



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
Im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**KATEDRA
NAUKI o MATERIAŁACH**

Dr hab. inż. Grażyna Mrówka – Nowotnik prof. PRz
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 10.12.2025 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Anny WOJTACHA

pt. „Obróbka cieplno-plastyczna ultradrobnoziarnistych stali bainitycznych
z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa”

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny (RDYMa.512.45.2025), Pana prof. dr. hab. inż. Adama Grajcara z dnia 30 października 2025 r. informujące, że Rada Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej uchwałą z dnia 28 października 2025 r. powołała mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Anny Wojtacha, w przewodzie prowadzonym w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa”. Dokumentację otrzymałam w dniu 06.11.2025 r.

2. Ocena celowości i aktualności tematyki badawczej

Poszukiwanie nowych materiałów o ulepszonych właściwościach stanowi jeden z głównych kierunków rozwoju współczesnej inżynierii materiałowej, która łączy projektowanie składu chemicznego stopów z modyfikacją mikrostruktury oraz optymalizacją parametrów technologii ich wytwarzania. Celem jest nie tylko zwiększenie wytrzymałości, plastyczności i odporności na pękanie, lecz także zapewnienie stabilności właściwości mechanicznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji. W przypadku stali bainitycznych z metastabilnym austenitem szczątkowym szczególne znaczenie ma taki dobór parametrów obróbki cieplno-plastycznej, aby uzyskana mikrostruktura aktywowała korzystne mechanizmy odkształcenia (zwłaszcza efekt TRIP), co umożliwia otrzymanie materiałów spełniających rosnące wymagania stawiane elementom odpowiedzialnym eksploataowanym w warunkach obciążeń dynamicznych. W tym kontekście podjęte w rozprawie badania nad

ultradrobnymi stalami bainitycznymi z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa należy uznać za w pełni uzasadnione i wyraźnie wpisujące się w aktualne kierunki rozwoju materiałów konstrukcyjnych. Praca wpisuje się w światowy trend projektowania zaawansowanych stali wysokowytrzymałych AHSS (*Advanced High Strength Steels*), w których kluczową rolę odgrywa kontrola mikrostruktury (udział i stabilność austenitu szczątkowego, rozmiar ziarna, morfologia bainitu) w celu jednoczesnego podwyższenia wytrzymałości, plastyczności i odporności na pękanie zmęczeniowe. Rozwijanie technologii obróbki cieplno-plastycznej dla stali o $R_m > 1$ GPa ma bezpośrednie znaczenie aplikacyjne dla przemysłu motoryzacyjnego, maszynowego oraz energetyki, gdzie dąży się do redukcji masy elementów przy zachowaniu lub poprawie bezpieczeństwa eksploatacji. Dodatkowo, wykorzystanie metastabilnego austenitu szczątkowego (efekt TRIP) jest jednym z najbardziej perspektywicznych kierunków rozwoju nowoczesnych stali konstrukcyjnych, co potwierdza aktualność tematyki na tle współczesnych badań materiałowych. Praca ma więc wyraźnie uzasadniony cel praktyczny i naukowy, a uzyskiwane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad optymalizacją parametrów obróbki cieplnej i cieplno-plastycznej oraz implementacją tych stali w odpowiedzialnych elementach konstrukcyjnych.

Podsumowując, tematykę rozprawy uważam za celową i dobrze osadzoną we współczesnych trendach badań nad zaawansowanymi stalami wysokowytrzymałymi.

3. Ogólna charakterystyka pracy

Opiniowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Wojtacha pt.: *„Obróbka cieplno-plastyczna ultradrobnodziarnistych stali bainitycznych z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa”* została zrealizowana w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa pod opieką Promotora dr. hab. inż. Marka Opieli, prof. PŚ oraz Promotora pomocniczego dr inż. Aleksandry Kozłowskiej. Rozprawa została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego LIDER (LIDER/16/0090/L-12/20/NCBR/2021) finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) i dotyczy opracowania składu chemicznego stali oraz parametrów obróbki cieplno-plastycznej i ich wpływu na kształtowanie mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych ultradrobnodziarnistych stali bainitycznych z udziałem metastabilnego austenitu szczątkowego, przeznaczonych na odkuwki o wysokich właściwościach mechanicznych.

Praca napisana jest w języku polskim, liczy 148 stron i obejmuje 4 rozdziały, bogato ilustrowane wykresami, schematami oraz mikrostrukturami (89 rysunków), a także zawiera liczne, syntetyczne zestawienia tabelaryczne (13 tablic). Napisana jest na bardzo dobrym poziomie językowym z relatywnie małą liczbą pomyłek językowych i edycyjnych. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra szata graficzna – rysunki, tabele i schematy są przejrzyste, estetyczne i właściwie opisane. Struktura pracy odpowiada klasycznie przyjętemu układowi – została podzielona na część literaturową oraz doświadczalną. Część teoretyczna, oparta na przeglądzie piśmiennictwa (rozdział 1, s. 12–50), poprzedzona jest spisem treści, wykazem najważniejszych oznaczeń i skrótów oraz wstępem. Część badawcza obejmuje

sformułowanie celu pracy, zaprojektowanie składu chemicznego i wytworzenie materiału do badań, opracowanie parametrów obróbki cieplno-plastycznej, szczegółowy opis zastosowanej metodyki badawczej oraz prezentację wyników badań z jednocześnie prowadzoną ich analizą, zakończoną sformułowaniem wniosków końcowych.

Na końcu rozprawy zamieszczono spis literatury, a następnie streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. Bibliografia obejmuje 207 pozycji literaturowych, z których siedem to prace współautorskie z udziałem Doktorantki. Dobór literatury należy ocenić jako trafny i kompletny. Autorka uwzględniła zarówno klasyczne pozycje z zakresu stali mikrostopowych i odkuwek matrycowych, jak i nowoczesne prace dotyczące stali bainitycznych, średniomanganowych oraz stali z efektem TRIP, w tym publikacje kluczowych ośrodków badawczych. Zestaw pozycji jest obszerny, aktualny i dobrze odzwierciedla stan wiedzy w obszarze objętym rozprawą.

Praca doktorska Pani mgr inż. Anny Wojtacha pt.: *„Obróbka cieplno-plastyczna ultradrobnoziarnistych stali bainitycznych z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa”* jest spójna, kolejne rozdziały tworzą logiczną całość, a tytuł rozprawy w pełni odzwierciedla jej treść i zakres merytoryczny.

4. Charakterystyka szczegółowa rozprawy doktorskiej

Pani mgr inż. Anna Wojtacha podstawowe studium literatury zawarła we „Wstępie” oraz pierwszym rozdziale pracy „1. Przegląd piśmiennictwa” (str. 7-50), w których dokonała wnikliwego przeglądu kluczowych publikacji (207 pozycji literaturowych) i wyników przedstawiających aktualny stan wiedzy w zakresie podejmowanego tematu. Zasadnicze, szczegółowe studium literatury Autorka zawarła w pierwszym rozdziale pracy, zaczynając od omówienia konwencjonalnych stali: ferrytyczno-perlitycznych, martenzytycznych (wysokoodpuszczonych i dyslokacyjnych), bainitycznych oraz stali dwufazowych (ferrytyczno-bainitycznej i ferrytyczno martenzytycznej) stosowanych na odkuwki – wraz z omówieniem technologii ich wytwarzania i obróbki cieplno-plastycznej. Podkreśliła rolę dodatków stopowych (C, Mn, Si, Cr, Ni i Mo) oraz mikrododatków (Ti, V, Nb i N) i warunków obróbki cieplno-plastycznej w kształtowaniu mikrostruktury oraz wynikających z niej własności mechanicznych i użytkowych poszczególnych gatunków stali, uwzględniając aktualny stan wiedzy oraz wyniki licznych badań literaturowych.

Istotnym elementem przeglądu piśmiennictwa jest analiza nowoczesnych stali wielofazowych z metastabilnym austenitem szczątkowym, w szczególności stali średniomanganowych, oraz omówienie roli efektu TRIP (*Transformation Induced Plasticity*) i TWIP (*Twinning Induced Plasticity*) w kształtowaniu kombinacji ich wysokiej wytrzymałości i ciągliwości. Doktorantka szczegółowo przedstawiła także problem stabilności mechanicznej austenitu szczątkowego, wskazując na znaczenie jego morfologii (cienkie płytki vs ziarna blokowe) oraz czynników wewnętrznych (stężenie węgla, pierwiastki stopowe, wielkość ziarna) i zewnętrznych (szybkość odkształcenia, temperatura, stan naprężeń) wpływających na przebieg przemiany martenzytycznej indukowanej odkształceniem plastycznym. Doktorantka prawidłowo wskazała znaczenie morfologii RA, zwłaszcza roli cienkich płytek austenitu szczątkowego w poprawie odporności na pękanie i własności zmęczeniowych.

Część pracy oparta na przeglądzie piśmiennictwa jest aktualna, obszerna i dobrze udokumentowana i ma charakter nie tylko opisowy, lecz przede wszystkim wyraźnie interpretacyjny i problemowy. Autorka nie ogranicza się do zestawienia wyników

literaturowych, lecz konsekwentnie analizuje stan wiedzy w odniesieniu do stali przeznaczonych na odkuwki i na tej podstawie jasno identyfikuje luki poznawcze oraz uzasadnia potrzebę podjęcia badań nad opracowaniem optymalnych wariantów obróbki cieplno-plastycznej stali średniomanganowych o strukturze bainitycznej z metastabilnym austenitem szczątkowym. W szczególności podkreśla, że mechanizm i znaczenie indukowanej odkształceniem przemiany martenzytycznej w tego typu stalach (w warunkach typowych dla procesów kucia i następującego po nim chłodzenia) nadal nie są wystarczająco rozpoznane, podobnie jak wpływ morfologii oraz jednorodności austenitu szczątkowego, zwłaszcza jego występowania w postaci cienkich płytek względem form blokowych, na właściwości mechaniczne i odporność na pękanie. Autorka wskazuje również na nie w pełni wyjaśniony przebieg przemiany bainitycznej w stalach wolnych od cementytu i wydzielen węglikowych, w których równocześnie konieczne jest zapewnienie stabilności austenitu szczątkowego i ograniczenie udziału niepożądanego martenzytu nowo powstałego tworzącego się w końcowych etapach chłodzenia.

Na tej podstawie Doktorantka sformułowała cel pracy, który brzmi: „**opracowanie optymalnego składu chemicznego oraz wariantów czasowo-temperaturowych obróbki cieplno-plastycznej, gwarantujących otrzymanie stali bainitycznej o ultradrobnoziarnistej strukturze z austenitem szczątkowym w postaci cienkich warstw o pożądanej stabilności i jednorodności morfologicznej, pozwalającej na wytwarzanie odkuwek o wysokich własnościach mechanicznych**” a także precyzyjnie dobrała zadania badawcze, które w sposób logiczny i spójny prowadzą do realizacji części eksperymentalnej oraz wypełnienia zidentyfikowanych braków w stanie wiedzy.

W drugiej części pracy – eksperymentalnej, Pani mgr inż. Anna Wojtacha zaplanowała i zrealizowała spójny, wieloetapowy program badań, w pełnej zgodności z celem rozprawy. Autorka w sposób logiczny łączy obliczenia termodynamiczne (JMatPro, Thermo-Calc) z rozbudowanym programem badań eksperymentalnych. Badania rozpoczęła od zaprojektowania składu chemicznego średniomanganowej stali o mikrostrukturze listwowego bainitu z austenitem szczątkowym (ok. 0,17% C, 3,10% Mn, 1,0% Si, 0,55% Al, 0,22% Mo oraz mikrodotatki Ti i V). Następnie, z wykorzystaniem programów Thermo-Calc oraz JMatPro, przeprowadziła symulacje termodynamiczne, na podstawie których wyznaczyła teoretyczne temperatury krytyczne dla badanej stali (A_{c1} , A_{c3} , M_s) oraz opracowała wstępne warianty obróbki cieplnej, w tym teoretyczne wykresy CTPc i CTPi. Wyniki symulacji stanowiły podstawę do dalszych badań eksperymentalnych i pozwoliły na racjonalne zawężenie zakresu analizowanych parametrów procesu. W celu zweryfikowania obliczeń termodynamicznych, zaprojektowania wstępnych parametrów obróbki cieplno-plastycznej oraz wyznaczenia eksperymentalnych wykresów CTPc i OCTPc, a także określenia zakresu i kinetyki przemiany bainitycznej, Autorka przeprowadziła badania dylatometryczne (z użyciem dylatometru BÄHR DIL 805 A/D) oraz szeroko zakrojone, kompleksowe badania plastometryczne na symulatorze termomechanicznym Gleeble 3800, obejmujące m.in. ściskanie próbek osiowosymetrycznych ($\varnothing 10 \times 12$ mm) w temperaturze 900–1100°C przy różnych szybkościach odkształcenia (0,05–50 s⁻¹). Uzyskane wyniki umożliwiły Jej określenie wpływu temperatury i szybkości odkształcenia na zachowanie austenitu, przebieg rekrytalizacji oraz kinetykę przemian fazowych. W kolejnym etapie zrealizowała próby dwuetapowego ściskania z przerwami wynoszącymi od 1 do 60 s, prowadzone w temperaturze 900°C i 1100°C przy szybkościach odkształcenia 0,05 s⁻¹ i 5 s⁻¹. Badania te

pozwoły na ilościową ocenę procesów mięknięcia i rekrytalizacji austenitu oraz ich wpływu na warunki inicjacji przemiany bainitycznej. Istotnym elementem programu badawczego były symulacje kucia z następnym wytrzymaniem izotermicznym, odwzorowujące warunki zbliżone do przemysłowych. Próbkę prostopadłościenną ($15 \times 20 \times 35$ mm) odkształcała przy prędkości 1 s^{-1} , po czym chłodziła do temperatury $380\text{--}400^\circ\text{C}$ i wytrzymywała izotermicznie przez $150\text{--}1800$ s, co umożliwiło Doktorantce szczegółową analizę kształtowania mikrostruktury bainitycznej oraz stabilności austenitu szczątkowego w funkcji czasu wytrzymania i temperatury przemiany.

W celu oceny wpływu opracowanych wariantów obróbki cieplno-plastycznej na własności mechaniczne badanej stali Pani mgr inż. Anna Wojtacha wykonała statyczną próbę rozciągania (MTS Insight 10 kN) oraz pomiary twardości metodą Vickersa (HV1). Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie zależności pomiędzy parametrami procesu a wartościami właściwości wytrzymałościowych $R_{p0.2}$, R_m , wydłużenia A oraz twardości, a także na ich powiązanie z obserwowaną mikrostrukturą.

Uzupełnieniem badań mechanicznych była szczegółowa analiza mikrostrukturalna próbek po badaniach dylatometrycznych, plastometrycznych oraz po statycznej próbie rozciągania. Do obserwacji mikrostruktury Autorka wykorzystwała techniki mikroskopii świetlnej LM, SEM i TEM, STEM a także analizę EBSD w skaningowym mikroskopie elektronowym w celu określenia morfologii, rozmieszczenia i jednorodności austenitu szczątkowego oraz pozostałych składników mikrostruktury. Badania mikrostrukturalne uzupełniła o ilościowe wyznaczenie udziału austenitu szczątkowego oraz oszacowanie zawartości węgla w tej fazie metodą rentgenograficzną (XRD) z zastosowaniem analizy Rietvelda.

Do najbardziej wartościowych wyników otrzymanych przez Doktorantkę w recenzowanej pracy zaliczam kompleksowe, eksperymentalne wyznaczenie przebiegu i kinetyki przemiany bainitycznej w warunkach sprzężonej obróbki cieplno-plastycznej, a w szczególności opracowanie eksperymentalnych wykresów CTPc oraz OCTPc dla zaprojektowanej stali bainitycznej z metastabilnym austenitem szczątkowym. Również jednoznaczne powiązanie parametrów odkształcenia i chłodzenia z kształtowaniem mikrostruktury (w szczególności morfologią i stabilnością austenitu szczątkowego) oraz uzyskiwanymi własnościami mechanicznymi. Na szczególne podkreślenie zasługuje także szeroki i spójny zakres badań plastometrycznych, obejmujący wysokotemperaturowe próby ściskania prowadzone w temperaturze $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ oraz w bardzo szerokim zakresie szybkości odkształcenia ($0,05\text{--}50 \text{ s}^{-1}$). Pozwoliło to Autorce na: ilościowe określenie wpływu temperatury i szybkości odkształcenia na przebieg rekrytalizacji austenitu, identyfikację warunków sprzyjających zachowaniu drobnoziarnistej struktury austenitycznej przed chłodzeniem, analizę wpływu stopnia i historii odkształcenia na dalszy przebieg przemian fazowych.

Istotnym i wartościowym rezultatem jest również powiązanie parametrów obróbki cieplno-plastycznej z morfologią i stabilnością austenitu szczątkowego. Autorka wykazała, że odpowiedni dobór temperatury i szybkości odkształcenia oraz ścieżki chłodzenia umożliwia preferencyjne kształtowanie austenitu szczątkowego w postaci cienkich płytek, a nie w formie

blokowej, co ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia korzystnej kombinacji wytrzymałości i plastyczności oraz udułności i odporności na pękanie.

Szczególnie wysoko należy ocenić także wyniki dotyczące charakteryzacji mikrostruktury. Autorka przy wykorzystaniu mikroskopii świetlnej, SEM, EBSD, a także wysokorozdzielczych badań TEM/STEM, uzyskuje pełny obraz morfologii ziarn ferrytu bainitycznego i austenitu szczątkowego. Mapy EBSD oraz obserwacje TEM potwierdzające grubość listew austenitu rzędu 30–180 nm stanowią szczególnie wartościowy element pracy, dokumentujący uzyskanie nanometrycznej listwowej morfologii RA, a więc jednej z kluczowych cech projektowanej mikrostruktury stali. Istotną wartością pracy jest również umiejętne powiązanie uzyskanych wyników badań mikrostruktury z opracowanym składem chemicznym. Autorka w sposób przekonujący wskazuje, że obecność Si i Al ogranicza wydzielanie cementytu, umożliwiając wzbogacenie austenitu w węgiel i poprawę jego stabilności, natomiast mikrododatki Ti i V ograniczają wzrost ziaren austenitu pierwotnego, co sprzyja tworzeniu drobnych listew bainitycznych. Na uwagę zasługuje również przejrzysty sposób prezentacji wyników i ich interpretacji. W poszczególnych rozdziałach Autorka konsekwentnie opisuje wpływ temperatury i czasu wytrzymania izotermicznego na udział RA, szerokość listew ferrytu bainitycznego, zawartość węgla w austenicie oraz twardość stali. Analizy te są prowadzone w sposób klarowny i dobrze udokumentowany graficznie, co znacznie ułatwia ich odbiór. Finalne wnioski Autorki (rozdz. 4) wyraźnie wskazują, które warianty obróbki prowadzą do najkorzystniejszej kombinacji udziału i stabilności RA, potwierdzając skuteczność zaprojektowanej metody obróbki cieplno-plastycznej. Mocną stroną rozprawy jest jej wyraźny kontekst aplikacyjny. Autorka konsekwentnie podkreśla, że badania dotyczą materiału przeznaczonego na odkuwki matrycowe pracujące w złożonych warunkach obciążenia, a zaprojektowana stal wpisuje się w potrzeby przemysłu motoryzacyjnego. Co istotne, w pracy przewidziano już kolejny etap badań, tj. walidację mikrostruktury i właściwości na rzeczywistych odkuwkach, zgodnie z parametrami opracowanymi w niniejszej rozprawie. Świadczy to o praktycznym, wdrożeniowym charakterze pracy.

Dodatkową wartością pracy jest konsekwentne połączenie symulacji termodynamicznych z wynikami eksperymentalnymi, co pozwoliło nie tylko na weryfikację obliczeń, ale również na racjonalne zawężenie zakresu parametrów badawczych. Takie podejście świadczy o dojrzałości metodycznej Autorki i wyraźnie odróżnia Jej pracę od tych o charakterze wyłącznie opisowym.

Podsumowując, rozprawa wyróżnia się bardzo dobrze przemyślaną koncepcją, szerokim zestawem metod eksperymentalnych, wysoką jakością opracowywanych badań mikrostrukturalnych oraz umiejętnością powiązania składu chemicznego, mikrostruktury i parametrów procesu z zakładanym celem technologicznym. Praca stanowi istotny wkład w rozwój technologii nowoczesnych stali bainitycznych przeznaczonych na odkuwki i spełnia wysokie standardy stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

5. Uwagi o charakterze merytorycznym oraz pytania do Autorki

Dysertacja Pani mgr inż. Anny Wojtacha jest bez wątpienia opracowaniem oryginalnym, o istotnym potencjale aplikacyjnym, które w znaczący sposób poszerza dotychczasowy stan wiedzy w badanym obszarze. Uzyskane przez Doktorantkę wyniki badań, jak również sformułowane na ich podstawie wnioski, oparte zostały na bardzo szerokim zakresie eksperymentów, co świadczy o rzetelności podejścia i dużym nakładzie pracy badawczej.

Jednak przy lekturze pracy pojawiają się także wątpliwości, które wymagają od Autorki uzupełnienia i wyjaśnienia.

Uwagi krytyczne i polemiczne:

1. Przyjęty w pracy sposób prezentacji wyników („3. WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE”), w którym Autorka równolegle przedstawia wyniki badań własnych oraz ich analizę wraz z porównaniem do wyników innych badaczy, miejscami utrudnia jednoznaczne zorientowanie się, czy dyskusja oraz formułowane stwierdzenia i wnioski wynikają bezpośrednio z uzyskanych przez Autorkę wyników eksperymentalnych, czy też opierają się na wynikach uzyskanych przez innych autorów. Wyraźniejsze rozdzielenie omówienia rezultatów własnych od przeglądu i dyskusji danych literaturowych zwiększyłoby czytelność wyводу oraz przejrzystość argumentacji.
2. Na ile wiarygodne jest przeniesienie wyników badań dylatometrycznych oraz plastometrycznych (Gleeble 3800), uzyskanych na próbkach o wymiarach $\varnothing 10 \times 12$ mm, na warunki rzeczywistego kucia przemysłowego? Proszę o doprecyzowanie, w jaki sposób Autorka uwzględniła efekt skali oraz różnice w stanie naprężeń i warunkach tarcia, niejednorodności odkształcenia, gradientach temperatury i szybkości chłodzenia oraz rzeczywistej historii odkształcenia w kuciu matrycowym, a także jakie działania walidacyjne (np. próby półtechniczne/przemysłowe, symulacje numeryczne) potwierdzą przydatność zaproponowanych parametrów dla procesu przemysłowego.
3. Doktorantka w pracy przedstawiła analizę wyników bazujących na próbach rozciągania i pomiarach twardości. W jaki zatem sposób przedstawione wyniki empirycznie potwierdzają, że zaproponowane warianty obróbki cieplno-plastycznej rzeczywiście umożliwiają uzyskanie „wysokich własności mechanicznych w zróżnicowanych warunkach obciążeniowych”? Dlaczego nie wykonano badań właściwości mechanicznych w warunkach bardziej złożonych obciążeń, takich jak próba udarności, zmęczeniowa czy ewentualnie pomiar odporności na pękanie (np. K1C), mimo że we wprowadzeniu, Doktorantka podkreśliła znaczenie udarności i wytrzymałości zmęczeniowej w kontekście planowanej do uzyskania mikrostruktury? Jak Doktorantka uzasadnia brak takich badań przy deklarowanym celu pracy?
4. Dlaczego Doktorantka w pracy, mimo zastosowania techniki EBSD i deklaracji wykonania „szczegółowej charakterystyki składników mikrostrukturalnych”, nie zamieściła ilościowej charakterystyki ultrafinoziarnistości w postaci rozkładów statystycznych (np. histogramów), bądź wartości średnich, szerokości listew dla ferrytu bainitycznego oraz austenitu szczątkowego? W jaki sposób, w świetle danych literaturowych, Doktorantka może dokonać ilościowej weryfikacji, że otrzymana mikrostruktura spełnia kryteria „ultrafinoziarnistości” przyjęte dla tego typu stali? Czy Doktorantka może jednoznacznie wykazać, że jakościowa analiza obrazów mikrostruktury jest wystarczająca, by formułować wnioski zawarte w pracy?
5. Dlaczego w pracy nie przeprowadzono ilościowej korelacji pomiędzy udziałem RA, jego stabilnością i morfologią, a uzyskanymi wartościami R_m i wydłużenia A? Jak Doktorantka interpretuje fakt, że przy udziale RA po rozciąganiu rzędu 0,5–1,4% odnotowano jedynie ok.

5% wydłużenia i czy tak niska zawartość RA sprzyja spodziewanemu efektowi TRIP? Jaki wariant udziału i stabilności RA można uznać za optymalny dla tej stali – i z czego wynika taka ocena?

6. Jak Doktorantka wyjaśnić może brak ilościowego odniesienia wyników EBSD i RTG dla tych samych obszarów lub wariantów, skoro obie techniki dały istotnie różne wartości udziału RA? W jaki sposób rozbieżność ta wpływa na interpretację zaniku RA podczas odkształcenia? Czy wnioski o „niemał całkowitej przemianie austenitu w martenzyt” można uznać za w pełni wiarygodne, skoro oparte są na jednej metodzie badawczej?

7. W jaki sposób Doktorantka uzasadnia, że próbki odkształcone w symulatorze Gleeble są reprezentatywne dla rzeczywistych odkuwek matrycowych, przy braku realizacji prób walidacyjnych parametrów obróbki w skali technologicznej? Czy może Doktorantka wskazać, jak różnice w geometrii, niejednorodności odkształcenia czy gradiencie chłodzenia wpływałyby na właściwości materiału, i dlaczego w pracy nie przeanalizowano tych aspektów? Czy można uznać, że zaprezentowane warianty obróbki mają potwierdzony potencjał wdrożeniowy?

8. Jakie kryterium optymalizacji zostało przyjęte przez Doktorantkę, przy wskazaniu w tytule pracy opracowania „optymalnych wariantów” obróbki cieplno-plastycznej? Czy może Doktorantka wskazać jednoznaczny wariant, który zapewni najlepsze połączenie R_m , $R_{p0.2}$, wydłużenia A oraz udziału i stabilności RA dla odkuwek?

9. Autorka używa zamiennie pojęć „struktura” i „mikrostruktura”, co nie jest w pełni precyzyjne w odniesieniu do materiałów metalicznych. „Struktura” jest pojęciem szerszym – może obejmować zarówno strukturę krystaliczną (układ sieci, typ faz), jak i budowę w skali makro (rozmieszczenie niejednorodności w odlewach, wtrąceń, defektów itp.). Natomiast „mikrostruktura” odnosi się ściśle do cech widocznych w mikroskopie (optycznym lub elektronowym), takich jak wielkość i kształt ziarn, morfologia faz, wydzielienia itp. Z tego względu nie powinno się traktować tych pojęć jako całkowicie równoważnych, chyba że Autor na początku pracy jednoznacznie zdefiniuje, że pod terminem „struktura” rozumie konkretnie mikrostrukturę. Dla większej przejrzystości i poprawności terminologicznej rekomenduję konsekwentne używanie terminu „mikrostruktura” tam, gdzie omawiane są wyniki obserwacji metalograficznych lub SEM/TEM

10. Zalecam Doktorantce, aby w przyszłych pracach unikała dosłownych kalk językowych w terminologii, takich jak określenie „martenzyt świeży” (ang. fresh martensite). W polskiej literaturze metalurgicznej w odniesieniu do tej fazy stosuje się najczęściej terminy „martenzyt nieodpuszczony” lub „nowo powstały martenzyt”, które trafniej oddają charakter mikrostruktury formującej się w końcowych etapach chłodzenia i są zgodne z przyjętą krajową nomenklaturą. Analogicznie, zamiast sformułowania „cienkie filmy austenitu szczątkowego” rekomenduję stosowanie określenia „cienkie płytki austenitu szczątkowego”, powszechnie używanego w polskiej literaturze metalurgicznej. Termin ten lepiej opisuje rzeczywistą morfologię tej fazy w mikrostrukturze stali bainitycznych oraz zapewnia większą

spójność z krajową nomenklaturą. Takie ujednolicenie poprawi precyzję opisu i konsekwencję terminologiczną rozprawy.

11. Str. 82. Autorka pisze „Podobnie w pracy [165] podczas wytrzymania izotermicznego stali 0,18C-3,6Mn-0,23Si 1,7Al-0,2Mo-0,04Nb w 350°C (poniżej temperatury Ms), zaobserwowano najwyższy sygnał pochodzący od przemiany bainitycznej pozbawionej czasu inkubacji.....Niższy sygnał podczas wytrzymania izotermicznego w temperaturze 400°C odpowiadał mniejszej ilości bainitu utworzonego w mikrostrukturze stali średniomanganowej.” - o jaki sygnał chodzi??

Przywołane powyżej uwagi należy traktować jako konstruktywny wkład do dalszej dyskusji z Doktorantką oraz jako punkt wyjścia do ewentualnych uzupełnień, doprecyzowania lub pogłębienia niektórych aspektów rozprawy. Nie podważają one w żadnym stopniu merytorycznej wartości przedstawionej pracy, nie naruszają jej zasadniczej treści ani nie zmieniają mojej pozytywnej, wysokiej oceny całości wysiłku badawczego oraz uzyskanych rezultatów. Uwagi te mają charakter pomocniczy i ukierunkowane są na wspieranie dalszego rozwoju naukowego mgr inż. Anny Wojtacha.

6. Uwagi drobne

Liczba stwierdzonych usterek w pracy mgr inż. Anny Wojtacha jest wyjątkowo mała. Najważniejsze z nich przedstawiam poniżej:

1. Str. 114. „Podobnie jak w przypadku analizy mikrostrukturalnej przeprowadzonej po badaniach dylatometrycznych (rys. 57), w strukturze stali po wytrzymaniu izotermicznym poniżej temperatury Ms ujawniono obecność oraz bainitu koalescencyjnego (rys. 79f,g).” – obecność czego??

Autorce zdarza się powoływać na rysunki w nieprawidłowej kolejności, np. na s. 87 po odwołaniu do rys. 57a-b w kolejnym zdaniu przywołuje rys. 61, pomijając rys. 58-60, do których nawiązuje dopiero później.

Str. 58 rys. 36 – brak jednostek na osiach wykresu

Str. 107. „Kontrola procesu ..., powala na osiągnięcie...” – powinno być pozwala

Str. 110. „Analiza ... procentowemu udziału austenitu ...- powinno być udziałowi

6. Wniosek końcowy

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Wojtacha pt. *„Obróbka cieplno-plastyczna ultradrobnoziarnistych stali bainitycznych z metastabilnym austenitem szczątkowym o wytrzymałości powyżej 1 GPa”* stanowi spójne, metodycznie poprawne i wartościowe opracowanie naukowe, poświęcone aktualnemu i istotnemu zagadnieniu z zakresu inżynierii materiałowej. Autorka wykazała się bardzo dobrą znajomością stanu wiedzy, umiejętnością

krytycznej analizy literatury oraz zdolnością do samodzielnego planowania i realizacji złożonych badań eksperymentalnych.

Zakres i poziom merytoryczny przeprowadzonych badań, obejmujących projektowanie składu chemicznego stali, symulacje termodynamiczne, badania dylatometryczne i plastometryczne, analizę mikrostruktury z wykorzystaniem zaawansowanych technik badawczych oraz ocenę właściwości mechanicznych, w pełni odpowiadają wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim. Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój wiedzy dotyczącej kinetyki przemian fazowych oraz kształtowania mikrostruktury stali bainitycznych z austenitem szcążkowym w warunkach obróbki cieplno-plastycznej i mają potencjalne znaczenie aplikacyjne w technologii wytwarzania odkuwek.

Sformułowane w rozprawie wnioski są dobrze udokumentowane i logicznie powiązane z przedstawionymi wynikami badań. Zgłoszone w niniejszej recenzji uwagi mają charakter porządkujący i dyskusyjny i nie podważają wartości naukowej pracy ani kompetencji Autorki. Praca poszerza aktualny stan wiedzy w dziedzinie inżynierii materiałowej i stanowi zauważalny wkład w rozwój tej dyscypliny.

Na tej podstawie stwierdzam, że rozprawa doktorska spełnia wymagania określone w obowiązującej ustawie: Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. (t.j. Dz. U. 2023 poz. 742) i wnioskuję do Wysockiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o przyjęcie rozprawy, kontynuowanie dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz dopuszczenie Pani mgr inż. Anny Wojtacha do publicznej obrony.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysoki poziom rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Wojtachy, przejawiający się zarówno w oryginalności sformułowanego problemu badawczego, jak i w kompleksowości oraz zaawansowaniu zastosowanych metod badawczych, a także wysokiej wartości poznawczej i aplikacyjnej uzyskanych wyników, wnioskuję o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej. Wysoka jakość merytoryczna, dojrzałość analityczna Autorki oraz bardzo dobre opracowanie redakcyjne rozprawy w pełni uzasadniają wniosek o jej wyróżnienie.

Prof. Grażyna Mrówka-Nowotnik

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)