

Prof. dr hab. inż. Bogdan Garbarz
bogdan.garbarz@git.lukasiewicz.gov.pl
☎ +48 32 2345 249
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski
Instytut Technologiczny
44-100 Gliwice
ul. K. Miarki 12

Gliwice, 09.05.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Skowronka pt.:

„Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing” („Poprawa plastyczności wysokowytrzymałych stali średniomanganowych przez wyżarzanie międzykrytyczne”)

wykonanej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzję rozprawy opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej (pismo RDIMa.RMT.512.4.2023 z dn. 28.03.2023 r.) zgodnie z zasadami zawartymi w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce: Dział V - stopnie i tytuł w systemie szkolnictwa wyższego i nauki.

2. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska w języku angielskim pt.: „Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing” (tytuł w języku polskim w tłumaczeniu Autora rozprawy: „Poprawa plastyczności wysokowytrzymałych stali średniomanganowych przez wyżarzanie międzykrytyczne”) przedstawiona do obrony w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Adam Grajcar, pracownik naukowy Politechniki Śląskiej. Recenzowana rozprawa ma postać opracowanego tomu, składającego się z właściwego opracowania w języku angielskim, streszczenia w języku angielskim, streszczenia w języku polskim oraz poszerzonego streszczenia w języku polskim. Właściwa rozprawa zawiera 136 jednostronne zadrukowanych kartek, na których znajdują się 83 rysunki (wykresy, diagramy i fotografie) i 6 tablic.

3. Tematyka, cel i teza rozprawy

Na podstawie analizy opublikowanych wyników prac z zakresu rozwoju gatunków stali stosowanych do konstrukcji nadwozi samochodów, w szczególności stali średniomanganowych należących do

Biurowo Dziekana

wpłynęło dnia 11.05.2023
RDJMa | RMT | 512 | 51 | 2023
nr zał.

gatunków AHSS trzeciej generacji, Autor rozprawy zidentyfikował obszar niewystarczająco zbadany, który przyjął jako tematykę pracy doktorskiej i na tej podstawie sformułował cel badań. Podany w rozprawie cel badań polega na wyjaśnieniu zjawisk strukturalnych zachodzących w trakcie wygrzewania (wyżarzania) międzykrytycznego (tj. pomiędzy temperaturami A_{c1} i A_{c3}) walcowanej na gorąco stali średniomanganowej z dodatkiem stopowym glinu, w zależności od zastosowanych parametrów temperaturowo – czasowych wygrzewania i od optymalizacji tych parametrów, mającej prowadzić do poprawy plastyczności stali. W oparciu o przegląd dotychczasowej wiedzy w obszarze wybranej tematyki badań, Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy: „Prawidłowy dobór ułamka objętości oraz stabilności austenitu resztkowego (szczątkowego) w wyniku zastosowania zoptymalizowanych wartości temperatury i czasu wygrzewania międzykrytycznego pozwala uzyskać stopniowy postęp przemiany martenzytycznej spowodowanej odkształceniem, regulowany wielkością ziarna austenitu i w rezultacie prowadzi do poprawy plastyczności oraz wartości iloczynu wytrzymałość $\times$ plastyczność, w szczególności w porównaniu ze stalą obrobioną termomechanicznie”. Teza pracy została sformułowana w sposób ścisły i przedstawia realnie nowy problem naukowy do wyjaśnienia. Jest to także zagadnienie ambitne i trudne eksperymentalnie na tle dotychczas opublikowanych prac z zakresu rozwoju obróbki stali średniomanganowych. Dodatkowo, Autor rozprawy ustalił cele ilościowe do osiągnięcia w zakresie poprawy właściwości mechanicznych badanej stali średniomanganowej na następujących poziomach: wydłużenie jednorodne $UEl \geq 15\%$, wydłużenie całkowite $TEl \geq 25\%$, wytrzymałość na rozciąganie $UTS \geq 900$ MPa.

4. Ocena ogólna i edytorska rozprawy

4.1. Tytuł rozprawy i kompozycja treści

Tytuł ocenianej rozprawy jest zwięzły i zasadniczo odpowiadający jej zawartości, ale nie odnosi się do istotnego elementu stosowanej obróbki, którym jest odpowiednio szybkie chłodzenie po wygrzewaniu w zakresie międzykrytycznym. Istotę badanego problemu lepiej oddawałby taki tytuł jak np. „Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing followed by fast cooling” („Poprawa plastyczności wysokowytrzymałych stali średniomanganowych przez wyżarzanie międzykrytyczne i następujące po nim szybkie chłodzenie”). Zasadnicza część rozprawy składa się z siedmiu rozdziałów następujących po sobie zgodnie ze standardową kolejnością stosowaną w rozprawach naukowych, co pozwala w sposób bezproblemowy śledzić kolejne etapy badań i analiz. Opracowanie poprzedza zestawienie zawierające objaśnienia ważniejszych zastosowanych w tekście symboli i skrótów oraz spis treści. Rozdział pierwszy jest wstępem przedstawiającym krótką historię rozwoju gatunków stali stosowanych do budowy nadwozi

samochodowych, ze wskazaniem kierunków badań nie stwarzających dalszych perspektyw rozwojowych oraz kierunków badań charakteryzujących się dużym potencjałem rozwojowym, w tym gatunków stali średniomanganowych zaliczonych do trzeciej generacji tzw. zaawansowanych (nowoczesnych) wysokowytrzymałych stali (AHSS – Advanced High Strength Steels), stanowiących przedmiot badań Doktoranta. Rozdział 2 jest 38-mio stronicowym przeglądem publikacji – nazwanym State of the Art / stan badanego zagadnienia – zakończonym podsumowaniem. Rozdział 3 zawiera opisy zastosowanych metod badań, a w rozdziałach 4, 5 i 6 Doktorant zamieścił rezultaty własnych badań wraz z ich opisem, dyskusją i posumowaniem poszczególnych etapów badań. W ostatnim rozdziale 7 Autor zamieścił posumowanie uzyskanych wyników i główne wnioski z wykonanych badań.

4.2. Poziom edytorski i językowy

Poziom językowy i edytorski rozprawy oceniam jako wysoki, a błędy literowe i usterki redakcyjne występują incydentalnie. Jednym z niewielu określeń, które wydaje się dyskusyjne, jest użyte dziesięć razy sformułowanie „as visible, as visible in table, it is visible that, are visible in case of,”. W stosowanych kontekstach bardziej prawidłowe byłoby użycie określenia „as seen....”. W innym określeniu użytym na str. 62: „...up to 1200 °C the dilatometric results are linear...”, zamiast „dilatometric results” powinno być raczej „dilatograms” lub „dilatation vs. temperature function”. Na str. 110 trzeci wiersz od góry jest błąd literowy: „...the chemical enrichment of RA is not enough to lower...”.

Reprodukcje diagramów i wykresów zamieszczone w rozprawie są bardzo dobrej jakości, a mikrofotografie charakteryzują się wystarczającą rozdzielczością do zobrazowania wszystkich składników fazowych w badanych próbkach.

4.3. Zestawienie i wykorzystanie materiałów źródłowych

Przegląd stanu wiedzy w zakresie wybranego do badań obszaru inżynierii materiałowej Doktorant opracował na podstawie analizy obszernej bazy materiałów źródłowych obejmujących 223 pozycje. Należy podkreślić, że wśród cytowanych pozycji znajduje się osiem publikacji ze współautorstwem Doktoranta indeksowanych w bazie Web of Science (WoS), o tematyce zbieżnej z tematem pracy doktorskiej – pozycje [63, 93, 115, 119, 131, 158, 192, 231]. Mgr inż. Adam Skowronek jest pierwszym autorem sześciu z tych publikacji. Dobór materiałów źródłowych jest reprezentatywny dla publikacji w czasopiśmie o największym zasięgu międzynarodowym w dziedzinie wiedzy obejmującej tematykę pracy doktorskiej. Zestaw publikacji obejmuje także pozycje, które ukazały się

krótko przed edycją rozprawy doktorskiej: [81, 82, 106, 134, 138, 160, 162, 167-169, 183, 206, 222, 226] i szereg publikacji Doktoranta. Jako pewien niedostatek dosyć obszernego przeglądu literatury można wskazać brak w analizie rozwoju stali AHSS trzeciej generacji krytycznego omówienia najnowszych pozycji, które ukazały się w latach bezpośrednio poprzedzających edycję rozprawy doktorskiej (dopiero w podsumowaniu rozdziału przywołano pozycję [183]). Na tym tle nie brzmi najlepiej stwierdzenie na str. 8: „New types of steels such as medium-Mn steels belonging to 3rd generation of AHSS and heat treatment, such as intercritical annealing, are currently under intensive development [6].” (Nowe rodzaje stali, takie jak średniomanganowe stale należące do 3-ciej generacji AHSS oraz obróbka cieplna, taka jak wygrzewanie międzykrytyczne, są obecnie intensywnie rozwijane), podczas gdy pozycja [6] pochodzi z roku 2017. Także na str. 20 znajduje się zdanie: „This results in the recent introduction of pilot batches to steelworks [15], despite the relatively short time since their invention.” (To skutkuje w ostatnim czasie zastosowaniem pilotowych partii w zakładach hutniczych, pomimo stosunkowo krótkiego czasu od ich odkrycia”, a publikacja [15] ukazała się w roku 2015.

5. Ocena merytoryczna rozprawy

5.1. Przegląd i podsumowanie stanu wiedzy dotyczącej badanego zagadnienia (State of the art - rozdział 2)

Analizę literatury naukowej i technicznej związanej z badanym zagadnieniem Doktorant podzielił na trzy części: część pierwszą – wprowadzającą (rozdział 2.1), zawierającą krótkie opisy charakterystyk materiałowych gatunków i klas gatunkowych stali stosowanych w postaci blach do wytwarzania poszczególnych części nadwozi samochodowych, część drugą (rozdział 2.2) przedstawiającą podstawy fizyczne i technologiczne wytwarzania blach ze stali średniomanganowych AHSS trzeciej generacji i część trzecią (rozdział 2.3) dotyczącą wpływu parametrów obróbki cieplnej w zakresie międzykrytycznym na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali średniomanganowych AHSS. Na końcu przeglądu literaturowego zamieszczono podsumowanie stanu wiedzy dotyczącej rozwoju podstaw naukowych i technologii wytwarzania blach stalowych stosowanych w przemyśle samochodowym.

W części pierwszej przeglądu literaturowego, poza krótkimi charakterystykami konwencjonalnych i zaawansowanych grup gatunkowych stali do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym, Doktorant wskazał trzy główne czynniki napędzające rozwój materiałów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym (str. 10): konieczność obniżenia wielkości emisji gazów spalinowych przez zmniejszenie masy pojazdu, oczekiwane polepszenie bezpieczeństwa pasażerów w wyniku ulepszonej

konstrukcji pojazdu i zastosowania materiałów o dużej zdolności do pochłaniania energii w przypadku odkształcenia oraz preferencje w zastosowaniu materiałów charakteryzujących się jednocześnie dużą sztywnością, dużą podatnością do formowania i dobrą spawalnością i zgrzewalnością.

W uzupełnieniu wymienionych czynników wpływających na wybór opracowywanych nowych materiałów do wdrożenia przemysłowego należałoby jeszcze dodać aspekt ekonomiczny oraz stopień komplikacji operacji technologicznych (technological feasibility), co zresztą zostało wymienione w dalszych częściach rozprawy.

Dwie kolejne części przeglądu literaturowego bezpośrednio dotyczą tematyki badań Doktoranta. Część obejmującą podstawy metaloznawcze technologii wytwarzania stali średniomanganowych (rozdział 2.2) Autor rozpoczął opisem zasad projektowania składu chemicznego tej klasy gatunkowej stali, przedstawił sposoby oddziaływania poszczególnych pierwiastków na przemiany fazowe, mikrostrukturę i właściwości oraz przeanalizował czynniki wpływające na odkształcalność na zimno. Kolejny problem opisany krytycznie przez Doktoranta na podstawie źródeł literaturowych i wcześniejszych badań własnych dotyczy obróbki termomechanicznej (określanej także jako obróbka cieplno – plastyczna) stali średniomanganowych. Analiza ta została zakończona przez Doktoranta wnioskiem, że obróbka termomechaniczna blach ze stali średniomanganowych, chociaż obejmuje względnie proste operacje techniczne, nie ma perspektyw zastosowania przemysłowego ze względu na osiąganą w wyniku tej operacji niewystarczającą plastyczność. Ten wniosek stanowił dla doktoranta jedną z przesłanek wyboru tematyki badań, obejmującej obróbkę alternatywną, w postaci wygrzewania w zakresie międzykrytycznym z następnym szybkim chłodzeniem i temu problemowi poświęcone zostały kolejne części analizy literaturowej, w szczególności rozdz. 2.3: Wpływ parametrów obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali średniomanganowych wygrzewanych w zakresie międzykrytycznym. Podstawy fizyczne i aspekty technologiczne obróbki stali średniomanganowych, której główną operacją jest wygrzewanie międzykrytyczne zostały opisane wyczerpująco przez Doktoranta, w podziale na następujące problemy:

- wygrzewanie międzykrytyczne blach walcowanych na gorąco,
- wygrzewanie międzykrytyczne blach walcowanych na zimno,
- stabilność austenitu resztkowego (szczątkowego) pozostalego w finalnej mikrostrukturze stali średniobanitycznej po obróbce obejmującej wygrzewanie międzykrytyczne,
- wpływ parametrów obróbki (szybkość nagrzewania, czas i temperatura wygrzewania, szybkość chłodzenia) na finalną mikrostrukturę.

W tym fragmencie pracy na str. 34 chciałbym zwrócić uwagę następujące braki wymagające uzupełnienia i / lub korekty: we wzorach (2) i (3) nie podano, że M_s wyrażono w $[^{\circ}\text{C}]$; we wzorze (3) powinno być 34.4 Mn (a nie C); wzór (2) występuje w pozycji [137], a wzór (3) w pozycji [135].

Podsumowując ocenę części rozprawy obejmującej opis podstaw teoretycznych i technologicznych wytwarzania blach do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym stwierdzam, że przegląd publikacji dotyczących przedmiotu rozprawy stanowi wystarczającą bazę do realizacji eksperymentalnej części pracy zgodnie ze współczesny stanem wiedzy.

5.2. Wybór i przygotowanie materiału do badań

Jako materiał do badań Doktorant wybrał średniomanganową stal zawierającą w % masowych: 0,16% C; 4,7% Mn; 1,6% Al; 0,20% Si; 0,20% Mo; 0,005% S oraz 0,008% P, uzasadniając ten wybór krótko i ogólnie, np. nie komentując w żaden sposób dodatku molibdenu.

Należałoby oczekiwać, że wybór konkretnych poziomów zawartości C, Mn, Mo oraz Al, których dodatki w stalach średniomanganowych AHSS mogą być bardzo różne - jak to pokazano w tabelicy 1 – zostanie uzasadniony z wykorzystaniem przesłanek ilościowych, na podstawie dotychczas dostępnych wyników badań. Eksperymentalną stal wytopiono i odlano w warunkach laboratoryjnych, a wlewki przewalcowano na gorąco na płaskowniki o grubości 4,5 mm. Jak wynika z dalszych opisów materiał ten przygotowano w ramach wcześniejszej pracy ([5] A. Grajcar, P. Skrzypczyk, D. Wozniak, Thermomechanically rolled medium-Mn steels containing retained austenite, Arch. Metall. Mater. 59 (2014) 1691–1697. <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0286>).

5.3. Zastosowane metody badań

Doktorant opracował program badań w formie diagramu (rys. 27 na str. 53) zawierającego trzy etapy eksperymentów, w ramach których zaplanował uzyskanie charakterystyk materiałowych i ich wzajemnych korelacji, z zastosowaniem podanych na diagramie metod badań fizycznych i symulacji numerycznych. Metody badań i rodzaj aparatury badawczej zostały poprawnie dobrane do rodzaju zaplanowanych eksperymentów i celów wyznaczonych do osiągnięcia w pracy. Symulacje termodynamiczne zostały wykonane za pomocą pakietu programów JMatPro, badania dylatometryczne przeprowadzono za pomocą nowoczesnego dylatometru o dużej rozdzielczości dylatacyjno – temperaturowej, a do badań mikrostrukturalnych użyto nowoczesną aparaturę z zakresu metod skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), transmisyjnej mikroskopii elektronowej (SEM) i dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Badania mechaniczne wykonano w ograniczonym zakresie, stosując

pomiar twardości i standardową próbę rozciągania. Na podkreślenie zasługuje zastosowanie oryginalnej zaproponowanej przez Doktoranta i zespół [158] metody obliczania ułamka objętości austenitu na podstawie zmierzonych współczynników rozszerzalności liniowej dla fazy ferrytycznej i fazy austenitycznej w badanej stali.

W odniesieniu do metodyki badawczej prosiłbym Doktoranta o następujące wyjaśnienia:

- Na str. 54 podano, że stosowane próbki dylatometryczne miały wymiary $\varnothing 4 \times 10$ mm, jednak na litych próbkach walcowych trudno byłoby osiągnąć w dylatometrze duże szybkości chłodzenia rzędu 60°C z zachowaniem jednorodności chłodzenia na przekroju próbki - czy nie stosowano próbek rurkowych o średnicy wewnętrznej 2 mm, tj. $\varnothing 4/\varnothing 2 \times 10$ mm ?

- Testy rozciągania wykonano na próbkach płaskich o przekroju 6 mm x 2,5 mm, które po obróbce w zakresie międzykrytycznym chłodzono w wodzie – czy zmierzono szybkość chłodzenia w środku przekroju próbki? Jest to istotne przy porównywaniu mikrostruktur uzyskanych w obrobionych próbkach wytrzymałościowych z mikrostrukturami wytworzonymi w próbkach dylatometrycznych po chłodzeniu z szybkością 60°C/s .

- Czy granicę plastyczności oznaczoną jako YS wyznaczono przy odkształceniu trwałym 0,2% ? Norma ASTM E8, na którą powołano się na str. 55, nie narzuca konkretnej wartości tego odkształcenia.

5.4. Wyniki badań wpływu temperatury międzykrytycznego wygrzewania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne badanej stali

Badania wpływu temperatury wygrzewania w zakresie pomiędzy krytycznymi temperaturami A_{c1} i A_{c3} wynoszącymi dla badanej stali, odpowiednio, 648°C oraz 924°C na mikrostrukturę wykonano na próbkach obrobionych cieplnie w dylatometrze, stosując siedem wartości temperatury wygrzewania, jedną wartość czasu wygrzewania 60 minut i jedną wartość szybkości chłodzenia po wygrzewaniu równą 60°C/s . Wyjściową mikrostrukturą próbek był martenzyt. Ułamek objętości austenitu resztkowego (AR) po ochłodzeniu próbek z zakresu międzykrytycznego do temperatury otoczenia wyznaczono eksperymentalnie metodą rentgenowską i ustalono, że największy ułamek AR uzyskuje się po wygrzewaniu w temperaturze 680°C (36%) i 700°C (41%). Określono również eksperymentalnie zależność zawartości C oraz Mn w austenicie resztkowym od temperatury wygrzewania międzykrytycznego, po raz kolejny stwierdzając istotne różnice w stosunku do wyników otrzymanych metodą obliczeń z zastosowaniem modelu.

Analizując mikrostrukturę próbek dylatometrycznych Doktorant zastosował metodę rozróżnienia na obrazach SEM listew lub płytek austenitu resztkowego od listew lub płytek martenzytu nowego, powstałego w trakcie chłodzenia, na podstawie morfologii powierzchni listew wytworzonej w wyniku

wytrawiania nitaliem – zostało to opisane na str. 72. W przypadku szerszych listew o odpowiedniej orientacji krystalograficznej może ta metoda jest skuteczna, ale czy Doktorant na podstawie np. mikrofotografii na rys. 42 d – str. 73 podjąłby się metodą metalografii ilościowej wyznaczyć ułamki objętości faz RA oraz M_f ?

W tablicy 5 – str. 76 zestawiono wartości ułamka objętości AR zmierzone różnymi metodami w próbkach po obróbce w międzykrytycznym zakresie temperatury. Wydaje się, że komentarz Doktoranta na str. 75 dotyczący tablicy 5: „otrzymano stosunkowo dobrą zgodność dla metod EBSD, XRD oraz metody dylatometrycznej” jest zbyt ogólny i należałoby go rozwinąć, mając na uwadze duże różnice w wartościach AR określonych po wygrzewaniu w temperaturach 700°C i 720°C metodami XRD i EBSD.

Wyniki analizy fazowej przedstawiono syntetycznie na diagramie pokazującym zależność składu fazowego stali i temperatury M_s od zastosowanej temperatury wygrzewania międzykrytycznego – rys. 50, str. 82.

Na podstawie analizy krzywych rozciągania próbek wytrzymałościowych obrobionych w sposób identyczny jak próbki dylatometryczne stwierdzono, że w wyniku wszystkich obróbek otrzymano ciągly charakter umocnienia (tj. bez tzw. wyraźnej granicy plastyczności) z tym, że po obróbkach w temperaturach 680°C oraz 700°C na krzywych umocnienia stwierdzono wystąpienie niestabilności w postaci wahań wartości naprężenia (serrations), spowodowanych efektem DSA. W wyniku zbadania wpływu temperatury międzykrytycznego wygrzewania na właściwości mechaniczne badanej stali Doktorant wskazał korzystny ze względu na uzyskane właściwości mechaniczne przedział obróbki międzykrytycznej pomiędzy wartościami 680°C a 700°C, dla wygrzewania w ciągu 60 minut.

W odniesieniu do wskazanego optymalnego przedziału temperatury wygrzewania międzykrytycznego brak jest komentarza Doktoranta dotyczącego występującego po obróbce w tym zakresie temperatury zjawiska fluktuacji naprężenia w trakcie odkształcania (serrations), które może niekorzystnie wpływać na jakość powierzchni kształtowanych plastycznie na zimno blach.

5.5. Wyniki badań wpływu czasu międzykrytycznego wygrzewania na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne badanej stali

Do obróbek wygrzewania w zakresie międzykrytycznym z zastosowaniem różnych czasów wytrzymania wybrano temperaturę 680°C uznając tę wartość temperatury obróbki za optymalną dla badanej stali, pozwalającą uzyskać jednocześnie duży ułamek zawartości i wysoką stabilność austenitu resztkowego, co prowadzi do uzyskania dużej plastyczności. Zastosowano sześć wartości czasu wygrzewania międzykrytycznego w temperaturze 680°C- od 1 minuty do 300 minut – i podobną

metodykę badania próbek dylatometrycznych i wytrzymałościowych jak w przypadku badania wpływu temperatury obróbki międzykrytycznej, poszerzoną o badania cienkich folii w TEM oraz o przerywane testy rozciągania. Stwierdzono, że w dla wszystkich wariantów w trakcie szybkiego chłodzenia po obróbce w zakresie międzykrytycznym nie zachodzi przemiana martenzytyczna. Wyznaczono zawartości austenitu resztkowego oraz rozkłady szerokości listew austenitu w mikrostrukturze próbek po obróbce.

Uwagę zwracają interesujące wyniki badania cienkich folii w TEM – rys. 61 – 63. Należałoby jednak dokładniej opisać wysokorozdzielczy obraz na rys. 61b: jeśli widoczne prążki w obszarach RA i F obrazują płaszczyzny sieciowe, to jakie są to płaszczyzny, o jakich wskaźnikach? Czasy podane na rys. 63e oraz 63f powinny chyba wynosić – odpowiednio – 15 min i 300 min?

Analizując czynniki wpływające na stabilizację austenitu resztkowego, dla poszczególnych wariantów obróbki izotermicznej obliczono wartości temperatury M_s z wykorzystaniem wzoru (10) podanego na str. 37. Stabilność mechaniczną austenitu resztkowego badano z zastosowaniem przerywanych testów rozciągania i na podstawie otrzymanych wyników sporządzono zależności zawartości pozostałego AR od wartości odkształcenia. Na podstawie kompletnych testów rozciągania opracowano krzywe umocnienia, na których – zwłaszcza dla dłuższych czasów obróbki – widoczne są niestabilności typu „serrations” oraz zależności szybkości umocnienia odkształceniowego i wykładnika umocnienia odkształceniowego od wielkości odkształcenia rzeczywistego. W wyniku badań mikrostruktury próbek wytrzymałościowych uzyskano istotne informacje ilościowe o fragmentacji obszarów austenitu resztkowego w trakcie odkształcania.

W odniesieniu do analizy wpływu poszczególnych czynników na wartość temperatury początku przemiany martenzytycznej powstaje pytanie i prośba do Doktoranta o wyjaśnienie, dlaczego do obliczeń wartości M_s austenitu wybrany został wzór (10) nie uwzględniający wpływu na M_s zawartości innych pierwiastków poza C i Mn, a nie np. wzór (9), który również uwzględnia wielkość obszarów austenitu resztkowego? Co prawda we wzorze (9) występuje średnia średnica obszarów austenitu, ale można się posługiwać wymiarem poprzecznym listew lub średnicą równoważną dla kształtów odbiegających od równoosiowych.

5. 6. Ocena podsumowania rozprawy i głównych wniosków

W końcowym podsumowaniu wyników badań i we wnioskach Doktorant w syntetycznej formie przedstawił główne – w większości oryginalne - osiągnięcia i uzasadnił, że postawiona teza pracy jest prawdziwa. Spełnione zostały także założone do osiągnięcia cele w zakresie parametrów mechanicznych badanej stali średniomanganowej uzyskane w wyniku międzykrytycznej obróbki

cieplnej. Jako najkorzystniejsze wskazano dwa warianty obróbki: 680°C - 15 minut / szybkie chłodzenie oraz 680°C - 60 minut / szybkie chłodzenie, po których uzyskano najlepsze kombinacje wartości granicy plastyczności i wydłużenia jednorodnego w próbie rozciągania. Doktorant stwierdził, że uzyskał poprawę właściwości mechanicznych w stosunku do rezultatów osiągniętych dotychczas w innych pracach dotyczących badania stali średniomanganowych AHSS i jako główną podstawę sukcesu wskazał zbadanie wpływu stabilności austenitu reszkowego na przemianę martenzytyczną wywołaną odkształceniem (SIMT effect).

6. Końcowa ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Skowronka

Na podstawie przeprowadzonej analizy i oceny przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant Pan mgr inż. Adam Skowronek wykazał się wysokimi umiejętnościami samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności w zakresie posługiwania się metodami badań eksperymentalnych i symulacji numerycznych oraz w zakresie umiejętności krytycznej analizy wyników badań własnych i prac publikowanych przez innych badaczy. Wykonany przeglądowy i krytyczny opis aktualnego stanu wiedzy w dziedzinie, której dotyczy rozprawa, świadczy o dużej wiedzy teoretycznej Doktoranta w zakresie inżynierii materiałowej. Otrzymane przez Doktoranta rezultaty badań i sformułowane na ich podstawie wnioski oceniam jako oryginalny wkład w poszerzenie wiedzy z zakresu przemian fazowych i mikrostrukturalnych zachodzących w trakcie międzykrytycznego wygrzewania i następującego po nim chłodzenia oraz w trakcie odkształcania stali średniomanganowych AHSS. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa pt.: „Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing” („Poprawa plastyczności wysokowytrzymałych stali średniomanganowych przez wyżarzanie międzykrytyczne”) przedstawiona do procedowania w dyscyplinie naukowej Inżynieria Materiałowa spełnia w pełnym zakresie wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dział V - stopnie i tytuły w systemie szkolnictwa wyższego i nauki, Rozdział 2 - Stopień doktora, Art. 187. pkt 1) i wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Adama Skowronka do obrony tej rozprawy. Ze względu na wysoki poziom naukowy recenzowanej pracy i dużą wartość poznawczą uzyskanych wyników, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej autorstwa Pana mgr inż. Adama Skowronka.

prof. dr hab. inż. Bogdan Garbarz
/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)