РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к. ф.-м. н., доцента Терлецького Олександра Семеновича
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

Аналіз дисертаційної роботи Ді Цзян на тему «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена потребою глибшого наукового розуміння закономірностей формування мікроструктури та властивостей алюмінієвих сплавів 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 підвищення міцності, пластичності й експлуатаційної надійності з'єднань.

Отримані результати мають суттєве значення для розвитку сучасного матеріалознавства, оскільки поєднують структурно-фазовий аналіз, оцінку властивостей і вплив технологічних факторів, які визначають довговічність, працездатність і якість зварних конструкцій із сплавів на основі алюмінію.. Таким чином, робота вирішує важливе науково-практичне завдання -

удосконалення технології зварювання легких сплавів на основі алюмінію відповідно до потреб авіаційної, транспортної та машинобудівної галузей.

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

Дисертаційна робота виконана згідно з вимогами Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Отримані в результаті дослідження наукові положення, експериментальні дані та практичні рекомендації впроваджено у навчальний процес кафедри, зокрема, в освітньо-професійні та освітньо-наукові програми підготовки фахівців у галузі матеріалознавства та інженерії. Результати дисертаційної роботи використовуються при викладанні таких навчальних дисциплін (освітніх компонентів), як: «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

Наукова новизна роботи полягає у встановленні нових закономірностей впливу технологічних параметрів процесу тертя з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП-П) на формування мікроструктури, фазового складу та механічних властивостей з'єднань алюмінієвих сплавів. У дослідженні поглиблено теоретичні уявлення та експериментально обґрунтовано роль основних параметрів процесу: глибини занурення інструмента, швидкості його обертання та часу витримки у забезпеченні оптимальної структури та високих експлуатаційних характеристик з'єднань. Отримані результати відображають особистий внесок автора у розвиток матеріалознавства та технологій зварювання легких 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 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. Розроблено математичну модель на базі Deform V11.0, що адекватно описує процес RFSSW (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.

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

Практична значущість отриманих результатів полягає у розробленні науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням для промислового з'єднання алюмінієвих плит, що забезпечує підвищення якості, міцності та надійності зварних конструкцій.

Визначено критерії вибору діаметра інструмента відповідно до вимог до міцності з'єднання: інструменти малого діаметра спричиняють руйнування по

межі розділу, тоді як збільшення діаметра може призводити до часткового руйнування зони перемішування.

Розроблено методологію прогнозування механічних властивостей з'єднань на основі математичного моделювання процесу, що дає змогу оптимізувати режими зварювання без потреби у значній кількості експериментів.

Отримані результати впроваджено у навчальний процес НТУ «ХПІ» та рекомендовано для використання в автомобільній, залізничній і аерокосмічній галузях під час виготовлення відповідальних зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

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

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

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

Робота Ді Цзян є завершеним науковим дослідженням, що містить анотацію українською та англійською мовами, вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел і два додатки.

Дисертація присвячена встановленню закономірностей впливу технологічних параметрів процесу: швидкості обертання, швидкості зварювання та діаметра інструмента на якість зварних з'єднань, отриманих методом точкового зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів. Метою дослідження є оптимізація параметрів процесу для забезпечення високих механічних характеристик і надійності з'єднань у виробах з алюмінієвих сплавів.

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 тертьового 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, швидкостей, 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.

Представлений список використаних джерел літератури свідчить про ґрунтовну аналітичну роботу автора з великою кількістю наукової та технічної літератури, включно з іноземними джерелами. Це забезпечило комплексне висвітлення сучасного стану проблеми та наукове обґрунтування поставлених завдань.

Додатки містять матеріали, які підтверджують впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес, а також перелік наукових праць автора, опублікованих за темою дисертації, що відображають основні наукові положення, висновки та практичні результати роботи.

7.Достовірність отриманих результатів та висновків

Достовірність і наукова обґрунтованість отриманих результатів підтверджується логічною узгодженістю мети, завдань, методів і висновків дослідження, а також використанням сучасних експериментальних, розрахункових і аналітичних підходів.

Застосований комплексний методологічний підхід забезпечив всебічне вивчення процесів, що відбуваються під час точкового зварювання тертям з перемішуванням, та дозволив отримати відтворювані результати, які підтверджують коректність наукових положень і висновків дисертації.

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 підтверджує високий рівень наукової етики та достовірність отриманих результатів. Отримані дані свідчать про наукову новизну й оригінальність дослідження, а у тексті роботи послідовно викладено авторські міркування, власні наукові підходи та узагальнення. Під час перевірки не виявлено випадків некоректного запозичення чи використання чужих матеріалів без належного посилання.

Основні результати дисертаційного дослідження відображені у шести наукових статтях, опублікованих у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science. Крім того, апробація основних положень і висновків роботи проведена на міжнародних наукових конференціях, де автор активно представляв і обговорював результати власних досліджень із фахівцями галузі.

9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Незважаючи на загалом високу оцінку дисертаційної роботи, варто зазначити, що окремі положення та результати потребують подальшого уточнення й глибшого наукового обґрунтування. Деякі аспекти проведеного

дослідження можуть стати основою для подальших наукових обговорень і розвитку тематики.

Вказані зауваження не зменшують наукової значущості та практичної цінності отриманих результатів, а їх урахування в майбутніх дослідженнях сприятиме більш ґрунтовному розкриттю поставленої проблеми та підвищенню рівня наукової аргументації роботи.

1. Слід уточнити достовірність і точність математичного моделювання. Зазначено, що точність моделі становить близько 85 %, однак не подано детального аналізу похибок вимірювань і порівняння розрахункових даних із експериментом. Доцільно було б навести кореляційні графіки або таблиці для підтвердження збіжності результатів.

2. Обмежена дискусія щодо масштабування результатів. Оскільки дослідження виконано для зразків товщиною 3 мм, варто було б обговорити можливість застосування отриманих закономірностей для зварювання товстіших або тонших плит, а також вплив геометрії інструмента при зміні масштабу з'єднання.

3. Не подано оцінки енергоефективності процесу. Для промислового впровадження доцільно було б порівняти енерговитрати ТЗТЗП із традиційними методами зварювання алюмінієвих сплавів, що підвищило б прикладну цінність роботи.

4. Бракує аналізу довготривалої експлуатаційної поведінки. Хоча досліджено втомну міцність, доцільним було б доповнення даними про корозійну стійкість або стабільність мікроструктури після тривалого термоциклювання.

10. Висновки

Дисертаційна робота Ді Цзян є завершеним дослідженням, яке містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дисертаційної роботи 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 – кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри « Матеріалознавство»
Національного Технічного Університету
«Харківський Політехнічний Інститут» Олександр ТЕРЛЕЦЬКИЙ

Підпис Олександр Терлецький
ЗАСВІДЧУЮ:
ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"
"29" 10 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ * Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут" * код 02071180 *