

dr hab. inż. Łukasz Rogal, prof. instytutu
Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej,
Polskiej Akademii Nauk
ul. Reymonta 25, 30-059 Kraków

Kraków, dn. 20.08.2025

RECENZJA

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Łukaszewicza pt. *„Wpływ wygrzewania pośredniego (IAT) na przemianę bainityczną oraz właściwości mechaniczne i użytkowe stali EN X37CrMoV5-1”*

Promotor: dr hab. inż. Wiesław Świątnicki (prof. PW)

1. Podstawa opracowania

Recenzję sporządzono na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa w Politechnice Warszawskiej na podstawie art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571.)

Recenzja dotycząca przedmiotowej rozprawy doktorskiej zawiera trzy elementy:

- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria materiałowa;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta ubiegającego się o nadanie stopnia doktora;
- Ocenę wraz z uzasadnieniem czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

2. Charakterystyka i opis rozprawy

Przedłożona rozprawa doktorska dotyczy wpływu dodatkowego segmentu obróbki izotermicznej (wygrzewania pośredniego) wprowadzonego w procesie obróbki cieplej izotermicznej pomiędzy austenitizowaniem a bainityzowaniem. Badana była kinetyka przemiany bainitycznej oraz wł. mech. stali EN X37CrMoV5-1. Zaproponowana obróbka IAT miała na celu zwiększyć niejednorodność chemiczną w austenicie oraz powodować

wydzielenie faz węglkowych prowadząc do zwiększenie kinetyki przemiany bainitycznej poprzez heterogeniczne zarodkowanie płytek bainitu jak również tworzenie się ferrytu gwieździstego. Oczekiwano również, że poprzez odpowiednie kombinacje różnych składników fazowych możliwe będzie zwiększenie właściwości mechanicznych badanej stali. Ostatecznie wykonano 16 wariantów złożonych obróbek cieplnych (32 warianty temperaturowo-czasowe). Zasadnicza część pracy to wnikliwa analiza różnych modyfikacji obróbki wraz z interpretacją, która na każdym etapie połączona była z zaawansowanymi badaniami struktury, mikrostruktury, dylatometrią, właściwościami mechanicznymi oraz symulacją w oparciu o modele termodynamiczne. Współczesne badania nad stalami bainitycznymi koncentrują się na skróceniu czasu przemiany bainitycznej, optymalizacji składu fazowego. Co więcej drobnoziarniste mikrostruktury bainityczne z udziałem austenitu szczątkowego cieszą się dużym zainteresowaniem, gdyż obecność tej fazy przekłada się na jednoczesne uzyskanie wysokiej wytrzymałości i ciągliwości materiału. Dlatego też uważam, iż wybór tematyki rozprawy należy uznać za trafny i wpisujący się w główny nurt rozwoju nowoczesnych stali bainitycznych w zakresie inżynierii materiałowej.

Praca liczy 201 stron, rozpoczyna się od „Wprowadzenia”, które definiuje również problem badawczy. Kolejne rozdziały to przegląd literatury, opis metodyki badawczej, wyniki badań z dyskusją oraz ostatni rozdział podsumowanie i wnioski. Wstęp teoretyczny został opracowany w oparciu o 49 odnośników literaturowych, które nie stanowią zbyt dużej ilości biorąc pod uwagę ogrom prac w zakresie przemiany bainitycznej. Warty podkreślenia jest dyskusja i podsumowanie po każdym z rozdziałów w części wyników badań, co porządkuje prace i ułatwia jej zrozumienie. Moje szczególne uznanie budzi również opracowanie graficzne, wysoka jakość rysunków. Stronę redakcyjną pracy oceniam bardzo wysoko.

Na samym początku pracy w rozdziale „Wprowadzenie”, zdefiniowane zostały cele badawcze pracy doktorskiej, które polegały na określeniu w stali EN X37CrMoV5-1 obrabianej cieplnie relacji pomiędzy:

- (i) warunkami wygrzewania pośredniego a rozwojem węglków,
- (ii) wydzieleniami a przebiegiem przemiany bainitycznej,
- (iii) uzyskaną mikrostrukturą a właściwościami mechanicznymi.

Kolejną częścią pracy jest wstęp teoretyczny, w którym Doktorant w bardzo krótki sposób przedstawił zagadnienia związane z przemianą bainityczną, obróbką IAT oraz charakterystyką badanej stali. Omówienie zagadnień teoretycznych oraz zdefiniowane we wstępie cele pracy pozwalają stwierdzić, że Doktorant rozumie kluczowe obszary inżynierii materiałowej istotne dla tej problematyki. Kolejnym rozdziałem rozprawy jest „Metodyka

badan eksperymentalnych”, w której autor bardzo szczegółowo opisał szeroką gamę zastosowanych technik optymalizacji obróbki cieplnej oraz diagnostyki stali po różnych wariantach zabiegów termicznych.

Bardzo wysoko oceniam całościowy plan badawczy zrealizowany w toku prac nad doktoratem. Autor umiejętnie dobrał zróżnicowane metody analizy (XRD, SEM-EDS, TEM dylatometria testy wytrzymałościowe oraz tribologiczne), które pozwoliły na uzyskanie pełnej charakterystyki stali na etapie projektowania obróbki cieplnej jak również po jej wykonaniu. Opis wyników badań składał się z czterech rozdziałów: (I) IAT i przemiany fazowe w stali, (ii) Wpływ IAT na przemianę bainityczną, (iii) Projektowanie i realizacja złożonych obróbek cieplnych, (iv) Efekty złożonych obróbek cieplnych. W każdym przypadku kończą się one podsumowaniem i dyskusją. Przeprowadzanie szeregu eksperymentów i związanych z nimi analiz dla określenia wpływu wygrzewania pośredniego w toku obróbki bainitycznej pozwoliło na określenie jej wpływu, tym samym realizację celów pracy. Opis kinetyki przemiany bainitycznej wywołanej wygrzewaniem pośrednim i możliwość kontroli zawartości austenitu umożliwiając sterowanie właściwościami mechanicznymi badanej stali. W konsekwencji wyniki prezentowanych badań dowodzą, że zastosowanie IAT pozwala na skrócenie czasu przemiany bainitycznej w stali EN X37CrMoV5-1. Ponadto, własności mechaniczne są dla niektórych wariantów obróbki cieplnej są porównywalne ze stalami martenzytycznymi.

Mgr. inż. Grzegorz Łukaszewicz wykazał się umiejętnością planowania i zarządzania wieloetapowym procesem badawczym. Autorstwo i współautorstwo w dwóch patentach oraz 16 publikacjach naukowych dodatkowo potwierdza jego samodzielność i dojrzałość naukową. Praca jako całość jest wykonana bardzo rzetelnie nie budząc większych wątpliwości. Drobne oraz szczegółowe uwagi/pytania przedstawiam poniżej:

- Układ oznaczeń referencji nie jest usystematyzowany, czasami autor piszę np. „He et al.” i na końcu zdania podaje numer odnośnika, a czasem robi to zaraz za nazwiskiem autorów np. „Zhao et al. [137]”.
- Nie jest dla mnie zrozumiała nowa terminologia, dlaczego zostało zastosowane nazewnictwo „ferryt gwieździsty” skoro nazwy ferryt iglasty lub igiełkowy, (ang. acicular ferrite) funkcjonuje w powszechnej literaturze fachowej.
- Na str. 29. Autor pisze „W przypadku bainityzowania poniżej 555 °F (291 °C) w mikrostrukturze obecny był również uprzedni martenzyt, który powstał podczas chłodzenia do temp. bainityzowania”. Proszę o wyjaśnienie, pojęcia „uprzedni martenzyt” i w jaki sposób mogło dość do jego powstania „podczas chłodzenia do temperatury bainityzowania”.

- W rozdziale „Metodyka badawcza”, 5.9. Badania odporności na pękanie, pojawiają się nie precyzyjne informacje: czy i w jaki sposób na dnie karbu mechanicznego były wytwarzane zarodki pęknięć, jaka była szybkość trawersy w badaniach odporności na pękanie ?
- Czy nie należałoby zastosować badań XRD do oceny ilości węglików, które wydzielają się w różnych obróbkach IAT dla pełnego określenia ich udziału oraz rodzaju ? Na niektórych dyfraktogramach opisujących wpływ odkształcenia na udział austenitu widoczne są refleksy w zakresie $\approx 40.2 - 2 \text{ Theta}$ (rys. 9.30, oznaczenie: $\varepsilon - 32.4\%$), rys. 9.29, oznaczenie: $\varepsilon - 12.1\%$), od jakiej fazy one pochodzą ?
- Na str. 56 Autor twierdzi, „że według symulacji węgliki typu MC występują w postaci gęsto rozmieszczonych na granicach ziaren macierzystego austenitu”, „z kolei węgliki typu M_7C_3 formują się nielicznie”. Według mojej opinii nie wynika to z symulacji. Brakuje badań identyfikacji typu węglików stosując np. mikroskopie transmisyjną z dyfrakcją elektronową.
- Rysunek 8.1, punktowa zmiana kontrastu na płytkach ferrytu bainitycznego obserwowana przy użyciu TEM-BF może sugerować obecność m.in. wydzielen wewnątrz listew. Należałoby dla pewności pokazać dyfrakcję elektronową z tego obszaru celem pełnej identyfikacji składników struktury.
- Rysunek 9.14, w próbie ściskania mówimy raczej o skróceniu Ac [%], niż A [%]. Może to wprowadzać w błąd czytelnika, ponieważ oznaczenie takie związane jest z wydłużeniem.
- Rysunek 9.15, umowna granica plastyczności w próbie ściskania została oznaczona jako $R_{p0.2}$ co jest mylące ponieważ takie oznaczenie odnosi się do rozciągania (można zastosować oznaczenie $R_{p0.2c}$).
- Brak dokładności pomiarowej w analizie EDS dla pierwiastków substytucyjnych w tab. na rys. 6.13, ponadto podawanie zawartości węgla z analizy EDS obarczone bardzo dużym błędem.
- Na rysunku 9.17 i 9.18 zaznaczono opis osi rzędnych „Obliczeniowa odporność na pękanie”. Proszę o wyjaśnienie znaczenia tego określenia. Czy były wykonane realne eksperymenty odporności na pękanie ?
- Proszę o informację dotyczącą jednostki [p.p.] na rysunkach opisujących względną zmianę długości (np. 6.3, 6.7, 6.17, itd.).
- Czy nie przeszacowano roli węglików w opisie/interpretacji rysunku 6.26. Autor pisze, iż główną przyczyną zmian jest „przebudowa struktury węglików”. Czy przy tak nieznacznym udziale węglików, które są widoczne na mikrostrukturach SEM, mogą one „tylko” odpowiadać za wzrost długości próbki dylatometrycznej w całej objętości ? Czy nie należało by również rozpatrzyć roli osnowy i przemian jakie mogą w niej zachodzić ?

3. Wniosek końcowy

Reasumując, pragnę zaznaczyć, iż doktorant, magister inżynier Grzegorz Łukaszewicz, pomyślnie zrealizował zaplanowany program badań. Przedmiot jego pracy stanowi nowatorski i aktualny problem w świetle literatury przedmiotu. Otrzymane wyniki wykazuje dużą wartość naukową i aplikacyjną. Autor prezentuje szeroką wiedzę teoretyczną z zakresu inżynierii materiałowej. Praca potwierdza umiejętność Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

Łukasz Rogal

