

Warszawa, 7 czerwca 2023r.

Dr hab. inż. Wiesław Świątnicki, prof. PW  
Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechnika Warszawska  
ul. Wołoska 141  
02-507 Warszawa

## 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*

Recenzja rozprawy doktorskiej została wykonana w odpowiedzi na pismo Pani prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa, z dnia 28.03.2023 r.

### **Przedmiot recenzji**

Recenzja dotyczy pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Adama Skowronka, napisanej pod kierunkiem Pana profesora dr hab. inż. Adama Grajcara. Przedmiotem recenzowanej rozprawy są badania zjawisk strukturalnych zachodzących podczas wyżarzania międzykrytycznego stali średniomanganowej walcowanej na gorąco, pod kątem opracowania obróbki cieplnej mającej na celu uzyskanie korzystnych właściwości wytrzymałościowych i dużej plastyczności.

### **Ocena wyboru tematyki rozprawy**

Od początku lat 90-tych XX w. nastąpił intensywny rozwój prac badawczych nad opracowaniem nowych gatunków stali do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym. Rozwój ten był jednym ze skutków kryzysu energetycznego wywołanego w 1973r. gwałtownym wzrostem cen ropy naftowej na światowych rynkach. Wysokie ceny ropy okazały się tendencją trwałą, co skłoniło producentów pojazdów samochodowych do poszukiwania rozwiązań technologicznych mających na celu zmniejszenie zużycia paliwa m. in. poprzez

Biurowisko

wpłynęło dnia 12.06.2023  
RDJMa | RMT | 781 | 512 | 2023  
nr ..... zat. ....



zmniejszenie masy produkowanych pojazdów. W późniejszym okresie doszły jeszcze motywacje związane z czynnikami środowiskowymi: ograniczeniem emisji spalin i gazów cieplarnianych związanych z eksploatacją pojazdów, a także wymogi bezpieczeństwa pasażerów. Efektem poszukiwań było opracowanie nowych gatunków stali o dużej wytrzymałości, co pozwoliło na redukcję grubości przekrojów blach i elementów konstrukcyjnych pojazdów. Należy podkreślić, że wzrost wytrzymałości został osiągnięty przez odpowiednie ukształtowanie składu fazowego i mikrostruktury stali na drodze precyzyjnie zaprojektowanych procesów obróbki cieplnej, a nie przez wprowadzenie dużego udziału dodatków stopowych. Opracowane stale wykazywały jednocześnie dużą odkształcalność umożliwiającą łatwe ich kształtowanie w procesach obróbki plastycznej. Wreszcie cechowały się dobrą spawalnością i zdolnością do absorpcji energii odkształcenia w trakcie kolizji pojazdu. Stale te pozwoliły zatem przełamać charakterystyczną dla stali konwencjonalnych sprzeczność polegającą na tym, że wzrostowi wytrzymałości towarzyszy spadek plastyczności i odwrotnie. Opracowane stale określa się mianem zaawansowanych stali o dużej wytrzymałości – (*Advanced High Strength Steels*). Obecnie szczególnie intensywnie rozwijane są stale AHSS 3 generacji, do których należą tzw. stale o średniej zawartości manganu. Są to stale wielofazowe zawierające metastabilny austenit, który pod wpływem odkształcenia plastycznego ulega przemianie martenzytycznej wskutek efektu SIMT (*Strain Induced Martensitic Transformation*). Wystąpienie tego efektu warunkuje wysokie właściwości plastyczne i duży współczynnik umocnienia odkształceniowego stali.

W ten nurt badań wpisuje się rozprawa doktorska mgr inż. Adama Skowronka, zrealizowana pod kierunkiem Pana Profesora dr hab. inż. Adama Grajcara.

Przedmiotem pracy doktorskiej jest tzw. stal średniomanganowa po walcowaniu na gorąco. Poprzez zastosowanie odpowiednio zaprojektowanej obróbki cieplnej w stali tej występuje metastabilny austenit, który pod wpływem odkształcenia może ulec przemianie martenzytycznej wskutek efektu SIMT. W przedstawionej do oceny rozprawie, Doktorant podjął się rozwiązania problemu kształtowania udziału i stabilności austenitu szczątkowego przy wykorzystaniu wyżarzania międzykrytycznego w procesie obróbki cieplnej. Należy podkreślić, że problem stabilności austenitu, a w szczególności czynników kształtujących stabilność, nie został, jak dotąd, w pełni wyjaśniony. Problemem jest również sterowanie zawartością austenitu szczątkowego, którego udział zależy od wielu czynników, w tym od jego składu chemicznego, parametrów procesu, wielkości ziaren, itd.



Rozwiązanie tych problemów pozwoliłoby na optymalizację właściwości mechanicznych stali średniomanganowych, co ma istotne znaczenie aplikacyjne.

Biorąc pod uwagę aktualność, aspekty naukowe i znaczenie praktyczne postawionego przez Doktoranta problemu, należy uznać wybór tematu rozprawy za trafny i uzasadniony.

### **Struktura pracy i ocena strony formalnej rozprawy**

Praca wydana jest w postaci książkowej i jest napisana w języku angielskim. Liczy łącznie 136 stron, w tym 19 stron zajmuje spis literatury. Struktura pracy jest typowa dla rozprawy doktorskiej i jest podzielona na dwie zasadnicze części: analizę stanu zagadnienia (*State of the art*) oraz część badawczą. Praca składa się z 7 rozdziałów oraz spisu literatury. Na początku pracy znajduje się lista stosowanych symboli i skrótów oraz spis treści. Na końcu pracy znajdują się streszczenia: w języku angielskim (*Abstract*) oraz krótkie (1 strona) i poszerzone streszczenie w języku polskim (14 stron).

Krótki wstęp (rozd. 1: *Introduction*) poświęcony jest wprowadzeniu w tematykę rozprawy.

W rozdziale 2, liczącym 39 stron, Autor przedstawił opis stanu zagadnienia (*State of the art*) skupiając się na stalach stosowanych w konstrukcji pojazdów samochodowych, a w szczególności na stalach średniomanganowych będących przedmiotem badań w pracy.

W rozdziale 3, liczącym 12 stron, Doktorant opisał procedurę eksperymentalną. Na początku tego rozdziału Autor przedstawił charakterystykę badanej stali (rozd. 3.1), dopiero w kolejnym punkcie cel i tezę pracy (rozd. 3.2). Przyjęta przez Autora kolejność pozwala łatwiej powiązać tezę i cel pracy z rodzajem badanej stali. Korzystne jest przedstawienie w tym rozdziale schematu opisującego czynniki kontrolujące proces wyżarzania międzykrytycznego, cechy austenitu szczątkowego oraz ich wpływ na właściwości mechaniczne stali na podstawie danych literaturowych. W rozdz. 3.3 przedstawiona została metodologia badań i charakterystyka zastosowanych metod badawczych. Techniki badań i procedura eksperymentalna są opisane wyczerpująco.

Wyniki badań opisane są w trzech kolejnych rozdziałach 4, 5 i 6. Na końcu każdego z tych rozdziałów przedstawiono dyskusję zawartych w nim wyników.

Rozdz. 4 opisuje wyniki badań temperatur charakterystycznych przemian fazowych zachodzących w analizowanej stali. Badania wpływu temperatury



i czasu wyżarzania międzykrytycznego na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali opisane są odpowiednio w rozdz. 5 i 6.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie wyników pracy ujęte w 9 wnioskach.

Spis literatury liczy 233 odnośniki, z których 150 pozycji to prace opublikowane w ostatnich 10 latach. Dobór publikacji jest trafny i uzasadniony tematyką rozprawy.

Ogólna struktura pracy jest logiczna i przejrzysta.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Opis stanu zagadnienia (rozdział 2) obejmuje analizę literaturową badań nad stalami stosowanymi do budowy pojazdów samochodowych. Rozdział 2.1 zawiera charakterystykę poszczególnych rodzajów stali stosowanych na blachy karoseryjne w pojazdach samochodowych, począwszy od stali konwencjonalnych, a następnie stali AHSS 1, 2 i 3 generacji. Procesy metalurgiczne i wytwarzanie stali średniomanganowych są przedmiotem rozdz. 2.2. Rozdział 2.3 poświęcony jest metodom obróbki cieplnej stali średniomanganowych oraz wpływowi obróbki cieplnej na mikrostrukturę i właściwości tych stali.

Trzeba podkreślić, że opis stanu zagadnienia jest bardzo logicznie skonstruowany i spójny z częścią obejmującą badania własne Doktoranta opisane w rozdziałach 5 i 6.

Ostatnim rozdziałem w tej części jest podsumowanie stanu zagadnienia (rozdz. 2.4). W rozdziale tym Autor stwierdził, że stale średniomanganowe stanowią perspektywiczną grupę zaawansowanych stali o wysokiej wytrzymałości trzeciej generacji. Wg Autora, właśnie dla tych stali istnieje realna możliwość uzyskania korzystnego stosunku wytrzymałości do plastyczności, przy ograniczonych kosztach ich produkcji. Kluczowy zabieg obróbki cieplnej stosowany w przypadku tych stali to wyżarzanie międzykrytyczne, które daje możliwość kształtowania ich składu fazowego i właściwości mechanicznych. Jest również procesem konkurencyjnym w stosunku do konwencjonalnej obróbki cieplnej pod względem kosztów.

Jak wykazała analiza stanu zagadnienia stale średniomanganowe nadal wymagają badań. Nie został jak dotąd w pełni wyjaśniony wpływ składu chemicznego tych stali, w szczególności podwyższonej zawartości manganu i innych dodatków stopowych, na przemiany fazowe w procesach obróbki cieplnej, zwłaszcza na procesy tworzenia austenitu i jego stabilność.



Pomimo wielu prac badawczych, wiedza o czynnikach kontrolujących stabilność austenitu szczątkowego w stalach średniomanganowych jest nadal niewystarczająca, co utrudnia precyzyjne kształtowanie ich właściwości mechanicznych. Plastyczność stali zależy w głównej mierze od zawartości i stabilności austenitu, co zależy od parametrów wyżarzania międzykrytycznego. Dalszych badań wymaga zatem poznanie zależności pomiędzy parametrami wyżarzania międzykrytycznego a mikrostrukturą oraz właściwościami mechanicznymi i technologicznymi stali średniomanganowych. Rozwiązanie tych problemów jest kluczowe dla optymalizacji właściwości tych stali pod kątem wdrożenia ich do produkcji przemysłowej.

Opis badanej stali oraz cel i teza pracy są przedmiotem rozdziału 3.

W rozdz. 3.1 Autor uzasadnił skład chemiczny wybranej do badań stali oraz przedstawił etapy przygotowania jej do dalszych badań, w tym opisał procesy obróbki plastycznej i obróbki termomechanicznej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stanu zagadnienia Doktorant przyjął dwa założenia:

- 1) plastyczność stali jest ściśle związana z udziałem i stabilnością austenitu szczątkowego w mikrostrukturze;
- 2) obróbką cieplną pozwalającą na uzyskanie najwyższej zawartości austenitu szczątkowego w stalach średniomanganowych jest wyżarzanie międzykrytyczne.

Autor określił przy tym luki badawcze w zakresie wyżarzania międzykrytycznego stali średniomanganowych. Wykazał m. in., że prace badawcze koncentrują się głównie na stalach średniomanganowych walcowanych na zimno, podczas gdy badania stali walcowanych na gorąco są niewystarczające, pomimo potencjalnych korzyści, jakie niosą w zakresie zastosowań praktycznych. Ponadto, dotychczas nie wyjaśniono w pełni wpływu i synergii poszczególnych parametrów wyżarzania międzykrytycznego na zależności mikrostruktura-właściwości. W szczególności konieczne jest głębsze poznanie roli wielkości ziaren w kształtowaniu stabilności mechanicznej austenitu szczątkowego i wynikającego z niej wpływu wielkości ziaren na właściwości wytrzymałościowe i plastyczne stali. Istotne jest także znalezienie odpowiedzi na pytanie czy i jak można zoptymalizować parametry wyżarzania międzykrytycznego oraz skrócić czas tego procesu.



W oparciu o analizę stanu zagadnienia Autor sformułował następującą tezę badawczą rozprawy:

*„Właściwe dobranie udziału i stabilności austenitu szczątkowego poprzez optymalizację temperatury i czasu wyżarzania międzykrytycznego pozwala na uzyskanie stopniowej, indukowanej odkształceniem przemiany martenzytycznej kontrolowanej wielkością ziarna, a tym samym na poprawę plastyczności stali, szczególnie w porównaniu ze stalą obrabianą termomechanicznie.”*

Jest to teza oryginalna, mająca aspekty zarówno naukowe, jak i praktyczne.

Autor stwierdził przy tym, że *„wytworzenie dużej frakcji austenitu szczątkowego o odpowiednim składzie chemicznym, morfologii i wielkości wymaga precyzyjnej kontroli parametrów procesu, takich jak temperatura i czas wyżarzania.”*

Na tej podstawie Doktorant określił główny cel pracy, jakim jest *„wyjaśnienie zjawisk strukturalnych zachodzących podczas wyżarzania międzykrytycznego walcowanej na gorąco stali średniomanganowej z dodatkiem Al w zależności od zastosowanych parametrów temperaturowo-czasowych obróbki cieplnej oraz optymalizacja tych parametrów, skutkująca poprawą plastyczności stali.”*

Wyznaczył również cele szczegółowe, tzn.: *„uzyskanie stali wielofazowej o końcowej mikrostrukturze zawierającej ponad 30 % austenitu szczątkowego i osnowę ferrytyczną. Minimalny poziom docelowych właściwości mechanicznych to:  $A_r = 15 \%$ ,  $A = 25 \%$  i  $R_m = 900 \text{ MPa}$ ”.*

Dla udowodnienia tezy pracy i osiągnięcia postawionych celów, Doktorant opracował skonstruował spójny i konsekwentny program badań, który ujął w formie schematu (*Figure 27*). Program obejmował 3 etapy badań:

1. Symulacje termodynamiczne i eksperymentalne badania przemian fazowych celem wyznaczenia krytycznych temperatur i kinetyki tych przemian zachodzących w badanej stali podczas grzania, chłodzenia i wytrzymania izotermicznego;
2. Badania wpływu temperatury wyżarzania międzykrytycznego na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali;
3. Badania wpływu czasu wyżarzania międzykrytycznego w temperaturze 680° na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne stali.

Do każdego etapu zostały dobrane określone techniki i metody badawcze, takie jak: symulacje komputerowe, pomiary dylatometryczne, badania mikrostruktury za pomocą metody wstecznie rozproszonych elektronów (EBSD), mikroskopii



elektronowej skaningowej (SEM) i transmisyjnej (TEM), identyfikacja faz metodą rentgenowskiej analizy fazowej (XRD), badania składu chemicznego za pomocą mikroanalizy rentgenowskiej (EDS) oraz badania właściwości mechanicznych za pomocą pomiarów twardości i statycznej próby rozciągania.

Zastosowane techniki badawcze były właściwie dobrane do realizacji celu pracy, pozwalając na określenie charakterystyki przemian fazowych, mikrostruktury i składu fazowego oraz właściwości mechanicznych.

W rozdziale 4 Autor przedstawił i szczegółowo przeanalizował wyniki badań przemian fazowych, w tym uzyskanych temperatur krytycznych za pomocą symulacji komputerowych przy użyciu programu JMatPro i pomiarów dylatometrycznych. Ponadto dokonał analizy faz wydzielanych i rozpuszczanych dla ustalonych szybkości grzania i chłodzenia oraz zmian ich składu chemicznego w zależności od temperatury wyżarzania międzykrytycznego. Ważnym celem tej części badań było wyznaczenie temperatur występowania zakresu międzykrytycznego przy zastosowanej szybkości grzania  $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$ , dobranie odpowiedniej szybkości chłodzenia zapewniającej uniknięcie przemian: ferrytycznej, perlitycznej i bainitycznej oraz wyznaczenie temperatur  $M_s$  i  $M_f$ . Temperatury te wyznaczone za pomocą symulacji komputerowych i pomiarów dylatometrycznych miały zbliżone wartości. Natomiast wartości temperatur  $A_{c1}$  i  $A_{c3}$ , wyznaczone eksperymentalnie w pomiarach dylatometrycznych były istotnie wyższe niż te uzyskane z symulacji komputerowych. Autor przeanalizował możliwe przyczyny tych rozbieżności. Parametry te zostały wykorzystane do właściwego zaprojektowania obróbek cieplnych w kolejnych etapach badań.

Przedmiotem badań opisanych w rozdz. 5 było określenie wpływu temperatury wyżarzania międzykrytycznego (IAT) na mikrostrukturę i skład fazowy stali oraz na jej właściwości mechaniczne. Jednym z celów badań była optymalizacja parametrów wyżarzania międzykrytycznego pod kątem uzyskania dużej plastyczności. Istotnym zadaniem było przy tym uzyskanie równowagi fazowej lub zbliżenie się do takiego stanu w procesie wyżarzania międzykrytycznego.

Przy użyciu symulacji komputerowych i badań dylatometrycznych Autor analizował zmiany zawartości ferrytu, austenitu i martenzytu oraz temperatury początku przemiany martenzytycznej  $M_s$  w funkcji temperatury wyżarzania międzykrytycznego. Na bazie symulacji komputerowych Doktorant wykazał m.in., że maksymalna zawartość austenitu szczątkowego występuje dla wyżarzania w zakresie międzykrytycznym w temperaturze  $680^{\circ}\text{C}$ .



Następnie przeprowadził badania dylatometryczne przemian fazowych w zakresie międzykrytycznym. Wykazał też, że podczas chłodzenia do temperatury pokojowej z temperatur wyżarzania międzykrytycznego 700°C i niższych przemiana martenzytyczna nie zachodzi, tzn., że utworzony austenit jest stabilny, a  $M_s$  leży poniżej temperatury pokojowej. Przemiana martenzytyczna występuje dopiero dla chłodzenia z temperatur wyższych niż 700°C, przy czym temperatura  $M_s$  rośnie ze wzrostem temperatury IAT, osiągając maksymalną wartość  $M_s = 314^\circ\text{C}$ , po chłodzeniu z temperatury 1000°C, w której stal ma pełną strukturę austenityczną.

Próbki po procesach dylatometrycznych poddane zostały następnie badaniom mikrostrukturalnym przy użyciu: SEM, EBSD, XRD, EDS, celem scharakteryzowania mikrostruktury, składu fazowego oraz składu chemicznego austenitu szczątkowego. Na podkreślenie zasługuje interesująca analiza zmian w strukturze fazowej dokonana na podstawie rozkładu kątów dezorientacji uzyskanych w badaniach EBSD.

Na próbkach po wyżarzaniu międzykrytycznym w różnych temperaturach wykonano także pomiary twardości i próby rozciągania. Oprócz standardowej analizy zmian granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia równomiernego i całkowitego na podstawie wykresów naprężenie – odkształcenie, Autor przeanalizował również zmiany współczynnika umocnienia  $d\sigma/d\epsilon$  oraz wykładnika umocnienia w funkcji temperatury wyżarzania międzykrytycznego. Z przeprowadzonej analizy wynika, że duże wartości współczynnika umocnienia wskazują na zakres odkształceń, w którym zachodzi efekt SIMT. Autor wykazał ponadto istotną rolę stabilności austenitu, którego przemiana w świeży martenzyt prowadzi do wzrostu parametrów wytrzymałościowych z jednej strony i do spadku właściwości plastycznych z drugiej. Analiza wykazała również wzrost wytrzymałości mechanicznej niezależnie od stosunku zawartości austenitu szczątkowego do świeżego martenzytu w badanych próbkach. Według Autora efekt ten nie był dotychczas odnotowany w literaturze w przypadku stali średniomanganowych.

Kolejny etap badań, opisany w rozdz. 6, dotyczył wpływu czasu wyżarzania w temperaturze 680°C na mikrostrukturę, udział faz, ich skład chemiczny oraz na stabilność austenitu, a także na właściwości wytrzymałościowe i plastyczne stali.

Na podstawie obserwacji za pomocą TEM Autor wykazał m. in. istotną rolę węglików sprzyjających zarodkowaniu austenitu podczas wyżarzania



międzykrytycznego. Ponadto, na podstawie badań TEM/EDS, Autor ujawnił zmniejszoną koncentrację Mn w środku wydłużonych ziaren (listew) austenitu szczątkowego, przy czym ta niejednorodność zwiększa się, w miarę jak wydłuża się czas wyżarzania i zwiększa grubość listew. Może to wpływać na lokalną stabilność austenitu szczątkowego: mniejszą w środku ziaren i większą przy granicach ziaren austenitu, a w konsekwencji wpływać na właściwości mechaniczne. Analizę właściwości wytrzymałościowych i plastycznych Autor przeprowadził na podstawie prób jednoosiowego rozciągania i prób twardości. Wydłużenie czasu wyżarzania w zakresie międzykrytycznym prowadziło do silnego spadku granicy plastyczności i niewielkiego spadku wytrzymałości mechanicznej. Wydłużenie równomierne i całkowite początkowo rosło, a następnie malało z czasem wyżarzania.

Istotny dla pracy jest rozdz. 6.3, w którym były rozważane 2 problemy. Pierwszy dotyczył wpływu składu fazowego stali na jej właściwości mechaniczne: twardość, granicę plastyczności, wytrzymałość mechaniczną i wydłużenie w próbie rozciągania (rozdz. 6.3.1).

W tej części Doktorant zastosował oryginalny eksperyment przerywanej próby rozciągania w zakresie wydłużenia równomiernego (UEI) oraz w zakresie przewężenia (UTI). W próbkach tych badany był skład fazowy metodą XRD, o pozwoliło określić zmiany zawartości ferrytu, austenitu szczątkowego i świeżego martenzytu po zadanych stopniu odkształcenia. Ponadto wyznaczono temperaturę  $M_s$  austenitu szczątkowego oraz twardość stali. Uzyskane wyniki porównano z analogicznymi właściwościami próbek bezpośrednio po wyżarzaniu międzykrytycznym. Dodatkowo przeprowadzono badania mikrostruktury za pomocą SEM i EBSD próbek odkształconych w zakresie UEI. Badania te potwierdziły obecność świeżego martenzytu utworzonego wskutek zajścia efektu SIMT.

Przeprowadzona analiza pokazała, że właściwości mechaniczne stali, zwłaszcza plastyczność, zależą jednocześnie od udziału austenitu szczątkowego, jak i jego stabilności.

Drugi problem w tej części pracy obejmował pogłębioną analizę lokalnego wpływu wielkości ziaren austenitu na jego stabilność (rozdz. 6.3.2). Chodziło o wyjaśnienie, dlaczego próbki wyżarzane przez 15 min i 60 min w temperaturze  $680^{\circ}\text{C}$  wykazują stopniowy efekt SIMT, podczas gdy austenit w próbce wyżarzanej przez 5 godz. przekształca się masowo w martenzyt na wczesnym etapie deformacji. Autor wykazał, że efekt ten wynika ze stabilizacji



austenitu wskutek silnego rozdrobnienia ziaren austenitu zachodzącego podczas krótkotrwałego wyżarzania międzykrytycznego (1 - 5 min) w temperaturze 680°C.

Analiza wyników badań jest przeprowadzona bardzo rzetelnie i konsekwentnie. Doktorant systematycznie porównywał uzyskane wyniki z wynikami badań opublikowanych przez innych autorów. Szczegółowo interpretował i wyjaśniał zaobserwowane w badaniach efekty porównując je z danymi literaturowymi.

Uzyskane przez Doktoranta rezultaty potwierdziły, że otrzymanie odpowiedniego udziału objętościowego austenitu szczątkowego i ukształtowanie jego stabilności poprzez optymalne zaprojektowanie temperatury i czasu wyżarzania międzykrytycznego pozwala uzyskać stopniową odkształceniową przemianę martenzytyczną (SIMT) kontrolowaną wielkością ziarna. Efekt ten prowadzi do poprawy plastyczności stali oraz wskaźnika formowalności, będącego iloczynem wytrzymałości mechanicznej i wydłużenia całkowitego w próbie rozciągania. Parametry te osiągają zdecydowanie wyższe wartości w porównaniu do parametrów, jakie wykazuje stal obrabiana w procesie termomechanicznym.

Optymalizacja parametrów wyżarzania międzykrytycznego, która pozwoliła uzyskać korzystne właściwości mechaniczne stali, polegała na zastosowaniu zarówno symulacji komputerowych, jak i badań eksperymentalnych, nakierowanych na analizę mikrostruktury, udziału faz i ich składu chemicznego oraz stabilności austenitu szczątkowego. Badania te pozwoliły wyjaśnić zjawiska strukturalne zachodzące podczas wyżarzania międzykrytycznego w zależności od zastosowanych parametrów temperaturowo-czasowych. Szczególnie istotna w kontekście plastyczności było określenie wpływu stabilności austenitu szczątkowego na indukowaną odkształceniową przemianę martenzytyczną.

W rezultacie Doktorant osiągnął założone cele badań oraz udowodnił postawioną w pracy tezę naukową.

### **Uwagi do dyskusji**

1. Recenzent odniósł wrażenie, że w analizie stanu zagadnienia dotyczącej stali AHSS 3-generacji takich jak: bainitic TRIP steels, Q&P steels, Doktorant pominął część ważnych publikacji, jak np. prace prof. H. Bhadeshii czy prof. J.G. Speera oraz innych. Nie jest to zarzut, gdyż rozprawa zawiera bardzo obszerny spis literatury. Chodzi tylko skierowanie uwagi Doktoranta na



prace badawcze tych właśnie badaczy, którzy byli autorami podstawowych artykułów w zakresie stali bainitycznych z efektem TRIP i stali typu Quenching & Partitioning.

2. Autor stosuje równolegle dwa terminy do opisu, jak się wydaje, tego samego zjawiska, a mianowicie efekt TRIP i efekt SIMT. Np. na str.: 15: „*Retained austenite was introduced to steels to allow for Strain-Induced Martensitic Transformation (SIMT)*”. Tak samo jest tłumaczony efekt TRIP, np. str. 20: „*During the plastic deformation process, the metastable austenite undergoes martensitic transformation (TRIP effect)*”. Z kolei na str. 17 w punkcie High-Mn TRIP Steels efekt TRIP jest rozumiany jako mechanizm umocnieniowy: „*the main strengthening mechanism is the TRIP effect, which is a strengthening of steel as a result of martensitic transformation occurring during technological cold forming of sheets*”.

Czy wg Doktoranta pojęcia TRIP i SIMT to synonimy, które można stosować zamiennie?

3. Pewną wątpliwość może budzić przyjęcie założenia równowagowego udziału węglików w stali, która przed wyżarzaniem w zakresie międzykrytycznym miała strukturę martenzytyczną. Przyjmując to założenie Autor stwierdził, iż kontrakcja na wykresie dylatometrycznym dla wyżarzania w temperaturze 640°C (*Figure 36, str. 68*) wynika z rozpuszczania węglików. Nie ma jednak w pracy dowodów na to, że udział węglików w stali po walcowaniu na gorąco i hartowaniu martenzytycznym jest określony przez równowagę termodynamiczną. Z drugiej strony badania za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego wskazują na obecność w tej próbce wydzielen cementytu (*Figure 42 (a)*). Może to oznaczać, że zaobserwowana na wykresie dylatometrycznym kontrakcja podczas wyżarzania w 640°C (*Figure 36*) wynika raczej z wydzielenia cementytu wskutek odpuszczania martenzytu.

### **Ocena strony edytorskiej rozprawy**

Praca jest zredagowana starannie i na ogół poprawnym językiem, dzięki czemu czyta się ją płynnie.

Tabele, wykresy i ilustracje są opisane prawidłowo i konsekwentnie. Format wykresów jest, zdaniem Recenzenta, zbyt mały, a linie na wykresach zbyt cienkie, co sprawia, że trudno jest odróżnić kolory poszczególnych linii.



To sprawia, że wykresy w wersji papierowej pracy nie zawsze są czytelne. Opis odnośników literaturowych jest prawidłowy.

Doktorant nie ustrzegł się drobnych błędów i nieścisłości, których przykłady podane są poniżej.

Fig. 6. (str. 20). Autor napisał: *“In addition, reducing the content of this element (Mn – przypisek Recenzenta) results in limitation of the impact of plastic instability (PLC effect) during deformation [52]”*. Akurat wykres naprężenie – wydłużenie, który zamieścił w tym miejscu Doktorant (Figure 6) przedstawia silną niestabilność odkształcenia plastycznego dla stali III generacji 9Mn 0.05C, podczas gdy w stali o dużej zawartości manganu (18Mn 0.6C 1,5Al) niestabilność plastyczna nie występuje lub jest znikoma.

Str. 24. Autor napisał: *„The local **stress** in the vicinity of the punched hole is generally much greater than the **elongation** measured in the tensile test.”* Powinno się raczej porównywać takie same właściwości: naprężenie (*stress*) z naprężeniem, a odkształcenie (*elongation*) z odkształceniem.

Str. 25. Autor napisał: *“The presence of internal and external stresses favors the diffusion and enrichment of steel with this element, leading to a decrease in its ductility. This phenomenon is called **hydrogen-induced ductility** or **hydrogen embrittlement**.”* Pojęcia *ductility* i *embrittlement* są sprzeczne. Być może Autorowi chodziło o zjawisko: *hydrogen-induced ductility loss?*

W równaniu 3. (str. 34) jest 34.4 C, powinno być 34.4 Mn

Str. 39. Wyrażenie *“higher properties”* jest żargonem

Str. 77. Jest: *“ferrite – austenite grain boundary relationship”*, powinno być: *ferrite – austenite boundary relationship* lub *ferrite – austenite interphase boundary relationship*.

Str. 91. Jest *„microsegregation results (Figure 60)”*, powinno być *misorientation results (Figure 60)*.

### **Podsumowanie i wnioski końcowe**

Reasumując, pragnę stwierdzić, że mgr inż. Adam Skowronek osiągnął założone w pracy cele oraz udowodnił postawioną tezę. Problem badawczy, będący przedmiotem pracy, jest oryginalny i aktualny na tle literatury przedmiotu. Jego rozwiązanie ma znaczenie zarówno naukowe, jak i posiada aspekty aplikacyjne.



Dużą zaletą pracy jest precyzyjny i logiczny program badań eksperymentalnych, który został z dużą determinacją i konsekwencją skutecznie zrealizowany.

Na uwagę zasługuje również wysoka jakość przeprowadzonych przez Doktoranta badań przemian fazowych przy wykorzystaniu pomiarów dylatometrycznych oraz badań metodami TEM i EBSD, które pozwoliły precyzyjnie opisać zmiany składu fazowego i mikrostruktury stali po różnych procesach wyżarzania międzykrytycznego.

Należy podkreślić, że otrzymane przez Doktoranta wyniki badań były dogłębnie i szczegółowo przeanalizowane oraz porównane oraz przedyskutowane w odniesieniu do wyników prac opublikowanych przez innych badaczy.

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma wysoki poziom merytoryczny. Doktorant wykazał się wiedzą teoretyczną i umiejętnością stosowania nowoczesnych technik i aparatury badawczej. Staranność i wysoki poziom przeprowadzonych badań oraz umiejętność wnikliwej analizy uzyskanych wyników i wyciągania wniosków potwierdzają, że Doktorant potrafi samodzielnie zaplanować, przeprowadzić i zinterpretować wyniki pracy badawczej.

Dowodem oryginalności rozprawy jest osiągnięcie wielu nowych wyników na tle literatury przedmiotu. W szczególności chodzi o wykazanie możliwości kształtowania stabilności austenitu szczątkowego, poprzez odpowiednie zaprojektowanie procesów wyżarzania międzykrytycznego i kontrolę wielkości ziaren. Ponadto Doktorant wykazał znaczenie stabilności mechanicznej austenitu na kształtowanie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych stali średniomanganowych po walcowaniu na gorąco.

Zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne dotyczą głównie strony redakcyjnej pracy i nie umniejszają jej wartości merytorycznej.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Adama Skowronka spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przewidziane Ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz.U. z 20.04.2023r., poz. 742) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Wiesław Świątek