



dr hab. inż. Oleksii Nosko, prof. uczelni
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
e-mail: oleksii.nosko@pg.edu.pl

Gdańsk, 29.05.2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Marzeny Tokarewicz
pt. „Kształtowanie właściwości mechanicznych stopów wysokoentropowych
na bazie AlCoCrFeNi”

Podstawą przygotowania recenzji jest Uchwała nr 93/2024-2028 Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej, przyjęta w dniu 25 lutego 2026 r. Dyscyplina naukowa rozprawy doktorskiej: inżynieria mechaniczna. Promotor rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Małgorzata Grądzka-Dahlke.

Zakres i treść rozprawy. Rozprawa składa się ze wstępu, pięciu rozdziałów (przegląd literatury, cel i zakres rozprawy doktorskiej, metodyka badań, wyniki badań i dyskusja, podsumowanie), spisu literatury, spisu tabel, spisu rysunków oraz streszczeń w językach polskim i angielskim. Praca liczy 146 stron i zawiera 79 rysunków, 9 tabel oraz 180 pozycji bibliograficznych.

We *wstępie* przedstawiono aktualność podjętego kierunku badań, dotychczasowego rozwoju i zastosowania stopów wysokoentropowych, ze szczególnym uwzględnieniem układu AlCoCrFeNi. Lukę badawczą określono jako niedostateczny stan wiedzy dotyczący wpływu modyfikacji składu chemicznego oraz kształtowania mikrostruktury stopów AlCoCrFeNi na uzyskiwane właściwości wytrzymałościowe. Wskazano również na niewystarczającą liczbę badań poświęconych optymalizacji takich materiałów i technologii ich wytwarzania pod kątem konkretnych zastosowań inżynierskich, w tym wysokotemperaturowych, tribologicznych i korozyjnych.

W *rozdziale pierwszym* przedstawiono aktualny stan wiedzy związany z tematyką badań. Przeprowadzono przegląd ponad 150 źródeł bibliograficznych, opublikowanych głównie w ostatnich latach. Omówiono historię rozwoju stopów wysokoentropowych, podejścia do ich definiowania, podstawowe efekty występujące w takich stopach, a także metody ich projektowania oraz przykładowe kompozycje. Szczegółowo opisano metody otrzymywania stopów wysokoentropowych. Przeanalizowano zależność granicy plastyczności i wytrzymałości od temperatury dla różnych stopów wysokoentropowych. Uzasadniono przewagę oraz zauważalny potencjał stopu AlCoCrFeNi pod względem właściwości mechanicznych i tribologicznych, zwłaszcza w warunkach wysokotemperaturowych oraz w środowiskach sprzyjających korozji. Jednocześnie podkreślono dużą wrażliwość struktury i właściwości funkcjonalnych tego stopu na technologię i parametry wytwarzania oraz na zawartość poszczególnych pierwiastków.

Rozdział drugi poświęcono sformułowaniu celu pracy i hipotezy badawczej oraz określeniu zakresu i podstawowych metod badań. Cel naukowy pracy został sformułowany jako „wyjaśnienie zjawisk odpowiedzialnych za właściwości wytrzymałościowe stopów na bazie AlCoCrFeNi”. Hipoteza badawcza zakłada natomiast, że „zmiana składu chemicznego, w szczególności zawartości aluminium i wybranych dodatków stopowych (Ti, V), umożliwi kontrolowane kształtowanie struktury fazowej i mikrostruktury stopów AlCoCrFeNi, a tym samym pozwala na świadome regulowanie ich właściwości mechanicznych, tribologicznych i żaroodporności”.

W *rozdziale trzecim* opisano zastosowane metody wytwarzania stopów, obejmujące topienie łukowe i indukcyjne, metody przygotowania próbek, w tym wycinanie drutowe, szlifowanie i polerowanie, a także metody badań mikrostruktury i składu chemicznego, takie jak SEM, EDS, XRD i FIB. Przedstawiono również metody badania właściwości mechanicznych, obejmujące pomiar twardości metodą Vickersa, statyczną próbę zginania trójpunktowego oraz statyczną próbę rozciągania, jak również metody badań tribologicznych prowadzonych w układzie kula-tarcza w warunkach tarcia suchego. Omówiono ponadto metody oceny odporności na utlenianie w wysokich temperaturach, obejmujące ogrzewanie w piecu oraz analizę chemiczną.

Rozdział czwarty przedstawia wyniki przeprowadzonych badań. Przeanalizowano wpływ zawartości aluminium na mikrostrukturę, skład chemiczny i twardość stopu AlCoCrFeNi. Ustalono, że stopy o mniejszej zawartości aluminium wykazują większą plastyczność, co umożliwia ich powtarzalne wytwarzanie. Następnie zbadano wpływ wyżarzania oraz zawartości aluminium na właściwości wybranych stopów, w tym na ich mikrostrukturę, umowną granicę plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł Younga. Stwierdzono, że stop Al_{0.7}CoCrFeNi

cechuje się najkorzystniejszym zestawem właściwości, w szczególności stabilną strukturą oraz najwyższą granicę plastyczności oraz wytrzymałością na rozciąganie. Ponadto przeprowadzono badania wpływu modyfikacji składu stopu $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNi}$ dodatkiem wanadu lub tytanu na jego mikrostrukturę oraz właściwości tribologiczne, w tym parametry śladu tarcia, twardość, współczynnik tarcia i zużycie. Ujawniono mechanizmy i cechy zużycia stopów $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNiV}_{0.5}$ i $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$. Wykazano przewagę stopu $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNiTi}_{0.5}$ pod względem odporności na zużycie, wynikającą z połączenia wysokiej twardości stopu oraz obecności stabilnej warstwy wtórnej, chroniącej powierzchnię tarcia przed zużyciem adhezyjnym. Końcowym etapem badań była analiza wpływu zawartości tytanu na mikrostrukturę, właściwości mechaniczne i odporność na utlenianie stopu $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNi}$. Ustalono, że stop $\text{Al}_{0.7}\text{CoCrFeNiTi}_{0.05}$ charakteryzuje się największą wytrzymałością spośród analizowanych kompozycji oraz wysoką odpornością na utlenianie.

W rozdziale piątym przedstawiono podsumowanie uzyskanych wyników badawczych oraz sformułowano wnioski końcowe. Stwierdzono, że „cel rozprawy doktorskiej został osiągnięty, a postawiona hipoteza badawcza została dowiedziona”, a także że „uzyskane wyniki potwierdziły możliwość świadomego kształtowania mikrostruktury i właściwości stopów wysokoentropowych z układu AlCoCrFeNi poprzez odpowiedni dobór składu chemicznego, modyfikację dodatkami stopowymi oraz kontrolę parametrów przetwarzania”.

Ocena merytoryczna rozprawy. W rozprawie podjęto problem udoskonalenia stopów wysokoentropowych na bazie AlCoCrFeNi pod względem właściwości mechanicznych i tribologicznych, z przeznaczeniem do pracy w warunkach podwyższonej temperatury oraz intensywnego oddziaływania korozyjnego. Zagadnienie to należy do grupy problemów interdyscyplinarnych, z dominującym udziałem inżynierii mechanicznej. Rozwój materiałów wysokoentropowych stanowi aktualny i ważny kierunek badań naukowych oraz prac technologicznych, ponieważ materiały te stwarzają możliwość projektowania nowych kombinacji właściwości, niedostępnych dla materiałów tradycyjnych, znajdujących zastosowanie zarówno w inżynierii mechanicznej, jak i w energetyce, elektronice czy biomedycynie. Złożony skład chemiczny stopów wysokoentropowych powoduje trudności w przewidywaniu ich struktury, stabilności fazowej oraz właściwości użytkowych. Dlatego współczesne badania koncentrują się nie tylko na otrzymywaniu nowych kompozycji, lecz także na wyjaśnieniu mechanizmów ich funkcjonowania, optymalizacji metod syntezy oraz skalowaniu technologii do zastosowań inżynierskich. Aktualność wybranego kierunku badań potwierdza duża liczba cytowań artykułu przeglądowego pt. „Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy” (DOI:10.3390/met11081302), którego pierwszą współautorką jest Doktorantka (wg bazy Scopus 199 cytowań). Można zatem stwierdzić, że *temat pracy jest bardzo aktualny*.

Złożoność zagadnienia udoskonalenia stopów wysokoentropowych wynika z konieczności jednoczesnego uwzględnienia wielu czynników wpływających na ich strukturę i właściwości. Wieloskładnikowy charakter tych stopów powoduje, że zmiana zawartości nawet jednego pierwiastka może istotnie oddziaływać na stabilność fazową, mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne i użytkowe materiału. W rozprawie zagadnienie to zostało rozsądnie podzielone na kilka etapów, w których udoskonalanie stopów prowadzono przy racjonalnie dobranej liczbie parametrów. Takie podejście z jednej strony upraszcza analizę problemu, a z drugiej pozwala eliminować istotną grupę nieperspektywicznych kompozycji przed przejściem do kolejnego etapu badań. W pierwszej kolejności układ AlCoCrFeNi zoptymalizowano poprzez zmianę zawartości aluminium pod względem stabilności struktury i wytrzymałości na rozciąganie, uzyskując stop $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNi}$. Następnie stop ten zmodyfikowano dodatkiem tytanu w celu poprawy odporności na zużycie w warunkach tarcia suchego, uzyskując kompozycję $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,5}$. W końcowym etapie dokonano dalszej optymalizacji zawartości tytanu pod kątem wytrzymałości na rozciąganie oraz odporności na utlenianie, wskazując kompozycję $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,05}$. Wytwarzanie stopów i przygotowanie próbek oparto na metodach metalurgicznych i obróbki mechanicznej. Badanie właściwości materiałów zostało oparte na wykorzystaniu różnorodnych metod mechanicznych, tribologicznych i chemicznych. Zastosowane metody badawcze wykorzystano w sposób poprawny. Można zatem stwierdzić, że *koncepcja i metodologia badań są naukowo uzasadnione i poprawne*.

W wyniku badań przeprowadzonych przez Doktorantkę opracowano udoskonalone stopy wysokoentropowe $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNi}$, $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,5}$ oraz $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,05}$, które wykazują istotnie lepsze właściwości eksploatacyjne. Przykładowo, modyfikacja składu AlCoCrFeNi do $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNi}$ powoduje około pięciokrotny wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy nieznacznym zmniejszeniu twardości i sprężystości. Dalsza modyfikacja $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNi}$ do $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,5}$ umożliwia zmianę mechanizmu zużycia na korzystniejszy, związany z powstawaniem stabilnej i twardej warstwy wtórnej, co prowadzi do istotnej poprawy odporności na zużycie. Ponadto modyfikacja $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,5}$ do $\text{Al}_{0,7}\text{CoCrFeNiTi}_{0,05}$ pozwala znacząco zwiększyć odporność na utlenianie wysokotemperaturowe. W rozprawie potwierdzono zatem, że właściwości mechaniczne i tribologiczne stopów AlCoCrFeNi mogą być regulowane poprzez kontrolowane kształtowanie mikrostruktury oraz wprowadzanie dodatków stopowych. Tym samym postawiona przez Doktorantkę hipoteza badawcza została dowiedziona. Warto podkreślić, że każdy istotny wpływ składu materiału na jego właściwości mechaniczne lub tribologiczne został zbadany nie tylko ilościowo, lecz także wyjaśniony na podstawie szczegółowej analizy mechanizmów zmian strukturalnych oraz odpowiednich procesów chemicznych.

Nadaje to rozprawie charakter eksplanacyjny. Zatem, *uzyskane wyniki mają istotne znaczenie zarówno praktyczne, jak i teoretyczne.*

Rezultaty rozprawy opierają się na wynikach badań opublikowanych we współautorstwie w 5 artykułach naukowych w czasopismach *Materials* (IF2024 3,2) i *Metals* (IF 2024 2,5). W czterech z tych publikacji Doktorantka występuje jako pierwsza współautorka. Zatem, *dorobek publikacyjny Doktorantki jest bardzo dobry.*

Uwagi dyskusyjne są następujące:

- 1) Wiarygodność i dokładność wyników badań eksperymentalnych zależą od liczby powtórzeń eksperymentów prowadzonych w identycznych warunkach. W poszczególnych cyklach badań wybór liczby powtórzeń, która w niektórych przypadkach odpowiadała liczbie próbek, nie został jednak uzasadniony. Może to budzić wątpliwości co do istotności statystycznej uzyskanych wyników.
- 2) Wyniki badań eksperymentalnych są w różnym stopniu obarczone błędami pomiarowymi. W pracy nie oszacowano jednak czułości, dokładności i precyzji zastosowanej aparatury pomiarowej ani dokładności metod pomiarowych jako całości.
- 3) Właściwości tribologiczne modyfikowanych stopów, w tym odporność na zużycie i siłę tarcia, zbadano za pomocą tribometru w warunkach tarcia suchego. Układ tarciový tribometru obejmował tarczę wykonaną z badanego stopu oraz kulę wykonaną z tlenku glinu, pełniącą funkcję przeciwciała. Zużycie linowe tarczy zostało zbadane systematycznie, natomiast zużycie kuli nie zostało objęte zakresem badań. W związku z tym sformułowane wnioski dotyczące właściwości tribologicznych stopów nie mogą być uznane za w pełni kompleksowe, ze względu na niewyjaśniony wpływ modyfikacji składu stopu na zużycie przeciwciała.
- 4) Rozdział trzeci, zatytułowany „Metodyka badań”, zawiera dość powierzchowny opis zastosowanych metod badawczych i jest nieproporcjonalnie krótki w stosunku do całości rozprawy.
- 5) Wyodrębnienie „Celu i zakresu rozprawy doktorskiej” jako oddzielnego rozdziału drugiego rozprawy ma charakter dyskusyjny.
- 6) Ostatni akapit rozdziału drugiego, rozpoczynający się od słów „Wyniki badań otrzymane podczas realizowania pracy doktorskiej pozwoliły ...”, nie należy do wstępnego opisu zakresu rozprawy, lecz dotyczy wyników badań. Powinien on zatem zostać zintegrowany z dalszymi rozdziałami rozprawy.
- 7) Lista źródeł literaturowych zawiera liczne powtarzające się odniesienia, w szczególności pozycje: 54/165, 87/89, 93/105, 114/133, 153/177.

Podsumowanie. Oceniana rozprawa doktorska stanowi ukończoną pracę naukową, w której rozwiązano problem optymalizacji stopów wysokoentropowych z układu AlCoCrFeNi pod względem właściwości mechanicznych, tribologicznych i chemicznych w warunkach wysokotemperaturowych i korozyjnych. Podjęta problematyka jest istotna zarówno z punktu widzenia teorii, jak i praktyki inżynierskiej. Rozprawę można bez wątpienia scharakteryzować jako oryginalną, eksplanacyjną, interdyscyplinarną i interesującą.

Rozprawa spełnia ustawowe i merytoryczne wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. — Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.). *Wnioskuje o dopuszczeniu rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marzeny Tokarewicz do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.*

Biorąc pod uwagę złożoność problemu rozpatrywanego w rozprawie, różnorodność metod eksperymentalnych wykorzystanych do jego rozwiązania, a także dorobek publikacyjny oraz znakomite wskaźniki naukometryczne Doktorantki, z przyjemnością *wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.*

Z wyrazami szacunku,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'AlOCKO'.