

Prof. dr hab. inż. Sebastian Mróz

Częstochowa, 04.06.2019 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartłomieja Szweda

pt.: „Własności mechaniczne oraz eksploatacyjne połączeń lutowanych tytanu ze stalą austenityczną wykonanych z udziałem Al, Cu, Ni” – wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach z dnia 06 maja 2019 r.

Rozwijające się prężnie różne gałęzie gospodarki takie jak energetyka, transport czy przemysł maszynowy poszukują nowych rozwiązań materiałowych zapewniających m.in. większą trwałość, zwiększoną odporność na korozję czy mniejszy ciężar właściwy. W wielu przypadkach stosowanie konwencjonalnych i powszechnie używanych materiałów nie gwarantuje spełnienia coraz wyższych wymagań odbiorców. Stąd też, w wielu krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych od kilkadziesiąt lat prowadzone są intensywne prace badawcze dotyczące opracowania nowej grupy materiałów wielowarstwowych. Połączenie w jeden materiał różnych metali ma na celu poprawę parametrów użytkowych i funkcjonalnych. W materiałach wielowarstwowych jednym z głównych parametrów decydujących o ich możliwości zastosowania w konkretnym rozwiązaniu technicznym jest jakość połączenia, która powinna zapewnić spójność poszczególnych komponentów w warunkach eksploatacyjnych. Obecnie znanych jest wiele metod łączenia materiałów, do których można zaliczyć, m.in. metodę odlewania, zgrzewania tarcowego, wybuchowego lub dyfuzyjnego. W przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej jako metodę łączenia komponentów materiału wielowarstwowego wybrano metodę zgrzewania dyfuzyjnego (lutowania). O ile znanych jest wiele prac technicznych opisujących wybraną przez doktoranta metodę zarówno pod względem podstaw teoretycznych jak również jej aplikacyjnego zastosowania, to należy stwierdzić, że brak jest kompleksowych badań obejmujących wpływ parametrów procesowych (m.in. temperatury oraz materiału zastosowanego na warstwy przejściowe) na jakość złącza (wytrzymałość) oraz właściwości eksploatacyjne. Praca mgr inż. Bartłomieja Szweda dotycząca określenia wpływu temperatury procesu zgrzewania dyfuzyjnego oraz wpływu czystych metali (Al, Cu, Ni) sto-

sowanych jako warstwy przejściowe na właściwości wytrzymałościowe oraz eksploatacyjne w połączeniach stal nierdzewna – tytan wpisuje się w ogólnie światowe trendy badań. Dlatego też uważam, że podjęty przez Autora pracy temat należy uznać za uzasadniony i bardzo aktualny.

Recenzowana praca składa się z wprowadzenia, 5 rozdziałów, spisu literatury oraz spisu rysunków i tablic, streszczenia w języku polskim i angielskim zamieszczonych na 118 stronach maszynopisu. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 60% całej objętości pracy. Cytowana literatura (197 pozycji) jest bardzo poprawna i adekwatnie dobrana do tematyki rozprawy. Bibliografia zawiera fundamentalne prace dotyczące podstaw teorii mechanizmów zgrzewania dyfuzyjnego (lutowania w stanie stałym i ciekłym), a także najnowsze pozycje światowej literatury, które zostały opublikowane w okresie ostatnich 10 lat. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że w 18 pozycjach literaturowych doktorant jest współautorem, co może świadczyć o dogłębnej analizie podjętego do rozwiązania w rozprawie zagadnienia badawczego.

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Autor bardzo szczegółowo omówił podstawy teoretyczne charakteryzujące proces lutowania dyfuzyjnego (z udziałem fazy stałej i ciekłej). W tej części pracy uwagę również zwrócono na zalety i wady zgrzewania dyfuzyjnego w porównaniu do innych metod łączenia materiałów oraz przykłady aplikacyjnego zastosowania tego typu materiałów. Mając na uwadze tematykę pracy (jakość, wytrzymałość złącza – tworzenie się faz międzymetalicznych) szczególnie skupiono się na analizie układów równowagi fazowej dla metali zastosowanych w pracy do wykonania materiału wielowarstwowego.

Zdaniem recenzenta część informacji zawartych w przeglądzie literatury jest ogólnie znana i można je było pominąć, np. opis właściwości materiałów łączonych – tytanu i stali nierdzewnej, opis poszczególnych gatunków stali nierdzewnych. Informacje przedstawione w tym podrozdziale są ogólnie dostępne w poradnikach materiałowych. Ponadto w przeglądzie literatury całkowicie pominięto chociażby krótką wzmiankę o innych metodach stosowanych do łączenia stali nierdzewnej z tytanem. Bardzo krótka wzmianka została zamieszczona w podsumowaniu przeglądu literatury.

Przegląd literatury zakończony jest podsumowaniem, w którym jasno wskazano braki w dostępnej literaturze dotyczące zgrzewania dyfuzyjnego stali nierdzewnej z tytanem w stanie

stałym i ciekłym przy zastosowaniu warstw pośrednich Al, Cu i Ni. Umożliwiło to autorowi sformułowanie logicznego i jasno sprecyzowanego celu pracy w postaci określenia wpływu warstw pośrednich wykonanych z czystych metali na właściwości wytrzymałościowe i eksploatacyjne połączeń dyfuzyjnych Ti/stal nierdzewna.

Tezę pracy stanowi stwierdzenie *„Możliwe jest połączenie tytanu i stali austenitycznej za pośrednictwem przekładek z czystych metali (Al, Cu, Ni), które będzie charakteryzować się wyższymi własnościami mechanicznymi i eksploatacyjnymi, niż materiały rodzime. (...) Lutowanie dyfuzyjne materiałów podstawowych: tytanu i stali austenitycznej w stanie stałym jest korzystniejsze, niż lutowanie z udziałem fazy ciekłej.”*

Zdaniem recenzenta Autor niezbyt jasno wyjaśnił pod jakim względem zgrzewanie dyfuzyjne tytanu ze stalą austenityczną jest korzystniejsze w stanie stałym. Jakie kryterium zostało przyjęte do udowodnienia przedstawionego stwierdzenia: kryterium wytrzymałościowe czy eksploatacyjne? Uwaga do tej części pracy zostanie przedstawiona w dalszej części recenzji.

Dla osiągnięcia celów i udowodnienia tezy pracy Doktorant zrealizował bardzo szeroki zakres badań doświadczalnych w postaci:

- wykonania złączy Ti/stal nierdzewna z wykorzystaniem warstw pośrednich Al, Cu i Ni,
- określenia wpływu temperatury zgrzewania (Autor dla każdej warstwy pośredniej zastosował aż siedem wartości temperatury, jednakże nie dokonał podziału, przy których temperaturach łączenie odbywało się w stanie stałym, a dla których w stanie ciekłym) na strukturę złączy,
- badań metalograficznych wraz z identyfikacją faz w strukturze złącza,
- badań właściwości wytrzymałościowych i właściwości eksploatacyjnych złączy w tym odporności na korozję.

Tak kompleksowe podejście jest niewątpliwie nowością, dzięki czemu Autor mógł wyznaczyć bardzo interesujące związki pomiędzy parametrami procesowymi (temperaturą i materiałem warstwy pośredniej) a jakością i trwałością eksploatacyjną złącza. Pewnym niedociągnięciem pracy jest brak zilustrowanego schematu badań, co utrudnia jego analizę. Jako materiały poddane zgrzewaniu wybrano stal odporną na korozję w gatunku X5CrNi18-10 oraz stop tytanu Grade 2 z warstwami pośrednimi z metali, które wymieniono powyżej.

Najobszerniejszym rozdziałem pracy jest rozdział 4, w którym to Autor przedstawił obszerne wyniki badań własnych, począwszy od doboru materiałów, metodyki badawczej oraz,

co najbardziej istotne, kompleksowym badaniom obszarów złącza, zarówno pod względem jakościowym jak i trwałości eksploatacyjnej.

Analiza otrzymanych wyników badań strukturalnych z przeprowadzoną analizą fazową obszarów złącz otrzymanych przy różnych temperaturach zgrzewania oraz z zastosowaniem trzech metali jako warstwy pośrednie umożliwiła określenie charakteru połączenia (typu faz powstałych w trakcie zgrzewania). Wykazano dla jakiego zakresu temperatur zgrzewanie odbywa się w stanie stałym, a po przekroczeniu jakiej temperatury łączenie jest w stanie ciekłym.

W kolejnym rozdziale Autor określił właściwości wytrzymałościowe poprzez określenie twardości obszarów złącza oraz przeprowadzeniu prób ścinania i statycznej próby rozciągania. Na podstawie analizy otrzymanych wyników doktorant wyznaczył temperatury dla poszczególnych rodzajów materiałów warstwy pośredniej, dla których otrzymano najwyższe parametry wytrzymałościowe. Dla każdego z metali stosowanych na warstwy pośrednie maksymalne wartości wytrzymałości otrzymano dla temperatur, w którym zgrzewanie odbywało się w stanie stałym.

O ile w dostępnej literaturze można znaleźć, czasami bardzo szczątkowe, informacje dotyczące faz powstałych w trakcie zgrzewania dyfuzyjnego oraz wytrzymałości złącz to brak jest kompleksowych badań eksploatacyjnych uzyskanych połączeń, co określono w recenzowanej pracy. W ramach badań wyznaczono wartości współczynnika tarcia oraz zużycie obszarów złącza w zależności od zastosowanego metalu na warstwę pośrednią. Wykazano, że najniższy współczynnik tarcia oraz największą trwałość eksploatacyjną posiada złącze z warstwą pośrednią wykonaną z aluminium. Otrzymane wartości zużycia (trwałości eksploatacyjnej) powiązane z fazami, które występują dla badanych złącz. Jest to niewątpliwie nowość i jedno z głównych osiągnięć doktoranta.

W pracy wykonano również kompleksowe badania odporności korozyjnej otrzymanych złączy. Badania przeprowadzono zarówno dla środowiska kwasowego (korozja kwasowa) oraz zasadowego (korozja zasadowa). Największą odporność korozyjną otrzymano dla złącza, w którym warstwę pośrednią wykonano z niklu.

Praca zakończona jest podsumowaniem i wnioskami. W rozdziale tym w syntetyczny sposób przedstawiono nowość otrzymanych wyników badań dzięki kompleksowemu podejściu do postawionego problemu naukowego. Otrzymane wyniki badań potwierdziły zrealizowanie większości postawionych celów oraz założeń przyjętych w tezie pracy.

Uwagi do pracy:

Praca została przygotowana bardzo starannie, poprawnie pod względem redakcyjnym i językowym, jednakże Autor nie ustrzegł się pewnych nieścisłości, a niektóre zagadnienia nie zostały wyjaśnione w sposób wyczerpujący, (uwagi przytoczono w kolejności ich występowania w pracy):

1) str. 13.: grubość warstwy dyfuzyjnej na rys. 7 oznaczona jako d_d , natomiast w równaniu (5) jako y . Ponadto opis rys. 7 jest *grubość warstwy dyfuzyjnej*, a podpis pod rysunkiem *grubość strefy dyfuzyjnej*. Warstwa jest obszarem mierzalnym, a ściśle zdefiniowanie granic strefy może być utrudnione;

2) w pracy Autor posługuje się polskimi nazwami poszczególnych procesów, natomiast na stronach 16 i 21 dla zgrzewania w stanie stałym i ciekłym przytoczono nazewnictwo w języku angielskim, czy nie istnieją odpowiedniki przedstawionego nazewnictwa w języku polskim?

3) proszę o komentarz do stwierdzenia (str. 31): *„Dzięki spajaniu dyfuzyjnemu możliwe jest łączenie materiałów rodzimych bez konieczności udziału materiału dodatkowego w postaci lutu oraz topnika, tym samym spajanie dyfuzyjne jest doskonałym kandydatem do łączenia materiałów kompatybilnych, które są używane do implantacji medycznych [197].”* w kontekście postawionych celów i tezy pracy;

4) analizę XRD przeprowadzono *„Na podstawie wcześniej przeprowadzonego studium literatury naukowej dotyczącej spajania dyfuzyjnego badanych materiałów do analizy XRD wybrano następujące złącza: z przekładką aluminiową, wykonane w temperaturze 600°C oraz z przekładką miedzianą i niklową w temperaturze 900°C.”* Przy czym brak jest powołania na pozycje literaturowe i kryterium dla jakiego wybrano temperatury zgrzewania. Zdaniem recenzenta przyjęte temperatury odpowiadają kryterium wytrzymałościowemu złącz, co udowodniono na rys. 38;

5) wyniki pomiarów twardości przedstawiono w sposób opisowy, co powoduje, że ich analiza jest utrudniona. Nie można jednoznacznie określić jak zmieniała się twardość obszarów złącza podczas zgrzewania w stanie stałym i ciekłym;

6) badania eksploatacyjne oraz odporności na korozję przeprowadzono tylko dla temperatur, dla których otrzymano największą wytrzymałość złącza (zgrzewanie w stanie stałym) - kryterium wytrzymałościowe. Brak jest natomiast wymienionych powyżej badań dla pozostałych temperatur, w tym zgrzewania w stanie ciekłym. Stąd też nie można jednoznacznie stwierdzić,

że kryterium eksploatacyjne jest udowodnione (odpowiednia część tezy pracy) ze względu na brak badań w tym zakresie dla warunków zgrzewania w stanie ciekłym. W tekście brak jest komentarza autora dlaczego do badań eksploatacyjnych wybrał tylko te materiały, dla których otrzymał najwyższą wytrzymałość złącza.

Wnioski końcowe:

Biorąc pod uwagę aktualność doboru tematu, który ma bardzo istotne znaczenie poznawcze, właściwą i wartościową tezę rozprawy, a także umiejętności Doktoranta, który:

- wykazał bardzo dobre opanowanie warsztatu w inżynierii materiałowej oraz w inżynierii mechanicznej,
- potrafił zastosować nowoczesne metody badawcze do analizy uzyskanych bardzo złożonych połączeń,
- poprzez kompleksowe podejście wyjaśnienia wpływu parametrów zgrzewania (temperatury i metali zastosowanych na warstwę pośrednią) uzyskał bardzo cenne dane dotyczące samej budowy złącza oraz jego wpływu na wytrzymałość i trwałość eksploatacyjną, co może być podstawą dla projektowania nowej generacji materiałów wielowarstwowych o najwyższych właściwościach użytkowych i funkcjonalnych,
- sformułował poprawne i wartościowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań doświadczalnych.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt.: *„Własności mechaniczne oraz eksploatacyjne połączeń lutowanych tytanu ze stalą austenityczną wykonanych z udziałem Al, Cu, Ni”* spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Bartłomieja Szweda do publicznej obrony.

