

РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Ребрової Олени Михайлівни

на дисертаційну роботу Ді Цзян

«Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію»

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

У результаті аналізу дисертаційної роботи Ді Цзян за темою «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію», поданої до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», можна сформулювати узагальнений висновок щодо її актуальності, наукової обґрунтованості положень, висновків і рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, новизни, а також теоретичної і прикладної цінності, що дозволяє дати комплексну оцінку представленій роботі.

1. Актуальність теми

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю поглибленого розуміння закономірностей формування мікроструктури та властивостей алюмінієвих сплавів під час зварювання тертям з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП). Вивчення впливу технологічних параметрів процесу на фазові перетворення, морфологію зони з'єднання і механічні характеристики дає змогу рівні обґрунтувати вибір оптимальних режимів оброблення. Отримані результати є вагомими для матеріалознавства, оскільки поєднують дослідження структури, властивостей і технологічних факторів, що визначають довговічність та надійність зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Дослідження спрямоване на підвищення ефективності процесів зварювання тертям для матеріалів на основі алюмінію шляхом оптимізації технологічних параметрів, що визначають структуру та механічні властивості з'єднань. Отримані результати мають важливе наукове й практичне значення, оскільки сприяють розробленню енергоощадних технологій отримання високоякісних нероз'ємних з'єднань для авіаційної, транспортної та машинобудівної галузей.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені у навчальний процес кафедри матеріалознавства: вони використані при розробленні освітньо-професійних та освітньо-наукових програм, а також під час викладання дисциплін спеціальної підготовки, зокрема: «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».

3. Наукова новизна одержаних результатів

Відомості про наукову новизну посідають важливе місце у структурі дисертаційної роботи, оскільки вони відображають основні положення, що становлять особистий внесок здобувача у розвиток сучасного наукового напрямку матеріалознавства та технології зварювання. Представлені положення новизни демонструють глибину аналітичного підходу, експериментальну обґрунтованість отриманих результатів та орієнтацію на вирішення актуальних теоретичних і прикладних завдань у галузі створення високоякісних з'єднань матеріалів на основі алюмінію.

У дисертаційній роботі узагальнено, поглиблено та розвинуто результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо впливу технологічних параметрів процесу тертя з перемішуванням (ТЗТЗП-П), зокрема глибини занурення інструмента, швидкості його обертання та часу

витримки, на формування мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей з'єднань на алюмінієвих листах. При цьому 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-T6 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 заклепуванні 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. Визначені температурні поля, напруження та характер течії металу в зоні зварювання на основі розробленої математичної моделі процесу точкового зварювання тертям з перемішуванням на базі Deform V11.0.

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

4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання

Практична цінність одержаних результатів полягає у розробленні технологічних рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням для промислового застосування при з'єднанні алюмінієвих плит, що забезпечує підвищення

якості та надійності зварних з'єднань. Встановлено критерії вибору діаметра інструмента залежно від вимог до міцності з'єднання: використання менших діаметрів спричиняє руйнування по межі розділу, тоді як збільшення діаметра призводить до часткового руйнування зони перемішування. Створено методологію прогнозування механічних властивостей з'єднань на основі математичного моделювання процесу, що дозволяє оптимізувати режими зварювання без проведення великої кількості експериментів. Отримані результати впроваджено в навчальний процес НТУ «ХП» та рекомендовано для використання в автомобільній, залізничній і аерокосмічній промисловості при виготовленні відповідальних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.

За результатами проведених досліджень опубліковано 12 наукових праць, серед яких - 6 статей у фахових наукових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, а також 6 тез доповідей, представлених у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій.

Обсяг та рівень публікацій свідчать про високий рівень апробації основних наукових положень дисертаційної роботи, підтверджують її відповідність сучасним вимогам до наукових досліджень та достовірність отриманих результатів.

Представлені матеріали демонструють самостійний, завершений характер дисертаційного дослідження, результати якого мають прикладне значення для вдосконалення технологій підвищення зносостійкості поверхневого шару сталей та можуть бути використані у машинобудівній, транспортній і енергетичній галузях.

6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Об'єкт дослідження: процес утворення зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-Т6, отриманих методом точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням.

Предмет дослідження: закономірності впливу технологічних параметрів (діаметра перемішувального інструменту, швидкості обертання та швидкості зварювання) на мікроструктуру, механічні властивості та механізми формування з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-Т6.

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 дисертації 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 методик 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 третьового 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, яке утворене 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, 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, швидкостей, траєкторії частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Отримані результати дозволили пояснити механізм формування ТЗТЗП.

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

Список використаних джерел охоплює широкий спектр наукових і технічних аспектів дослідження, що свідчить про глибоке опрацювання автором значного обсягу спеціалізованої літератури, що забезпечило всебічне висвітлення теоретичних основ, експериментальних підходів і практичних напрямів розвитку технологій зварювання тертям.

У додатках подано матеріали, які підтверджують впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», а також

перелік наукових праць автора, опублікованих за темою дисертації, що відображають основні положення, висновки та практичні результати виконаної роботи.

7. Достовірність отриманих результатів та висновків

Обґрунтованість отриманих у дисертаційній роботі результатів забезпечується чітким формулюванням мети дослідження, логічною послідовністю у вирішенні поставлених наукових завдань та застосуванням сучасних методологічних підходів відповідно об'єкту й предмету дослідження.

Достовірність і наукова обґрунтованість висунутих положень підтверджуються комплексним використанням експериментальних, аналітичних і розрахункових методів, що забезпечили повне та всебічне вивчення впливу технологічних параметрів процесу зварювання тертям на структуру й механічні властивості з'єднань. Застосовані методи відповідають сучасним вимогам до наукових досліджень у галузі матеріалознавства та гарантують достовірність отриманих результатів і зроблених висновків.

8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях

Дисертаційна робота виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності, що відповідає вимогам чинного законодавства України та етичним нормам наукової спільноти. Отримані результати свідчать про оригінальність проведеного дослідження та особистий внесок автора у розвиток наукового напрямку, пов'язаного з удосконаленням технологій зварювання тертям. У тексті роботи послідовно викладено власні наукові ідеї, підходи й висновки здобувача, не виявлено фактів некоректного запозичення матеріалів чи результатів інших дослідників без належних бібліографічних посилань.

Основні положення та результати дисертації опубліковано у 6 наукових статтях, розміщених у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, а також представлено й апробовано на міжнародних наукових конференціях, де дисертант публічно обговорював отримані результати, що підтверджує їх наукову значущість і практичну цінність.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Попри високий рівень виконання дисертаційного дослідження, його наукову новизну, обґрунтованість висновків і практичну значущість, у роботі наявні окремі зауваження, які можуть бути враховані автором у подальшій науковій діяльності:

1. Недостатньо обґрунтовано вибір діапазону параметрів процесу.

У роботі наведено оптимальні режими точкового зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП), однак не до кінця розкрито підхід до визначення меж варіювання швидкості обертання, швидкості занурення та часу витримки. Доцільно було б детальніше пояснити критерії їх початкового вибору на основі попередніх досліджень або аналітичних оцінок тепловиділення.

2. Не повною мірою представлено кількісну оцінку впливу окремих параметрів на тепловклад. Хоча робота якісно встановлює взаємозв'язок між швидкістю занурення, обертання та діаметром інструмента, бракує узагальненої математичної моделі або графічних залежностей, що кількісно демонстрували б внесок кожного фактору в загальний тепловий баланс зони зварювання.

3. Потребує уточнення механізм формування дефектів поверхні. У висновках визначено, що інструменти малого діаметра сприяють появі точкових дефектів, а великого — поверхневих, проте не наведено мікроструктурного або термодинамічного пояснення їхнього походження. Було б доцільно додати, наприклад, моделювання локального розподілу температури.

4. В роботі по тексту наявні певні недосконалості у трактуваннях, які, вірогідно, виникли в процесі перекладу.

10. Висновки

Дисертаційна робота Ді Цзян є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дисертаційного дослідження відповідає галузі знань 13 – «Механічна інженерія» та спеціальності 132 – «Матеріалознавство».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Ді Цзян «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Ді Цзян, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Рецензент,

доцент кафедри «Матеріалознавство»
Національного Технічного Університету
«Харківський Політехнічний Інститут»,
кандидат технічних наук, доцент



Олена РЕБРОВА

