

Prof. dr hab. inż. Jarosław Sęp
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

RECENZJA
rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta Kosturka nt.
„Badania niskocyklowego zmęczenia połączeń wykonanych metodą FSW
stopu AA2519”

I. Podstawy formalne i ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzję opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego.

Recenzowana rozprawa ma postać cyklu opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Cykl ten tworzy pięć powiązanych tematycznie publikacji [1-5] wyszczególnionych w wykazie umieszczonym poniżej. Przedstawione publikacje stanowią własne osiągnięcia badawczo-naukowe dotyczące tematyki związanej z badania niskocyklowego zmęczenia połączeń wykonanych metodą FSW (Friction Stir Welding - zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny) stopu AA2519.

W skład cyklu wchodzi następujące publikacje:

1. **Kosturek R.** (77%), Śnieżek L., Wachowski M., Torzewski J.: The Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Fatigue Properties of Sc-Modified AA2519 Friction Stir-Welded Joint, *Materials*, 12, 4, 2019, 1-17, <https://doi.org/10.3390/ma12040583>, 140 punktów wg listy MEiN.
2. **Kosturek R.** (81%), Śnieżek L., Torzewski M., Wachowski M.: Research on the Friction Stir Welding of Sc-Modified AA2519 Extrusion, *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, 9, 10, 2019, 1-15, <https://doi.org/10.3390/met9101024>, 70 punktów wg listy MEiN.
3. **Kosturek R.** (79%), Śnieżek L., Torzewski J., Wachowski M.: Low Cycle Fatigue Properties of Sc-Modified AA2519-T62 Extrusion, *Materials*, 13, 220, 2020, 1-12, <https://doi.org/10.3390/ma13010220>, 140 punktów wg listy MEiN.
4. **Kosturek R.** (78%), Śnieżek L., Torzewski J., Wachowski M.: The influence of welding parameters on macrostructure and mechanical properties of Sc-modified AA2519-T62 FSW joints, *Manufacturing Review*, 7, 28, 2020, 1-9, DOI: 10.1051/mfreview/2020025, 70 punktów wg listy MEiN.
5. **Kosturek R.** (71%), Śnieżek L., Torzewski J., Ślęzak T., Wachowski M., Szachogłuchowicz I.: Research on the Properties and Low Cycle Fatigue of Sc-modified AA2519-T62 FSW Joint, *Materials*, 13, 5226, 2020, 1-18, <https://doi.org/10.3390/ma13225226>, 140 punktów wg listy MEiN.

Praca [1] jest współautorską publikacją Doktoranta. Zawiera wyniki badań wpływu obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości zmęczeniowe wykonanych metodą FSW połączeń stopu AA2519 modyfikowanego skandem. Badaniom poddano złącza wykonane w dwóch seriach przy trzech zestawach parametrów procesu (dwie prędkości obrotowe narzędzia – 400 i 800 obr/min oraz dwie prędkości zgrzewania – 100 i 200 mm/min). Jedna z serii była poddana dodatkowo dwuetapowej obróbce cieplnej obróbce cieplnej w postaci przesycań połączonego z chłodzeniem w zimnej wodzie i starzenia. Wykazano niekorzystny wpływ obróbki cieplnej na właściwości zmęczeniowe połączeń FSW stopu AA2519. Badania zmęczeniowe uzupełniono bardzo rozbudowanymi analizami makrostrukturalnymi i mikrostrukturalnymi połączeń oraz przełomów rozważanych wariantów obróbkowych.

Praca [2] jest współautorską publikacją Doktoranta. Przedstawiono w nim wyniki badań wpływu parametrów procesu FSW (prędkości obrotowej narzędzia i prędkości zgrzewania) na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne połączeń stopu AA2519 modyfikowanego skandem. Do wykonania próbek wykorzystano wyciskane płaskowniki, materiał nie był obrabiany cieplnie. Przebadano siedem wariantów obróbkowych różniących się parametrami procesu. Stwierdzono, że wartości wytrzymałości na rozciąganie wykonanych połączeń nie odbiegają w sposób znaczący od wytrzymałości wyznaczonej dla nieobrobionego cieplnie stopu AA2519 (stanowią od 88,9% do 95,4% wytrzymałości materiału podstawowego). Ocenę właściwości mechanicznych uzupełniono o rozbudowane badania mikrostrukturalne.

Opracowanie [3] jest współautorską publikacją Doktoranta i zawiera wyniki badań niskocyklowych właściwości zmęczeniowych stopu AA2519-T62 modyfikowanego skandem po dwuetapowej obróbce cieplnej (przesycań + starzenie). Badania przeprowadzono na pięciu poziomach odkształcenia całkowitego. Na ich podstawie zrealizowanych eksperymentów opracowano zależności Ramberga-Osgooda oraz Mansona-Coffina-Basquina dla stopu AA2519-T62.

W pracy [4] poruszono zagadnienie wpływu parametrów sterowalnych procesu FSW na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne połączeń wykonanych ze stopu AA2519-T62 modyfikowanego skandem. Do badań wybrano pięć wariantów technologicznych różniących się prędkością obrotową narzędzia (rozważano pięć wartości) oraz prędkością zgrzewania (rozważano cztery wartości). Na podstawie przeprowadzonych badań wskazano zakres wartości parametrów procesu, dla których uzyskano pozbawioną defektów mikrostrukturę złącza oraz efektywność połączenia w przedziale 70,2% do 85,4%. Dla analizowanych wariantów przeprowadzono także badania niskocyklowego zmęczenia wyłaniając najkorzystniejszy zakres parametrów procesu z punktu widzenia tego kryterium.

W pracy [5] przedstawiono wyniki badań dotyczących właściwości mechanicznych oraz niskocyklowego zmęczenia połączenia stopu AA2519-T62 wykonanego przy wykorzystaniu technologii FSW. Do badań wybrano jeden z wariantów połączenia, które poddano rozbudowanym analizom. Obejmowały one: analizę mikrostruktury, badania rozkładu mikrotwardości, badania wytrzymałości na rozciąganie, badania naprężeń własnych, badania niskocyklowego zmęczenia oraz badania fraktograficzne. Wykazano 83% efektywność połączenia, stwierdzono rozciągające naprężenia własne w spoinie i jej otoczeniu oraz opracowano wykres Mansona-Coffina-Basquina. Wyznaczona wartość współczynnika wytrzymałości zmęczeniowej dla połączenia FSW jest ponad trzykrotnie mniejsza od wartości wyliczonej dla stopu AA2519.

Analizując zaprezentowany cykl publikacji można stwierdzić, że:

- zawiera on pięć publikacji w czasopiśmie wydawnictwa MDPI, zgodnie z obowiązującą punkcją MEiN publikacje w cyklu mają 70 (2 publikacje) oraz 140 (3 publikacje) punktów,

- wszystkie publikacje mają charakter współautorski, udział Kandydata wynosi w nich od 71% ([5]) do 81% ([2]), średni procentowy udział jest równy 77,2%,

- zgodnie z danymi z artykułów udział Doktoranta w pracach zbiorowych polegał na: opracowaniu koncepcji, współudziale w realizacji badań oraz opracowaniu roboczej wersji artykułu [1,3,5]; współopracowaniu koncepcji artykułu i metodyki badań [2,3,5], współudziale w realizacji badań i opracowaniu ich wyników [2,3,5] oraz współudziale w opracowaniu roboczej wersji artykułu [2]; praca [4] nie zawiera szczegółowego opisu wkładu Autorów,

- jest on spójny tematycznie i zawiera wyniki badań dotyczących stanu warstwy wierzchniej, właściwości mechanicznych oraz niskocyklowego zmęczenia połączeń stopu AA2519 wykonanych metodą FSW uzupełnione o wymienione właściwości materiału podstawowego

- jest aktualny i zawiera wyniki oryginalnych badań,
- zawiera opracowania na wysokim poziomie merytorycznym,
- wykazuje znaczący udział merytoryczny Doktoranta w pracach zbiorowych,
- prace zawierają wyniki badań eksperymentalnych oraz modele zjawisk zmęczeniowych,
- badania eksperymentalne zrealizowano przy wykorzystaniu nowoczesnej aparatury.

Cykl artykułów stanowiący rozprawę doktorską jest poprzedzony rozbudowanym streszczeniem-przewodnikiem (73 strony) systematyzującym wyniki badań zawarte w cyklu publikacji. Streszczenie zawiera:

- wstęp
- cztery rozdziały główne (Analiza literaturowa problemu, Cel i zakres pracy, Wyniki badań własnych, Podsumowanie i wnioski)
- bibliografię liczącą 103 pozycje literaturowe.

Po cyklu artykułów zamieszczono wykaz dorobku naukowego Doktoranta.

II. Ocena merytoryczna rozprawy

2.1. Aktualność i znaczenie podjętej tematyki

W pracy podjęto tematykę badania niskocyklowego zmęczenia połączeń stopu AA2519 wykonanych metodą zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny. Aktualność i znaczenie analizowanych zagadnień determinują dwie kwestie główne. Pierwsza z nich dotyczy badanego materiału. Należy on do wysokowytrzymałych stopów aluminium, które znajdują szerokie zastosowanie w nowoczesnych konstrukcjach dając możliwość zmniejszenia ich masy z jednoczesnym zachowaniem wytrzymałości. Stop AA2519 modyfikowany skandem oraz cyrkonem z racji swoich właściwości (m, in. bardzo korzystne właściwości wytrzymałościowe i odporność balistyczna) ma szansę na szerokie zastosowanie, w tym w przemyśle zbrojeniowym. Jednym z czynników ograniczających w tym zakresie są problemy z wykonywaniem połączeń spójnościowych tego materiału przy wykorzystaniu tradycyjnych technologii, np. spawania. Zastosowanie do wykonywania połączeń w miejsce technologii klasycznych zgrzewania tarcowego z przemieszaniem materiału zgrzeiny (FSW -Friction Stir Welding) może pozwolić na pokonanie ograniczeń w tym zakresie. Badana w pracy w kontekście wykonywania połączeń technologia to druga kwestia determinująca aktualność i znaczenie podejmowanej w pracy tematyki. Technologia FSW została opracowana trzydzieści lat temu, ale w dalszym ciągu jest badana w różnorodnych aspektach dotyczących mechanizmów tworzenia połączenia oraz warunkujących jej praktyczne zastosowania. Jednym z takich aspektów jest wytrzymałość zmęczeniowa połączenia – w wielu przypadkach kluczowa z punktu widzenia aplikacji w konstrukcjach narażonych na występowanie naprężeń zmiennych.

W rozprawie doktorskiej podjęto zatem aktualną i istotną z punktu widzenia naukowego i wdrożeniowego tematykę. Wysoko należy ocenić jej aspekt naukowy ukierunkowany na identyfikację niskocyklowych właściwości zmęczeniowych połączeń spajanych wykonanych metodą FSW stopu AA2519 oraz aspekt użytkowy mający na celu określenie możliwości zastosowania rozważanych połączeń w konstrukcjach narażonych na obciążenia zmienne.

2.2. Realizacja badań i uzyskane rezultaty

Praca ma w przeważającej części charakter eksperymentalny. W jej ramach przeprowadzono badania wpływu obróbki cieplnej oraz wybranych parametrów procesu FSW (prędkości obrotowej narzędzia oraz dwie prędkości zgrzewania) na makrostrukturę, mikrostrukturę, właściwości mechaniczne oraz właściwości zmęczeniowe połączeń stopu AA2519. W rozprawie przedstawiono także odpowiednie wyniki badań właściwości materiału podstawowego, które były poziomem odniesienia dla właściwości połączeń.

Praca ma w zdecydowanej większości charakter eksperymentalny. Badania realizowano przy wykorzystaniu nowoczesnej aparatury naukowo-badawczej. Określano w nich wybrane właściwości użytkowe połączeń w odniesieniu do materiału podstawowego. Co bardzo istotne, nie porzeczano tylko na porównaniu właściwości, ale poszukiwano także przyczyn uzyskiwanych w badaniach wyników liczbowych. Stąd ocenę właściwości mechanicznych uzupełniają bardzo liczne badania dotyczące makrostruktury i mikrostruktury połączeń, analiz rozkładu pierwiastków stopowych oraz składu chemicznego składników fazowych i wydzielen. Dzięki temu możliwe było określenie przyczyn stwierdzanych eksperymentalnie faktów, co jest istotą pracy naukowej. Ponadto, bazując na wynikach badań określono modele opisujące właściwości zmęczeniowe badanego stopu.

Przeprowadzone badania pozwoliły na:

- określenie efektywności połączenia metodą FSW stopu AA2519 w stanie nieobrobionym cieplnie,
- stwierdzenie niekorzystnego wpływu obróbki cieplnej po procesie spajania na właściwości zmęczeniowe połączeń FSW stopu AA2519,
- określenie zakresu badanych parametrów procesu pozwalających na uzyskiwanie połączeń o dobrej efektywności oraz akceptowalnych właściwościach zmęczeniowych,
- scharakteryzowanie zmian mikrostruktury w trakcie wykonywania połączenia,
- określenie odkształceń podczas statycznej próby rozciągania połączeń FSW,
- określenie zmian warstwy wierzchniej oraz dysypacji energii połączeń i materiału podstawowego w trakcie niskocyklowego zmęczenia,
- określenie miejsc inicjacji przelomów zmęczeniowych wraz z powiązaniem z mikrostrukturą oraz rozkładem naprężeń własnych.

Analiza efektów uzyskanych badań pozwala stwierdzić, że w pracy rozwiązano oryginalny problem naukowy związany z doбором parametrów procesu FSW oraz opisem właściwości mechanicznych i zmęczeniowych połączeń stopu AA2519. W szczególności dotyczy to:

- doboru parametrów procesu FSW umożliwiających wytwarzania połączeń stopu AA2519 o wysokiej jakości i wytrzymałości w warunkach występowania naprężeń zmiennych w zakresie niskocyklowym,
- określenia wpływu obróbki cieplnej przed i po procesie realizacji połączeń FSW na ich strukturę i właściwości wytrzymałościowe,
- wykonania badań niskocyklowych umożliwiających opisanie zachowania się rozpatrywanego połączenia FSW i materiału rodzimego w oparciu o odkształceniowe charakterystyki zmęczeniowe,
- identyfikacji głównych czynników wpływających na dekohezję połączeń.

Cele pracy zostały osiągnięte, a jej zakres i poziom naukowy w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Tematyka rozprawy zawiera się w ramach dyscypliny Inżynieria Mechaniczna. Recenzowana praca może być zatem podstawą nadania stopnia naukowego doktora.

2.3. Strona edytorska i redakcyjna pracy

Praca składa się z trzech głównych elementów: rozbudowanego streszczenia-przewodnika, cyklu publikacji oraz wykazu dorobku naukowego Doktoranta. Praktycznie w całości napisana jest poprawnym i zrozumiałym językiem. Występują w niej jedynie bardzo nieliczne usterki o charakterze edytorskim lub redakcyjnym. Przykładowo:

-str. 7 ... wysoką zawartości miedzi...

- str. 10 w podpisie rys. nr 2 „Schemat ilustrujący wplywu procesu FSW na spajane elementy...”,

- str. 13-14 opisy osi na rys. 4 języku angielskim,

- str. 16 użycie słowa z języka angielskiego „pinu”,

- str. 18 ... przy użyciu stanowisko VPG...

Oczywiście w przypadku recenzowanej rozprawy nie mają one najmniejszego negatywnego wpływu na zrozumienie jej treści.

2.4. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Każda praca naukowa nasuwa pewne pytania i wątpliwości, jak również stanowi punkt wyjścia do dyskusji i wyznaczania kierunków dalszych badań. Mam w tym kontekście sformułowane poniżej uwagi do recenzowanej rozprawy.

1. Rozpatrując wpływ parametrów procesu FSW na właściwości połączeń analizowano dwa z nich: prędkość obrotową narzędzia i prędkość zgrzewania. Dwa pozostałe – siłę osiową oraz kąt skręcenia narzędzia, które mogą również istotnie rzutować na efekty procesu, przyjęto na stałym poziomie. Założone wartości wynosiły odpowiednio: siła osiowa 17 kN, kąt skręcenia narzędzia 2°. Powstaje pytanie, na jakiej podstawie przyjęto wymienione wartości parametrów procesu?

2. Dlaczego do dalszych badań zmęczeniowych wybrano wariant oznaczony jako Z81? Wykazuje on największą efektywność złącza, ale niewiele ustępuje mu (ok. 3%) w tym zakresie wariant oznaczony jako Z61. Z kolei wariant Z61 charakteryzuje się o 25% większą od wariantu Z81 liczbą cykli do zniszczenia zmęczeniowego.

3. Przy analizie wyników badań wytrzymałości i efektywności złączy przeprowadzono statystyczną analizę wyników (tab. 7 w streszczeniu). Na podstawie ilu powtórzeń na każdym z poziomów obliczano zawarte w tabeli wartości rozrzutu wyników? Część prezentowanych wyników nie zawiera analizy zmienności. Czy zatem pozostałe prezentowane liczbowe wyniki wielkości charakteryzujących połączenia są wynikiem realizacji określonej liczby powtórzeń eksperymentów na każdym z przyjętych poziomów parametrów? Pytanie to jest szczególnie adresowane do danych zawartych w tabeli nr 5 publikacji [A4], bo na ich podstawie wybierano wariant do dalszych analiz.

4. Z punktu widzenia podkreślanych w pracy możliwości aplikacyjnych technologii FSW oraz stawianego celu użytkowego pracy trochę brakuje we wnioskach przedstawionych w streszczeniu oraz pracy [A5] jednoznacznego zestawienia właściwości zmęczeniowych połączenia oraz materiału rodzimego.

5. Na str. 6 w streszczeniu podkreślono rolę stopów aluminium w rozwoju lotnictwa. To prawda, ale należy pamiętać, że w konstrukcjach współczesnych statków powietrznych stopy aluminium są zastępowane przez kompozyty.

6. Na str. 20 w streszczeniu znalazło się sformułowanie: „...koncentrację pierwiastka cięższego od aluminium...”. To nieprecyzyjne stwierdzenie chodzi o pierwiastek o większym ciężarze właściwym.

7. Formułując kierunki dalszych badań Autor wskazuje na zastosowania technologii FSW do uzyskiwania połączeń materiałów różniamiennych. Wydaje się, że interesującym kierunkiem dalszych badań, zwłaszcza z punktu widzenia praktycznych zastosowań technologii FSW do wykonywania połączeń ze stopu AA2519, może być doskonalenie właściwości zmęczeniowych uzyskiwanych złączy. W tym kontekście pomocne może być zastosowanie technik optymalizacyjnych do doboru parametrów procesu oraz zastosowanie technologii umożliwiających eliminowanie rozciągających naprężeń własnych ze spoiny oraz strefy wpływu ciepła.

Wskazane uwagi o charakterze dyskusyjnym i krytycznym nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy, która spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

III. Podsumowanie i wniosek końcowy

W pracy doktorskiej autorstwa mgr inż. Roberta Kosturka podjęto interesujący i aktualny naukowo temat ukierunkowany na dobór parametrów procesu FSW oraz opis właściwości mechanicznych i zmęczeniowych połączeń stopu AA2519. Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że Autor rozwiązał oryginalny problem naukowy związany z efektywnym doбором parametrów procesu, określeniem wpływu obróbki cieplnej na właściwości połączeń, określeniem odkształceniowych charakterystyk zmęczeniowych połączeń oraz identyfikacją głównych czynników wpływających na dekohezję złączy. Ponadto, przy rozwiązywaniu problemu naukowego Autor rozprawy wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawowe stawiane Kandydatom do stopnia naukowego doktora. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii technicznej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych badań oraz poziom naukowy rozprawy doktorskiej wnioskuje o jej wyróżnienie