

ВІДГУК

офіційного опонента

Гапонової Оксани Петрівни

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 дисертаційної роботи пов'язана з потребою вдосконалення наукових уявлень про процеси формування мікроструктури та властивостей алюмінієвих сплавів при зварюванні тертям з перемішуванням (ТЗТЗП) – технології, що набуває все більшого значення у виробництві високонадійних конструкцій з легких металів. Тож вивчення впливу основних технологічних параметрів зварювання, будову зони з'єднання, перетворення в ній та механічні характеристики дає можливість обґрунтувати оптимальні режими процесу, які забезпечують стійкість, міцність і довговічність зварних з'єднань.

Отримані результати мають наукову й прикладну значущість, оскільки поєднують аналіз мікроструктури, механічних властивостей і технологічних чинників, що визначають ефективність та надійність експлуатації конструкцій з алюмінієвих сплавів у промислових умовах.

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 чіткою логічною узгодженістю між метою, завданнями, методами та отриманими результатами дослідження, а також послідовним використанням сучасних експериментальних, аналітичних і теоретичних методів.

Достовірність результатів забезпечується проведенням багатofакторних експериментів, застосуванням математичного моделювання процесу ТЗТЗП та комплексним металографічним аналізом зварних з'єднань, що підтвердило високу узгодженість отриманих даних і висновків.

Практична цінність розроблених рекомендацій полягає в тому, що вони ґрунтуються на експериментально встановлених закономірностях впливу технологічних параметрів на структуру й властивості зварних з'єднань. Їх успішне впровадження у виробничих процесах і навчальну діяльність підтверджує ефективність, надійність і прикладну значущість результатів дослідження.

Достовірність результатів досліджень

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректною постановкою експериментів, обґрунтованістю обраних методів аналізу та високою відтворюваністю отриманих даних.

У дослідженні застосовано сучасні методи фізико-механічних випробувань, металографічного та фазового аналізу, а також математичне моделювання процесу тертя з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП). Такий комплексний підхід дозволив всебічно дослідити закономірності формування структури й властивостей зварних з'єднань та забезпечив високу наукову достовірність отриманих результатів.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

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

Отримані результати поглиблюють наукові уявлення про механізми структуроутворення під час зварювання тертям з перемішуванням і створюють підґрунтя для оптимізації технологічних режимів формування високоякісних з'єднань.

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 (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-центральный осьовий потік» - для великих діаметрів.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Значення отриманих результатів для науки та практики полягає в тому, що виконане дослідження дало змогу науково обґрунтувати вибір параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням, які забезпечують формування якісних і міцних з'єднань алюмінієвих сплавів. Проведений аналіз дозволив визначити закономірності впливу технологічних режимів на структуру та властивості зварних з'єднань, що має важливе значення для подальшого вдосконалення технології зварювання легких сплавів.

У роботі встановлено критерії вибору діаметра інструмента залежно від вимог до міцності з'єднання: інструменти з меншим діаметром схильні до утворення руйнування по межі розділу, тоді як більший діаметр може спричиняти локальне пошкодження зони перемішування.

Розроблено науковий підхід до прогнозування механічних властивостей з'єднань за допомогою математичного моделювання, що дає можливість раціонально підбирати режими зварювання без проведення надмірної кількості експериментів.

Практична значущість дослідження підтверджується використанням його результатів у навчальному процесі НТУ «ХП» при викладанні дисциплін «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».

Крім того, сформульовані рекомендації можуть бути застосовані у промисловому виробництві.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Результати досліджень опубліковані у 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.

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, надано 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 представлено та проаналізовано теоретичну модель тепловиділення в зоні точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП), а також досліджено металографічну структуру з'єднань за різних параметрів процесу. Встановлено, що швидкість занурення інструмента є найбільш впливовим фактором тепловиділення, далі за значущістю йде швидкість обертання, а діаметр інструмента має порівняно менший вклад. Показано, що морфологія поверхні в зоні ТЗТЗП істотно змінюється залежно від параметрів процесу та діаметра інструмента. 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,

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-T6 (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, що налічує 106 найменувань, є достатньо повним і охоплює зарубіжні наукові публікації.

Анотація чітко відображає зміст дисертаційної роботи, послідовно розкриваючи її мету, завдання, основні результати та наукову новизну. Вона достатньо повно висвітлює отримані наукові положення, їх практичну значущість і напрями можливого застосування результатів дослідження.

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

Хоча дисертаційна робота відзначається високим рівнем виконання та містить значущі наукові результати, окремі її положення потребують подальшого уточнення та розширеного аналізу. Деякі аспекти дослідження залишають простір для додаткового експериментального або теоретичного опрацювання, що може стати підґрунтям для подальших наукових пошуків.

Зазначені зауваження мають конструктивний характер і не знижують загальної наукової цінності роботи, а навпаки, вказують на перспективні напрями розвитку теми та можливість поглиблення отриманих результатів.

1. У тексті дисертації спостерігається одночасне використання англійської (RFSSW) та української (ТЗТЗП – точкове зварювання тертям з перемішуванням) аббревіатур для позначення одного й того ж процесу. Це створює певну термінологічну непослідовність.

2. На рисунках 1.1, 1.2, 1.3, 1.6 та 2.6, 3.2, 3.14-3.19, 3.23, 4.19, 4.23, 5.3 присутні англійські підписи, що ускладнює їх інтерпретацію. Доцільно подати переклад написів українською мовою або двомовні підписи для зручності сприйняття.

3. У таблиці 1.2 використано як українські, так і англійські назви матеріалів, що створює стилістичну та термінологічну непослідовність. Необхідно уніфікувати подання назв матеріалів і обрати єдину мову (українську або англійську) відповідно до використаних стандартів.

4. Висновки до другого розділу потребують розширення для більш повного відображення отриманих результатів та їх наукового обґрунтування.

5. У третьому розділі (рисунки 3.5 та 3.6) не вказано, за допомогою якого програмного забезпечення були отримані наведені зображення. Ця інформація наявна лише в анотації, але відсутня в основному тексті дисертації.

6. Рисунок 3.12 виконано у зменшеному масштабі, через що написи та позначення на ньому є надто дрібними й важкими для сприйняття.

7. У тексті використано некоректне формулювання «...діаметра мішалки, що розглядається в цій статті...» (с. 35). Оскільки йдеться про дисертаційну роботу, а не статтю, потрібно було застосувати слово «дисертація» або словосполучення «ця робота».

8. У підрозділі 3.2 наведено значну кількість формул і коефіцієнтів, але бракує якісного пояснення фізичного змісту кожного етапу моделі.

9. У розділі 3 відсутній логічний перехід між підрозділом 3.1 та підрозділом 3.2. Не пояснено, чому дослідження тепловиділення є необхідним етапом для розуміння формування мікроструктури у зоні ТЗТЗП.

10. Рисунки 3.7, 3.11 не дозволяють детально розглянути зони мікроструктури. Рекомендується збільшити масштаб рисунків або винести їх у додатки.

11. У тексті використано некоректне формулювання «*При 1000 об/хв зі збільшенням швидкості проникнення діапазон дефектів розширюється...*» (с. 46) є неконкретною. Не пояснено, які саме дефекти, мабуть, маються на увазі точкові заглиблення. Також слово «діапазон» не зовсім коректне: краще було використати «кількість точкових заглиблень» або «місця розташування дефектів», щоб точніше відобразити залежність від швидкості проникнення.

12. Термін «*точкові дефекти*» на с. 47, с. 48, с. 50 використаний некоректно під час розгляду точкового зварювання ТЗТЗП. У металургії та зварювальних процесах більш точними є терміни «локальні порожнини», «заглиблення» тощо оскільки вони відображають реальну природу дефектів у зоні зварювання.

13. Термін «*поверхневі дефекти*» с. 50 використаний некоректно. Необхідно конкретизувати природу дефектів, наприклад: «поверхневі порожнини», «тріщини на поверхні», «нерівності» тощо.

14. Термін «*субкристали*» на с. 62–63 слід уточнити. Збільшення мікроструктури на рис. 3.22 є недостатнім, щоб досліджувати субкристали. Ймовірніше, автор мав на увазі рекристалізовані зерна малого розміру.

15. Формулювання «*зона стає крутішою*» с. 64 некоректне. Зона сама по собі не може «стати крутішою». Слід уточнити, що мається на увазі.

16. У тексті термін «*мішалка*» використовується як синонім «перемішувального стрижня», проте це не було чітко визначено.

17. Фраза «*викликати більш динамічне явище рекристалізації*» с. 67 некоректна. Динамічна рекристалізація – це фізичний процес, який відбувається під впливом пластичної деформації та температури, його не можна «зробити більш динамічним».

18. Фраза «*середній розмір зерна поступово вдосконалюється*» с. 67 некоректна з наукової точки зору. Розмір зерна не «вдосконалюється», він змінюється (збільшується або зменшується) залежно від процесів рекристалізації та деформації.

19. Фраза «отримання великої кількості динамічної рекристалізації» с. 67 некоректна з технічної точки зору. Динамічна рекристалізація – це процес, його не «отримують» і не рахують у кількості. Повноту процесу оцінюють за розміром і морфологією зерен, а не за «кількістю рекристалізації».

20. Термін «розливання» у описі на с. 67, останній абзац, процесу некоректний. У зоні точкового зварювання метал не «розливається» у класичному сенсі, а відбувається пластична течія або деформація металу.

21. У тексті (с. 68-69) з'являється термін «геометрична динамічна рекристалізація», проте не надано пояснення відмінностей між геометричною та класичною (безперервною) динамічною рекристалізацією. Відсутні підтвердження того, що у досліджуваних умовах відбувається саме геометрична рекристалізація.

22. Термін «виступні зварні з'єднання» не узгоджена зі стандартом ISO 14273:2016, як зазначає автор на с. 72 дисертації.

23. Фраза «Типова морфологія несправностей штепсельних вилок» с. 74, рис. 4.2, неконкретна.

24. Термін «міжфазна тріщина» (рис. 4.4) некоректний, оскільки на рисунку показано не міжфазне руйнування.

25. Терміни «стабільна еластична стадія» і «стадія зміцнення межі текучості» с. 89 потребують уточнення відповідно до загальноприйнятої термінології механіки матеріалів.

26. У тексті на с. 89 використано термін «нагромаджувач точкового зварного шва», який є некоректним і незрозумілим з точки зору механіки матеріалів. Опис процесу зсуву заплутаний, пояснення кривої «напруження-зсув-переміщення» потребує уточнення.

27. В розділі 5 деякі терміни, наприклад, «зона перезаповненого третєвого перемішування» або «спіральний потік», вживаються без визначення або пояснення.

28. Для моделювання ТЗТЗП у розділі 5 наведені параметри матеріалу основного металу та інструмента для його перемішування без обґрунтування їх вибору та джерел даних. Необхідно пояснити, чому саме ці значення були обрані, чи підтверджені вони експериментально для алюмінієвого сплаву 6061-T6, а також оцінити вплив можливих похибок цих параметрів на результати моделювання.

29. *«Безпосередньо під змішувальною гільзою з'являється так звана «краплеподібна зона», про яку згадувалося в попередньому розділі» с.141.* У попередньому розділі така згадка відсутня.

30. Розділ 6 містить ґрунтовний якісний опис механізмів плинину матеріалу та формування з'єднання для різних діаметрів інструменту. Однак виклад надмірно насичений описовими міркуваннями без достатнього використання кількісних даних. Відсутність узагальнюючих порівнянь для різних діаметрів інструменту ускладнює сприйняття, не дозволяє чітко простежити залежності між параметрами процесу та структурними/механічними характеристиками. У результаті розділ переважно має описовий характер, а кількісне підкріплення механізмів руйнування та формування з'єднання є недостатнім.

31. Лист «Позначення» (с. 179) розміщено після основного тексту дисертації, тоді як згідно з академічними вимогами та стандартною структурою дисертаційних робіт, перелік позначень і скорочень має бути поданий перед змістом.

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. Представлена дисертаційна робота є самостійним і завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальну науково-практичну задачу та встановлено закономірності впливу технологічних параметрів процесу (швидкості обертання, швидкості зварювання, діаметра інструмента) на формування та якість зварних з'єднань при точковому зварюванні тертям з перемішуванням із заповненням алюмінієвих сплавів.

Отримані результати спрямовані на оптимізацію технологічного процесу та забезпечення високих механічних характеристик з'єднань, що має важливе значення для розвитку сучасних методів зварювання легких конструкційних матеріалів.

Подана дисертаційна робота «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію» Ді Цзян

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

Професор кафедри прикладного матеріалознавства і технологій конструкційних матеріалів Сумського державного університету,
доктор технічних наук, професор



Оксана ГАПОНОВА

20.10.2025 р.

Сирнис д.т.н., професор Гапонової О.П.
Завірю
Венкис секретар

Л. Рубан