

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Царика Богдана Романовича

«Залишкові напруження та деформації зварних з'єднань і конструкцій із алюмінієвих сплавів при зварюванні тертям з перемішуванням», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації.

Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП), який є процесом з'єднання матеріалів в твердій фазі, має низку переваг у порівнянні з традиційними методами зварювання плавленням, особливо при з'єднанні алюмінієвих сплавів. До цих переваг належать нижчі рівні залишкових напружень, менші деформації та висока міцність з'єднання. Попри ці переваги, виникаючі в процесі зварювання деформації та напруження можуть суттєво впливати на якість, розмірну точність та міцність зварних конструкцій, що робить їх прогнозування та контроль критично важливими для застосування ЗТП у різних галузях промисловості.

Різноманіття обчислювальних методів, що застосовуються до ЗТП, вказує на те, що дослідники вивчають різні підходи для найкращого відображення складної фізики процесу. Поширеність зв'язаних термомеханічних та 3D-моделей підкреслює важливість одночасного розгляду взаємодії теплопередачі та механічної поведінки у всіх трьох просторових вимірах для точного моделювання ЗТП. Це відображає розуміння того, що ці явища нерозривно пов'язані у визначенні залишкового стану зварного з'єднання. ЗТП включає значне теплоутворення внаслідок тертя та пластичної деформації, що, у свою чергу, впливає на механічні властивості та плинність матеріалу. Для точного відображення цих взаємозалежностей необхідний зв'язаний підхід. Тривимірність виникає через складний рух інструменту та результуючі нерівномірні поля температури та напружень в елементах з'єднання.

Активні дослідження в цій галузі, підтверджені численними публікаціями та різноманітністю використовуваних методологій, свідчать про високий науковий інтерес до цієї тематики. Постійний розвиток більш досконалих та точних розрахункових методів, спрямованих на подолання обмежень існуючих моделей, вказує на безперервне прагнення до вдосконалення методів моделювання фізико-хімічних процесів при ЗТП. Це свідчить про високу актуальність проблеми розрахункового визначення зварювальних деформацій і залишкових напружень при використанні процесу ЗТП, а широке застосування у таких галузях, як аерокосмічна, автомобільна та суднобудівна, підкреслює практичну важливість результатів досліджень.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- визначені основні фактори, які впливають на точність розрахункового визначення залишкових напружень і деформацій при ЗТП. Доведено, що ефект знеміцнення матеріалу алюмінієвого сплаву 2219-T81 внаслідок термічного циклу

зварювання суттєво впливає на розподіл залишкових напружень, а врахування знеміцнення матеріалу при чисельному визначенні залишкових напружень призводить до суттєвого підвищення точності розрахункових результатів і доброму узгодженні з даними експериментальних вимірювань.

- отримані за допомогою розробленої математичної моделі розрахункові результати при зварюванні пластин товщиною 8 мм різних сплавів АМг6 і 2219-T81 показали, що при ЗТП алюмінієвих сплавів утворюються досить високі залишкові напруження, близькі до межі текучості матеріалу у відпаленому стані, а залишкові деформації можуть мати нижчий рівень, ніж при традиційних дугових способах зварювання. А саме, поздовжня компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за величиною в 1,5-2 рази нижче і розподілена в більш вузькій зоні, ніж при дуговому зварюванні. Поперечна компонента залишкових пластичних деформацій при ЗТП за величиною також в 2-3 рази нижче, ніж при дуговому зварюванні.

Наукова новизна чітко сформульована та зрозуміло викладена, повністю, із розкриттям суті. Сформульовані автором положення наукової новизни відповідають завданням досліджень, які поставлені в роботі. Сформульовані здобувачем теоретичні закономірності підтверджені проведенням чисельних і експериментальних досліджень реальних зразків. Вони не мають протиріч з існуючими теоретичними уявленнями та закономірностями, а наукові положення, сформульовані висновки і запропоновані рекомендації добре узгоджуються з існуючими концепціями. Визнання обґрунтованості положень наукової новизни підтверджується апробацією результатів роботи на відомих міжнародних конференціях з прикладної механіки, зварювання та суміжних технологій.

Наукові дослідження виконані здобувачем у відділі математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в рамках виконання наукової роботи «Розрахунок параметрів напружено-деформованого стану конструктивних елементів ракетно-космічної техніки у вигляді циліндричних оболонок складної геометрії та неоднорідної структури за статичних і динамічних навантажень. Розрахунок кінетики температурного, структурного, напружено-деформованого стану при зварюванні оболонкових конструкцій ракетно-космічної техніки» (2023-2024 рр.) під керівництвом завідуючого відділом Математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Махненка Олега Володимировича.

Таким чином, слід вважати, що поставлені в дисертаційній роботі наукові завдання виконані в повному обсязі. При виконанні експериментальних та теоретичних досліджень здобувач продемонстрував наявність необхідних компетентностей та володіння методологією наукової діяльності повною мірою.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Представлена дисертаційна робота Царика Б. Р. за своїм змістом повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 – Матеріалознавство та визначеним в ньому напрямкам досліджень. Наведені в роботі відомості та висока якість представленого матеріалу свідчить про те, що здобувач повною мірою опанував компоненти освітньо-наукової програми підготовки докторів філософії за спеціальністю Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, наведені в ній результати та висновки свідчать про наявність особистого внеску здобувача у розвиток наукового напрямку Матеріалознавство.

За результатами розгляду звіту подібності та перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги та співпадіння можна зробити однозначний висновок, що дисертаційна робота Царика Богдана Романовича є результатом самостійних наукових досліджень здобувача. Представлена дисертація не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані здобувачем ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні літературні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота грамотне написана українською мовою. Представлені результати комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, їх аналіз та узагальнення логічно розподілені здобувачем за розділами. Структура дисертації надає можливість послідовно та у повному обсязі чітко зрозуміти сутність наукових досліджень, виконаних здобувачем самостійно. Графічний матеріал дисертаційної роботи представлений фотографіями, скріншотами, графіками та загальними ілюстраціями, які демонструють найважливіші результати експериментальних та теоретичних досліджень, отриманих шляхом експериментів на реальних зразках, скінчено-елементним моделюванням, математичним обчисленням та інструментальним вимірюванням. Сутність отриманих результатів та їх аналіз викладені послідовно, зручно та лаконічно. Автор використовує загальноприйняту наукову термінологію, що сприяє повному розумінню представлених результатів досліджень.

Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаної літератури зі 50 джерел. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 156 сторінок.

У **вступі** розкрита актуальність теми дисертаційної роботи, описані мета та завдання дослідження, представлені методи та методологія їх проведення, визначена наукова оригінальність та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** робота містить результати проведеного аналітичного огляду сучасного стану проблеми математичного моделювання температурних розподілів і формування зварних з'єднань при ЗТП. Зроблений огляд існуючих математичних моделей та основних їх особливостей і параметрів для прогнозування напружено-деформованого стану, а також проаналізовано існуючі експериментальні данні вимірювання залишкових напружень і деформацій при ЗТП алюмінієвих сплавів.

У **другому розділі** представлено технологію зварювання тертям з перемішуванням дослідних зразків з термозміцненого алюмінієвого сплаву 2219-T81 аеро-космічного призначення, надані результати проведених випробувань зразків для визначення механічних властивостей матеріалу та результати вимірювання залишкових напружень в зразках стикових зварних з'єднань з алюмінієвого сплаву 2219-T81.

У **третьому розділі** надано опис розробленої математичної моделі визначення зварювальних напружень і деформацій в стикових з'єднаннях, виконаних зварюванням тертям перемішуванням, на основі загального методу термопластичності і методу скінчених елементів. Впроваджено модель знеміцнення алюмінієвого сплаву 2219-T81 при зварювальному нагріві, що суттєво

впливає на точність визначення залишкових напружень і деформацій. Отримано результати математичного моделювання залишкових зварювальних напружень і пластичних деформацій стикових з'єднань з алюмінієвого сплаву 2219-T81, виконаних ЗТП, проведені процедури верифікації і валідації розробленої математичної моделі за результатами експериментального вимірювання залишкових напружень. Зроблено порівняння результатів математичного моделювання залишкового напружено-деформованого стану з'єднань з алюмінієвого сплаву АМг6 при ЗТП з дуговими процесами зварювання.

У четвертому розділі розроблена методологія моделювання зварних залишкових напружень і деформацій великогабаритних циліндричних ємностей за методом функції усадки. Виконано дослідження можливості отримання параметрів функції усадки (пластичних деформацій) та розподілів залишкових напружень для кільцевих і повздовжніх стикових зварних з'єднань великогабаритної циліндричної оболонки на спрощених моделях обмеженого розміру методами термопластичності. Проведено верифікацію і валідацію математичної моделі визначення зварювальних деформацій для великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвого сплаву. Зроблено порівняння результатів математичного моделювання загальних деформацій великогабаритних циліндричних ємностей із алюмінієвого сплаву при використанні ЗТП і дугового зварювання.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Наукові результати дисертаційної роботи висвітлені у 4 наукових публікаціях здобувача, зокрема в 3-х статтях у наукових виданнях, що включені до переліку наукових фахових видань України та 1-а стаття у періодичному науковому виданні, яке індексується у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus та віднесене до четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports.

Отримані автором результати дисертації пройшли апробацію на 4-х наукових фахових конференціях.

При підготовці публікацій автор неухильно дотримувався принципів академічної доброчесності. В представленій дисертації наведений перелік опублікованих за темою дисертації робіт з наведенням особистого внеску здобувача при виконанні наукових досліджень та при підготовці наукових публікацій із співавторами.

Таким чином, описані в дисертаційній роботі наукові результати повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Викликають питання терміни «істинний модуль», «істинна границя течії», «загальний метод термопластичності»; використання різних термінів «текучість» і «плинність», останній скоріше використовується для рідини.
2. Згідно (1.19) параметри моделі Джонсона-Кука мають розмірність МПа, тоді як в табл. 1.2 вони визначені, як безрозмірні.
3. Недостатньо висвітлена розрахункова СЕ схема. Після постановки задачі відразу наведені результати розрахунків.
4. Недостатньо висвітлена модель термопластичності в частині деформаційного зміцнення. Бажано було б навести порівняння експериментальних і розрахункових діаграм розтягу.

5. Модель розміщення потребує доопрацювання, оскільки пов'язана з процесами типу «відпал» і «відпускання» має враховувати термічну історію, наприклад час нагрівання, час витримки при підвищенні температури.
6. Математична модель не враховує структурно-фазові перетворення при остиганні (аналог ТКД).
7. Викликає сумнів можливість використання терміну «оперативне визначення» при 3D розрахунках методом СЕ, зважаючи на визначення параметрів в функції усадки і час розрахунків.
8. Є окремі огріхи перекладу типу «січення» - переріз (с. 106), «рішення» - розв'язок (с. 146).

Викладені зауваження носять характер рекомендацій і побажань.

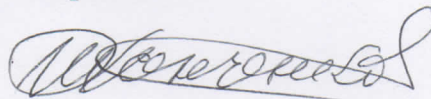
Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Царика Богдана Романовича на тему «Залишкові напруження та деформації зварних з'єднань і конструкцій із алюмінієвих сплавів при зварюванні тертям з перемішуванням» виконана на високому науковому рівні, вона не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має суттєве значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, які наведені в п.п. 6 – 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 Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Царик Богдан Романович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

головний науковий співробітник
Відділу термодружності Інституту механіки
ім. С. П. Тимошенка НАН України
д.ф.-м.н.



Ігор СЕНЧЕНКОВ

Підпис оф. Опонента д.ф.-м.н. Ігоря СЕНЧЕНКОВА

Засвідчую

Учений секретар Інституту механіки
ім. С. П. Тимошенка НАН України

д.т.н.



Юрій СКОСАРЕНКО

« 06 » травня 2025 року