

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., доцента Реброва Олена Михайлівни

на дисертаційну роботу Сяоле Ге

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

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

У результаті аналізу дисертаційної роботи Сяоле Ге за темою «Дослідження технології та властивостей з'єднань точкового зварювання тертям сплавів на основі міді», 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 обумовлена потребою вивчення особливостей формування з'єднань у тонких мідних листах методом зварювання тертям із переміщенням, визначення впливу технологічних параметрів процесу на мікроструктурну еволюцію, механічні властивості та залишкові напруження зварних з'єднань, а також встановлення механізмів їх руйнування.

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

Дисертаційне дослідження Сяоле Ге є актуальним і виконаним у відповідності до сучасних вимог розвитку науки і техніки. Робота проводилася у межах пріоритетних напрямів наукової діяльності, визначених державою, і спрямована на оптимізацію параметрів процесу для забезпечення

максимальної міцності та надійності з'єднань, що є основою для підвищення ефективності застосування технології ТЗТЗП-П у промислових умовах та розширення її використання для матеріалів з високою теплопровідністю і електропровідністю, зокрема міді.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Отримані результати дисертаційного дослідження впроваджено в навчальний процес (в освітньо-професійні та освітньо-наукові програми) та розглядаються при вивченні 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».

### **3. Наукова новизна одержаних результатів**

Відомості про наукову новизну займають важливе місце в структурі дисертаційної роботи та відображають основні положення, що становлять вклад здобувача в розвиток наукового напрямку. Представлені положення новизни демонструють глибину аналітичного підходу та орієнтацію на розв'язання актуальних прикладних і теоретичних задач.

В дисертаційній роботі узагальнено та розвинуто результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо 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. При цьому вперше:

1. Проведено всебічне дослідження ТЗТЗП на мідних листах товщиною 1 мм, що суттєво розширює сферу застосування ТЗТЗП для матеріалів з високою теплопровідністю та електропровідністю;

2. Визначені температурні цикли, розподіли напружень і деформацій, а також швидкість течії матеріалу під час процесу ТЗТЗП. Встановлено особливості перерозподілу матеріалу та механізми пластичної течії, що поглибили розуміння процесу формування з'єднань у тонких мідних листах;

3. Встановлені форми руйнування, місця зародження тріщин, шляхи їх поширення та причини руйнування під час навантаження на розтяг з'єднань ТЗТЗП, що є теоретичною основою для вибору оптимальних параметрів процесу зварювання тонких мідних листів.

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

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у системному вивченні процесу точкового зварювання тертям із перемішуванням (ТЗТЗП) тонких мідних листів та визначенні впливу технологічних параметрів на формування мікроструктури та властивостей з'єднань. Отримані результати створюють науково обґрунтовані передумови для оптимізації режимів зварювання та впровадження технології ТЗТЗП у промисловість.

Використання математичного моделювання дало змогу прогнозувати теплові та деформаційні поля, зменшивши потребу в експериментальних випробуваннях.

Одержані результати можуть бути використані для розробки технологічних карт, удосконалення обладнання та застосування ефективних режимів зварювання у виробництві деталей з тонколистової міді.

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

За результатами дослідження опубліковано 12 наукових праць, серед яких - 6 статей у фахових 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 свідчить про належний рівень апробації основних положень роботи та дає підстави вважати дисертацію завершеним науковим дослідженням, результати якого мають прикладне значення для вирішення актуальних завдань зварювання тонколистової міді.

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

Об'єкт дослідження: процес зварювання тертям з перемішуванням мідних листів товщиною 1 мм.

Предмет дослідження: взаємозв'язки параметрів зварювального процесу з мікроструктурою, механічними властивостями та поведінкою при руйнуванні з'єднань тонколистової міді.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету, основні завдання, об'єкт і предмет дослідження. Наведено перелік методів, використаних у процесі дослідження. Виокремлено 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 присвячений огляду передумов та значущості дослідження. В ньому наведено класифікацію зварювання тертям із перемішуванням, викладений принцип роботи ТЗТЗП та розглянуто сучасний стан досліджень і наявні обмеження ТЗТЗП, що стало підґрунтям для формулювання конкретного змісту дослідження.

Другий розділ містить опис матеріалів, зварювального обладнання та інструментів, які використані в дослідженні. Також наведено експериментальні процедури, методи випробувань та обладнання, застосовані для оцінки характеристик з'єднань.

Третій розділ присвячений моделюванню ТЗТЗП для тонких мідних листів. В ньому наведена розроблена та верифікована математична модель процесу формування зварного з'єднання з урахуванням розподілу 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 вивчається макроморфологію та мікроструктурні особливості з'єднань. В матеріалах розділу досліджується вплив глибини занурення інструмента, швидкості обертання та часу витримки на

морфологію з'єднання та утворення дефекту типу Hook. З використанням електронної дифракції зворотного розсіювання, наведено мікроструктуру в ключових зонах, проаналізовано відмінності у розмірі зерен і поведінці рекристалізації. Для дослідження дислокацій та характеристик двійників у зоні переміщення зонда та гільзи застосовано трансмісійну електронну мікроскопію.

П'ятий розділ присвячений оцінці механічних властивостей з'єднань і напруження під час зварювання. В розділі досліджено вплив параметрів процесу на мікротвердість, навантаження на зсув під час розтягування, електропровідність, 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.

Шостий розділ присвячений дослідженням механізмів руйнування з'єднань. В ньому вивчаються 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 тріщини при різних формах руйнування. Доведено, що несуча здатність з'єднань обмежується розм'якшенням матеріалу в зоні термічного впливу та різкими змінами залишкових напружень розтягування-стискання.

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

Список використаних джерел охоплює широкий спектр наукових і технічних аспектів дослідження, що свідчить про глибоке опрацювання автором значного обсягу спеціалізованої літератури.

У додатках подано матеріали, що підтверджують впровадження результатів дисертації у навчальний процес, а також перелік наукових праць автора, опублікованих за темою дослідження.

## **7. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується чітким формулюванням мети, послідовним вирішенням поставлених завдань та застосуванням методологічних підходів.

Представлені наукові положення підтверджуються комплексним використанням взаємодоповнювальних експериментальних, аналітичних і розрахункових методів, які повною мірою відповідають цілям і завданням роботи.

### **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, а отримані результати свідчать про оригінальність проведеного дослідження. У тексті послідовно викладено власні наукові ідеї автора, і не виявлено випадків некоректного запозичення матеріалів чи результатів інших дослідників без відповідних посилань.

Основні положення та результати дисертації викладено у 6 наукових статтях, опублікованих у виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричних базах, а також апробовані на міжнародних наукових конференціях, де дисертант представляв і обговорював результати власних досліджень.

### **9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

Попри високий рівень виконання дисертаційного дослідження, його наукову новизну та практичну значущість, слід відзначити наступні зауваження, які можуть бути враховані автором у подальшій науковій діяльності:

1. Обґрунтування вибору технологічних параметрів ТЗТЗП проведено недостатньо детально. Варто було б пояснити, чому обрано саме такі значення параметрів, а також охарактеризувати доцільність їх вибору для матеріалу дослідження.

2. Математичне моделювання процесу ТЗТЗП-П, хоча і виконано з використанням сучасного програмного забезпечення, потребує порівняльної оцінки з експериментальними результатами для підтвердження адекватності моделі.

3. Взаємозв'язок між структурними змінами та механічними властивостями потребує більш глибокого аналізу. Слід було б чіткіше показати, як мікроструктурні перетворення впливають на твердість, залишкові напруження та електропровідність.

## 10. Висновки

Дисертаційна робота Сяоле Ге 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 Сяоле Ге «Дослідження технології та властивостей з'єднань точкового зварювання тертям сплавів на основі міді» 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, Сяоле Ге, заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

Рецензент

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



Олена РЕБРОВА

