

Kraków, dnia 11.09.2024 r.

Uniwersytet Komisji Edukacji Narodowej w Krakowie
Instytut Nauk Technicznych
Katedra Inżynierii i Technologii Materiałów
Dr hab. inż. Krzysztof Ziewicz, Profesor UKEN

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Karstena Głównki
pt. "Struktura oraz wybrane właściwości stopów o wysokiej entropii Ti-Ta-Nb-Hf-Mo-Zr o zmiennej zawartości Hf, Mo oraz Zr przeznaczonych do potencjalnych zastosowań biomedycznych"
opracowana na zlecenie
Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Śląskiego

Ogólna charakterystyka recenzowanej pracy

Przedmiotem niniejszej recenzji jest praca doktorska mgr inż. Karstena Głównki pt. " Struktura oraz wybrane właściwości stopów o wysokiej entropii Ti-Ta-Nb-Hf-Mo-Zr o zmiennej zawartości Hf, Mo oraz Zr przeznaczonych do potencjalnych zastosowań biomedycznych", która została wykonana pod opieką Pani Prof. dr hab. Danuty Stróż, jako Promotorki oraz Pana Maciej Zubko, prof. UŚ jako Promotora pomocniczego z Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytutu Inżynierii Materiałowej, Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach.

W trakcie realizacji badań zaprezentowanych w recenzowanej pracy doktorant wykorzystał szereg zaawansowanych metod badawczych, takich jak:

- Dyfrakcja rentgenowska (XRD),
- Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM),
- Transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM),
- Skaningowo-transmisyjna mikroskopia elektronowa (STEM),
- Spektroskopia dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS),
- Wysokotemperaturowa skaningowa kalorymetria różnicowa (HT-DSC),
- Nanoindentacja,
- Pomiar mikrotwardości,
- Metody potencjodynamiczne.

Doktorant miał możliwość korzystania z wiedzy i doświadczenia wysoce wykwalifikowanych pracowników naukowych oraz dostępu do zaawansowanej aparatury w renomowanych instytucjach, takich jak Uniwersytet Śląski w Katowicach, Politechnika Śląska oraz Institute for Technical Physics and Materials Science, Center for Energy Research w Budapeszcie. Dzięki współpracy z tymi prestiżowymi ośrodkami, które charakteryzują się najwyższymi standardami badawczymi, doktorant nie tylko skutecznie stosował zaawansowane techniki badawcze, ale także przestrzegał najlepszych praktyk naukowych.

Zastosowanie nowoczesnych technologii, takich jak dyfraktometr Panalytical Empyrean, mikroskopy elektronowe JEOL JSM-6480, JEOL JEM 3010 i Thermo Fisher G2 200 Themis, a także kalorymetr Netzsch Pegasus 401 F1, umożliwiło przeprowadzenie dokładnych i rzetelnych badań. Ponadto, techniki nanoindentacji z użyciem Triboindenter Hysitron Ti 950

oraz mikrotwardości z testerem MicroVickers 401MVD firmy Wilson Instruments, jak również potencjodynamiczne badania przy użyciu systemu Metrohm / Eco Chemie Autolab PGSTAT30, potwierdzają wysoki poziom merytoryczny przeprowadzonych prac.

Współpraca z ośrodkami o międzynarodowej renomie oraz nadzór doświadczonych ekspertów zapewniają, że badania zostały przeprowadzone rzetelnie i profesjonalnie, zgodnie z najwyższymi standardami naukowymi, co świadczy o wysokiej jakości pracy doktoranta.

Praca liczy 207 stron, z czego 115 stron stanowi zasadnicza część, czyli tzw. przewodnik po publikacjach, po której występują załączniki, zawierające: Wykaz osiągnięć naukowych (załącznik nr 1), w tym 10 publikacji naukowych oraz związane z nimi wskaźniki dorobku naukowego (metryki naukowe), dane o udziale doktoranta w konferencjach naukowych, informacje o jego stażach naukowych, nagrodach i wyróżnieniach, udziale w projektach, kursach i szkoleniach oraz o działalności popularyzatorskiej związanej z nauką. Kolejne załączniki od nr 2 do nr 5 stanowią wybrane przez doktoranta 4 publikacje. Po załączniku 5 występuje 10 oświadczeń współautorów o wkładzie własnym w publikacje. Praca zawiera 40 rysunków i 23 tabele.

Z wykazu zamieszczonego w pracy wynika, że osiągnięcia naukowe doktoranta obejmują szeroki zakres działań badawczych, publikacyjnych i popularyzatorskich. W trakcie studiów opublikował 10 artykułów naukowych w recenzowanych czasopismach, z których 7 dotyczyło stopów o wysokiej entropii. Sumaryczna liczba punktów MEiN wynosi 850, a łączny Impact Factor opublikowanych prac to 24,421. Oprócz publikacji, doktorant brał aktywny udział w 12 konferencjach naukowych, z czego 9 miało zasięg międzynarodowy. W jego dorobku znajduje się 7 wystąpień ustnych oraz 6 prezentacji posterowych. Dodatkowo, odbył staż naukowy w Budapeszcie, gdzie prowadził badania we współpracy z międzynarodowymi zespołami. Jego wkład w rozwój naukowy został doceniony przez otrzymanie nagrody za najlepsze wystąpienie ustne na konferencji w Wiśle. Doktorant angażuje się także w działalność organizacyjną, będąc członkiem kilku towarzystw naukowych oraz uczestnicząc w pracach Akredytowanego Laboratorium Dyfrakcji Rentgenowskiej. Ponadto, aktywnie popularyzuje naukę, organizując warsztaty i wydarzenia edukacyjne na festiwalach oraz targach.

Dorobek doktoranta świadczy o jego wszechstronnej aktywności naukowej, obejmującej liczne publikacje w renomowanych czasopismach, aktywny udział w konferencjach międzynarodowych oraz zaangażowanie w działalność popularyzatorską i organizacyjną. Jego osiągnięcia są dowodem solidnej pracy badawczej oraz zdolności do współpracy w interdyscyplinarnych projektach naukowych.

Rozdział 1 (Wstęp): Wstęp przedstawia ogólne informacje na temat stopów o wysokiej entropii (HEAs) i ich wyjątkowych właściwości. Doktorant wyjaśnia, dlaczego te stopy różnią się od tradycyjnych materiałów inżynierskich, oraz opisuje potencjalne zastosowania biomedyczne, które wynikają z ich charakterystycznych cech fizyko-chemicznych. Wprowadzenie ma na celu zarysowanie motywacji badania tych stopów, zwłaszcza w kontekście medycyny.

Rozdział 1: Przegląd doniesień literaturowych

Doktorant przedstawia szeroki przegląd literatury dotyczącej wieloskładnikowych stopów metali, w szczególności stopów o wysokiej entropii (HEAs). Stopy te charakteryzują się unikalnymi właściwościami wynikającymi z czterech efektów: wysokiej entropii, dużego zniekształcenia sieci, powolnej dyfuzji oraz efektu koktajlu, który wpływa na ich właściwości mechaniczne i termodynamiczne. Doktorant szczegółowo omawia parametry termodynamiczne stosowane w przewidywaniu tworzenia się faz w tych stopach, takie jak niedopasowanie w sieci krystalicznej (δ), entalpia mieszania (ΔH_{mix}), entropia konfiguracyjna (ΔS_{mix}), różnice w elektroujemności ($\Delta\chi$), stężenie elektronów walencyjnych (VEC) oraz parametr Zhang (Ω). Każdy z tych parametrów ma istotne znaczenie w procesie projektowania nowych materiałów. Podsumowując, doktorant zwraca uwagę na potencjał aplikacyjny HEAs w różnych dziedzinach, takich jak biomedycyna, przemysł lotniczy, energetyka czy kataliza.

Uwagi krytyczne:

- Rozdział 1.3: Choć rozdział wprowadza bio-HEAs jako potencjalnie lepsze rozwiązanie w biomedycynie, brakuje tu szczegółowych wyników badań, które bezpośrednio porównywałyby te materiały z tradycyjnymi stopami.
- Rozdział 1.3: Stwierdzenie, że bio-HEAs mogą w przyszłości zastąpić tradycyjne materiały biomedyczne, nie jest poparte konkretnymi przesłankami lub badaniami w tej części tekstu. Warto dodać cytaty z badań, które potwierdzają lepszą wytrzymałość mechaniczną, biokompatybilność czy odporność korozyjną.
- Rozdział 1.4: Choć opisano właściwości bio-HEAs, nie ma wyraźnego porównania ich z tradycyjnymi biomateriałami, takimi jak stal nierdzewna, stopy Co-Cr-Mo czy Ti6Al4V. Doktorant mógłby dodać odniesienia do badań, które potwierdzają przewagę bio-HEAs w kontekście aplikacji biomedycznych.

Rozdział 2: Teza, cel i zadania rozprawy doktorskiej

Na podstawie analizy literatury oraz wstępnych badań, doktorant sformułował tezę, że możliwe jest otrzymanie sześcioskładnikowych stopów o wysokiej entropii Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo przeznaczonych do zastosowań biomedycznych, a zmiana zawartości Hf, Mo i Zr poprawi ich odporność korozyjną. Dodatkowo, struktura tych stopów może być przewidywana na podstawie określonych parametrów termodynamicznych.

Jako cel rozprawy doktorant określił wytworzenie stopów o wysokiej entropii metodą topienia łukowego, ich charakterystyka oraz ocena wpływu dodatków Hf, Mo i Zr na strukturę i właściwości tych materiałów w kontekście ich potencjalnych zastosowań biomedycznych. Aby zrealizować wyznaczony cel, wyznaczył cztery następujące zadania badawcze:

1. wytworzenie stopów o zmiennych stężeniach Hf, Mo i Zr,
2. określenie struktury materiałów za pomocą metod rentgenowskich i mikroskopowych,
3. badanie ich właściwości mechanicznych,
4. określenie odporności korozyjnej w środowisku symulującym płyny ustrojowe.

Rozdział 3: Wytworzenie materiału

Doktorant szczegółowo opisuje proces wytworzenia badanych materiałów. Zaczyna od zaprojektowania składów chemicznych stopów Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo na podstawie parametrów termodynamicznych, takich jak entalpia mieszania i entropia konfiguracyjna. Następnie opisuje przygotowanie naważek, które uzyskano z proszków metali oraz pręta hafnu. Doktorant podkreśla tam szczególne znaczenie dokładnego wymieszania składników dzięki zastosowaniu specjalnie zaprojektowanego urządzenia do mieszania. Tak wymieszane naważki, były następnie prasowane, i przetapiane w piecu łukowym w atmosferze argonu, aby zapewnić jednorodny skład chemiczny i wysoką czystość wytopów.

Uwagi krytyczne:

Proszki użyte do przygotowania stopów charakteryzowały się wysoką czystością, jednak brak szczegółowych danych na temat zawartości tlenu. Wiadomo, że proszki były mieszane przez 72 godziny za pomocą mieszarki, ale brak informacji, czy mieszanie odbywało się w atmosferze ochronnej. Podczas późniejszej obróbki topienie i stapianie przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu, wykorzystując technikę topienia łukowego próżniowego (VAM), z zastosowaniem getteru tytanu o wysokiej czystości do wychwytywania gazów reszkowych. Proces przetapiania próbek odbywał się czterokrotnie, z odwracaniem wlewków po każdym przetopie, aby uzyskać jednorodny skład chemiczny, co potwierdzono za pomocą analiz XRD i SEM-EDS. Brakuje jednak informacji o oczyszczaniu próbek po każdym przetopie oraz o kontroli natężenia prądu i czasu przetapiania, co mogło mieć wpływ na jakość końcowego materiału.

Rozdział 4: Metody badawcze

Doktorant zastosował szereg metod badawczych w celu scharakteryzowania mikrostruktury oraz właściwości wytworzonych stopów o wysokiej entropii. Badania obejmowały dyfrakcję rentgenowską, skaningową mikroskopię elektronową, transmisyjną mikroskopię elektronową oraz skaningowo-transmisyjną mikroskopię elektronową. Analiza składu chemicznego była przeprowadzana przy użyciu spektroskopii dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego. Dokonano również analizy właściwości mechanicznych za pomocą nanoindentacji oraz pomiarów mikrotwardości, a odporność korozyjną badano przy użyciu metod potencjodynamicznych.

Ocena wiedzy Doktoranta w zakresie problematyki rozprawy doktorskiej

Doktorant wykazał się szeroką wiedzą na temat stopów o wysokiej entropii, co jest potwierdzone zarówno w jego opublikowanych artykułach, jak i w cytowanej literaturze. Zrozumienie zagadnień teoretycznych, takich jak struktura krystaliczna stopów zawierających tytan, cyrkon, hafn i molibden, jest solidnie oparte na publikacjach naukowych, które doktorant przytacza, odnosząc się do przewidywania faz w stopach wieloskładnikowych oraz ich właściwości biomedycznych. Cytowane prace, takie jak "A new look at biomedical Ti-based shape memory alloys" (Acta Biomater., 2012) oraz inne prace dotyczące prognozowania faz i biokompatybilności, pokazują, że doktorant skutecznie łączy teorię z praktyką, co znajduje odzwierciedlenie w jego badaniach nad stopami Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo.

Pod względem metod badawczych, doktorant sprawnie zastosował nowoczesne techniki, takie jak mikroskopia elektronowa (SEM, TEM), dyfrakcja rentgenowska (XRD) oraz

spektroskopia dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego (EDS), co umożliwiło kompleksową analizę struktury i składu chemicznego badanych stopów. Wysokiej jakości wyniki uzyskane przy użyciu tych metod świadczą o zaawansowanych umiejętnościach doktoranta w zakresie interpretacji wyników i projektowania badań.

W odniesieniu do literatury, doktorant dobrze zintegrował wyniki swoich badań z istniejącymi danymi naukowymi, w szczególności cytując istotne prace dotyczące właściwości biokompatybilnych pierwiastków, a także prognozowania tworzenia się faz na podstawie obliczeń termodynamicznych. Jednak mimo że doktorant odnosi się do istotnych prac w literaturze, niektóre wnioski mogłyby być wzmocnione przez bardziej szczegółowe porównania wyników z innymi badaniami nad stopami o podobnym składzie.

Ogólnie rzecz biorąc, doktorant wykazał się solidną wiedzą na temat stopów o wysokiej entropii oraz umiejętnością ich badania przy użyciu zaawansowanych metod badawczych. Jego praca stanowi wartościowy wkład w badania nad materiałami biomedycznymi, a jednocześnie jest dobrze ugruntowana w aktualnej literaturze naukowej.

Ocena wkładu badań w rozwój nauki w temacie doktoratu

Badania przedstawione w pracy doktorskiej wnoszą istotny wkład w rozwój nauki w zakresie stopów o wysokiej entropii (HEAs), szczególnie w kontekście ich zastosowań biomedycznych. Praca doktoranta poszerza istniejącą wiedzę na temat projektowania, wytwarzania oraz charakterystyki stopów Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo, które mają potencjalne zastosowania w medycynie, zwłaszcza w implantologii. Doktorant wprowadza nowe koncepcje związane z wykorzystaniem pierwiastków takich jak hafn, molibden i cyrkon, co umożliwia poprawę właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej tych stopów.

Jednym z kluczowych osiągnięć pracy jest zastosowanie zaawansowanych metod badawczych do kompleksowej analizy struktury oraz właściwości mechanicznych i korozyjnych tych materiałów. Wyniki badań doktoranta pozwalają lepiej zrozumieć wpływ składu chemicznego na mikrostrukturę i właściwości fizykochemiczne stopów wysokoentropowych, co jest istotnym krokiem naprzód w tej dziedzinie. W szczególności jego badania nad odpornością korozyjną stopów w środowisku symulującym płyny ustrojowe są szczególnie ważne dla rozwoju nowych materiałów biomedycznych o zwiększonej trwałości.

Kolejnym ważnym aspektem pracy doktoranta jest wykazanie, że poprzez odpowiednie modyfikacje składu chemicznego (zmiana stężeń Hf, Mo, Zr), można kontrolować właściwości tych stopów, co daje możliwość dalszego ich dostosowywania do specyficznych potrzeb w różnych aplikacjach medycznych. Badania te stanowią zatem istotny wkład w rozwój materiałów inżynierskich o wysokiej entropii i pokazują, jak precyzyjne projektowanie składu może wpływać na ich funkcjonalność.

Wkład pracy w rozwój nauki jest również widoczny w kontekście biomedycznych zastosowań stopów wysokoentropowych. Odkrycie, że materiały te mogą być użyteczne w medycynie, otwiera nowe możliwości badawcze w zakresie tworzenia wytrzymałych, odpornych na korozję implantów o długotrwałym działaniu w organizmie. Dodatkowo, badania doktoranta mogą służyć jako punkt odniesienia dla dalszych prac w dziedzinie stopów wieloskładnikowych oraz ich modyfikacji pod kątem różnych zastosowań.

Podsumowując, badania doktoranta znacząco wzbogacają wiedzę o stopach o wysokiej entropii, w szczególności w aspekcie ich zastosowań biomedycznych, i wnoszą cenny wkład do nauki zarówno w zakresie projektowania materiałów, jak i ich zastosowań praktycznych.

Ocena zastosowania odpowiednich metod badawczych oraz adekwatność i kompletność opisów doświadczeń

W pracy doktorskiej zastosowano odpowiednie metody badawcze, ściśle powiązane z rozwiązywanymi problemami. Celem badań było zbadanie wpływu dodatków stopowych Hf, Mo i Zr na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne oraz odporność korozyjną stopów o wysokiej entropii. W tym kontekście wybrane metody badawcze, takie jak dyfrakcja rentgenowska (XRD), skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) z EDS, transmisyjna mikroskopia elektronowa (TEM), nanoindentacja oraz metody potencjodynamiczne i spektroskopia impedancji elektrochemicznej (EIS), były w pełni adekwatne do analizy mikrostruktury, twardości i odporności korozyjnej tych materiałów. Na przykład, XRD i SEM umożliwiły precyzyjną analizę składu fazowego i mikrostruktury, TEM potwierdziło obecność fazy amorficznej, a metody korozyjne pozwoliły na określenie parametrów odporności korozyjnej, co było kluczowe w kontekście zastosowań biomedycznych.

Opis doświadczeń w pracy jest szczegółowy i kompletny, co pozwala na pełne zrozumienie przeprowadzonych eksperymentów. Zawarto precyzyjne informacje dotyczące wytwarzania stopów, w tym procesy technologiczne, takie jak mieszanie proszków i topienie łukowe, co świadczy o rzetelnym podejściu do badań. Opisy zastosowanych metod oraz uzyskane wyniki są wyczerpujące i dobrze uzasadnione, co wskazuje na pełną adekwatność wybranych technik badawczych do rozwiązywanych problemów. Badania przeprowadzono w sposób systematyczny i zgodny z założonymi celami, a wyniki są spójne z teorią, co podkreśla ich wiarygodność.

Drobna uwaga dotyczy braku oznaczenia osi pasa (zone axis) na rozwiązaniach dyfrakcji elektronowej. Oznaczenie to ułatwiłoby pełniejszą interpretację wyników oraz porównanie ich z innymi pracami, jednak przedstawione rozwiązania pozostają czytelne i wartościowe w swojej obecnej formie.

Ocena zgodności interpretacji wyników z aktualnym stanem wiedzy naukowej

Interpretacja wyników przedstawionych w pracy doktorskiej jest zgodna z aktualnym stanem wiedzy naukowej dotyczącej stopów o wysokiej entropii (HEAs) oraz ich zastosowań biomedycznych. Doktorant w oparciu o wyniki swoich badań skutecznie odnosi się do literatury naukowej i teoretycznych podstaw materiałoznawstwa, zwłaszcza w zakresie termodynamiki i mikrostruktury stopów wieloskładnikowych.

Wyniki badań nad stopami Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo, które doktorant uzyskał, są zgodne z przewidywaniami teoretycznymi opartymi na parametrach termodynamicznych, takich jak entalpia mieszania, niedopasowanie w sieci krystalicznej czy stężenie elektronów walencyjnych. W literaturze naukowej, zwłaszcza w pracach poświęconych stopom o wysokiej entropii, podkreśla się znaczenie tych parametrów w projektowaniu nowych materiałów, co zostało potwierdzone przez doktoranta w jego badaniach. Zatem, interpretacja

wyników dotyczących struktury i właściwości mechanicznych stopów jest zgodna z obowiązującą wiedzą w tej dziedzinie.

Wyniki dotyczące odporności korozyjnej w środowisku symulującym płyny ustrojowe ciała człowieka również są zgodne z literaturą, która podkreśla kluczową rolę pierwiastków takich jak Zr, Ti, Hf i Mo w zwiększaniu odporności na korozję stopów o wysokiej entropii. Doktorant skutecznie odwołuje się do istniejących badań nad biokompatybilnością tych pierwiastków, co wzmacnia wiarygodność jego interpretacji. W literaturze naukowej wskazuje się, że stopy zawierające te pierwiastki mają duży potencjał w aplikacjach biomedycznych, a wyniki doktoranta potwierdzają te założenia.

Jednakże w pewnych miejscach praca mogłaby korzystać z głębszego porównania wyników z istniejącymi badaniami, szczególnie w kontekście innych stopów o podobnym składzie. Chociaż interpretacje doktoranta są prawidłowe, to bardziej rozbudowana analiza porównawcza z wynikami innych badaczy mogłaby dodać jeszcze większej głębi w interpretacji rezultatów.

Podsumowując, interpretacja wyników pracy doktorskiej jest zgodna z aktualnym stanem wiedzy naukowej. Doktorant odnosi się do kluczowych publikacji z zakresu stopów o wysokiej entropii, a uzyskane przez niego wyniki są w dużej mierze spójne z przewidywaniami teoretycznymi oraz wynikami innych badaczy w tej dziedzinie.

Wniosek końcowy

Mgr inż. Karsten Główka w swojej pracy doktorskiej przedstawił wyniki badań oraz analizę dotyczącą struktury i właściwości stopów o wysokiej entropii AlCoCrxFeNiSi_y oraz AlCoFeNi(Ti,Si) , wytwarzanych metodami szybkiego chłodzenia.

Cel i teza opiniowanej pracy doktorskiej zostały sformułowane poprawnie i jednoznacznie.

Przeprowadzone badania dotyczące stopów o wysokiej entropii Ti-Ta-Nb-Zr-Hf-Mo mają istotne znaczenie dla rozwoju nauki w dziedzinie inżynierii materiałowej, szczególnie w kontekście biomedycznych zastosowań tych materiałów. Doktorant wykazał się dogłębną wiedzą na temat właściwości fizykochemicznych oraz mechanicznych badanych stopów, skutecznie wprowadzając nowoczesne metody badawcze, takie jak mikroskopia elektronowa czy dyfrakcja rentgenowska. Wyniki badań są zgodne z aktualnym stanem wiedzy naukowej, co zostało poparte szeroką analizą literaturową oraz odpowiednią interpretacją wyników.

Ponadto, zaproponowane przez doktoranta modyfikacje składu stopów, które skutkowały poprawą odporności korozyjnej i właściwości mechanicznych, mają potencjalne zastosowania w medycynie, szczególnie w implantologii. Rozprawa przedstawia wartościowy wkład w rozwój stopów o wysokiej entropii, a wnioski doktoranta są dobrze uzasadnione zarówno eksperymentalnie, jak i teoretycznie.

W rozprawie doktorskiej kluczowym osiągnięciem jest potwierdzenie wysokiej skuteczności zastosowanych parametrów termodynamicznych przy domniemaniu tworzenia się roztworów stałych po wytworzeniu stopów o wysokiej entropii. Badania wykazały zgodność pomiędzy przewidywaniami termodynamicznymi a rzeczywistą mikrostrukturą analizowanych stopów, co potwierdzono metodami rentgenowskiej analizy fazowej (XRD) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM).

W *Publikacji 1* istotnym osiągnięciem było potwierdzenie wielofazowej mikrostruktury stopu $\text{Co}_{15}\text{Cr}_{15}\text{Mo}_{25}\text{Si}_{15}\text{Y}_{15}\text{Zr}_{15}$ oraz uzyskanie struktury amorficznej w technice topienia łukowego, co jest znaczące ze względu na niską krytyczną szybkość chłodzenia (CCR). Wykazano również, że reguły Inoue wspomagają wybór składników stopowych dla stopów o strukturze amorficznej.

W *Publikacjach 2-4* potwierdzono zgodność pomiędzy przewidywaniami parametrów termodynamicznych a analizą mikrostruktury, w tym obecność dwóch faz o strukturze regularnej przestrzennie centrowanej (BCC) dla materiałów o zmiennym stężeniu Hf, Mo i Zr. Przeprowadzono również badania nad materiałami o wysokiej entropii wytworzonymi z proszków pierwiastków, co jest rzadkością w literaturze, gdzie częściej stosuje się materiały lite.

Kolejnym ważnym osiągnięciem było zbadanie wpływu dodatków stopowych Hf, Mo i Zr na skład fazowy, mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i odporność korozyjną. Wzrost stężenia Mo powodował zmniejszenie parametrów komórek elementarnych, podczas gdy wzrost stężenia Hf i Zr powodował ich zwiększenie. Wykazano, że Mo ma znaczący wpływ na mikrotwardość badanych stopów, natomiast wpływ Hf i Zr na te właściwości był niski.

W zakresie odporności korozyjnej potwierdzono, że badane stopy charakteryzują się wyższymi potencjałami przebicia warstwy tlenkowej (EBD) w porównaniu do powszechnie stosowanych materiałów biomedycznych, przy czym Zr miał największy wpływ na wartość tego parametru, a Mo i Hf miały niski wpływ na te właściwości.

Tak kompleksowe i rzetelne badania, poparte szczegółowymi analizami mikrostruktury, właściwości mechanicznych oraz odporności korozyjnej badanych stopów, świadczą o wysokim poziomie naukowym pracy. Wyniki te mają istotne znaczenie zarówno w kontekście teoretycznym, jak i praktycznym, co czyni je cennym wkładem w rozwój inżynierii materiałowej.

Tym samym uważam, że rozprawa doktorska spełnia ustawowe wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora, określone ustawą o stopniach i tytułach naukowych – Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz. U. 2018 r., poz. 1668. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Śląskiego o nadanie mgr inż. Karstenowi Główce stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Recenzent



Dr hab. inż. Krzysztof Ziewiec, Prof. UKEN