

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

Рибалка Івана Миколайовича

на дисертаційну роботу Ді Цзян

«Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

### **Актуальність теми**

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою глибшого наукового розуміння закономірностей формування мікроструктури та властивостей сплавів на основі алюмінію під час процесу зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП).

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу на фазові перетворення, морфологію зони з'єднання та механічні характеристики дозволяє науково обґрунтувати вибір оптимальних режимів зварювання, що забезпечують високу якість і надійність з'єднань.

Отримані результати мають вагомe значення для розвитку матеріалознавства, оскільки поєднують аналіз структури, властивостей і технологічних чинників, які визначають довговічність, експлуатаційну надійність і ефективність зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі**

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі є високим. Це підтверджується узгодженістю між метою, завданнями, методами та отриманими результатами дослідження, а також послідовним використанням сучасних експериментальних, теоретичних і аналітичних підходів.

Достовірність висновків підтверджується результатами багатофакторного експерименту, математичного моделювання процесу ТЗТЗП і металографічного аналізу з'єднань, що демонструють взаємну узгодженість та співпадіння отриманих

даних.

Рекомендації, сформульовані в роботі, мають практичну цінність і базуються на експериментально встановлених закономірностях впливу технологічних параметрів на структуру та властивості зварних з'єднань. Їх реалізація у виробничих і навчальних умовах підтверджує ефективність та прикладний характер результатів дослідження.

### **Достовірність результатів досліджень**

Достовірність результатів досліджень підтверджується коректністю постановки експериментів, адекватністю застосованих методів аналізу та відтворюваністю отриманих даних. У роботі використано сучасні методики фізико-механічних випробувань, металографічного та фазового аналізу, а також математичне моделювання процесу тертя з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП), що забезпечило комплексне вивчення явищ, що досліджувалися.

### **До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів процесу тертя з перемішуванням (ТЗТЗП) на формування мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей з'єднань алюмінієвих сплавів.

Вперше:

1. Системно досліджено з удосконаленням п'ять типів перемішуючих інструментів діаметром 6-10 мм та встановлено оптимальні технологічні параметри для бездефектного зварювання алюмінієвого сплаву 6061-Т6 товщиною 3 мм.
2. Встановлено закономірності формування характерного "U"-подібного профілю поперечного перерізу зварного шва з розмірами, що дещо перевищують розміри інструменту, та виявлено три основні зони: зону впливу стрижня, зону впливу гільзи та зону термомеханічного впливу.
3. Визначено критичну роль "зони зчеплення при фрикційному зварюванні з перемішуванням" у забезпеченні експлуатаційних характеристик зварного шва та встановлено кореляцію між розміром зерна та положенням зони.

4. Встановлено пряму залежність між діаметром інструменту та рівнем сили розтягуючого зсуву: 9,27; 13,74; 14,79; 16,83 та 18,16 кН для діаметрів 6-10 мм відповідно, що підтверджує діаметр інструменту, як ключовий фактор міцності з'єднання.

5. Розроблено математичну модель на базі Deform V11.0, що адекватно описує процес RFSSW зварювання тертя з перемішуванням (ТЗТЗП) та дозволяє прогнозувати температурні поля, напруження та характер течії металу в зоні зварювання.

6. Встановлено два механізми формування з'єднань залежно від діаметра інструменту: "тертя зсуву-обертання на місці" для малих діаметрів та "двосторонній зсув-центральний осьовий потік" для великих діаметрів.

### **Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання**

Значимість отриманих результатів для науки і практичного застосування полягає у тому, що проведене дослідження дало змогу розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням для промислового з'єднання алюмінієвих плит, що забезпечує підвищення якості, міцності та довговічності зварних конструкцій.

У роботі встановлено критерії вибору діаметра інструмента залежно від вимог до міцності з'єднання: інструменти малого діаметра сприяють руйнуванню по межі розділу, тоді як збільшення діаметра може призводити до часткового руйнування зони перемішування.

Крім того, розроблено методологію прогнозування механічних властивостей з'єднань на основі математичного моделювання процесу, що дозволяє оптимізувати режими зварювання без проведення великої кількості експериментів, зменшуючи витрати часу та ресурсів.

Практична цінність роботи підтверджується впровадженням її результатів у навчальний процес НТУ «ХП» при викладанні дисциплін (освітніх компонентів): «Кольорові метали і сплави», «Технології та обладнання для модифікування поверхні, об'ємної обробки, комп'ютерного інженерного дизайну металів»,

«Матеріалознавство нерознімних з'єднань та їх діагностика», «Основи міцності матеріалів» та потенційною можливістю використання отриманих рекомендацій у промисловості для виготовлення відповідальних зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів, що відповідає сучасним вимогам надійності та безпеки.

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях**

Результати дисертаційних досліджень висвітлено у 12 наукових публікаціях, серед яких 6 статей у фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, а також 6 тез доповідей, опублікованих у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Ді Цзян складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, двох додатків.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та визначено основні завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет роботи. Наведено перелік методів, використаних у процесі дослідження. Підкреслено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача, подано відомості щодо апробації результатів дослідження та публікацій, у яких висвітлено основні положення дисертаційної роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячений аналізу джерел інформації щодо впливу технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію. Показано, що сучасні дослідження і випробування спрямовані на удосконалення процесу зварювання шляхом розробки

нових механізмів взаємодії матеріалів у зоні з'єднання. На основі аналізу літературних джерел сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі наведений перелік вихідних матеріалів, експериментального обладнання і викладено опис методів дослідження.

У третьому розділі наведено і проаналізовано теоретичну модель тепловиділення в зоні точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП) і металографічну структуру при різних параметрах процесу. Показано, що у зоні точкового зварювання швидкість введення інструмента є основним фактором, що впливає на тепловиділення, за нею йде швидкість обертання, а потім діаметр інструменту. Також показано, що при різних параметрах процесу і діаметрах інструменту морфологія поверхні в області ТЗТЗП значно змінюється, в основному, внаслідок теплового впливу і тангенціальної швидкості металу, які взаємно обмежені.

У четвертому розділі проведено дослідження характеристик з'єднань, отриманих методом повторного тертявого точкового зварювання з перемішуванням, з акцентом на зсувну міцність, мікротвердість і втому при навантаженні. Показано, що діаметр перемішувального інструмента впливає на максимальну зсувну міцність у зоні точкового зварювання. У зоні ТЗТЗП з'єднання, які утворені інструментами меншого діаметра, схильні до руйнування по поверхні з'єднання або до виривання виступу, тоді як при більшому діаметрі інструмента зазвичай спостерігається часткове руйнування виступу. Зона ТЗТЗП зазнає рекристалізаційного відпалу, внаслідок чого її мікротвердість нижча за твердість основного матеріалу. Найвища твердість на поверхні спостерігається в зоні активного зрушення, найнижча - в зоні термічного впливу. Кількість циклів до втомного руйнування у зонах ТЗТЗП зростає зі збільшенням діаметра інструмента.

У п'ятому розділі на основі експериментальних даних, отриманих у попередніх розділах, було виконано математичний аналіз ТЗТЗП за допомогою програмного забезпечення Deform, вибрано репрезентативні параметри процесу як основні об'єкти дослідження, і в результаті отримано температурне поле та внутрішнє переміщення металу в зоні точкового зварювання. Побудовано, у програмі Deform V11.0, математичну модель рефілінгового точкового зварювання

методом тертя з перемішуванням (ТЗТЗП) з використанням різних змішувальних інструментів. Отримано важливу інформацію про напружене поле, температурне поле, поле швидкостей, відстеження частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Симуляції при математичному моделюванні показали, що збільшення діаметра змішувального інструмента суттєво впливає на температурне поле в зоні точкового зварювання. Результати моделювання показали, що для інструментів з меншим діаметром просторові гвинтоподібні траєкторії є більш вираженими та слабшають зі збільшенням відстані від центру зварного шва.

У шостому розділі за допомогою методу миттєвої зупинки були отримані макро- та мікроструктури ТЗТЗП на різних стадіях, а також визначено текучість металу в зоні точкового зварювання шляхом поєднання результатів аналізу полів напружень та температур, отриманих методом математичного моделювання. В результаті було встановлено механізм формування зони ТЗТЗП для різних діаметрів змішувальних інструментів. Течія металу в зоні точкового зварювання в основному має характер вертикального спірального руху. Проведено комплексні експериментальні роботи з ТЗТЗП товстих пластин із алюмінієвого сплаву 6061-Т6 (товщина 3 мм). Основна увага зосереджена на змішувальному інструменті, зокрема досліджено вплив п'яти різних діаметрів стрижня на формування зони точкового зварювання. Дослідження виконано для різних швидкостей обертання та зварювання, з аналізом макро- і мікроструктури, мікротвердості, міцності на розтяг і зсув, втомних властивостей, а також динамічних змін напружень і деформацій. Крім того, побудовано математичну модель у програмі Deform V11.0, що дало змогу отримати дані про поля напружень, температури, швидкості, траєкторії частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Отримані результати дозволили пояснити механізм формування ТЗТЗП. Наведено основні результати дисертаційної роботи при розв'язанні поставлених завдань.

У висновках представлено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових завдань дослідження.

Список використаних джерел, із 106 найменувань, є достатньо повним і охоплює зарубіжні наукові публікації.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває

наукові результати та практичну цінність роботи.

### **Академічна доброчесність**

Порушень принципів академічної доброчесності в дисертаційній роботі та у наукових публікаціях, де представлено її основні результати, не встановлено.

Усі положення, винесені на захист, отримані автором самостійно та відображені в опублікованих наукових працях. У публікаціях, виконаних у співавторстві, використано лише ті ідеї, висновки та розрахунки, що є результатом особистих наукових досліджень здобувача.

### **По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:**

Попри загалом високу оцінку дисертаційної роботи, варто зауважити, що деякі положення та результати потребують додаткового уточнення й розширеного теоретичного обґрунтування. Окремі аспекти дослідження можуть бути розвинуті у подальших наукових пошуках та дискусіях.

Водночас висловлені зауваження не знижують наукової та практичної значущості отриманих результатів. Їх урахування в подальших дослідженнях дозволить поглибити розуміння проблематики, що досліджується та підвищити рівень наукової аргументації роботи.

1. Не до кінця розкрито вплив геометрії інструмента на формування зони зварювання. У роботі наведено результати для п'яти діаметрів інструмента, проте не розглянуто вплив профілю лопатей, кута нахилу, форми інструмента та геометрії гільзи на характер течії металу. Таке дослідження дало б змогу більш повно пояснити механізми перемішування й утворення дефектів.

2. Відсутній аналіз впливу попереднього термічного стану матеріалу. Алюмінієвий сплав 6061-T6 використано у вихідному загартованому стані, але не розглянуто, як відпал або попереднє старіння впливають на процес формування шва, рекристалізацію та міцність з'єднання.

3. Потребує уточнення методика вимірювання температурного поля. Хоча температури моделювалися в програмі Deform, у роботі відсутній опис експериментальної калібровки термопар або способу визначення контрольних

точок. Це дещо знижує достовірність порівняння розрахункових та експериментальних даних.

4. Недостатньо повно висвітлено вплив багатократних термічних циклів. У реальних умовах промислового зварювання можливі повторні нагріви або багатоточкове з'єднання. Доцільно було б оцінити, як такі цикли впливають на стабільність структури й властивостей зварного шва.

5. Не розглянуто вплив умов закріплення та жорсткості системи. Відомо, що тепло- і силовий баланс процесу значною мірою залежить від способу фіксації заготовок. Робота не містить аналізу, чи враховано цей чинник при моделюванні і як він впливає на симетрію теплового поля та якість з'єднання.

6. Потребує розширення порівняльна характеристика з іншими методами зварювання. Для посилення практичної цінності дослідження варто було б навести зіставлення показників міцності, твердості та структури зварних з'єднань, отриманих за допомогою ТЗТЗП, із традиційними методами — MIG, TIG або лазерним зварюванням.

7. Відсутній аналіз впливу масштабного ефекту на моделювання. У програмному моделюванні не вказано, чи враховано масштабування тертя, зусиль та тепловиділення при переході від лабораторних зразків до промислових деталей, що може впливати на точність прогнозів.

8. Не подано аналіз похибок вимірювань механічних властивостей. Було б доцільно додати статистичну обробку результатів випробувань (дисперсію, стандартне відхилення, довірчі інтервали), щоб підтвердити достовірність отриманих залежностей між параметрами процесу і властивостями з'єднання.

9. Бракує оцінки впливу структури на експлуатаційну поведінку. Хоча робота містить мікроструктурний аналіз, не простежено зв'язок між мікроструктурними змінами (розміром зерна, фазовим складом) та довговічністю або втомною міцністю з'єднання у реальних умовах роботи конструкцій.

10. Не подано практичних рекомендацій щодо контролю якості зварних з'єднань. Для повноти прикладного аспекту дослідження доцільно було б запропонувати методику неруйнівного контролю або діагностики дефектів у зоні ТЗТЗП, що особливо важливо при промисловому застосуванні.

## Висновок

Дисертаційна робота Ді Цзян «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію» за своїм змістом відповідає спеціальності 132 – Матеріалознавство. Дисертаційне дослідження є завершеною самостійною науковою роботою, присвяченою розв'язанню важливої прикладної проблеми матеріалознавства, а саме, виявленню закономірностей впливу технологічних параметрів (швидкості обертання, швидкості зварювання, діаметра інструмента) на структуру та властивості зварних з'єднань, утворених методом точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням алюмінієвих сплавів.

Результати дослідження мають практичне значення для підвищення якості, міцності та надійності зварних конструкцій, а також сприяють удосконаленню технології їх виготовлення. Подана дисертаційна робота «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію» Ді Цзян відповідає спеціальності 132 – «Матеріалознавство», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 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 КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Ді Цзян заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

Доцент кафедри сервісної інженерії та  
технології матеріалів в машинобудуванні  
імені О.І. Сідашенка

Державного біотехнологічного університету,

доктор технічних наук, доцент



Іван РИБАЛКО

22.10.2025р.

Підпис *Івана Рибалки*  
**ЗАСВІДЧУЄ**  
Керівник відділу діловодства  
*Олена Мейчик*