

Dr hab. inż. Krzysztof Radwański
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górn Śląski
Instytut Technologiczny
ul. Karola Miarki 12-14
44-100 Gliwice

Tel. +48 (32) 2345234
e-mail: krzysztof.radwanski@git.lukasiewicz.gov.pl

Gliwice, dn. 11.07.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej pt.:

„Wpływ wygrzewania pośredniego (IAT) na przemianę bainityczną oraz właściwości mechaniczne i użytkowe stali EN X37CrMoV5-1”

Autor: mgr inż. Grzegorz Łukaszewicz

Promotor: dr hab. inż. Wiesław Świątnicki, prof. uczelni

Ocena rozprawy doktorskiej została wykonana w odpowiedzi na pismo Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa, Pani prof. dr hab. inż. Małgorzaty Lewandowskiej z dnia 29.04.2025 r.

1. Przedmiot oceny

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej liczącej 201 stron, 112 rysunków i 7 tabel, napisanej w języku polskim. Praca została zrealizowana w ramach projektu pt. „Opracowanie nowej generacji stali o strukturze nanokrystalicznej z węglkami”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Lider IX na podstawie umowy nr: LIDER/12/0040/L-9/17/NCBR/2018 z dnia 26.11.2018. Rozprawa rozpoczyna się od streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu ważniejszych oznaczeń i skrótów, spisu treści oraz wprowadzenia. Przegląd literaturowy zawarto w rozdziałach 2, 3 i 4. Rozdział 5 poświęcono metodyce badań. W rozdziałach od 6 do 9 przedstawiono wyniki badań własnych, zestawiając je również z doniesieniami literaturowymi. Podsumowanie i wnioski zawarto w rozdziale 10. Dalej zawarto podziękowania, informację dotyczącą projektu, w ramach którego powstała praca oraz bibliografię.



2. Ocena doboru tematyki badawczej

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy zaproponowania dodatkowego zabiegu obróbki cieplnej związanego z izotermicznym wygrzewaniem pośrednim pomiędzy austenityzowaniem a bainityzowaniem, mającego na celu wydzielenie węglików przed przemianą bainityczną. Węgliki w zamyśle mają stanowić miejsca zarodkowania heterogenicznego ferrytu, zwanego przez Doktoranta gwieździstym. Cele pracy zostały zdefiniowane w rozdziale 1, pt. Wprowadzenie. Nadrzędną myślą Doktoranta jest udzielenie odpowiedzi na postawione pytanie: „Co przyniesie dodatkowy przystanek izotermiczny wprowadzony w trakcie obróbki cieplnej między austenityzowaniem a bainityzowaniem stali EN X37CrMoV5-1?”. Głównym celem Autora było zatem opracowanie alternatywnej obróbki cieplnej w odniesieniu do dotychczas stosowanej, co w zamyśle ma doprowadzić do rozszerzenia zastosowania stali w obszarach innych niż narzędzia do pracy na gorąco. Doktorant sformułował również cele szczegółowe, związane z określeniem zależności pomiędzy:

- warunkami wygrzewania pośredniego a rozwojem węglików,
- wydzieleniami a przebiegiem przemiany bainitycznej,
- uzyskaną mikrostrukturą a właściwościami mechanicznymi stali.

Pomimo, że praca nie zawiera sformułowanej tezy, to za taką można przyjąć założenie, że mikrostruktura zawierająca ferryt gwieździsty i węgliki poprawi właściwości mechaniczne i użytkowe badanej stali.

O ile sformułowane cele pracy są jasne, to pojawiają się jednak pytania dotyczące zakresu motywacji podjęcia tematyki. Autor nie doprecyzował czy motywacja wynika, jak wskazano w pracy, jedynie z potrzeb poznawczych i chęci wypełnienia luki badawczej czy też być może również z potrzeb przemysłowych. Doktorant nie scharakteryzował również aktualnie stosowanej obróbki cieplnej w odniesieniu do konkretnego wyrobu oraz uzyskiwanych w jej wyniku właściwości mechanicznych i struktury. Stwierdzenie, że konwencjonalna obróbka cieplna chromowych stali narzędziowych do pracy na gorąco polega na hartowaniu i kilkukrotnym odpuszczaniu jest powszechnie wiadome. Nie sprecyzowano zatem jaki typ wyrobu stalowego jest rozważany i jakie wartości właściwości mechanicznych oraz jaka struktura są uzyskiwane w efekcie konwencjonalnej obróbki cieplnej. Doktorant opisał natomiast rozwój modyfikacji obróbki cieplnej z uwzględnieniem hartowania izotermicznego, które zaliczył do niekonwencjonalnej obróbki cieplnej. W tym zakresie odniósł się do końcowych właściwości mechanicznych. Wiadomo zatem, że w drodze modyfikacji obróbki cieplnej możliwe jest uzyskiwanie granicy plastyczności wynoszącej około 900 MPa, wytrzymałości na rozciąganie około 1860 MPa przy wydłużeniu 16%. W kontekście podanych informacji pojawia się pytanie jakie właściwości mechaniczne wyrobu są traktowane jako wyjściowe w kontekście podjętej tematyki badawczej. Nie wiadomo również w jakich innych gałęziach gospodarki stal miałyby znaleźć zastosowanie dzięki proponowanemu w pracy rozwiązaniu i które cechy będą o tym decydowały. Warte zauważenia jest natomiast docenienie dokonań w zakresie modyfikacji obróbki cieplnej przedmiotowej stali przez zespół Politechniki Warszawskiej, której członkiem jest Doktorant. Zostało to wskazane i udokumentowane w pracy, o czym świadczą przytoczone pozycje literaturowe.

Pomimo powyższych uwag uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej jest aktualna i istotna z punktu naukowego i poznawczego z potencjalnym aspektem aplikacyjnym.

3. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

3.1 Ocena przeglądu piśmiennictwa, zakresu oraz zaproponowanej metodyki badawczej

Opis stanu zagadnienia został przedstawiony w ramach rozdziałów 2, 3 i 4 i ograniczony do scharakteryzowania przemiany bainitycznej, opisu wygrzewania pośredniego oraz charakterystyki stali narzędziowej typu X37CrMoV5-1. Autor zdecydował się również prowadzić analizę literatury w podrozdziałach stanowiących dyskusję i podsumowanie wyników. Takie rozwiązanie należy uznać za właściwe, jeśli wyniki uzyskane przez Doktoranta są odnoszone do danych literaturowych. W tym zakresie nie zawsze w taki sposób analiza została przeprowadzona. Przykładowo w rozdziale 7.6. Doktorant opisuje kwestie nazwane jako „Stymulacja polami naprężeń” czy „Drenaż macierzystego austenitu” bez odniesienia do wyników badań własnych. W takich przypadkach uzasadnione wydaje się zamieszczenie tych rozdziałów w części literaturowej, a nie w podsumowaniu i dyskusji wyników. W zakresie zagadnień związanych z przemianą bainityczną Autor poruszył kwestie jej siły pędnej, mechanizmów oraz cech strukturalnych. W rozdziale poświęconym wygrzewaniu pośredniemu opisano wpływ zaproponowanej obróbki cieplnej na uzyskiwane składniki strukturalne i ich morfologię. W rozdziale poświęconym charakterystyce stali narzędziowej Autor opisał znaczenie i jakościowy wpływ poszczególnych pierwiastków chemicznych na szeroko pojęte charakterystyki rozpatrywanej grupy stali oraz zagadnienia związane z hartowaniem izotermicznym z przemianą bainityczną, gdzie jedynie w jednym przypadku odnosi się do właściwości mechanicznych uzyskiwanych w drodze obróbki cieplnej. Dokonany przez Autora w tym zakresie przegląd literaturowy dowodzi, że istnieją ograniczone doniesienia w zakresie podjętej tematyki. Stąd też zastanawiający jest brak szerszego odniesienia się do uzyskiwanych właściwości mechanicznych stali, skoro publikowano już wyniki badań strukturalnych.

Autor w pracy powołuje się na pozycje literaturowe. Analizie poddano łącznie 151 pozycji literaturowych, z czego 49 z nich przywołano w opisie stanu zagadnienia. Ponad 50 pozycji literaturowych zostało wydanych w przeciągu ostatnich pięciu lat, co również świadczy o aktualności podjętej przez Doktoranta tematyki badawczej. Pewnym niedociągnięciem jest jednak brak powołań na pozycje literaturowe lub nieprecyzyjne ich wskazanie w treści. Przykładowo opisując przemianę bainityczną, przywołano dwie pozycje literaturowe w tytule podrozdziału „Sekwencja przemiany”, zamiast umieścić je w treści, co znacząco ułatwiłoby powiązanie podanych tam wielu informacji z konkretnymi wskazaniami publikacyjnymi. Innym przykładem jest brak powołań na pozycje literaturowe np. pod rysunkami 2.2, 3.1 czy 3.2.

Materiał badawczy stanowiły pręty kute o średnicy ok. 170 mm i składzie chemicznym odpowiadającym komercyjnie dostępnej stali WCL z podwyższoną zawartością niklu. Pręty charakteryzowały się mikrostrukturą ferrytyczno-perlityczną i twardością 215 HV2. Na duże uznanie zasługuje ilość zastosowanych w pracy metod badawczych, do których należy zaliczyć: badania dylatometryczne, pomiary twardości, testy udarności, statyczne próby rozciągania, statyczne próby ściskania, badania odporności na pękanie, badania odporności na zużycie przez tarcie, badania dystorsji hartowniczych, badania VSM i XRD oraz badania mikroskopowe

z wykorzystaniem mikroskopii świetlnej oraz skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej. W analizie struktury wykorzystano również metody mikroanalizy z wykorzystaniem detektorów EDS, WDS i EBSD. Zakres pracy obejmował również symulacje komputerowe przemian fazowych.

Stwierdzam, że zarówno zakres pracy, jak i zaproponowane metody badawcze, zostały właściwie dobrane pod kątem zdefiniowanego celu pracy.

3.2. Ocena uzyskanych wyników badań

W ramach ocenianej pracy uzyskano szereg bardzo wartościowych wyników badań. W pierwszej kolejności Doktorant w oparciu o przeprowadzone symulacje komputerowe oraz eksperymenty dylatometryczne dobrał warunki austenitowania oraz temperatury wygrzewania pośredniego. Dla dobranych temperatur 800, 700, 600 i 500°C przeprowadził symulacje komputerowe oraz eksperymenty fizyczne wraz z badaniami strukturalnymi dla opisu przemian fazowych. Skupił się na opisie procesów wydzieleniowych zarówno pod względem typu, jak i ich danych stereologicznych. Analizę typu węglików przeprowadził w oparciu o wyniki mikroanalizy składu chemicznego, jednocześnie słusznie podkreślając wady zastosowanej metodyki i zaznaczając, że uzyskanych wyników nie można traktować jako rozstrzygających. Jednocześnie należy stwierdzić, że zastosowana metodyka EDS jest dyskusyjna, m. in. z uwagi na objętość obszaru analizy, z której pochodzi wynik, tzw. „efekt gruszki”. Należy docenić fakt, że Doktorant ma świadomość wad zastosowanej metodyki w tym zakresie. Jednocześnie jednak zastanawiające jest dlaczego Doktorant nie zdecydował się na wykonanie analizy węglików z wykorzystaniem elektronowej mikroskopii transmisyjnej. Takie badania pozwoliłyby na jednoznaczną identyfikację wydzieleni i wyeliminowały aspekt przypuszczeń. Jest to istotna kwestia, stanowiąca jedno z ważniejszych zagadnień pracy, jakim jest analiza wpływu węglików na przemianę bainityczną. Wątpliwości budzi również użyta w pracy terminologia „hartowanie martensytyczne z IAT w temperaturze 600 i 500°C” ze względu na brak wyników badań mikrostruktury po tych wariantach obróbki cieplnej. Kolejną część pracy jest poświęconą wpływowi wygrzewania pośredniego na przemianę bainityczną. W ramach tej części wykonano eksperymenty dylatometryczne, stosując cykle cieplne obejmujące austenitowanie, wygrzewanie pośrednie w temperaturach 800, 700, 600 i 500°C oraz przemianę bainityczną w temperaturze 330°C. Doktorant wykazał w oparciu o badania dylatometryczne, że wprowadzony dodatkowy przystanek izotermiczny powoduje zmianę kinetyki przemiany bainitycznej. Prowadzi to do przyspieszenia przemiany bainitycznej ze wzrostem temperatury i czasu zastosowanego wcześniej wygrzewania. Kolejną część pracy została poświęconą projektowaniu i realizacji złożonych obróbek cieplnych, w której Doktorant opisał wpływ wygrzewania pośredniego na właściwości mechaniczne i użytkowe stali. Zaproponował obróbkę cieplną składającą się z austenitowania w temperaturze 1050°C, wygrzewania pośredniego w 800°C, bainitowania jednostopniowego w temperaturze 330°C oraz drugi wariant obróbki z dodatkowym bainitowaniem w temperaturze 230°C. Dla podanych temperatur dobrał czasy wygrzewania. Po przeprowadzonych eksperymentach dylatometrycznych wykonano pomiary twardości oraz

badania za pomocą mikroskopii świetlnej. Autor zastosował również obróbki cieplne z wygrzewaniem pośrednim w temperaturach 700, 600 i 500°C, bez zmiany pozostałych parametrów oraz obróbkę referencyjną tj. austenitizowanie w 1050°C, hartowanie w emulsji oraz dwukrotne odpuszczanie w temperaturach 540 i 560°C. Zaplanowane warianty obróbki cieplnej wykonał również na większych próbkach z wykorzystaniem pieców laboratoryjnych. Doktorant opisując różnice w uzyskanych mikrostrukturach oparł się o wyniki mikroskopii świetlnej, wnioskując o obecności martenzytu i austenitu szczątkowego oraz w przypadku dodatkowego bainityzowania, również o obecności wiązek „bainitu niżjtemperaturowego”. Szkoda, że do analizy struktur Doktorant nie wykorzystał w szerszym zakresie metody EBSD, a ograniczył się jedynie do zestawienia uzyskanych rozkładów dezorientacji granic. Należy zauważyć, że kształt tych krzywych nie potwierdza obecności austenitu, o czym świadczy brak wyraźnego sygnału dla kątów około 45°, pomimo że zdaniem Doktoranta udział ten wynosił od 25 do 34%. Ciekawe byłoby przykładowo nałożenie uzyskanych rozkładów na mapy EBSD, co pozwoliłoby na precyzyjniejsze opisanie składników strukturalnych, które w jednoznaczny sposób potwierdziłyby wnioskowanie Doktoranta w zakresie obecności i różnic w strukturach poszczególnych składników. W pracy brakuje również informacji w zakresie warunków i parametrów zastosowanej metody EBSD, które mają wpływ na uzyskiwane wyniki badań. W odczuciu recenzenta Doktorant nie wykorzystał w pełni możliwości wynikających z dostępnej aparatury badawczej w zakresie analizy strukturalnej. Uwaga ta dotyczy zarówno braku identyfikacji wydzielań, jak i opisu składników strukturalnych, których wyniki oparto głównie o mikroskopię świetlną. Wysoko oceniam natomiast opis uzyskanych wyników badań właściwości mechanicznych, które Doktorant przedstawił na tle innych doniesień literaturowych. Analiza ta jest przedstawiona w sposób dojrzały i krytyczny. Zaproponowane obróbki cieplne nie doprowadziły do uzyskania korzystniejszych właściwości mechanicznych w porównaniu do uzyskanych w wyniku zaproponowanej i zrealizowanej w pracy referencyjnej obróbki cieplnej. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam wykazanie, że wprowadzenie do procesu obróbki cieplnej wygrzewania pośredniego wywołuje przyspieszenie przemiany bainitycznej. Dużą wartość poznawczą ma również opis kinetyki przemiany bainitycznej z wykorzystaniem wygrzewania pośredniego.

W podsumowaniu można stwierdzić, że uzyskane wyniki badań są adekwatne do celów pracy. Nie potwierdzają jednak przyjętego założenia odnośnie osiągnięcia korzystniejszych właściwości mechanicznych i użytkowych w wyniku zaproponowanego rozwiązania w porównaniu do konwencjonalnej obróbki cieplnej. Stwierdzenie to jednak w żaden sposób nie umniejsza pracy, a stanowi dodatkową wartość poznawczą.

4. Uwagi szczegółowe

Praca jest napisana w większości starannie pod względem poprawności językowej stosowanej w literaturze naukowo-technicznej i cechuje się dokładnością wykonania zamieszczonych tablic i rysunków. W pracy występują również pewne niejasności, błędy stylistyczne i edytorskie, do których należy zaliczyć:

- Str. 14, wiersz 14 od góry, jest: „...energiej swobodą Gibbsa...”, a powinno być: ... energie swobodną Gibbsa...,

- Str. 15, podpis pod rys. 2.2 nie zawiera objaśnień do przedstawionych podpunktów od (a) do (f),
- Str. 34, 4 i 5 wiersz od dołu, zawzięte zdanie: „Tak więc zasadnym było w analizie poszczególnych segmentów stosowanie jako długości początkowej długości próbki na początku analizowanego eksperymentu”,
- Str. 40, wiersz 14 od dołu, jest: „...skaningową i transmisyjną mikroskopie elektronowe...”, a powinno być: ... skaningową i transmisyjną mikroskopię elektronową...,
- Str. 40, wiersze 5, 6, 9, 10 od dołu, powtórzenie w dwóch różnych miejscach zdania o tej samej treści: „Preparatyka zgładów objęła szlifowanie i mechaniczne polerowanie oraz trawienie odczynnikami Mi19Fe aż do ujawnienia mikrostruktury”,
- Str. 48, wiersz 11 od dołu, jest: „Na rys. 6.3 przedstawiony został...”, a powinno być: Na rys. 6.3 przedstawiony został...,
- Zbyt duże odległości w tekście pomiędzy opisem wyników, a rysunkami do których te opisy się odnoszą. Przykładowo opis do rys. 6.3 znajduje się na stronie 48, podczas gdy rysunek zamieszczono na str. 51. Podobnie opis do rys. 6.4a zamieszczono na str. 49, natomiast rysunek na str. 52.
- używanie kolokwializmów, przykładowo: „... głębsze podhartowanie..” (str. 120) czy „Co ciekawe,...” (str. 121),
- brak konsekwencji stosowania jednostek, przykładowo na rys. 8.4 na stronie 140, czas wygrzewania podano raz w minutach a raz w godzinach,
- zdania niepoprawne językowo, przykładowo str. 162, wiersz 1 i 2 od góry: „Krucze fazy w mikrostrukturach bainitycznych ograniczyły szersze stosowanie stali bainitycznych do momentu opracowania bezwęglkowych stali bainitycznych [5, 111].

5. Uwagi dyskusyjne

Zawarte w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny, wynikający z zainteresowania recenzenta pracą i w żaden sposób nie obniżają wartości pracy. Proszę o odniesienie się do następujących kwestii:

1. Autor wskazał, że dla zarodkowania ferrytu gwieździstego w strukturze pożądana jest obecność tlenków, uzyskiwanych w procesach metalurgicznych i spawalniczych. Proszę o wskazanie rodzaju tych tlenków, ich dopuszczalnych wielkości oraz udziału w strukturze.
2. Proszę o wskazanie wyrobu oraz jego właściwości mechanicznych, które są traktowane jako wyjściowe, tj. uzyskiwane w konwencjonalnej obróbce cieplnej, w kontekście podjętej tematyki badawczej.
3. Doktorant w kilku miejscach w pracy używa własnej lub bardzo rzadko stosowanej terminologii. Proszę zatem o wyjaśnienie, co Autor ma na myśli używając następującej terminologii: ferryt martenzytyczny, uprzedni martenzyt, uprzedni ferryt, ferryt gwieździsty, ferryt wewnątrzziarnowy, bainit niżjtemperaturowy, bainit wyżejtemperaturowy.
4. Proszę o doprecyzowanie metodyki badawczej w zakresie ilościowej analizy obrazu wydzieleni o wskazanie obszaru analizy oraz podanie parametrów analizy EBSD.
5. W ramach pracy przeprowadzono te same eksperymenty obróbki cieplnej zarówno z wykorzystaniem dylatometru, jak i pieców laboratoryjnych. Proszę o doprecyzowanie

zastosowanych szybkości chłodzenia próbek pomiędzy poszczególnymi etapami obróbki cieplnej w odniesieniu do rys. 8.4 z wykorzystaniem dylatometru oraz odniesienie ich do szybkości uzyskanych z wykorzystaniem pieców laboratoryjnych.

6. Doktorant zaproponował dalszy zakres prac w obszarze objętym tematyką. Czy Autor w przypadku uzyskania pozytywnych wyników badań widzi możliwości komercjalizacji zaproponowanego procesu wyżarzania pośredniego w produkcji konkretnych wyrobów stalowych oraz w jaki sposób proces ten może wpłynąć na opłacalność ekonomiczną?

6. Wniosek końcowy

Uzyskane przez Doktoranta wyniki badań mają wartość naukową oraz poznawczą. Doktorant w realizacji pracy wykazał się niezbędną wiedzą, dojrzałością, umiejętnością twórczego prowadzenia badań i interpretowania uzyskanych wyników. Recenzowana praca pt. „Wpływ wygrzewania pośredniego (IAT) na przemianę bainityczną oraz właściwości mechaniczne i użytkowe stali EN X37CrMoV5-1” spełnia wszystkie wymagania określone w obowiązującej Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wobec czego wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa o dopuszczenie mgr inż. Grzegorza Łukaszewicza do publicznej obrony swojej rozprawy.

