

ВІДГУК

офіційного опонента

Гапонової Оксани Петрівни

на дисертаційну роботу

Сяоле Ге

«Дослідження технології та властивостей з'єднань точкового зварювання тертям сплавів на основі міді»,

представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

Актуальність теми.

Актуальність теми зумовлена необхідністю дослідження особливостей формування з'єднань у тонких мідних листах методом зварювання тертям із перемішуванням, визначення впливу технологічних параметрів процесу на мікроструктурну еволюцію, механічні властивості та залишкові напруження зварних з'єднань, а також встановлення механізмів їх руйнування. Розв'язання зазначеної наукової проблеми дасть змогу оптимізувати режими процесу ТЗТЗП з метою досягнення максимальної міцності й надійності з'єднань, що сприятиме підвищенню ефективності застосування цієї технології в промислових умовах та створить науково-технічне підґрунтя для її подальшого впровадження у виробництво виробів із тонколистової міді.

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

Положення та висновки, що викладені в дисертаційній роботі Сяоле Ге, мають достатній рівень обґрунтованості, а їх наукова достовірність підтверджується комплексним підходом до дослідження впливу параметрів процесу ТЗТЗП (глибина занурення інструмента, швидкість обертання, час витримки) на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань у тонких мідних листах, а також визначенням механізмів їх деформування та руйнування.

Для досягнення поставленої мети здобувач використав широкий спектр сучасних методів дослідження, зокрема: металографічний аналіз, оптичну та електронну мікроскопію, механічні випробування на зсув і розтягування, вимірювання мікротвердості, визначення залишкових напружень, дифракцію ударного випромінювання, а також двоелектродний цифровий чотириточковий тестер для вимірювання електропровідності. Крім того, проведено математичне моделювання процесу зварювання із використанням програмного забезпечення Deform 3D, що дозволило глибше проаналізувати температурно-напружений стан матеріалу під час з'єднання.

Отримані результати є логічно узгодженими, взаємопов'язаними та підтверджують достовірність зроблених висновків і сформульованих наукових рекомендацій.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові результати впровадженні в навчальний процес.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

В дисертаційній роботі узагальнено та розвинуто результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо визначення впливу параметрів процесу ТЗТЗП-П (глибина занурення інструмента, швидкість обертання, час витримки) на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань у тонких мідних листах, а також визначення механізмів їх деформування та руйнування.

Вперше:

1. У роботі проведено систематичне дослідження ТЗТЗП у мідних листах товщиною 1 мм, що дозволяє усунути науковий пробіл у зварюванні міді цим методом. Дослідження суттєво розширює можливості застосування ТЗТЗП для матеріалів з високою теплопровідністю та електропровідністю і закладає осно-ву для його використання.

2. На основі математичного моделювання в роботі розкрито температурні цикли, розподіли напружень і деформацій, а також швидкість течії матеріалу під час процесу ТЗТЗП. Встановлено особливості перерозподілу матеріалу та механізми пластичної течії, що поглиблює розуміння формування з'єднань у тонких мідних листах.

3. Дослідження пояснює форми руйнування, місця зародження тріщин, шляхи їх поширення та причини руйнування під час навантаження на розтяг з'єднань ТЗТЗП, що забезпечує теоретичну основу для вибору оптимальних параметрів процесу зварювання тонких мідних листів.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Результатом проведених теоретичних і експериментальних досліджень є системне вивчення процесу точкового зварювання тертям із перемішуванням (ТЗТЗП) тонких мідних листів. Отримані результати дозволили усунути наявний науково-технічний пробіл щодо впливу параметрів процесу на формування мікроструктури та властивостей з'єднань, що створює передумови для практичного інженерного застосування цього методу.

Розширення можливостей промислового використання ТЗТЗП сприяє впровадженню технології для зварювання матеріалів із високою теплопровідністю та електропровідністю, зокрема міді, у таких галузях, як електротехнічна, авіаційна та енергетична промисловість.

Застосування математичного моделювання для оптимізації процесу дало змогу прогнозувати температурні поля, напружено-деформований стан і особливості течії матеріалу, що зменшує обсяг експериментальних досліджень і скорочує витрати на розробку оптимальних режимів зварювання. Поглиблене розуміння механізмів формування з'єднань, зокрема закономірностей міграції матеріалу та пластичної течії, забезпечує можливість цілеспрямованого керування процесом утворення зварного шва та запобігання виникненню дефектів.

Практичні рекомендації, розроблені за результатами дослідження, спрямовані на підвищення міцності з'єднань і передбачають визначення

оптимальних параметрів процесу, а також аналіз механізмів руйнування, місць зародження тріщин і шляхів їх поширення під час навантаження на розтяг. Це дозволяє підвищити надійність та довговічність зварних швів. Отримані результати можуть бути використані для створення технологічних карт, удосконалення обладнання для ТЗТЗП і впровадження ефективних режимів зварювання у виробництво виробів із тонких мідних листів.

Окремі положення дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес під час викладання дисциплін (освітніх компонентів): «Кольорові метали і сплави», «Технології та обладнання для модифікування поверхні, об'ємної обробки, комп'ютерного інженерного дизайну металів», «Матеріалознавство нероз'ємних з'єднань та їх діагностика», «Основи міцності матеріалів».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень опубліковані у 12 наукових працях, 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.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі.

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 Сяоле Ге 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.

У першому розділі подано дослідження передумов та значущості цієї роботи, наведено класифікацію методів зварювання тертям із перемішуванням у точці, а також пояснено принцип роботи ТЗТЗП. Розглянуто сучасний стан досліджень і наявні обмеження ТЗТЗП, що стало підґрунтям для формулювання конкретного змісту даного дослідження.

У другому розділі описано матеріали, зварювальне обладнання та інструменти, які використані в дослідженні. Також наведено експериментальні процедури, методи випробувань та обладнання, застосовані для оцінки характеристик з'єднань.

У третьому розділі представлено математичне моделювання ТЗТЗП для тонких мідних листів. Розроблено та верифіковано математичну модель з позицій температури зварювання та формування з'єднання. Передбачено розподіли температури, деформацій, напружень і швидкостей течії матеріалу в з'єднаннях. Досліджено вплив параметрів зварювання на температурне поле, напруження, деформації, швидкість потоку матеріалу та його міграцію, що дозволило виявити механізми течії матеріалу на різних стадіях зварювання.

У четвертому розділі вивчено макроморфологію та мікроструктурні особливості з'єднань. Досліджено вплив глибини занурення інструмента, швидкості обертання та часу витримки на морфологію з'єднання та утворення дефекту типу Ноок. За допомогою електронної дифракції зворотного розсіяння, охарактеризовано мікроструктуру в ключових зонах, проаналізовано відмінності у розмірі зерен і поведінці рекристалізації. Для дослідження дислокацій та характеристик двійників у зоні перемішування зонда та гільзи застосовано трансмісійну електронну мікроскопію.

У п'ятому розділі оцінено механічні властивості з'єднань і напруження під час зварювання. Досліджено вплив параметрів процесу на мікротвердість, навантаження на зсув під час розтягування (СЗР) та електропровідність. Оцінено

розподіл залишкових напружень у типових з'єднаннях. На основі теорії кілець розроблено восьмикутний динамометр для вимірювання зварювальних зусиль під час ТЗТЗП тонких мідних листів та проаналізовано залежність зварювальних зусиль від різних параметрів.

У шостому розділі досліджено механізми руйнування з'єднань. Вивчено форми руйнування за різних параметрів процесу. Шляхом спостереження місць руйнування та аналізу розподілу напружень у зразках на розтяг виявлено початкові зони руйнування та шляхи поширення тріщин при різних формах руйнування, що дозволило встановити механізми руйнування з'єднань. Результати показують, що несна здатність з'єднань обмежується розм'якшенням матеріалу в зоні термічного впливу та різкими змінами залишкових напружень розтягування-стискання. Використовуючи методологію поверхні відгуку, проведено оптимізацію параметрів процесу з метою максимізації СЗР і побудовано математичну модель, що описує залежність між параметрами процесу та СЗР, що дозволило визначити оптимальну комбінацію параметрів.

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

Список використаних джерел, що налічує 218 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 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:

Попри загалом позитивну оцінку дисертаційного дослідження, слід

відзначити наявність окремих положень, що викликають наукову дискусію, а також зауважень, які потребують уточнення, додаткового обґрунтування або розширеного аналізу. Зазначені уточнення не знижують загального рівня роботи, проте їх опрацювання сприятиме підвищенню наукової аргументованості та поглибленню результатів дослідження.

1. На рисунках 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.8, 1.9, 1.13, 1.16; 2.1, 2.5; 3.3; 4.5; 5.12; 6.1 та інші присутні англійські підписи, що ускладнює їх інтерпретацію. Доцільно подати переклад написів українською мовою або двомовні підписи для зручності сприйняття.

2. Доцільно було б включити у дисертацію ілюстративні матеріали – схеми процесів та конструкцій інструментів, що демонструють різні варіанти зварювання тертям із перемішуванням (розділ 1). Це дозволить краще зрозуміти технологічні особливості та відмінності між методами.

3. Доцільно було б додати ілюстрації мікроструктури з позначенням зон шва ТЗТЗП-П (ЗП, ТМВЗ, ТВЗ, ВМ, ЗПВ, ЗПШ), с. 24, для наочності та кращого сприйняття матеріалу.

4. На мікроструктурі (рис. 1.9) зони ЗП, ТМВЗ, ТВЗ і ВМ позначені англійськими аббревіатурами, тоді як у тексті використані українські назви. Це ускладнює сприйняття та розуміння, тому доцільно уніфікувати позначення між текстом і рисунком.

5. Доцільно було б включити у дисертацію окремий лист умовних скорочень, оскільки у роботі використовується велика кількість аббревіатур. Це полегшить сприйняття тексту та забезпечить єдність позначень.

6. Рисунки 1.8–1.10 не дозволяють детально розглянути зони мікроструктури. Рекомендується збільшити масштаб рисунків або винести їх у додатки. А на рисунках 1.17 і 1.18, 3.6, 3.14, 3.23 написи надто дрібні для зручного сприйняття. Рекомендується збільшити розмір шрифтів або винести рисунки у додатки.

7. Щоб обґрунтувати протікання динамічної рекристалізації в зонах зварного шва під час ТЗТЗП, в літературному огляді необхідно навести посилання на наукові джерела, в яких дійсно досліджувався цей процес. Динамічна

рекристалізація впливає не лише на мікроструктуру (розмір зерен, як стверджує автор), а й на дислокаційну структуру матеріалу. Тому для підтвердження процесів динамічної рекристалізації повинні були бути проведені відповідні експериментальні або аналітичні дослідження.

8. У розділі 2 (рис. 2.2) не зазначено марки устаткування, що використовувалося для проведення досліджень. Доцільно було б вказати конкретні моделі та виробників обладнання.

9. Не пояснено, як спрощення геометрії та умов граничних контактів (наприклад, спрощення верхнього та нижнього листів до однієї пластини) впливає на точність результатів. Рекомендується додати короткий аналіз обмежень моделі та посилання на підтверджуючі джерела.

10. Не зазначена похибка чисельного моделювання для деформацій та напружень, хоча вона є критичною для оцінки достовірності моделі.

11. Хоча в роботі наведені максимальні значення переміщень і швидкостей, бракує короткого підсумкового порівняння впливу кожного параметра на результат. Наприклад, можна було б додати таблицю «глибина занурення / швидкість обертання / час витримки → пікова швидкість / міграція (переміщення) точок» тощо. Також можна було б більш чітко відокремити вплив температури та механічного перемішування на рух матеріалу, адже в тексті інколи вплив цих факторів змішаний.

12. Підпис до рисунків 4.7, 4.8 - «Макроморфології ...», проте масштаб поділки на фотографіях 0,2 мм, що відповідає мікромасштабу. Більш коректно було б для назви використати термін «мікроморфології» або замінити його на «Локальна морфологія шва...» тощо.

13. В тексті описані тенденції (наприклад, збільшення глибини занурення знижує мікротвердість, висока швидкість обертання спричиняє укрупнення зерен тощо), але не зроблено висновку, який набір параметрів забезпечує максимальну мікротвердість і найкращу структуру.

14. Вплив окремих параметрів розглянуто по черзі, але не показано їх сумарний ефект. Наприклад, як одночасно впливають висока швидкість обертання і велика глибина занурення.

15. У тексті наведені численні дані про залишкові напруження для різних комбінацій параметрів (глибина занурення, швидкість обертання, час витримки), але вони розкидані по абзацах і рисунках. Було б корисно скласти загальну таблицю, де чітко показано вплив кожного параметра на величину та тип залишкових напружень.

16. В дисертації є опис, як окремі параметри збільшують або зменшують залишкові напруження, як змінюється їх знак, але не зроблено висновку, який набір параметрів забезпечує мінімальні залишкові напруження та найменший ризик дефектів.

17. Відсутня узагальнена таблиця чи графік впливу параметрів зварювання (глибина занурення, частота обертання, час витримки) на НЗР та на електропровідність. Наведено вплив кожного параметра окремо, але відсутня загальна таблиця чи графік, які б дозволили одразу порівняти всі режими та визначити оптимальні.

18. У дисертації відсутні результати фазового аналізу зон зварювання, що ускладнює оцінку змін кристалічної структури та підтвердження утворення нових фаз у процесі ТЗТЗП-П. Хоча автор на с. 118 зазначає, що «на електропровідність впливають не лише розмір зерна, але й густина дислокацій та інтерметалеві сполуки, що утворюються внаслідок деформації», ці твердження залишаються непідтвердженими.

19. Принцип роботи ОКД (октагонального кільцевого динамометра) слід уточнити. В роботі необхідно було б чітко зазначити, що вимірювання зусиль і моменту є непрямыми, а також зазначено, що ОКД менш чутливий до високих температур, однак не наведено оцінки похибок вимірювань.

20. У моделюванні методом скінченних елементів не враховані залишкові напруження у зоні зварного з'єднання, що може значно впливати на результати аналізу процесу руйнування, а також застосовано значні спрощення, проте не проаналізовано, як ці спрощення можуть впливати на точність результатів та відповідність експериментальним даним.

21. Відсутнє чітке порівняння числових значень напружень і деформацій, отриманих у результаті FE-моделювання, з експериментальними даними, що

ускладнює оцінку адекватності запропонованої моделі., а також недостатньо висвітлено практичну значущість результатів моделювання. Хоча у розділі детально описані механізми поширення тріщини та руйнування, не визначено, які параметри зварювання можна вважати оптимальними для формування якісного з'єднання з високою міцністю, надійною адгезією та мінімальними залишковими напруженнями, що обмежує можливість практичного застосування результатів для підвищення довговічності конструкцій.

22. Шостий розділ, будучи підсумовуючим, мав би інтегрувати експериментальні результати, мікроструктурні дослідження та дані FE-моделювання в єдину картину механізмів руйнування. Проте у роботі недостатньо висвітлено взаємозв'язок між мікроструктурними особливостями (наприклад, розміром зерна, характером ЗПВ) та макроскопічною поведінкою зварних з'єднань. Згадки про вплив величини зерна присутні, але вони не завжди логічно інтегровані у пояснення механізмів руйнування, що варто було б підсилити.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Сяоле Ге «Дослідження технології та властивостей з'єднань точкового зварювання тертям сплавів на основі міді» за своїм змістом відповідає спеціальності 132 – Матеріалознавство. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу науково-практичну задачу, що полягає у визначенні впливу параметрів процесу ТЗТЗП-П (глибина занурення інструмента, швидкість обертання, час витримки) на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань у тонких мідних листах, а також визначення механізмів їх деформування та руйнування.

Подана дисертаційна робота «Дослідження технології та властивостей з'єднань точкового зварювання тертям сплавів на основі міді» Сяоле Ге 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

Сяоле Ге 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.

*Лідниця З.Т.Н., професора Гашковій О.П.
забіраю*

Згенері секретар

