

Dęblin 12.04.2021

Prof.dr hab. inż. Jerzy Bajkowski
Lotnicza Akademia Wojskowa
08-521 Dęblin
Ul. Dywizjonu 303 Nr 35

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Roberta Kosturka

p.t.

Badania niskocyklowego zmęczenia połączeń wykonanych metodą FSW stopu AA2519

Opracowana w związku z pismem 1951-2021 z dn.26.06.2021r.
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna”
Wojskowej Akademii Technicznej
Prof. dr. hab. inż. Jerzego Małachowskiego

1. Uwagi dotyczące tematu rozprawy, sformułowanego celu i tezy oraz zakresu pracy

Przedmiotem pracy są naukowe, technologiczne i aplikacyjne zagadnienia obejmujące badania niskocyklowego zmęczenia połączeń wykonanych metodą FSW (*Friction Stir Welding*), jednego z wysokowytrzymałościowych stopów aluminium jakim jest zmodyfikowana przez Oddział Metali Lekkich Instytutu Metali Nieżelaznych w Skawinie, podwyższonym dodatkiem cyrkonu i skandu, wersja stopu AA2519,

Mimo że Autor koncentruje się na prezentacji dokonań badawczych, które odnoszą się do jednego stopu, to rezultaty przeprowadzonych badań stanowią zasób danych, które mogą być z powodzeniem wykorzystane w badaniach obejmujących całą grupę podobnych materiałów spajanych metodą FSW.

Cel pracy został sformułowany dwuczęściowo, a więc jako cel naukowy i użytkowy. Dzięki takiemu rozdzieleniu Autor wyraźnie mógł wskazać zarówno poznawczy jak i aplikacyjny zbiór swoich dokonań związanych z opracowywanymi zagadnieniami.

Zaproponowany pięciopunktowy zakres pracy zagwarantował moim zdaniem pełną realizację założonych jej celów.

W dysertacji, w bezpośredni sposób nie została zaprezentowana teza pracy. W świetle osiągniętych rezultatów badań jej sformułowanie nie byłoby trudne, a wypełniłoby jeden ze podstawowych składników każdej pracy doktorskiej.

2. Struktura i ogólna charakterystyka pracy

Strukturę pracy stanowią dwie zasadnicze jej części oraz uzupełnienie zawierające informacje o dotychczasowych osiągnięciach naukowo badawczych i innych Doktoranta.. Pierwszą jest, poprzedzone spisem treści oraz wykazem stosowanych w pracy oznaczeń, obszernie jej streszczenie z zamieszczonym wykazem przywoływanych w tekście streszczenia odpowiednich opracowań literaturowych. Druga, to zbiór pięciu jednotematycznych artykułów opublikowanych w czasopiśmie naukowych uzupełnionych oświadczeniami dotyczącymi współautorskiego udziału innych osób w zaprezentowanych pracach. Uzupełniające pracę dodatkowe informacje o dorobku naukowym i innych dokonaniach naukowo-badawczych i organizacyjnych Autor potraktował jako jej trzecią część.

Stanowiące pierwszą część rozprawy obszernie streszczenie jest przewodnikiem po szczegółowych zagadnieniach naukowo badawczych, które zostały opublikowane w pięciu artykułach stanowiących drugą, podstawową i najważniejszą część analizowanej dysertacji. Materiał zamieszczony w tej części pracy uzupełnia także informacje zawarte w opublikowanych pracach i uzupełnia prezentację naukowych i aplikacyjnych osiągnięć Autora rozszerzając bądź je uszczegóławiając.

Obejmująca 75 stron prezentacja pierwszej części pracy została podzielona na pięć rozdziałów merytorycznych; szósty jest spisem bibliografii.

W krótkim jednostronicowym wstępie do pracy Autor wskazuje na bardzo ważną rolę jaką aktualnie odgrywają, w wysoko zaawansowanych wytworach technicznych, w tym w technice wojskowej, lotniczej i kosmicznej, wysokowytrzymałościowe stopy aluminium. Szczególne zainteresowanie w tej grupie stopów, ze względu na unikalne właściwości wytrzymałościowe oraz perspektywę szerokiego wykorzystania w przemyśle zbrojeniowym budzi modyfikowany odpowiednimi dodatkami, wytwarzany w Skawinie produkt o oznaczeniu AA2519. Będąc materiałem o unikalnych właściwościach wytrzymałościowych ale jednocześnie materiałem sprawiającym duże kłopoty w procesie spajania metodami tradycyjnymi, stał się głównym podmiotem zainteresowania prezentowanej dysertacji. Autor podjął się naukowego i inżynierskiego wyjaśnienia możliwie wielu zagadnień poznawczych jakie mają miejsce w procesie łączenia elementów wykonanych z tego stopu metodą FSW oraz opracowania inżynierskich wskazań technologicznych.

Materiał zamieszczony w drugim rozdziale streszczenia pracy to szczegółowy przegląd dostępnej literatury związanej z zasadniczym jej tematem. W pierwszej jego części (*podrozdział 2.1*) Autor przedstawił właściwości i technologię otrzymywania stopu AA2519, a także jego modyfikacje; podkreślono również trudności spajania elementów przy użyciu tradycyjnych metod ich łączenia. W podrozdziale drugim (*2.2*) została przybliżona technologia spajania stopów aluminiowych metodą FSW, przytoczone zalety łączenia elementów tą metodą, omówiono również jej wady oraz fizyko-chemiczne i metalograficzne właściwości finalnej struktury spajania omawianej grupy stopów. Podrozdział trzeci (*2.3*) został poświęcony omówieniu właściwości wytrzymałościowych połączeń otrzymanych podczas spajania z wykorzystaniem metody FSW innych stopów aluminium, które należą do serii 2XXX. Dostępne w literaturze rezultaty badań dotyczą głównie mikrostruktury połączeń oraz właściwości mechanicznych. Mimo że zostały

uzyskane w statycznych próbach rozciągania to jednak reprezentują one obszerny zbiór wyników badań, które dotyczą zarówno różnych technologii wykonywania połączenia metodą FSW, jak również bardzo różnych wartości parametrów jakie obowiązywały podczas prowadzonych doświadczeń. Na szczególną uwagę zasługują m.in. przytoczone wyniki niskocyklowych badań zmęczeniowych połączeń, powszechnie stosowanego w lotnictwie, stopu AA2219-T62.

Trzeci rozdział dysertacji w całości został poświęcony sformułowaniu celu oraz zakresu pracy.

W rozdziale czwartym streszczenia przedstawiony został główny merytoryczny materiał dotyczący badań połączeń omawianego stopu jakie zostały zrealizowane przez Doktoranta. W pierwszym podrozdziale (4.1) zaprezentowana została metodyka badawcza połączeń elementów metodą FSW oraz rodzaje próbek jakie zostały użyte w badaniach statycznych rozciągania oraz niskocyklowego zmęczenia. W podrozdziale drugim (4.2) scharakteryzowany został materiał rodzimy stopu AA2519, który umocniony po obróbce cieplnej przyjmuje postać AA2519-T62. Opisany został jego skład chemiczny, mikrostruktura metalograficzna oraz jego statyczne właściwości wytrzymałościowe. W trzecim podrozdziale (4.3) zaprezentowane zostały rezultaty badań stopu AA2519 w stanie nieulepszanym cieplnie, a w kolejnym (podrozdział 4.4), szczegółowe wyniki badań wpływu obróbki cieplnej zarówno na mikrostrukturę złącza jak i parametry niskocyklowego zmęczenia połączeń badanego stopu. W podrozdziale piątym (4.5) zamieszczono materiał, który poświęcony został analizie doboru parametrów zgrzewania metodą FSW stopu AA2519, w stanie po obróbce cieplnej. Analizę i kryterium wyboru próbek oparto na rezultatach badań mikrostruktury oraz niskocyklowego zmęczenia pięciu, spośród wcześniej wybranych ośmiu, próbek materiałowych wyselekcjonowując najbardziej korzystne parametry technologiczne spajania. Szczegółowe właściwości mikrostrukturalne i wytrzymałościowe połączenia FSW stopu AA2519-T62 są treścią podrozdziału szóstego (4.6), a wyniki badań niskocyklowego zmęczenia tego połączenia zostały zaprezentowane w podrozdziale siódmym (4.7) pracy. W ostatnim podrozdziale (4.8) rozdziału 4. zamieszczona została analiza otrzymanych rezultatów badań zmęczeniowych stopu AA2519-T62, w odniesieniu do wyników materiału rodzimego.

Końcowym merytorycznym podsumowaniem badań własnych Doktoranta jest materiał zamieszczony w rozdziale piątym pracy, a ostatni rozdział obszernego streszczenia pracy to spis prac naukowych i badawczych bezpośrednio związanych z pracą.

Główny i najważniejszy materiał merytoryczny, jaki został przedstawiony przez Doktoranta do oceny jako rozprawa doktorska stanowi zbiór pięciu jednotematycznych prac, które zostały opublikowane w takich czasopismach, jak *Materials* (artykuł oznaczony jako A1 -2019r., A3 -2020r oraz., A5 -2020r.), *Metals* (A2-2019r.) i *Manufacturing* (A4 -2020r.). Uzupełnieniem informacji o autorskim wkładzie Doktoranta w opracowanie wszystkich wymienionych prac są odpowiednie oświadczenia współautorów.

Końcowym elementem pracy jest spis dorobku naukowego Doktoranta, a w tym: pozostałych recenzowanych prac naukowych i badawczych, wystąpień na konferencjach

naukowych krajowych i międzynarodowych oraz nierecenzowanych materiałów prezentowanych na konferencjach, realizowanych projektów badawczych, dokonań organizacyjnych i odbytych praktyk.

3. Ogólna ocena merytoryczna

Podzielona na trzy części, opiniowana rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, streszczenia i spisu cytowanej w nim literatury, zbioru pięciu obszernych artykułów, które zostały opublikowane w trzech wysoko punktowanych czasopismach znajdujących się na liście Ministerstwa Edukacji i Nauki i stanowią główny materiał merytoryczny dysertacji oraz części, w której przybliżone zostały pozostałe dotychczasowe dokonania naukowo-badawcze i inne Doktoranta. Całość została zaprezentowana na 156 stronach.

Wykaz literatury, którą Autor przytacza w obszernym 75. stronicowym streszczeniu obejmuje 103 pozycje bibliograficzne i 5 odwołań do obowiązujących norm bezpośrednio związanych z prowadzonymi badaniami. Wszystkie omawiane artykuły dotyczą problemów, które są bezpośrednio związane z analizowanymi w pracy. Większość z nich przywoływana jest zarówno w streszczeniu pracy, jak i w prezentowanych artykułach kilkakrotnie. Każde stwierdzenie Autora dotyczące wybranych cech metalograficznych lub właściwości mechanicznych stopów serii 2XXX jest udokumentowane odpowiednią pozycją literaturową. Biorąc pod uwagę staranny dobór pozycji bibliograficznych (*tylko 8 to klasyczne książkowe opracowania z ubiegłego wieku, pozostałe opublikowane zostały w wieku 21, a większość dotyczy ostatniego dziesięciolecia*), precyzyjną formę dokumentowania wszystkich stwierdzeń opisujących analizowane zagadnienia, a także wyjątkowo przystępną formę autorskiej narracji oceniam tę część pracy bardzo wysoko.

W streszczeniu pracy zarówno naukowy jak i aplikacyjny cel pracy zostały sformułowane w sposób dość szeroki. Dzięki temu możliwe było uogólnienie wszystkich celów cząstkowych jakie precyzyjnie zostały sformułowane w każdym z artykułów składowych dysertacji, zreżumowujących ich jednotematyczny charakter.

Podobne zdanie wyrażam o zakresie pracy. Na jego ogólny charakter składają się cząstkowe zadania zrealizowane i opisane w kolejnych opublikowanych pracach wchodzących w skład rozprawy. Lektura artykułów będących częściami rozprawy potwierdza ich kompatybilność z kolejnymi punktami ogólnego zakresu pracy jaki został zaprezentowany w trzecim rozdziale streszczenia, w pełni gwarantując osiągnięcie założonych celów naukowych i aplikacyjnych. Również i ten fragment pracy oceniam bardzo pozytywnie.

Wspomniany w pierwszej części recenzji brak sformułowanej tezy pracy nie ma większego znaczenia w ogólnej pozytywnej ocenie materiału, który został zamieszczony w trzecim rozdziale streszczenia dysertacji.

Wysoko oceniam układ edytorski tej nietypowej jak na dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna, pracy. Podstawowym założeniem Autora było zaprezentowanie w możliwie zwartej formie całości dokonań naukowych i badawczych jakie w całości zostały przedstawione w artykułach. W kolejnych podrozdziałach rozdziału czwartego streszczenia pracy Doktorant prezentuje więc najważniejsze osiągnięcia zaprezentowane w opublikowanych pracach. Tytuły omawianej części streszczenia nie są prostym

tłumaczeniem tytułów artykułów. W kolejnych podrozdziałach omówiono podobne zagadnienia, które pojawiały się we wszystkich zgromadzonych i opublikowanych pracach. Takie syntetyczne ujęcie uważam za wyjątkowo udane. Dzięki temu streszczenie ma wyraźny charakter przewodnika po zagadnieniach jakie wystąpiły w kolejnych publikowanych w różnym czasie pracach. Nie stało się więc zwykłym streszczeniem kolejnych artykułów. Taka przemyślana forma opisu rozwiązywanych problemów, a nie kolejnych opublikowanych prac, zasługuje na wysoką ocenę zarówno z punktu widzenia merytorycznego jak i edytorskiego. Przy lekturze artykułów czytelnik bez trudu odnajduje w kolejnych pracach wspólne zagadnienia jakie pojawiały się na różnych etapach ich realizacji.

Szczegółowa ocena merytoryczna wszystkich pięciu artykułów przedstawionych do oceny jako rozprawa doktorska, została dokonana przez grono specjalistów wyznaczonych przez redakcyjne komitety naukowe. Są to wszystkie czasopisma o wysokiej renomie naukowej i wysoko punktowane na liście ministerialnej. Dlatego swoją ocenę zawartego w nich materiału ograniczam do ogólnej oceny każdego z nich przyjmując jako zasadnicze kryterium, którym jest odpowiedź na pytanie: czy forma, objętość, poziom naukowy i spójność prezentowanego materiału odpowiada kryteriom jakie są niezbędne do uznania całości jako rozprawa doktorska?. Moja odpowiedź na to postawione przez siebie pytanie jest jednoznacznie pozytywna co postaram się udowodnić poniżej.

Każdy ze składników rozprawy jest starannym i obszernym opracowaniem zagadnień naukowych, które potwierdzone zostały wszechstronnymi, mikrostrukturalnymi i wytrzymałościowymi zmęczeniowymi badaniami laboratoryjnymi .

Artykuł oznaczony przez Doktoranta jako A1 pt. *The Influence of Post-Weld Heat Treatment on the Microstructure and Fatigue Properties of Sc-Modified AA2519 Friction Stir-Welded Joint* jest 17-stronicowym opracowaniem, które w sposób bezpośredni wskazuje zasadniczy temat zainteresowań Doktoranta. Można je zdefiniować jako kompleksowe badania połączeń wykonanych metodą FSW, elementów ze stopu AA2519 i jego modyfikacji. Odnosząca się do wszystkich zgromadzonych artykułów wspomniana wcześniej kompleksowość badań, w każdym z prezentowanych przypadków badanych połączeń, obejmuje szeroką prezentację i szczegółową analizę otrzymanych rezultatów badań zarówno metalograficznych jak i wytrzymałościowych, a w tym w szczególności, niskocyklowych badań zmęczeniowych.. Zostały one zaprezentowane zarówno we wspomnianym wyżej artykule oznaczonym jak A1, jak również w 15 stronicowej pracy (A2) pt. *„Research on the Striction Stir-Welding of Sc- Modifies AA2519T62 Extrusion”* oraz w 12-stronicowej pracy (A3) pt. *“Low Cycle Fatigue Properties of Sc-modified AA2519-T62 Extrusion”*.

Dwie pierwsze z wymienionych prac zostały opublikowane w czasopiśmie „Metals”, a trzecia (A3) w periodyku „Materials”. Dwa kolejne artykuły zostały zamieszczone w czasopismach „Manufacturing Review” (A4) oraz „Metals” (A5). W 9-stronicowej pracy oznaczonej jako A4, pt. *„The infuence of welding parameters on macrostructure and mechanical properties of Sc-modified AA2519-T62 FSW joint”*, przedstawione zostały rezultaty badań oraz analiza makrostruktury połączenia elementów stopu AA2519-T62

modyfikowanego skandem, a w 18-stronicowej pracy (A5) pt. "Research on the Properties and Low Cycle Fatigue Sc-Modified AA2519-T62 FSW Joint" wyniki badań i szczegółowa analiza właściwości mikrostrukturalnych połączeń tego samego stopu metodą FSW.

Wszystkie wymienione prace cechuje wysoki poziom naukowy i profesjonalizm dotyczący prezentacji zarówno rezultatów badań jak i przeprowadzonej analizy. Zgromadzony materiał jest ważny zarówno z punktu widzenia poznawczego jak również aplikacyjnego. Charakteryzuje go również wspomniana już wcześniej kompleksowość badań. We wszystkich przypadkach badanych połączeń stopów, a także w przypadku badań materiału rodzimego prezentowane rezultaty badań, analiza obejmuje zarówno badania makrostrukturalne jak i mikrostrukturalne oraz badania wytrzymałościowe dotyczące niskocyklowego zmęczenia połączeń.

W moim przekonaniu materiał zaprezentowany w pięciu omówionych wyżej artykułach wypełnia wszystkie niezbędne kryteria jakie są konieczne do uznania go za rozprawę doktorską. Przedstawione do oceny wymienione wyżej prace są opracowaniami współautorskimi. Udział Doktoranta jest w nich dominujący bo wynosi średnio ponad 76%.

Należy podkreślić, iż oprócz dorobku naukowego i badawczego jaki zaprezentowany został przez Doktoranta jako dokument wypełniający niezbędne warunki rozprawy doktorskiej Jego pozostały dorobek naukowy i badawczy jest również znaczący. W syntetycznym zestawieniu został on zaprezentowany w trzeciej części pracy. Obejmuje on (łącznie z przedstawionymi do oceny jako praca doktorska) 16 artykułów w czasopismach znajdujących się na liście MEiN, 11 spoza tej listy, 11 publikacji w materiałach konferencyjnych, prezentację referatów na 1 międzynarodowej i 2 konferencjach krajowych oraz czynne uczestnictwo w trzech projektach badawczych. Doktorant był też recenzentem kilkunastu prac opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Odbił także kilka praktyk w Instytutach i laboratoriach badawczych.

Ocena bibliometryczna dorobku Doktoranta jest wysoka. Potwierdzają to następujące liczby znajdujące się w następujących bazach bibliometrycznych:

- wg. Web of Science: indeks Hirscha 5, liczba publikacji 22, a cytowani 65;
- wg. bazy Scopus indeks Hirscha 6, liczba publikacji 21, a cytowani 71;
- wg. bazy Google Scholar indeks Hirscha 6, liczba publikacji 25, a cytowani 90;

Całkowity Impact Faktor przedłożonych publikacji wynosi IF=11,288.

4. Uwagi szczegółowe

Wspomniałem o znakomitej narracji Autora z jaką zostało napisane streszczenie pracy. Podobnie doskonale została zrealizowana jej korekta. W ocenianym tekście dopatrzyłem się tylko dwóch drobnych uchybień. Jedno ma charakter ogólny, dwa następne szczegółowy ale i tak ostatnie może być dyskutowane.

1. Dobrym zwyczajem w każdej pracy naukowej, która jest wykonywana pod czyjąś opieką (tu promotora; promotora pomocniczego) jest zamieszczenie podziękowań.

2. W spisie literatury, który dotyczy streszczenia pracy brak jest pozycji [11], a do niej znajduje się odwołanie w tekście.
3. Str. 6, wiersz 7 od góry: jest ...ponad niebo. -to piękna przenośnia ale czy naprawdę to tylko zasługa duraluminium, że można wzbic się aż tak wysoko?,

5. Końcowa ocena rozprawy

Naturalną kolejną rolę nauki jest ciągła dążność do poszukiwania nowych materiałów, pomysłów w ich konstruowaniu i kompozycji, a także opracowywanie nowych technologii do ich tworzenia i łączenia oraz możliwie precyzyjnego poznania ich szczególnych właściwości strukturalnych i wytrzymałościowych. Temat opiniowanej pracy doskonale wpisuje się nie tylko w aktualny trend poszukiwań naukowych, które dotyczą badań podstawowych połączeń wybranych modyfikacji stopu AA2519 ale również dotyczy bardzo ważnych zagadnień technologicznych, które starają się usuwać trudności jakie stwarzają elementy wykonane z tych stopów, w procesach spajania. Są to zagadnienia niezwykle ważne w działaniach inżynierskich wykorzystujących stopy aluminium należące do grupy 2XXX, m.in. w branży lotniczej czy zbrojeniowej. .

Oceniając całość zaprezentowanej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą, badawczą i techniczną, analizowanych w pracy zagadnień, które obejmowały zarówno problemy z zakresu inżynierii materiałowej, złożone zagadnienia technologiczne dotyczące spajania elementów wykonanych z analizowanych stopów, wciąż zaliczaną do nowatorskich metod spajania, metodą FSW, z zakresu budowy i eksploatacji maszyn, mechaniki i wytrzymałości materiałów. Na każdym etapie pracy, począwszy od sformułowania jej celu, poprzez wysoko oceniony przeze mnie, przegląd literatury, uzasadnienie wyboru szeroko rozumianych obiektów badań, sposób ich realizacji oraz prezentacji i interpretacji wyników, Autor wykazał się doskonałym opanowaniem warsztatu naukowego i badawczego.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym z dnia 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami, niniejszym zgłaszam wnioszek o dopuszczenie mgr. inż. Roberta Kosturka do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna.

Biorąc pod uwagę całość przedstawionego mi do zaopiniowania materiału, oryginalność i kompleksowość zaprezentowanych w ocenianej rozprawie metod i rezultatów badań poznawczych oraz ściśle z nimi związanych zagadnień technologicznych, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i badawczej, udokumentowany także bibliometrycznym zestawieniem dorobku naukowo-badawczego Doktoranta uważam, że przedłożona rozprawa doktorska moim zdaniem, przy spełnieniu innych proceduralnych, obowiązujących wymagań, kwalifikuje się do wyróżnienia o co niniejszym wnioskuję .

Niniejszą opinię przedkładam Panu Prof. dr. hab. inż. Jerzemu Małachowskiemu Przewodniczącemu Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej zleceniodawcy powyższej recenzji.

