор. 74 «...на одновісне розтягнення...»; на стор. 79 «...мірятьних баз...»; на стор. 113 «...доданки...» та ін., хоча в цілому написана грамотно, логічно та зрозуміло.

2. На стор. 12, в умовних позначеннях, автор використовує позначку  $T_{liq}$  і вказує, що це температура плавлення, але плавлення сплавів складної системи легування відбувається в інтервалі температур від температури солідус (початку плавлення) до температури ліквідус (повного розплавлення).

3. В роботі автор використовує поняття «зварюваність». Більш коректно застосовувати поняття «технологічна здатність до зварювання».

4. На стор. 68 в табл. 2.2 – «Хімічний склад алюмінієвого сплаву 2219» не вказані одиниці виміру вмісту легуючих елементів.

5. Бажано пояснити, що має на увазі автор використовуючи на стор. 76 вислів «...що призвело до збільшення розмірів інтерметалідних осадів...».

6. На стор. 84 автор стверджує, що «Для ефективного моделювання даного процесу можуть використовуватися різні підходи в залежності від мети дослідження. Це може бути прогнозування якості формування зварного з'єднання...». Бажано пояснити, які характеристики якості або властивості має на увазі автор та що таке ефективне моделювання? Також бажано пояснити, що має на увазі автор стверджуючи, що «Основною особливістю моделювання процесу ЗТП є доволі жорстке закріплення...».

7. Бажано пояснити, чому при створенні розрахункової моделі автор нехтує відведенням тепла в оснащення для закріплення елементів з'єднання (опорна пластина і притискачі) і враховує лише відведення тепла за рахунок конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем (стор. 86). Чи була виконана попередня оцінка впливу такого підходу на результати розрахунків?

8. З роботи не зрозуміло який тип та розміри скінчених елементів використовує автор, як це впливає на величину отриманих розрахункових значень компонент напружень, деформацій та переміщень.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Царика Богдана Романовича на тему «Залишкові напруження та деформації зварних з'єднань і конструкцій із алюмінієвих сплавів при зварюванні тертям з перемішуванням» 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 галузі знань 13 Механічна інженерія. 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 Царик Богдан Романович повною мірою заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

**Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри зварювального виробництва  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»



Віктор КВАСНИЦЬКИЙ

Підпис офіційного опонента завідувача кафедри зварювального виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктора технічних наук, професора Квасницького Віктора Вячеславовича засвідчую

факі веіо



Квасницького