

Prof. dr hab. inż. Halina Garbacz

Warszawa, dn. 13.05. 2021 roku

Politechnika Warszawska

Wydział Inżynierii Materiałowej

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Izabelli Kwiecień

pt. „Diffusion phenomena at the interface zone of Al1050/Ni201 explosively welded clads”

Podstawę formalną recenzji stanowiła Uchwała Rady Naukowej Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie z dnia 18 marca 2021 roku, oraz pismo Dyrektora Instytutu, dr hab. Joanny Wojewody-Budki, prof. PAN z dnia 22 marca 2021 roku. Praca doktorska została przygotowana pod kierunkiem dr hab. Joanny Wojewody-Budki, prof. PAN, promotorem pomocniczym był dr inż. Piotr Bobrowski.

Ocena problematyki badawczej

Tematyka i koncepcja pracy ma swoją genezę w pracach Instytutu Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie w zakresie łączenia metali oraz faz międzymetalicznych, czego potwierdzeniem są między innymi liczne publikacje współautorstwa pracowników Instytutu, na które powołuje się w rozprawie Doktorantka. Praca była realizowana w ramach Projektu „Międzynarodowe interdyscyplinarne studia doktoranckie z zakresu nauk o materiałach z wykładowym językiem angielskim” (nr POWR.03.02.00-00-IO43/16-00). Część zaprezentowanych w pracy wyników, Autorka uzyskała w czasie stażu we Fraunhofer Institute for Ceramic Technologies and Systems IKTS. Badane w pracy złącza zostały przygotowane przez Zakład Technologii Wysokoenergetycznych „Explomet” w Opolu, stosujący i rozwijający technologię wybuchowej obróbki metali na skalę przemysłową.

Praca jest interesująca zarówno ze względu na rodzaj wybranych do badań materiałów, bimetalicznych złączy stopów Al1050 oraz Ni201, jak i zastosowany do ich otrzymania proces technologiczny. Zgrzewanie wybuchowe to bardzo przydatna, a czasem jedyna technologicznie możliwa nowoczesna metoda łączenia, szczególnie w przypadku

elementów wielkogabarytowych, produkcji zarówno blach bimetalicznych, jak i kompozytów wielowarstwowych. Technologia ta, wykorzystuje energię wybuchu i jest konkurencyjna w stosunku do innych metod łączenia ze względu na możliwość zastosowania do materiałów o różnych właściwościach fizykochemicznych, takich jak: temperatura topnienia, gęstość i wytrzymałość, do których należą badane w pracy stopy. Przewaga technologii wybuchowego platerowania wynika z jej unikalnych cech w odniesieniu do innych metod łączenia. Zaletą zgrzewania wybuchowego jest tworzenie wiązania pomiędzy czystymi powierzchniami, ze względu na bardzo dużą dynamikę procesu, któremu towarzyszy zjawisko strumieniowania. Jego efektem jest usuwanie z łączonych powierzchni zanieczyszczeń i warstw tlenkowych. Obecność powierzchni rozdziału wolnej od tlenków odgrywa kluczową rolę w procesie migracji atomów poprzez granicę między metalami. Wytwarzane złącza posiadają bardzo dobre parametry wytrzymałościowe, najczęściej wyższe niż wytrzymałość słabszego z łączonych metali. Technologia zgrzewania wybuchowego umożliwia produkcję materiałów platerowanych w różnych, Nielimitowanych ilościach, od małych do dużych serii wyrobów, przy zróżnicowanych wielkościach jednostkowych elementów, które mogą być dalej mechanicznie przetwarzane.

Potencjał łączenia metali z zastosowaniem energii wybuchu jest przedmiotem naukowych analiz w oparciu o badania empiryczne oraz numeryczne, prowadzone w wielu ośrodkach zarówno krajowych, jak i zagranicznych. Dyskutowane są zjawiska towarzyszące powstaniu trwałego połączenia oraz jednorodność mikrostruktury i wybranych właściwości laminatów, a także ich stabilność cieplna. Rozprawa wpisuje się w tę tematykę. Autorka podjęła się bowiem, **wielowątkowej charakterystyki bimetali utworzonych na bazie stopu aluminium (Al1050) i niklu (Ni201), zgrzewanych wybuchowo w różnych warunkach procesowych, takich jak: prędkość detonacji, odległość technologiczna między płytami oraz wzajemne położenie zderzających się płyt.**

Wybrany przez Doktorantkę układ Al-Ni jest ciągle obszarem zainteresowań, co jest bezpośrednio związane z możliwością powstawania faz międzymetalicznych, zarówno w warunkach równowagowych, jak i nierównowagowych. Fazy międzymetaliczne bogate w nikiel charakteryzują się żarowytrzymałością i żaroodpornością, jednakże są bardzo twarde i kruche, dlatego ich obecność, wiąże się również z problemami technologicznymi. Literatura szeroko odnosi się do różnych nowoczesnych metod łączenia aluminium z niklem i opisuje zjawisko dyfuzji na granicy faz w trakcie i po procesie łączenia, zachodzące w warunkach

równowagi. Istnieje jednak luka badawcza, na którą wskazuje również Doktorantka, dotyczącą łączenia aluminium z niklem techniką zgrzewania wybuchowego, choć jest to bardzo obiecująca metoda i może być dedykowana tym metalom. Co ważne, w porównaniu z innymi technikami spajania, zgrzewanie wybuchowe zachodzi w warunkach silnie nierównowagowych, co znacznie komplikuje analizę zjawisk i zmian mikrostrukturalnych towarzyszących procesowi. Tylko w kilku publikacjach, dotyczących aktualnych doniesień literaturowych szczegółowo omówiono złącza Al/Ni otrzymane metodą wybuchową, podając jedynie krótki opis mikrostrukturalnego charakteru płyt bimetalicznych lub kompozytów wielowarstwowych. Ponadto, co podkreśla Autorka rozprawy, żadna z tych prac nie przedstawia szczegółowo wpływu parametrów zgrzewania wybuchowego na kinetykę i mechanizmy wzrostu faz międzymetalicznych po obróbce cieplnej. Wymienione argumenty stanowiły dla Doktorantki motywację do podjęcia problemu wybuchowego łączenia aluminium z niklem w układzie bimetalicznym.

Oryginalność rozprawy polega na kompleksowym podejściu do analizy złączy Al/Ni otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego. Autorka dysertacji słusznie uznała, że punktem wyjścia w projektowaniu nowego produktu jest szczegółowy i wieloskalowy opis mikrostruktury, a następnie zrozumienie zjawisk zachodzących na tworzonych interfejsach. Przedstawione w rozprawie wyniki są istotne nie tylko ze względów poznawczych, ale także dla rzeczywistej praktyki w środowisku przemysłowym, dostarczając ważnych wskazówek technologicznych dotyczących technologii produkcji. Ważny aspekt pracy związany był z analizą wpływu wyżarzania na przemianę mikrostruktury strefy międzyfazowej wraz z opisem kinetyki wzrostu głównych tworzących się faz międzymetalicznych, ujawniając ich mechanizm wzrostu w zależności od zastosowanych parametrów łączenia.

Podjęty przez Autorkę dysertacji temat jest z pogranicza badań podstawowych i aplikacyjnego nurtu badań naukowych z dyscypliny Inżynieria Materiałowa. Uwzględniając przedstawione uwarunkowania problematyki naukowej, zakres przeprowadzonych badań oraz kompleksowość podejścia do rozwiązania zagadnień, należy uznać podjęcie tematu rozprawy za celowe i w pełni uzasadnione merytorycznie, jak również aktualne zarówno pod względem poznawczym, jak i w odniesieniu do potencjalnych praktycznych zastosowań.

Ocena formalna rozprawy

Praca doktorska została napisana w języku angielskim i przygotowana w tradycyjnej formie. Liczy 152 stron maszynopisu i składa się z 5 rozdziałów, tworzących dwie wyraźnie wyodrębnione części rozprawy: zawarty we wprowadzeniu przegląd literatury oraz część empiryczną. Kolejność rozdziałów i układ treści w poszczególnych podrozdziałach są powiązane oraz logiczne, tworząc poprawny i przejrzysty, klasyczny schemat pracy. Przyjęta struktura pracy jest właściwa, a badania własne i ich analiza stanowią ponad 70% całej objętości pracy. Doktorantka wykazuje się zrozumieniem przedstawionych zagadnień, a poszczególne rozdziały logicznie wprowadzają czytelnika w prezentowaną tematykę. Rozprawa zawiera także streszczenie (tylko w języku angielskim), spis stosowanych skrótów oraz obszerną bibliografię, składającą się ze 191 pozycji, w tym dwóch współautorstwa Doktorantki. Cytowana literatura jest poprawna i właściwie dobrana do tematyki rozprawy. Bibliografia zawiera istotne prace, dotyczące podstaw teorii mechanizmów łączenia metali, a także najnowsze pozycje światowej literatury, które zostały opublikowane w okresie ostatnich 10 lat.

Praca doktorska została wzbogacona materiałem ilustracyjnym adekwatnym do przedstawionych treści merytorycznych (część literaturowa - 32 rysunki, część eksperymentalna - 80 rysunków). Zawiera także istotne wzory i tabele (21). Rozprawa jest napisana poprawnym językiem i dosyć starannie zredagowana, cele, motywy oraz tezę rozprawy Autorka wyjaśnia w Rozdziale 2. Uzyskane wyniki podsumowuje w Rozdziale 5, który ma formę opisową i dlatego jego nazwa powinna raczej brzmieć Summary albo Summary and Conclusions zamiast Conclusions.

Z obowiązku recenzenta należy wymienić stosunkowo drobne uchybienia zauważone podczas lektury niniejszej rozprawy, takie jak brak streszczenia w języku polskim, a także nieliczne błędy literowe i interpunkcyjne. Do przykładowych niejasnych lub dyskusyjnych sformułowań zaliczam:

1. Str. 41, czy na pewno prawdziwe jest stwierdzenie "Intermetallic phases rich in nickel are characterized by very good mechanical properties such as strength and **ductility**, even at elevated temperatures; however, they are very hard and brittle.

2. Str. 43, niezrozumiałe zdanie „The mean grain size of Al was 60 x 10 μm , while that of Ni was 30 μm .”, w tym kontekście pojawia się pytanie w oparciu o jaki parametr i jaką metodą Autorka wyznaczała wielkość ziarna.
3. Str. 53, Rys. 38 i 39, utrudnione jest porównanie mikrostruktur laminatów, ponieważ na Rys. 38 są dwie zmienne: prędkość detonacji i wzajemne położenie płyt Al i Ni.
4. Czy w podpisie pod Rys. 47 i 49 są właściwie podane wzajemne położenia płyt Al i Ni?

Ocena merytoryczna rozprawy

Rozdział 1 *Introduction* Doktorantka poświęciła krótkiemu przedstawieniu metod łączenia metali i na ich tle procesowi zgrzewania wybuchowego, a także parametrom wpływającym na reaktywności w układzie Al-Ni. Autorka wskazuje na właściwości metali, które wymuszają zastosowanie zaawansowanych technik łączenia oraz mechanizmy towarzyszące powstawaniu trwałych i stabilnych złączy. Analizuje kryteria podziału technik łączenia w zależności od stosowanych parametrów technologicznych, takich jak ciśnienie, rodzaj energii lub temperatura procesu. Przytacza także klasyfikację wskazaną przez organizację American Welding Society, zgodnie z którą do najczęściej stosowanych technik łączenia należą techniki spawania łukowego. Doktorantka w sposób krytyczny opisuje najważniejsze metody łączenia metali wskazując na ich zalety i ograniczenia, a także czynniki wpływające na mikrostrukturę i właściwości otrzymanych złączy. Oprócz konwencjonalnych metod Autorka wymienia proces Accumulative Roll Bonding, w którym wykorzystuje się duże odkształcenie plastyczne. Metoda ARB stosowana jest do łączenia ze sobą różnych metali, dzięki czemu uzyskuje się wielowarstwowe kompozyty charakteryzujące się unikalnymi właściwościami mechanicznymi, elektrycznymi lub/i magnetycznymi. Zaleta ARB wiąże się z poprawą właściwości mechanicznych metali lekkich, dzięki umocnieniu granicami ziaren i umocnieniu odkształceniowym.

Na tym tle, w kolejnym rozdziale kompetentnie omawia wybrane aspekty, dotyczące wykorzystywanej w rozprawie metody zgrzewania wybuchowego, podobnie jak ARB przydatnej techniki do otrzymywania laminatów z metali o zróżnicowanych właściwościach. Technologia zgrzewania wybuchowego jest procesem łączenia metali pod wpływem

zderzenia z dużymi prędkościami (pod dużym ciśnieniem), wywołanymi kontrolowaną detonacją ładunku wybuchowego. Dodatkowym efektem (nieeksponowanym przez Autorkę pracy w części literaturowej) jest rozdrobnienie ziaren w obszarze połączenia, co jest kolejną cechą wspólną z metodą ARB. Doktorantka analizuje szczegółowo parametry technologiczne istotne dla uzyskania dobrej jakości połączenia z wykorzystaniem energii wybuchu. W tym aspekcie brak jest jednoznacznego wskazania, czy charakter połączenia (faliste/proste) jest zależny tylko od parametrów procesu, czy też i w jakim obszarze od rodzaju tworzących złącze materiałów. Autorka podaje stosowane typowe prędkości detonacji, które obejmują szeroki zakres wartości, interesujące byłoby zatem wskazanie jak czynnik materiałowy wpływa na ten parametr.

Przed postawieniem tezy pracy, w przeglądzie literatury, Autorka szczegółowo odnosi się do trudności związanych z otrzymaniem połączenia między Al i Ni, związanych z różnicami między właściwościami fizyko-chemicznymi tych materiałów, zdolnością do samopasywacji Al oraz tworzeniem się kruchych faz międzymetalicznych. Analizuje rodzaje i właściwości faz międzymetalicznych z układu Al-Ni, tworzących się w stanie równowagowym oraz nierównowagowym, a także czynniki wpływające na reaktywność badanych metali, np.: gęstość prądu. Ta część rozprawy jest szczególnie ważna, z punktu widzenia poruszanej tematyki. Doktorantka skupia się nie tylko na stechiometrii i kolejności powstających faz, ale również na ich morfologii i ewolucji mikrostruktury. W sposób dojrzały naukowo dyskutuje często sprzeczne doniesienia literaturowe, dotyczące zjawisk zachodzących przy zmiennej temperaturze w różnym układzie par dyfuzyjnych Al/Ni. Odnosząc się również do wyników własnych wskazuje na mnogość czynników, które mogą mieć wpływ na interpretację uzyskanych wyników, w tym rodzaj metody łączenia. Na koniec, Autorka rozprawy przytacza dane literaturowe, dotyczące kompozytów wielowarstwowych Al/Ni uzyskiwanych metodą zgrzewania wybuchowego, podkreślając luki eksperymentalne uniemożliwiające wnioski o charakterze ogólnym. Dotyczyły one między innymi powiązania budowy fazowej i mikrostruktury laminatów z parametrami procesu łączenia wybuchowego.

Rozdział 2 *Objectives* stanowi de facto podsumowanie przeglądu literaturowego pod kątem wyjaśnienia genezy pracy i jednoznacznie wskazuje na zasadność podejmowanych w rozprawie wątków naukowych. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego, Doktorantka wyznaczyła jako **cel badawczy niniejszej rozprawy doktorskiej,**

opisanie mikrostruktury łączonych wybuchowo stopów aluminium i niklu ze szczególnym uwzględnieniem strefy interfejsu, jej przemian w wyniku obróbki cieplnej, kinetyki wzrostu faz międzymetalicznych oraz wybranych właściwości. Doktorantka dla realizacji przyjętego celu, słusznie przyjęła plan badań obejmujący: 1) przygotowanie bimetalicznych laminatów Al/Ni z zastosowaniem różnych warunków procesu zgrzewania wybuchowego; 2) szczegółową charakterystykę mikrostrukturalną otrzymanych złączy zarówno w stanie po zgrzewaniu, jak i po wyżarzaniu w różnych warunkach; 3) określenie kinetyki wzrostu wybranych faz międzymetalicznych ze wskazaniem mechanizmów ich wzrostu, 4) korelację wybranych właściwości z mikrostrukturą złączy i warunkami łączenia. **Autorka postawiła następującą tezę badawczą: Warunki procesu zgrzewania wybuchowego, a zwłaszcza zastosowana prędkość detonacji, mają istotny wpływ na mikrostrukturę i skład fazowy spoiny w stanie bezpośrednio po połączeniu, co z kolei bardzo istotnie wpływa na integralność spoiny po obróbce cieplnej.** Pierwsza część tezy wydaje się być sformułowana dosyć ogólnie i z ograniczonym ryzykiem naukowym, natomiast ocena wpływu budowy złączy na ich jakość spoiny po procesie wyżarzania wymagała szeregu badań w celu potwierdzenia tezy.

W Rozdziale 3 *Materials and Method*, Doktorantka przedstawiła skład chemiczny i mikrostrukturę badanych materiałów oraz parametry przeprowadzonych procesów zgrzewania wybuchowego. Autorka w pracy zastosowała trzy typy warunków zgrzewania: i) prędkość detonacji w zakresie 2000-2800 m / s, ii) różne odległości między zderzającymi się płytami, iii) zmienna wzajemna lokalizacja zderzające się płyty. W celu ujawnienia wpływu temperatury i czasu wyżarzania na zmiany mikrostruktury złączy oraz określenia kinetyki wzrostu wybranych faz międzymetalicznych, które powstały podczas obróbki cieplnej, próbki wyżarzano w temperaturze 500 ° C w czasie: 0,5, 5, 10, 18, 24, 72, 168 i 260 godzin. Na tym etapie pracy pojawia się pytanie, dotyczące kryteriów wyboru czasów wyżarzania oraz w kontekście dużego powinowactwa Al do tlenu, zasadności obróbki cieplnej bez atmosfery ochronnej.

W ocenie recenzentki, wybór metod badawczych do realizacji celu pracy nie budzi zastrzeżeń. Badania mikrostruktury i składu fazowego Doktorantka prowadziła w oparciu o obserwacje przy użyciu mikroskopu świetlnego, SEM, TEM oraz pomiary XRD. Na szczególne podkreślenie zasługuje swoboda z jaką Autorka posługuje się szeroko stosowaną

w pracy metodą EBSD. Doktorantka wykorzystała ją do analizy wielkości i kształtu ziaren, rozkładu faz, a także do ujawnienia zależności krystalograficznych między ziarnami w obrębie złączy, zarówno w stanie bezpośrednio po zgrzewaniu wybuchowym, jak i po wyżarzaniu. Ostatecznie technika EBSD, wsparta informacjami o składzie chemicznym (EDS), posłużyła do uzyskania map orientacji krystalograficznej dla odpowiednich faz międzymetalicznych. Ta część wyników ma w mojej opinii dużą wartość poznawczą, zawiera bowiem dane uzyskane zaawansowaną techniką badawczą, które zostały przeanalizowane przez Doktorantkę i odniesione do istniejących w literaturze. Oprócz charakterystyki mikrostruktury Autorka analizowała wybrane właściwości złączy, takich jak twardość przy różnych obciążeniach, odporność na zginanie w próbach udarnościowych oraz rozszerzalność cieplną przy użyciu dylatometru.

Uzyskane w pracy wyniki badań Autorka prezentuje w Rozdziale 4 *Results and discussion* z zastosowaniem przyjętych i opracowanych procedur. Sekcja ta została podzielona na trzy główne części i kilka podrozdziałów. Na początku została przedstawiona szczegółowa charakterystyka mikrostrukturalna każdego z rozważanych złączy bimetalicznych. Taki sposób prezentacji pozwalał na ujawnienie wpływu zastosowania różnych warunków procesu zgrzewania wybuchowego. W kolejnym kroku badania skupiały się na zmianach na granicy Al/Ni w złączach poddanych dodatkowej obróbce cieplnej, ze szczególnym uwzględnieniem transformacji strefy połączenia i wzrostu faz międzymetalicznych w stanie stałym dla wszystkich zgrzewanych wybuchowo blach. Ważny aspekt pracy poświęcony jest wpływowi wyżarzania na przemianę mikrostruktury strefy interfejsu, w zakresie kinetyki wzrostu dwóch głównych tworzących się faz międzymetalicznych: Al_3Ni i Al_3Ni_2 , ujawniając mechanizm ich wzrostu w zależności od zastosowanych parametrów procesu zgrzewania wybuchowego. Autorka opisała wpływ prędkość detonacji na tempo i mechanizm wzrostu faz międzymetalicznych. Mechanizm wzrostu na granicy ziaren, któremu towarzyszy silny efekt Kirkendalla, objawiający się porowatością, może prowadzić w skrajnym przypadku do rozpadu spoiny w strefie międzyfazowej po długotrwałym wyżarzaniu. Naturalnym pytaniem dla specjalisty z dyscypliny Inżynieria Materiałowa, nasuwającym się po wnikliwej analizie mikrostruktury jest: jak obserwowane zmiany wpływają na właściwości użytkowe/funkcjonalne zgrzewanych wybuchowo złączy Al/Ni. Temu aspektowi jest poświęcona ostatnia - trzecia część badań, w

której weryfikowano wybrane właściwości bimetalicznych złączy, takie jak liniowa rozszerzalność cieplna czy właściwości mechaniczne w tym odporność na zginanie w warunkach dynamicznych oraz pomiary mikro- i nanotwardości.

Po każdej sekwencji prezentacji wyników Doktorantka przeprowadzała ich wnikliwą analizę i dyskusję, odnosząc się do danych literaturowych. Przyjęta forma przedstawienia wyników mimo dużej liczby zmiennych parametrów technologicznych oraz metod badawczych, pozwala w uporządkowany sposób podążać za rozważaniami Autorki i w efekcie zrozumieć wyciągane wnioski. Na szczególne wyróżnienie zasługują przedstawione przez Doktorantkę poglądowe schematy graficzne morfologii interfejsów po procesach łączenia i wyżarzania. Są bardzo czytelne i pomocne w analizie porównawczej, a oprócz tego mają duży walor dydaktyczny. Docenić należy również jakość zdjęć obrazujących wyniki badań mikrostruktury analizowanej w różnych skalach, np.: EDS na cienkich foliach z obszaru interfejsu Al/Al₃Ni.

Prezentacja wyników zakończona jest podsumowaniem oraz wnioskami zawartymi w Rozdziale 5 *Conclusions*. Podsumowanie wyników jest istotną częścią rozprawy, ponieważ Autorka łączy w nim wiele wątków badawczych podjętych w ramach zaplanowanych eksperymentów. Uzyskane wyniki wskazują, że badany materiał ma potencjał do zastosowań przemysłowych z zastrzeżeniem, że w badanym układzie nie zaleca się niskiej prędkości detonacji. Autorka zauważa złożoność badanych procesów i wskazuje na konieczność dalszych prac, związanych z modyfikacją warunków procesu zgrzewania wybuchowego w celu uzyskania optymalnych właściwości użytkowych złączy.

Do najistotniejszych osiągnięć recenzowanej pracy, wnoszących nowe elementy w obszarze technik łączenia metali oraz faz międzymetalicznych z układu Al-Ni, zaliczam:

1. Kompleksowy i wieloskalowy opis budowy laminatów na bazie stopów aluminium (Al1050) i niklu (Ni201) oraz zrozumienie zjawisk zachodzących na tworzonych interfejsach w oparciu o badania złączy uzyskanych w warunkach przemysłowych metodą zgrzewania wybuchowego. Autorka dane wynikające z przeglądu literatury wykorzystywała w badaniach podstawowych, z których wnioski mogą pozwolić na uzyskanie efektu utylitarne o charakterze technologicznym i bezpośrednio wdrożonego w firmie Explomet.

2. Analizę wpływu warunków (prędkość detonacji, odległość i wzajemna lokalizacja zderzających się płyt) procesu zgrzewania wybuchowego, z której wynika, że zastosowana prędkość detonacji jest kluczowym parametrem z punktu widzenia kształtowania morfologii, mikrostruktury i składu fazowego nowopowstałych interfejsów, co z kolei bardzo istotnie wpływa na integralność spoiny po obróbce cieplnej. Uzyskane wyniki stanowią potwierdzenie postawionej w rozprawie tezy badawczej.
3. Określenie kinetyki i mechanizmy wzrostu wybranych faz międzymetalicznych z układu Al-Ni w złączach otrzymanych metodą zgrzewania wybuchowego, wyżarzanych w temperaturze 500°C w zakresie od 0,5 do 260 godzin. Doktorantka opracowała bogaty, poglądowy materiał ilustracyjny zachodzące procesy.

Na tle wyników uzyskanych w ramach recenzowanej rozprawy oraz przeprowadzonej dyskusji nasuwają się następujące pytania, które wymagają komentarza ze strony Autorki:

1. Doktorantka podkreśla, że praca jest istotna z punktu widzenia zastosowania otrzymanych złączy w motoryzacji, lotnictwie i kosmonautyce. Na działanie jakich zatem warunków/środowiska w rzeczywistych aplikacjach może być narażony laminat Al/Ni?
2. Które prędkości detonacji 2400m/s czy 2800 m/s, są bardziej korzystne z punktu widzenia właściwości laminatów?
3. Zdaniem Doktorantki, które z uzyskanych wyników mają największą wartość poznawczą, a które są najistotniejsze dla celów użytkowych?
4. Czy powstawanie faz międzymetalicznych w złączach Al/Ni otrzymywanych metodą zgrzewania wybuchowego jest zjawiskiem pożądanym, a jeśli tak to dlaczego?

Z obowiązku recenzentki chciałabym także zwrócić uwagę Doktorantki na kilka problemów:

1. W pracy brak jest szerszego uzasadnienia wyboru parametrów procesu wyżarzania, pojawia się między innymi pytanie, czy brak atmosfery ochronnej mógł mieć wpływ na uzyskane wyniki, np.: pomiary twardości.
2. Autorka co prawda nie eksponowała trudności związanych z preparatyką złączy Al/Ni, ale nie jest to problem trywialny. Przygotowanie próbek do badań EBSD obejmowało

między innymi polerowanie mechaniczne i elektropolerowanie. Czy nie zaobserwowano występowania ogniwa galwanicznego i jaki był skład chemiczny odczynnika A1 firmy Struers?

3. Szerszej refleksji wymagają wyniki badań twardości. Zastanawiające jest: i) dlaczego rośnie twardość Ni po zgrzewaniu wybuchowym, natomiast nie obserwuje się tej zależności dla Al (Rys. 108) oraz czy wynik ten jest niezależny od wzajemnego położenia płyt, ii) dlaczego twardość w strefie przejściowej jest większa dla mniejszych prędkości detonacji, iii) co uzasadnia większy rozrzut wyników pomiarów w obszarze istnienia faz międzymetalicznych dla próbek przed wygrzewaniem (Rys. 108 i 109).

Pomimo wspomnianych powyżej zastrzeżeń, których większość ma charakter dyskusyjny, uważam że mgr inż. Izabella Kwiecień przygotowała bardzo ciekawą i aktualną pracę na wysokim poziomie merytorycznym. Recenzentka zachęca Autorkę do dyskusji, bo jest ona immanentnym elementem prac badawczych, dodatkowo potwierdza zasadność podejmowanych w rozprawie wątków naukowych.

Wnioski końcowe

Ważną cechą Pani mgr inż. I.Kwieceń, jako młodej adeptki nauki, wydaje się umiejętność doboru odpowiednich instrumentów badawczych do postawionego problemu. Na uwagę zasługuje sprawność obrazowania i interpretacji otrzymanych wyników oraz zastosowanie komplementarnych metod badawczych w zakresie charakteryzowania mikrostruktury. Przeprowadzona dyskusja wyników oraz szczegółowe rozważania odnośnie do kinetyki i mechanizmów wzrostu faz międzymetalicznych w złączach, przedstawione dodatkowo w części empirycznej pracy świadczą o dojrzałości badawczej Doktorantki i potwierdzają umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska mgr. inż. Izabelli Kwieceń stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, mieszczącego się w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Przedmiot rozprawy i jej cele odnoszą się do wątku interesującego i aktualnego z punktu widzenia badań podstawowych i aplikacji. Dotyczy on wykorzystania energii wybuchu do otrzymania

bimetalicznych złączy Al/Ni, a w szczególności wpływu parametrów procesu łączenia i obróbki cieplnej na morfologię, mikrostrukturę oraz skład fazowy interfejsu i w konsekwencji na wybrane właściwości laminatów. Sposób sformułowania celu, hipotezy i usystematyzowania programu badań, a także jego realizacja, świadczą o umiejętności Doktorantki zbudowania koncepcji i rozwiązania problemu badawczego.

W rozprawie przewija się wiele wątków, ale Autorka umiejętnie potrafił je powiązać i w efekcie rozważania tworzą logiczną całość. Część teoretyczna pracy daje podstawy do stwierdzenia, że Doktorantka posiada uporządkowaną ogólną wiedzę teoretyczną z zakresu inżynierii materiałowej, a część empiryczna pozwala na pozytywną ocenę Jej warsztatu naukowego. Autorka wykazał umiejętność selekcji i doboru źródeł adekwatnych do opisywanych zagadnień. Dowiodła też, że potrafi stosować metody analizy i krytycznej syntezy naukowej. Szczegółowo uzasadniona i opisana procedura badawcza przyczyniła się do realizacji założonych celów. Całość rozprawy świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Zarówno sposób przygotowania jak i zawartość merytoryczna rozprawy pozwalają sądzić, że jej Autorka jest sprawnym badaczem, posiadającym szeroką i ugruntowaną wiedzę. Uważam, że praca spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Izabellę Kwiecień do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Halina Garbacz