

## **ВІДГУК**

офіційного опонента

Рибалка Івана Миколайовича

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**

Обумовлена потребою дослідження особливостей формування з'єднань у тонких мідних листах методом зварювання тертям з перемішуванням, визначенням впливу параметрів процесу на мікроструктурну еволюцію, механічні властивості та залишкові напруження зварних з'єднань, а також встановленням механізмів їх руйнування.

Вирішення цієї задачі дозволить оптимізувати технологічні параметри процесу ТЗТЗП для досягнення максимальної міцності та надійності з'єднань, що забезпечить підвищення ефективності використання даної технології у промислових умовах та створить науково-технічне підґрунтя для її подальшого впровадження у виробництво виробів з тонколистової міді.

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

Положення та висновки, викладені в дисертаційній роботі Сяоле Ге, мають достатній рівень обґрунтованості. Їх наукова достовірність ґрунтується на 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.

Для досягнення поставленої мети здобувачем застосовано широкий спектр методів дослідження, включаючи металографічний аналіз, оптичну та електронну

мікроскопію, механічні випробування на зсув та розтягування, вимірювання мікротвердості, визначення залишкових напружень, метод дифракції ударного випромінювання, двоелектричний цифровий чотириточковий тестер для вимірювання електропровідності, математичне моделювання на базі програмного забезпечення Deform 3D.

Отримані результати підтверджують достовірність зроблених висновків і наукових рекомендацій.

### **Достовірність результатів досліджень.**

Обґрунтованість теоретичних положень підтверджена результатами експериментальних досліджень.

Наукові результати, які отримані під час написання дисертаційної роботи впровадженні в навчальний процес кафедри «Матеріалознавство» НТУ «ХП», як для студентів бакалаврів, так і для магістрів.

### **До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:**

Вперше:

1. 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 основу для його використання;

2. в роботі на основі математичного моделювання 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. проведені дослідження пояснюють 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 проведення системних досліджень методу ТЗТЗП, а саме, дослідження зварювання тонких мідних листів методом ТЗТЗП, що дозволяє усунути нестачу даних про вплив параметрів процесу на формування мікроструктури та властивостей з'єднань, що створює передумови для інженерного застосування цього методу. Розширення можливостей промислового використання ТЗТЗП сприяють впровадженню методу для зварювання матеріалів з високою теплопровідністю та електропровідністю, зокрема міді, у таких галузях, як електротехнічна, авіаційна та енергетична промисловість. Використання математичного моделювання для оптимізації процесу дозволяє прогнозувати температурні поля, напружено-деформований стан та особливості течії матеріалу, що зменшує кількість необхідних експериментів і скорочує витрати на розробку оптимальних режимів зварювання. Поглиблене розуміння механізмів формування з'єднань, а саме, встановлення закономірностей міграції матеріалу та пластичної течії дають змогу цілеспрямовано керувати процесом утворення зварного шва та запобігати появі дефектів. Практичні рекомендації для підвищення міцності з'єднань, дослідження механізмів руйнування, місць зародження тріщин та їх поширення під навантаженням на розтяг забезпечать вибір оптимальних параметрів процесу, що підвищить здатність і надійність зварних швів. Результати дослідження можуть бути використані для розробки технологічних карт, удосконалення обладнання для ТЗТЗП та впровадження ефективних режимів зварювання у промислове виробництво виробів з тонких мідних листів.

Окремі питання з матеріалів дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі при викладанні 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».

### **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.

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 способів 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 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, охоплюючи і зарубіжні наукові публікації, є достатньо повним.

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 дисертаційної роботи, слід відзначити наявність окремих тверджень і результатів, що потребують додаткового уточнення або більш глибокого наукового обґрунтування. Окремі аспекти дослідження можуть стати предметом подальших наукових дискусій і розвитку. Зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності отриманих результатів, а їх урахування у подальшій роботі сприятиме більш повному розкриттю проблематики, що досліджується та підвищенню рівня наукової аргументації.

1. Надмірна концентрація даних при описі результатів без достатнього аналітичного узагальнення. У тексті наведено детальний опис результатів моделювання та експериментів, однак відсутнє глибоке обговорення їхнього взаємозв'язку. Варто порівняти результати математичного моделювання з експериментальними даними для підтвердження достовірності моделі та визначення її похибки.

2. Недостатнє обґрунтування вибору технологічних параметрів. Не пояснено, чому саме обрано такі діапазони глибини занурення, швидкості обертання та часу витримки. Доцільно додати посилання на літературні джерела або попередні експерименти, які слугували б основою для такого вибору.

3. Брак порівняльного аналізу з іншими способами зварювання міді. У роботі не подано порівняння отриманих характеристик з'єднань із даними для зварювання плавленням чи дифузійного зварювання. Таке порівняння дозволило б оцінити переваги та обмеження методу ТЗТЗП (ТЗТЗП-П).

4. Опис мікроструктурних змін потребує більшої конкретизації. У другому пункті висновків подано загальні спостереження щодо зеренної структури, дислокацій та двійників. Для підвищення наукової цінності доцільно доповнити опис кількісними характеристиками (розмір зерна, густина дислокацій, частка двійників), а також додати посилання на мікрофотографії.

5. Висновки щодо мікротвердості та залишкових напружень бажано уточнити. Хоча встановлено закономірності зміни твердості й напружень, не розглянуто причини таких змін з позицій фазових перетворень чи релаксації дефектів. Варто пояснити фізичну природу виявлених закономірностей.

6. Недостатньо розкрито значення розробленого динамометра. Висновок про створення восьмигранного кільцевого динамометра є важливим, проте не наведено його метрологічних характеристик (похибка вимірювання, чутливість, діапазон вимірювання), а також переваг, порівняно з відомими аналогами.

7. Аналіз характеру руйнування потребує глибшого обґрунтування. У п'ятому пункті описано типи руйнування, однак не вказано, які структурні або механічні чинники призводять до переходу від одного типу до іншого. Доцільно проаналізувати зв'язок між локальними напруженнями, твердістю та шляхом поширення тріщини.

8. Формулювання висновків бажано зробити менш узагальненим. Частина висновків є описовою. Для наукової роботи доцільно виділити ключові закономірності, підкресливши наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів.

9. Відсутні рекомендації щодо подальших досліджень. Варто зазначити напрями подальшого розвитку роботи: наприклад, дослідження впливу охолодження після зварювання, вивчення структури в тривимірному перерізі, аналіз поведінки сплавів іншого складу тощо.

## 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. Представлена дисертація є самостійною завершеною науковою працею, 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:

Доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів в машинобудуванні імені О.І. Сідашенка Державного біотехнологічного університету, доктор технічних наук, доцент



22.10.2025р.

Іван РИБАЛКО

Підпис *Іван Рибалко*  
**ЗАСВІДЧУЮ**  
 Керівник відділу діловодства ДБТУ  
*Олена Мегич*