

Prof. dr hab. inż. Tomasz Lipiński
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
ul. Oczapowskiego 11
10-719 Olsztyn

Olsztyn, dnia 12.06.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Anny Marii Kuś
nt.: „Investigation of properties of cobalt-based alloys with high
glass-forming ability developed by selective laser melting and plasma
spraying” („Badania właściwości stopów na bazie kobaltu o wysokiej zdolności
do zeszklenia wytworzonych za pomocą selektywnego stapiania laserowego
oraz natryskiwania plazmowego”)

opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechanicznej
Pana Prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego (W10/RDND07/123/2025
z dnia 25.04.2025 r.) w związku z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynierii Mechaniczna
Politechniki Wrocławskiej z dnia 23.04.2025 r.

1. Informacja o rozprawie

Rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Anny Marii Kuś została wykonana na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem promotora Pani dr hab. inż. Wirginii Pilarczyk, prof. PŚ oraz promotora pomocniczego Pani dr inż. Aleksandry Małachowskiej. Podjęty przez Autorkę problem dotyczący badań niektórych właściwości stopów kobaltu o wysokiej zdolności do tworzenia szkła metalicznego na przykładzie stopów CoBFeSiNb i CoBFeTaSiCu wytwarzanych przy zastosowaniu technologii selektywnego topienia laserowego i natryskiwania plazmowego. Szereg publikacji przedstawia wyniki badań stopów metali o dużej zdolności do zeszklenia otrzymywanych głównie metodami odlewniczymi i metodami polegającymi na wykorzystywaniu dużej.

prędkości chłodzenia. Oba te procesy mają swoje znaczne ograniczenia pozwalające na otrzymywanie prostych kształtów i niewielkich rozmiarów elementów, co ogranicza zastosowanie praktyczne wytworzonych materiałów. Podejmowane są również próby zastosowania innych metod wytwarzania stopów o wysokiej zdolności do zeszklenia za pomocą różnych procesów technologicznych, w który to obszar wpisuje się oceniana rozprawa. Zastosowanie szkieł metalicznych może znacznie rozszerzyć swój zakres, ale aby to nastąpiło konieczne jest opracowanie technologii pozwalających na zwiększenie grubości wytwarzanych elementów oraz stworzenie możliwości rozwinięcia ich kształtów geometrycznych. Materiały te cieszą się coraz większym zainteresowaniem ze strony przemysłu. Z tego powodu mają potencjał aplikacyjny. Dlatego podjęcie powyższego tematu pracy przez Doktorantkę uważam za trafne i celowe. Tematyka opiniowanej pracy dobrze odpowiada problemom przemysłowym występującym w trakcie wykonywania elementów konstrukcyjnych w przemyśle energetycznym, technologii medycznej, budowie maszyn i wielu innych. Przedstawione w rozprawie wyniki badań i rozważania mogą stanowić materiał porównawczy do udoskonalania procesów wytwarzania, a wytworzony za pomocą obu zaproponowanych technologii materiał o podanych analizie właściwościach może zyskać zastosowanie praktyczne.

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy analizy właściwości użytkowych stopów o wysokiej zdolności do zeszklenia na przykładzie CoBFFeSiNb i CoBFFeTaSiCu poddanych procesom selektywnego przetapiania laserowego i natryskiwania plazmowego, a tym samym mieści się w obszarze dyscypliny inżynieria mechaniczna.

2. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozprawa ma typowy układ pracy doktorskiej. Rozprawa jest zapisana na 122 stronach maszynopisu formatu A4 (nie wliczając strony tytułowej, streszczenia w języku angielskim i polskim, spisu treści, literatury, spisu rysunków i tabel) i zawiera cztery rozdziały. Jej objętość zaliczam do typowych. Pierwszym rozdziałem rozprawy jest jej streszczenie („Abstract”) zamieszczone na sześciu stronach w języku rozprawy i języku polskim. W drugim rozdziale („Thesis Introduction”) zostały przedstawione cel i dwie hipotezy rozprawy. Trzeci rozdział zatytułowany: „State-of-the-art” obejmujący część literaturową (strony 13 do 53 maszynopisu), w którym Doktorantka zwięźle przedstawiła:

- definicję metali amorficznych (rozdział III.1 „Definition of amorphous metals”);
- warunki wytwarzania metali amorficznych (rozdział III.2 „Fabrication conditions of amorphous metal”);

- klasyfikację szkieł metalicznych (rozdział III.3 „Classification of metallic glasses”);
- technologie wytwarzania szkieł metalicznych (rozdział III.4 „Manufacturing technologies of metallic glasses”) z uwzględnieniem technologii odlewniczych, przetapiania laserowego i natryskiwania plazmowego;
- wybrane właściwości szkieł metalicznych (rozdział III.5 „Selected properties of metallic glasses”) z podziałem na właściwości mechaniczne (twardość, moduł sprężystości, moduł Yonga, wytrzymałość i ciągliwość), termiczne i chemiczne;
- przykłady zastosowania szkieł metalicznych (rozdział III.6 „Applications”),
- Stopy na bazie kobaltu (rozdział III.7 „Co-based glasses” z uwzględnieniem klasyfikacji i właściwości stopów oraz metod wytwarzania i zastosowania stopów.

Kolejne cztery rozdziały stanowią badania własne (strony: 54 do 132). W rozdziale IV Metodyka badań („Research methods”) Doktorantka przedstawiła:

- plan badań (rozdział IV.1 „Research plan”);
- wybór stopów (rozdział IV.2 „alloys selection”);
- procesy wytwarzania (rozdział IV.3 „Manufacturing processes”) zawierający technologie odlewniczą, atomizację, przetapianie laserowe oraz natryskiwanie plazmowe;
- analizę próbek (rozdział IV.4 „Samples analysis”) opisujący metody badania proszków oraz stopów po odlewaniu, przetapianiu laserowym i natryskiwaniu plazmowym.

Rozdział V „Results” zawiera zestawienie wybranych wyników badań dla CoBFeSiNb (str. 69 do 86) i CoBFeTaSiCu (str. 87 do 106).

W rozdziale VI „Discussion” Autorka przedstawiła omówienie wybranych wyników badań (str. 107 do 130) z podziałem na CoBFeSiNb (str. 107 do 117) i CoBFeTaSiCu (str. 118 do 130). Całość rozprawy Doktorantka podsumowała w rozdziale VII „Conclusions” (str. 131 i 132 rozprawy). Na stronie 132 na końcu Conclusions Autorka zamieściła podziękowanie Promotorowi i Promotorowi pomocniczemu za pomoc realizacji badań i edycji ocenianej rozprawy.

Rozdział VIII „Bibliography” zawiera spis wykorzystanej w pracy literatury w ilości aż 395 pozycji. Rozdział IX „List of tables” zamieszczony na str. 150 i 151 zawiera zestawienie tabel, zaś rozdział X „List of Figures” zamieszczony na str. 152 do 155 zestawienie zamieszczonych w rozprawie rysunków.

Praca została wyedytowana w języku angielskim. Pomimo starannej edycji Autorka nie ustrzegła się błędów edytorskich, typowych dla tego typu prac, np. stopień Promotora pomocniczego na str. 1 rozprawy podany jest w postaci „DSc Eng”, zaś na str. 132 w postaci

„ PhD”; oraz błędów maszynowych, np. str. 2 „Thesis IntrOduction”. Autorka stosowała w pracy język angielski w formacie brytyjskim i amerykańskim str. 5 „analysis” i str. 55 „analyzes”. Autorka nie zwracała również uwagi na podział tekstu na poszczególnych stronach pracy pozostawiając go przypadkowym, np. podział cobalt-based w tytule. Powyższe niedoskonałości nie wpływają na jakość ocenianej rozprawy.

Tytuł rozprawy: „Investigation of properties of cobalt-based alloys with high glass-forming ability developed by selective laser melting and plasma spraying” („Badania właściwości stopów na bazie kobaltu o wysokiej zdolności do zeszklenia wytworzonych za pomocą selektywnego stapiania laserowego oraz natryskiwania plazmowego”) został sformułowany dość ogólnie. Nie wskazuje jakie właściwości będą poddawane analizie. Niemniej jednak jest on adekwatny do treści zamieszczonych w rozprawie.

Całość pracy rozpoczyna: spis treści (str. 2 i 3) oraz wykaz oznaczeń (str. 4). Łącznie rozprawa wyedytowana jest na 155 stronach, zawiera 93 rysunki i 44 tabele. Literatura jest bardzo liczna. Autorka zestawiała ją z 395 pozycji. Niektóre z nich są powielone, np. poz. 354 i poz. 371, zatem rzeczywista liczba ich jest niższa. Datowane są one od 1959 roku (poz. 218) do 2024 roku (np. poz. 45). Najwięcej pozycji literaturowych datowanych jest do roku 2020, co jest całkowicie zrozumiałe i uzasadnione ponieważ Doktorantka w tym okresie rozpoczęła studia doktoranckie i analizę literatury w celu podjęcia tematu badawczego na stopień doktora. Analiza literatury potwierdza, że Doktorantka nie poprzestała na pierwotnej analizie literatury i dalej śledziła rozwój badań nad postawionym problemem badawczym w trakcie realizacji rozprawy, aż do jej zakończenia w 2024 roku. Potwierdza to również porównanie wyników badań z wynikami dostępnymi w literaturze z różnych lat, w tym również z ostatnich 3 lat w rozdziale „Discussion” świadczy o włożonym wysiłku Doktorantki w porównanie otrzymanych wyników z dużą ilością badań innych autorów opublikowanych na przestrzeni długiego okresu. Tak szeroki przedział czasowy pozycji literaturowych świadczyć może, o wyłonieniu przez Doktorantkę najistotniejszych doniesień dotyczących tematu pracy, bez względu na datę przeprowadzonych badań. Doktorantka wykorzystała 6 publikacji autorstwa Promotora rozprawy, w tym 3 swoich współautorskich. Szkoda, że wśród tak licznie zestawionych prac tylko 11 potwierdza wyniki badań przeprowadzone przez krajowych badaczy, co stanowi niecałe 3% wszystkich zestawionych w rozprawie pozycji. Zestawienie literatury wydanej od 2020 roku zawiera co najmniej 98 pozycji. Co najmniej ponieważ jedna jest w druku (poz. 357), zaś dane bibliograficzne niektórych pozycji są niepełne (np. 354), w tym nie zawierają roku wydania, np. poz. 363.

Doktorantka w przeglądzie literatury słusznie zwraca uwagę między innymi na procesy wytwarzania materiałów z powłoką w postaci szkła metalicznego, która wraz z składem chemicznym i strukturą determinują właściwości materiałów oraz wynikające z tych właściwości możliwości praktycznego zastosowania materiałów wytwarzanych różnymi technologiami.

Doktorantka w przeglądzie literatury opisała bardzo zwięźle szkła metaliczne, niektóre metody wytwarzania oraz każdą z rozważanych w dalszej części pracy stanowiącej badania własne metodę zastosowaną do oceny właściwości powłok. Szkoda, że Autorka wybrała konwencję wyjaśnienia symboliki równań w tekście. Moim zdaniem utrudnia to ich analizę.

Część literaturowa ma układ analogiczny do części badawczej, co potwierdza spójność rozprawy oraz wykazuje dobre rozeznanie Doktorantki w zakresie tematyki rozprawy. Kolejność zamieszczonych rozdziałów nie budzi zastrzeżeń. Autorka w sposób zwięzły przedstawiła problem badawczy oraz umieściła go w sprecyzowanym obszarze badawczym. W tym celu trafnie dobrała metodykę badawczą, wytworzyła próbki, poddała je zaplanowanym badaniom, zaprezentowała wyniki badań, ich analizę i dyskusję oraz wnioskowanie podsumowujące wyniki eksperymentu. Oceniana rozprawa analizuje możliwości rozwoju struktur amorficznych. Autorka przeprowadziła badania na dwóch stopach na bazie kobaltu: $\text{Co}_{47,5}\text{Fe}_{20,4}\text{B}_{21,9}\text{Si}_{5,1}\text{Nb}_5$ oraz $\text{Co}_{42}\text{B}_{26,5}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5,5}\text{Si}_5\text{Cu}_1$. Do formowania struktury tych stopów użyła selektywne stopowanie laserowe oraz natryskiwanie plazmowe.

Doktorantka sformułowała podstawowy cel naukowy pracy jako uzyskanie struktury amorficznej ze stopów na bazie kobaltu, metodą wytwarzania przyrostowego i natryskiwania plazmowego, przy jednoczesnym utrzymaniu właściwości mechanicznych uzyskanych materiałów na poziomie zbliżonym do właściwości mechanicznych uzyskiwanych przez odlewanie.

W rozprawie Autorka przyjęła miarę osiągnięcia celu naukowego w postaci dwóch hipotez. Pierwsza hipoteza dotycząca rozwoju struktury amorficznej: strukturę amorficzną można pomyślnie opracować przy użyciu technik wytwarzania przyrostowego i metod natryskiwania ze stopami na bazie kobaltu, które mają wysoką zdolność do tworzenia szkła (np. $\text{Co}_{47,5}\text{Fe}_{20,4}\text{B}_{21,9}\text{Si}_{5,1}\text{Nb}_5$ i $\text{Co}_{42}\text{B}_{26,5}\text{Fe}_{20}\text{Ta}_{5,5}\text{Si}_5\text{Cu}_1$). Druga hipoteza dotycząca właściwości mechanicznych struktury amorficznej: stopy na bazie kobaltu o wysokiej zdolności do tworzenia szkła, po przetworzeniu za pomocą technik wytwarzania przyrostowego i metod natryskiwania, osiągną właściwości mechaniczne porównywalne z właściwościami tych samych stopów opracowanych za pomocą tradycyjnych metod odlewania. Formułując powyższe hipotezy Doktorantka powiązała możliwości uzyskania struktur amorficznych oraz

wynikających i nich właściwości mechanicznych zaproponowanych stopów z wybranymi technologiami ich wytwarzania.

Cel rozprawy oraz postawione w oparciu o przeprowadzoną analizę aktualnego stanu wiedzy naukowej dwie hipotezy badawcze dobrze formułują problem naukowy. Po przeanalizowaniu celu rozprawy oraz spójnych z nim hipotez stwierdzam, że rozprawa ma charakter naukowy i zmierza do rozwiązania oryginalnego problemu naukowego. Uważam, że Autorka ocenianej rozprawy potrafi właściwie sformułować problem naukowy, a z lektury następnych rozdziałów rozprawy wynika także, że potrafi zaproponować odpowiednie metody jego rozwiązania. Szkoda, że Doktorantka na końcu przeglądu literatury nie dokonała podsumowania wskazującego na potrzebę realizacji tematu rozprawy.

Do zrealizowania postawionego celu badań Doktorantka opanowała i wykorzystała wiele metod badawczych, szczegółowo opisanych w rozprawie w rozdziale IV Research Methods. Dobór zastosowanych metod badawczych potwierdza dobre rozeznanie Autorki rozprawy w zakresie tematu pracy. Z analizy manuskryptu wynika, że Doktorantka opiera wybór parametrów o dane literaturowe. Dla przykładu w tabeli 15 (str. 61 rozprawy) podano dostępne w literaturze parametry stosowane przez innych badaczy obok parametrów zastosowanych w badaniach („In this thesis”). Szkoda, że przy zastosowanych parametrach wytwarzania powłoki amorficznej Doktorantka nie uzasadniła przyjętego zakresu zmian parametrów oraz nie wyjaśniła dlaczego parametry dla obu stopów są różne, np. tabela 17. Dodatkowo porównując odpowiednio dane zawarte w tabelach 15 i 16 z danymi zamieszczonymi w tabeli 17 i opisie na str. 63 stwierdzono rozbieżności, np. ED w zakresie $16-82 \text{ J/mm}^2$ (tab. 15) i $39-68 \text{ J/mm}^2$ (tab. 17). Nie jest zrozumiałe powtórne podanie równania 11, które jest tożsame z równaniem 1. Dodatkowo symbole w równaniu i jego objaśnieniu różnią się. Niejednoznaczne jest również zaokrąglanie parametrów, np. w opisie na str. 63 i w tabeli 17a gdzie ED zmienia się od 42,2 do 67,5 J/mm^3 , zaś podpis pod tabelą podaje $39-68 \text{ J/mm}^3$. Nie wszystkie metody badań zostały opisane z wystarczającą starannością pozwalającą na ich powtórzenie, np. nie jest jednoznaczne co Autorka rozumie przez zapis na str. 67: „the length of the measurment profile by device” czy jest to odcinek pomiarowy l_n czy odcinek przejazdu l_t (PN-EN ISO 21920-3:2022-06), według jakich norm/procedur przeprowadziła to badanie, jak ustaliła długość odcinka pomiarowego, jakie były ograniczenia badawcze itd.

Wyniki badań i ich analizę Doktorantka przedstawiła oddzielnie dla każdego z dwóch stopów. Dla każdego z nich metody badawcze pokrywają się, co przy podobnych parametrach i metodyce badań umożliwia porównywanie wyników. Szkoda, że Doktorantka nie podała

na ilu próbkach przeprowadziła każde z badań. Dyskusję Autorka przeprowadziła również oddzielnie dla każdego z analizowanych stopów. Szkoda, że zabrakło porównania odpowiednich wyników otrzymanych dla obu stopów. Niedogodność tę częściowo rekompensuje rozdział VII Conclusions. Nie zawsze Doktorantka analizując wyniki badań odnosiła się do wiarygodności wyników, np. tabela 44 na str. 130 (oznaczenie również jest błędne powinno być: Fig. 94). Autorka używa również ogólników, np. dobre właściwości mechaniczne (str. 131). Trudno dociec co i dlaczego jest dobre. W rozdziale Conclusions Doktorantka nietypowo zamieściła również podziękowania dla promotora i promotora pomocniczego.

W rozdziałach VI Discussion i VII Conclusions rozprawy stanowiącymi podsumowanie badań Autorka przedstawia spostrzeżenia wynikające z badań i ich analizy. Są one słuszne w odniesieniu do uzyskanych wyników badań oraz są skorelowane z tezą i celem rozprawy.

Stwierdzam, że Autorka dowiodła postawioną tezę oraz osiągnęła zamierzony cel przedstawiony na str. 11 ocenionej rozprawy.

Za szczególne osiągnięcie w realizacji pracy uważam wykazanie zdolności stopu na bazie kobaltu $\text{Co}_{47.5}\text{Fe}_{20.4}\text{B}_{21.9}\text{Si}_{5.1}\text{Nb}_5$ do wytworzenia masywnego szkła metalicznego za pomocą selektywnego przetapiania laserowego oraz powłok amorficznych za pomocą natryskiwania plazmowego. Dodatkowo opiniowana rozprawa poszerza dostępną wiedzę dotyczącą wytwarzania, badania i właściwości metali amorficznych oraz wykazuje możliwości wykorzystania selektywnego przetapiania laserowego i natryskiwania plazmowego do wytwarzania powłoki amorficznej na powierzchni stopów na bazie kobaltu.

Przy tak bogatym eksperymencie, biorąc pod uwagę ograniczoną objętość rozprawy doktorskiej, Autorka nie była w stanie zamieścić i opisać wszystkich otrzymanych w trakcie badań wyników. Wykazała jednak, że potrafi nie tylko zaplanować i przeprowadzić eksperyment, ale również potrafi przeprowadzić prawidłową jego analizę i wyciągnąć właściwe wnioski.

Mimo przedstawionych drobnych uwag, które mogą mieć charakter polemiczny, należy stwierdzić, że nie umniejszają one zasadniczej wartości pracy, w której zrealizowano szeroki program badań oraz dokonano analizy wyników. Autorka przedstawiła również szereg bardzo interesujących wyników predysponujących analizowane metody technologiczne i stopy do zastosowań w praktyce.

3. Wniosek końcowy

Opiniowaną przeze mnie rozprawę doktorską mgr inż. Anny Marii Kuś „Investigation of properties of cobalt-based alloys with high glass-forming ability developed by selective laser melting and plasma spraying” („Badania właściwości stopów na bazie kobaltu o wysokiej zdolności do zeszklenia wytworzonych za pomocą selektywnego stapiania laserowego oraz natryskiwania plazmowego”) oceniam pozytywnie. Wykazuje ona ogólną wiedzę teoretyczną Kandydatki w dyscyplinie Inżynierii Mechanicznej w zakresie rozwoju struktur amorficznych stopów na bazie kobaltu wytwarzanych za pomocą topienia laserowego i natryskiwania plazmowego, stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego oraz wykazuje umiejętność i dobre przygotowania Autorki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Marii Kuś „Investigation of properties of cobalt-based alloys with high glass-forming ability developed by selective laser melting and plasma spraying” („Badania właściwości stopów na bazie kobaltu o wysokiej zdolności do zeszklenia wytworzonych za pomocą selektywnego przetapiania laserowego oraz natryskiwania plazmowego”) spełnia wymagania ustawy z dnia 20. lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 r. poz. 1571) stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Marii Kuś do publicznej obrony.

