

Dr hab. inż. Barbara Kalandyk, prof. AGH
Katedra Inżynierii Stopów i Kompozytów
Wydział Odlewnictwa
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Kraków, dnia 10.09.25

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Mateusza Dziubka

**pt.: „Wykorzystanie mechanizmu rekrytalizacji typu PSN w procesie
dwuetapowej obróbki cieplnej stali X120Mn12 w celu zwiększenia
odporności na zużycie ścierne”**

wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki
Wrocławskiej z dnia 9 lipca 2025 roku.

1. Charakterystyka ogólna pracy

Otrzymana do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mateusza Dziubka pt.: „*Wykorzystanie mechanizmu rekrytalizacji typu PSN w procesie dwuetapowej obróbki cieplnej stali X120Mn12 w celu zwiększenia odporności na zużycie ścierne*” została wykonana pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Dominiki Grygier, prof. PWr, promotora pracy, przy wsparciu dr inż. Małgorzaty Rutkowskiej-Gorczy - promotora pomocniczego.

Rozprawa została opracowana w układzie klasycznym, obejmującym część stanowiącą przegląd literatury oraz część badawczą. Całość liczy 148 stron i składa się ze streszczenia, abstraktu, wykazu najważniejszych pojęć i skrótów użytych w pracy, siedmiu rozdziałów, spisu ilustracji, tabel i literatury oraz trzech załączników. Bibliografia obejmuje 205 pozycji (w tym 2 normy i 6 patentów), z czego 120 opublikowano przed 2015 rokiem, a 85 po roku 2015, w tym 46 po 2020 roku. Wśród pozycji literaturowych znajdują się trzy publikacje współautorstwa Doktoranta. Jedna o zasięgu międzynarodowym (*Materials – 2022r*) i dwie publikacje w krajowym czasopiśmie *Tribologia (2021, 2023r)*.

Pod względem językowym i edytorskim praca została przygotowana bardzo starannie. Rysunki, tabele oraz obrazy mikrostruktur charakteryzują się wysoką jakością, a Autor wykazał się dużą dbałością o tę część rozprawy. Cennym rozwiązaniem było także umieszczenie

dotychczasowych mikrostruktur w formie trzech załączników. Podsumowując, całość rozprawy pod względem redakcyjnym i graficznym oceniam bardzo wysoko.

2. Uzasadnienie tematyki i celu pracy

Tematyka rozprawy doktorskiej Pana Mateusza Dziubka obejmuje zagadnienia mieszczące się w dwóch dyscyplinach: inżynierii materiałowej i mechanicznej, a przeprowadzone badania wpisują się w istotny obszar badań zużycia i poprawy właściwości tribologicznych wysokomanganowej stali X120Mn12 poprzez zmiany w jej mikrostrukturze. W tym zakresie wciąż poszukuje się nowych, innowacyjnych metod wydłużających czas eksploatacji elementów wykonanych z tej stali czy staliwa, przede wszystkim w obszarze inżynierii materiałowej. Jest to szczególnie ważne, ponieważ stal X120Mn12, jak słusznie zaznaczył Doktorant we wstępie swojej pracy, od ponad wieku znajduje zastosowanie na elementy narażone na silne oddziaływania dynamiczne. Pomimo licznych prób, do tej pory nie udało się znaleźć stopu łączącego równie dobre właściwości mechaniczne i użytkowe, co stal X120Mn12, powszechnie znana jako stal czy staliwo Hadfielda.

Ze względu na szerokie zastosowanie tej stali – m.in. w kruszarkach, rozjazdach kolejowych czy elementach młynów węglowych – badania skupiają się na rozszerzeniu obszaru jej wykorzystania, nie tylko w warunkach oddziaływania silnych nacisków dynamicznych, lecz także na działanie mniejszych obciążeń wywołanych np. przez drobne cząstki materiału kruszonego. Od wielu lat jednym z kierunków poszukiwań jest umocnienie osnowy węglkami pierwiastków silnie węglkotwórczych, takich jak Ti, Cr czy V przez wprowadzenie ich w czasie technologii topienia. Nowym, aktualnym i innowacyjnym rozwiązaniem stosowanym w przypadku elementów odlewanych jest użycie reaktywnych wyprasek zawierających proszki TiC lub WC. Są one wprowadzane bezpośrednio do form odlewniczych, które po zalaniu ciekłym metalem tworzą warstwę kompozytową. Zaletą tej metody jest możliwość zwiększenia odporności na zużycie ścierne wybranych powierzchni elementów odlewanych. Badania przemysłowe zespołu dr inż. E. Olejnik potwierdziły korzystny wpływ tego rozwiązania, wydłużający czas eksploatacji m.in. młotków w kruszarkach udarowych służących do kruszenia rud miedzi.

Kolejnym ważnym kierunkiem badań zwiększającym odporności na zużycie ścierne elementów ze stali i staliwa Hadfielda są metody umocnienia powierzchniowego stosowane przed eksploatacją, np. kulowanie, młotkowanie, czy umocnienie wybuchowe. To ostatnie rozwiązanie było testowane m.in. dla rozjazdów kolejowych.

Na tle przedstawionych badań i wprowadzonych rozwiązań, praca Doktoranta wyróżnia się tym, że proponowane zmiany w mikrostrukturze stali zachodzą nie tylko w wybranych miejscach, lecz w całej objętości materiału. Oczywiście, podobnie jak w przypadku odlewów, nie wszystkie powierzchnie są jednakowo obciążone, jednak biorąc pod uwagę złożoność mechanizmów zużycia oraz procesów zachodzących podczas eksploatacji, zaproponowane rozwiązanie może być szczególnie wartościowe i mieć duży potencjał praktyczny. Z tego względu wybór tematu rozprawy przez Doktoranta należy uznać za ważny krok w kierunku opracowania nowych, dobrze rokujących rozwiązań, zwiększających odporność stali i staliwa Hadfielda na zużycie ścierne. Co więcej, ma on istotne znaczenie praktyczne z punktu widzenia przemysłu wydobywczego, kolejnictwa oraz zastosowań wojskowych.

Cel pracy jest ambitny i obejmuje opracowanie oraz weryfikację efektów dwuetapowej obróbki cieplnej stali X120Mn12 (izotermiczne wyżarzanie i reaustenitizację), wykorzystującej mechanizm rekrytalizacji stymulowanej cząsteczkami (PSN). Mechanizm ten prowadzi do rozdrobnienia mikrostruktury badanej stali i poprawy jej odporności na zużycie ścierne. Teza pracy została jasno sformułowana, a zakres sześciu szczegółowych zadań badawczych podanych przez Doktoranta w pełni odpowiada tematowi rozprawy doktorskiej. W mojej opinii **cel i teza pracy zostały jasno zdefiniowane, a zagadnienie badawcze ważne z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego.**

3. Omówienie i ocena recenzowanej pracy

Przegląd literatury obejmuje najważniejsze zagadnienia związane z realizowaną pracą dokorską tj. charakterystykę wysokomanganowej stali 120Mn12, tribologię procesów kruszenia oraz omówienie mechanizmu rekrytalizacji PSN. W tej części pracy Doktorant wyszedł poza przyjęte schematy i wykazał się dociekliwością i bardzo wnikliwie opisał historię odkrycia i opatentowania w 1884r, tej unikalnej jeśli chodzi o właściwości, stali przez lorda R. A. Hadfielda. W kolejnych podrozdziałach poświęconych tej stali Doktorant omówił jej najważniejsze właściwości oraz kierunki modyfikacji i przedstawił obszary jej zastosowania. Ten obszar tematyczny wymaga jednak doprecyzowania pewnych stwierdzeń np. s.15 „*wykorzystanie (tej stali) na szyny kolejowe, które poddawane są silnym, zmęczeniowym obciążeniom*” w tym przypadku precyzyjniej byłoby użyć terminu: rozjazdy kolejowe, czy dodatkowo dodać rozjazdy tramwajowe. Na tej samej stronie Doktorant pisze o „...usunięciu węglików z granic ziaren austenitu przy zastosowaniu zabiegu przesycania w 1050°C po

procesie odlewania”. W mikrostrukturze po odlaniu występują nie tylko węgliki, ale dodatkowo obecne są wydzielania eutektyki fosforowej, która również jest eliminowana po przesycaniu. Warto o tym wspomnieć, ponieważ w stali i staliwie Hadfielda max. dopuszczalna zawartość P < 0,1%, a w większości stali i staliwa konstrukcyjnego zawartość P nie przekracza 0,03%. Więcej o eutektyce napisał w swojej monografii prof. Z. Stradomski [70]. Dopełnieniem informacji jakie zamieścił Doktorant w zakresie możliwości umocnienia warstwy wierzchniej stali Hadfielda przez młotkowanie czy kulowanie jest jeszcze umocnienie wybuchowe, bądź zgrzewanie wybuchowe stali Hadfielda np. ze stalą kotłową (badania np. WAT – R. Kosturek, A. Maranda, C. Senderowski, D. Zasada. *Badania nad zastosowaniem zgrzewania wybuchowego do uzyskania bimetalicznych blach z udziałem staliwa Hadfielda. Materiały Wysokoenergetyczne*, 2016, 8, 91–102).

Na stronie 16 słusznie Doktorant stwierdził, że *„każdy przypadek zastosowania stali wysokomanganowej powinien uwzględniać wielkość rzeczywistych obciążeń i warunki eksploatacyjne”* jest to o tyle ważne, że elementy wykonane ze stali i staliwa Hadfielda (podobnie jak stale i staliwa Cr-Ni odporne na korozję) są podatne na wydzielanie niekorzystnych faz w mikrostrukturze, gdy temperatura eksploatacji przekracza 300°C. Warto o tym wspomnieć i pamiętać, bo może to zniszczyć nawet najlepiej przeprowadzoną obróbkę cieplną elementów wykonanych z tej stali, a w tym konkretnym przypadku nawet tą dwuetapową. A z praktyki przemysłowej wiem, że często się o tym zapomina.

W dalszej części rozdziału Doktorant skupił się na syntetycznym przedstawieniu zagadnień związanych z różnymi mechanizmami zużycia występującymi w czasie kruszenia skał, zwracając uwagę na synergizm występowania różnych mechanizmów pomiędzy materiałem kruszonym a materiałem elementów kruszarki. Słusznie podkreślił złożoność procesów zużycia i trudności w rozgraniczeniu poszczególnych mechanizmów. W tym kontekście przedstawił zachowanie się różnych materiałów, w tym stali wysokomanganowej. Szczegółowo opisał mechanizm jej umocnienia odkształceniowego oraz możliwości wystąpienia zagrożeń związanych z jej kruchym pękaniem.

Ostatnie 5 stron poświęcił Doktorant na omówienie kluczowego rozwiązania jakim jest proces rekrystalizacji PSN. Podkreślił, że zjawisko to zostało zaobserwowane w różnych stopach, w tym również w stali. Doktorant przytoczył publikacje, których autorzy zwracają uwagę, że rozpad kolonii perlitu może doprowadzić do rekrystalizacji ziaren austenitu przez mechanizm PSN. Doktorant zaproponował zastosowanie opisanego mechanizmu do rozdrobnienia wysokomanganowej stali Hadfielda, co stanowi rozwiązanie nowatorskie i

istotne z punktu widzenia zwiększenia jej właściwości mechanicznych i odporności na zużycie ścierne.

Pomimo tych drobnych uwag przegląd literatury w zakresie zrealizowanego tematu rozprawy doktorskiej został przedstawiony w sposób całościowy i wskazuje na dobre przygotowanie Doktoranta.

Kolejny rozdział 2 poświęcił Doktorant badaniom wstępnym skupiając się na zagadnieniach uszkodzenia elementów roboczych kruszarek – a więc problematyce dotyczącej niezawodności i wydłużeniu ich czasu eksploatacji. Nakreślił problem badawczy i przedstawił uzyskane wstępne wyniki bogato je ilustrując. Ten rozdział kończy się, moim zdaniem, bardzo trafnym i przemyślanym tabelarycznym podsumowaniem podjętych prac badawczych z uwzględnieniem przeglądu literatury, co może się podobać. Przeprowadzone badania wstępne i ich szerokie omówienie w kontekście zużycia elementów roboczych kruszarek pozwoliło Doktorantowi na identyfikację kluczowych problemów badawczych i z pewnością przyczyniło się do precyzyjnego postawienia celu i tezy pracy.

Rozdział 4. Przedmiot i metodyka badań został poprawnie opisany przez Doktoranta. W części opisującej materiał brakuje jednak aktualnej normy na staliwo Hadfielda (a więc stal wlaną do formy odlewniczej), tu Doktorant używa starego oznaczenia L120Mn13. Zgodnie z obowiązującą normą powinien używać oznaczenia GX120Mn13 (lub 1.3802 - PN-EN 10349:2009), więcej informacji jest dostępnych w międzynarodowej bazie materiałowej Total materia (dostęp online). Zachęcam Doktoranta do zapoznania się z tą normą, gdyż zawiera ona również inne gatunki staliwa wysokomanganowego, w tym również gatunek GX120MnCr18-3, który obok klasycznego staliwa Hadfielda (GX120Mn13), również jest stosowany przez krajowe odlewnie na odlewane elementy kruszarek.

Na rysunku 4.1 został przedstawiony schemat obróbki dwuetapowej z wygrzewaniem izotermicznym w 510°C przez 6-12 godzin - proszę Doktoranta o uzasadnienie czasu wygrzewania oraz czasu reaustrylizacji wynoszącym 15 min.

W podrozdziale 4.3.2 nie jest podany odczynnik trawiący zastosowany do trawienia kolorowego badanej stali. Z pewnością nie jest to nital raczej inny roztwór (np. $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8 + \text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

Rozdział 5 poświęcony jest prezentacji wyników badań mikrostruktury stali X120Mn12 na różnych etapach obróbki cieplnej oraz testów mechanicznych, w tym m.in. rozciągania *in-situ*. Układ treści tego rozdziału został zaplanowany w sposób logiczny, co umożliwia pełne zrozumienie zależności pomiędzy zmianami zachodzącymi w mikrostrukturze a właściwościami mechanicznymi i odpornością na ścieranie badanej stali. Warto podkreślić

wyjątkowo staranną prezentację omawianych wyników. Godne uwagi jest szczegółowe i przejrzyste przedstawienie rezultatów badań, zwłaszcza prowadzonych z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej, elektronowej mikroskopii skaningowej oraz transmisyjnej w zakresie zmian mikrostruktury i analizy mechanizmów pękania badanej stali (m.in. wprowadzenie opisów bezpośrednio na mikrostrukturach). W celu uzupełnienia opisu mikrostruktur badanej stali wskazane byłoby przeprowadzenie symulacji jej krystalizacji, na przykład z wykorzystaniem programu ThermoCalc z równoczesnym określeniem zakresu temperatur, w których występuje cementyt. Takie uzupełnienie mogłoby istotnie wzbogacić analizę wyników przedstawionych w pracy i dodatkowo potwierdzić wybór temperatur obróbki cieplnej badanej stali.

W tym rozdziale Doktorant porównał również wyniki badań uzyskane dla stali gruboziarnistej i drobnoziarnistej X120Mn12. Analiza ta ma istotne znaczenie, ponieważ w elementach odlewanych w porównaniu ze stalą przerabianą plastycznie obserwuje się zdecydowanie większe ziarno. Z tego względu przeprowadzenie takiego porównania należy uznać za w pełni uzasadnione i potrzebne.

Należy również zwrócić uwagę, że w pracy Doktorant zastosował znane oraz nowoczesne techniki badawcze uzyskując bardzo interesujące i oryginalne wyniki o znaczeniu zarówno poznawczym jak i aplikacyjnym. A uzyskane wyniki wpisują się w aktualne nurty badawcze w zakresie poszukiwania nowych rozwiązań zwiększających odporność na zużycie stali i staliwa Hadfielda.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił podsumowanie uzyskanych wyników, które w pełni odzwierciedlają zakres przeprowadzonych badań. Jednocześnie potwierdzają one realizację założonego celu oraz weryfikację tezy niniejszej rozprawy doktorskiej. Ze względu na szeroki zakres badań, trafnym rozwiązaniem okazało się zamieszczenie graficznego podsumowania wyników, obrazującego zmiany właściwości mechanicznych i odpowiadające im zmiany w mikrostrukturze.

W ostatnim rozdziale Doktorant sformułował siedem wniosków o charakterze poznawczym i pięć o charakterze aplikacyjnym dobrze streszczających całość badań i dowodzących osiągnięcie założonego celu badawczego. Przedstawił również kierunki przyszłych swoich badań, które chce w przyszłości rozwijać.

Podsumowując zastosowanie szerokiego zestawu metod badawczych, połączone z pogłębioną analizą uzyskanych rezultatów w zakresie dwóch dyscyplin: inżynierii materiałowej i mechanicznej, świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Dziubka bez wątpienia prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu zwiększenia odporności na zużycie ścierne stali wysokomanganowej X120Mn12 poprzez dwuetapową obróbkę cieplną wykorzystującą mechanizm rekryształizacji stymulowanej cząstkami (PSN).

4. Uwagi do pracy i poprawność redakcyjna rozprawy

Trudno wskazać istotne słabe strony przesłanej do recenzji rozprawy doktorskiej. Doktorant jasno przedstawia uzyskane wyniki, a jego argumentacja jest przekonująca i łatwa do zrozumienia. Wyniki zostały wsparte licznymi rysunkami, w tym bardzo czytelnymi obrazami mikrostruktur oraz wykresami. Dodatkowo, w trzech załącznikach Doktorant zamieścił reprezentatywne obrazy mikrostruktury badanej stali na różnych etapach obróbki cieplnej, co niewątpliwie jest ułatwieniem podczas czytania rozprawy. Warto również podkreślić dużą przejrzystość i kompleksowość rozprawy z łatwością łączącą zagadnienia z zakresu inżynierii materiałowej i mechanicznej, co bezpośrednio wynika z przyjętego tematu pracy.

Doktorant nie uniknął w swojej rozprawie doktorskiej drobnych uchybień, zarówno w zakresie przyjętej terminologii, jak i błędów językowych oraz edytorskich. Należy jednak podkreślić, że liczba tych błędów jest niewielka w stosunku do objętości pracy. Do najistotniejszych z nich można zaliczyć:

Str. 1. „Morfologia mikrostruktury” - raczej jeżeli już to morfologia składników mikrostruktury.

Str. 13. „.. zubożenie matrycy w węgiel” bardziej adekwatnym określeniem jest : zubożenie osnowy w węgiel.

„..dyskwalifikuje odlew stalowy ..” odlew staliwny lub wykonany ze staliwa. Stal wlna do formy odlewniczej jest staliwem, w odróżnieniu do stali, która poddawana jest przeróbce plastycznej.

Str.15. „... szyny kolejowe...” – obecnie szyny wykonuje się z innych gatunków stali, natomiast rozjazdy kolejowe są wykonywane ze staliwa Hadfielda.

Literówki i inne błędy:

Str. 4. „...patent z 1984r ...” zamiast 1894

Str. 1. Wprowadzenie oraz 2.1. Wprowadzenie - może zamiast drugi raz powtarzać Wprowadzenie za drugim razem można było Podstawowe wiadomości kruszenie skał.

Str. 47. Na rys. 4.2.

s. 109 niepotrzebnie słowo struktury w zdaniu: "twardości austenitycznej osnowy struktury.." W literaturze [19] zdublowanie autorów.

Brak przywołania literatury w rys.:1.2, 1.3, 2.1.

Str. 35, 37. Częste używanie w środku zadania „Rys.” zamiast „rys”, podobnie w nawiasach (Rys. 2.2) zamiast (rys. 2.2).

s. 56 – tabela 5.1 czy tutaj nie ma błędu w zawartości P oraz S?

s. 60 „tempo chłodzenia” lepiej byłoby użyć „szybkość chłodzenia.

s. 64 -Tab. 5.2. Jeśli jest to analiza SEM-EDS pierwiastków, to nie powinna zawierać C, m.in. ze względu na zjawisko kontaminacji.

s. 81-82 brak przywołania rys. 5.30 i 5.31 w tekście.

s. 97 – na mikrostrukturach i w tekście określenie „wżery” należałoby zmienić na lokalne ubytki (wgłębienia powstałe po wykruszeniu lub wyrwaniu twardych cząstek z osnowy w czasie ścierania). Wżery na powierzchniach stali są związane z korozją głównie wżerową lub lokalną.

Należy podkreślić, że praca zawiera nieliczne błędy edycyjne, które nie wpływają na jej wartość naukową.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę, że praca obejmuje zagadnienia badawcze z dwóch dyscyplin: inżynierii materiałowej i inżynierii mechanicznej stwierdzam, że Doktorant bardzo dobrze poradził sobie z interpretacją i opisem uzyskanych wyników zarówno badań materiałowych oraz tribologicznych. Swoimi badaniami Doktorant udowodnił, że istnieje jeszcze możliwość poprawy odporności na ścieranie wysokomanganowej stali 120Mn12 przez dwuetapową obróbkę cieplną bez zmian w jej składzie chemicznym. Nie bez znaczenia jest również możliwość zastosowania takiej obróbki cieplnej stali 120Mn12 bez dodatkowych kosztów w warunkach przemysłowych - produkcja elementów kruszarek.

Podsumowując stwierdzam, że przesłana mi do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr inż. **Mateusza Dziubka pt.: „Wykorzystanie mechanizmu rekrytalizacji typu PSN w procesie dwuetapowej obróbki cieplnej stali X120Mn12 w celu zwiększenia odporności na zużycie ścierne”** spełnia wymogi stawiane przez Ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Wrocławskiej o dopuszczenie pana mgr inż. **Mateusza Dziubka** do publicznej obrony.


Barbara Kalandyk

Kraków, 10.09.2025