

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, 25.11.2023r

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Rozmusa

pt.: „**Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process**”

Podstawą opracowania recenzji jest pismo (nr RDIMa.512.12.2023 RM)
Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa
prof. dr. hab. inż. Marii Sozańskiej z dnia 25.09.2023r

1. Ocena celowości i aktualności tematyki badawczej

Współczesne wyzwania badawcze inżynierii materiałowej dotyczą w dużym stopniu poprawy właściwości mechanicznych i użytkowych elementów wytwarzanych ze stopów metali. Polepszenie właściwości stopów metali można osiągnąć, np.: poprzez optymalizację technologii ich produkcji oraz warunków procesów kształtujących ich mikrostrukturę, w kontekście uzyskania parametrów funkcjonalnych gwarantujących bezpieczną i długotrwałą eksploatację. Do stopów tych niewątpliwie należą stale bainityczne, które ze względu na wyjątkowo wysokie właściwości mechaniczne, w połączeniu z relatywnie wysoką udarnością, w warunkach niskiej temperatury znalazły zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym i transporcie kolejowym. Opiniowana praca doktorska dotyczy tematyki istotnej z punktu widzenia badawczego dla opisu procesów odpowiedzialnych za konstytuowanie finalnych właściwości wytrzymałościowych produktów wytwarzanych ze stali o strukturze bainitycznej, co ma kluczowe znaczenie dla zastosowania wyników w praktyce przemysłowej. Badania realizowane przez Pana mgr. inż. Radosława Rozmusa dotyczą opracowania parametrów technologicznych jednoetapowego procesu walcowania XTP oraz oceny możliwości optymalizacji składu chemicznego stali 7MnB8, w celu obniżenia temperatury przejścia w stan kruchy (DBTT) wytwarzanych z niej prętów. Doktorant w części

pracy, w której przedstawia problem badawczy opisuje technologię Xtreme Performance (XTP) jako jednoetapowy proces walcowania prętów przy zastosowaniu dużych wartości odkształcenia, umożliwiającą produkcję prętów o średnicy od 18 do 40 mm, charakteryzujących się ultradrobnyim ziarnem. Doktorant, wykazuje jednak pewne ograniczenia tej technologii, wynikające z konieczności stosowania m.in. indukcyjnej metody grzania do temperatury austenitacji (T_A), zbyt krótkiego czasu nagrzewania, trudnej kontroli temperatury procesu walcowania (T_R), a przede wszystkim skomplikowanego procesu kalibracji linii walcowniczej. Autor jednocześnie wskazuje jak duże znaczenie mają badania stali bainitycznych stosowanych na wyroby przeznaczone do eksploatacji w warunkach ekstremalnych, w których tradycyjna stal ulega szybkiej degradacji. Dodatkowo zastosowanie technologii Xtreme Performance (XTP) pozwala zminimalizować koszty wytwarzania prętów o wymaganej, gradientowej mikrostrukturze w jednym cyklu produkcyjnym, poprzez wyeliminowanie np. konieczności dodatkowej obróbki cieplnej czy obróbki wykończeniowej wyrobów finalnych. Zatem realizacja prac badawczo-rozwojowych oraz badań podstawowych z obszaru zastosowania obróbki cieplno-plastycznej wysokowytrzymałych stali bainitycznych wciąż należy do ważnych w kontekście rozwoju nauki, a przede wszystkim przemysłu w zakresie rozwiązań niskoenergetycznych gwarantujących uzyskanie właściwości wyrobów niemożliwe do osiągnięcia przy wykorzystaniu standardowych procesów przeróbki cieplno-plastycznej. Można to osiągnąć np. poprzez optymalizację procesu regulowanego walcowania, opracowując parametry umożliwiające modyfikację składu fazowego stali mikrostopowej. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie badań zmierzających do opisu zjawisk odpowiedzialnych za kształtowanie mikrostruktury wyrobów, w tym przypadku prętów, determinującej ich finalne właściwości uwzględniające planowane zastosowanie w praktyce. Takie działania zapewniają uzyskanie danych niezbędnych do tworzenia baz stosowanych w opracowaniu modeli technologii pod potrzeby szybkiego wdrożenia nowych rozwiązań materiałowych i produktowych w praktyce przemysłowej. Prowadzenie badań z obszaru optymalizacji procesów kształtowania właściwości materiałów, w tym stali, z uwzględnieniem eliminacji ograniczeń procesowych, pozwalających na osiągnięcie większej efektywności, przy zachowaniu niższych kosztów produkcyjnych, a przede wszystkim wymaganej, podwyższonej jakości wytwarzanych wyrobów, wciąż stanowi istotny element działań badawczych dla rozwoju dyscypliny inżynieria materiałowa. Zrozumienie podstawowych mechanizmów kształtujących mikrostrukturę stali o strukturze bainitycznej w procesie przeróbki plastycznej w zakresie temperatury przemian fazowych jest kluczem do dalszej optymalizacji materiałów przeznaczanych do zastosowania na wyroby, które mają pracować w warunkach obciążeń zmiennie-cyklicznych. Dlatego wykonane przez Doktoranta badania w tym zakresie należy uznać za ważne, uzasadnione i wnoszące wartość dodaną również dla rozwoju technologii walcowania tzw. stali bainitycznych. Przeprowadzona przez Autora analiza danych źródłowych tylko potwierdza konieczność ich prowadzenia poprzez wykazanie ogromnego ich znaczenia w kontekście globalnych potrzeb rynku wyrobów wykazujących wysoką wytrzymałość przy zachowaniu dobrej udarności, zwłaszcza w temperaturze niskiej. W mojej ocenie zagadnienia naukowo-badawcze podjęte w opiniowanej rozprawie są istotne, a temat rozprawy jest aktualny i wpisuje się w nurt współczesnej inżynierii materiałowej.

2. Charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Rozmusa pt.: „*Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process*” podzielona została na część literaturową (rozdział 1-2, str. 7-25) oraz obszerną część doświadczalną (26-104), po której zamieszczono spis literatury, a także streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. Praca obejmuje 174 stron i składa się z dziewięciu rozdziałów. Bibliografia zawiera 140 pozycji literaturowych w dobrym stopniu charakteryzujących stan wiedzy związanej z tematyką rozprawy. Większość przywoływanych prac powstała w okresie ostatnich kilku lat, co potwierdza aktualność podjętego przez Doktoranta tematu.

Analiza treści rozprawy wskazuje, że można wyróżnić cztery jej podstawowe części: pierwszą opartą na przeglądzie i analizie literatury, drugą zawierającą opis metodyki, trzecią zawierającą wyniki badań własnych, wraz z ich analizą oraz czwartą, w której przeprowadzono dyskusję z podsumowaniem zakończonym wnioskami.

Autor rozpoczyna pracę częścią literaturową, która zawiera przegląd istniejącej wiedzy na temat procesów walcowania i produkcji prętów, również opis procesów zachodzących podczas przeróbki cieplno-plastycznej stali w zakresie stabilnego austenitu i kontrolowanego przebiegu chłodzenia w warunkach przemiany fazowej austenitu przechłodzonego. Autor przeprowadził analizę dotychczasowej wiedzy z zakresu technologii kształtującej wysokie właściwości wytrzymałościowe z uwzględnieniem zachowania odpowiedniej plastyczności stali umożliwiającej pochłanianie energii w warunkach odkształcenia plastycznego oraz obciążeń dynamicznych, zwłaszcza w warunkach obniżonego chłodzenia. Kluczowe dla opisu metod kształtowania właściwości stali wysokowytrzymałych w procesie regulowanego walcowania jest wykazanie roli pierwiastków stopowych w stali, ich wpływu na wielkość ziarna austenitu, a także przemian fazowych zachodzących podczas chłodzenia, ze szczególnym uwzględnieniem utwardzania wydzieleniowego ferrytu. To kluczowe punkty rozdziału 2. *Przegląd literatury*, które stanowią podstawę prowadzonych badań w tej pracy.

Udowodniona i opracowana w sposób przejrzysty analiza stanu zagadnienia w świetle danych literaturowych, znajomość tematyki dotyczącej charakterystyki mikrostopowej stali wielofazowej, metod badawczych niezbędnych do badań właściwości wyrobów uzyskanych w procesie przeróbki cieplno-plastycznej oraz ograniczona liczba prac, w literaturze krajowej i światowej, odnoszących się do problemów opisanych w pracy doktorskiej, stanowiła podstawę sformułowania w rozdziale 3 (3. *Cel badań*) tezy oraz celu pracy: „Wprowadzenie odpowiednich dodatków stopowych i zastosowanie zmodyfikowanych parametrów nowatorskiego procesu regulowanego walcowania umożliwia wytworzyć w wyrobach ze stali bainitycznej (prętach) mikrostrukturę gradientową, co zapewnia obniżenie temperatury przejścia materiału w stan kruchy bez istotnego wpływu na właściwości mechaniczne w porównaniu do prętów wytworzonych przy zastosowaniu konwencjonalnego procesu kształtowania wyrobów z tej samej stali 7MnB8”. Celem pracy było zatem „opracowanie parametrów procesu regulowanego walcowania z uwzględnieniem wyznaczenia optymalnej temperatury granicznej odpowiadającej bezpiecznemu poziomowi odporności na kruche pękanie komercyjnej stali 7MnB8 (do -100 °C)”. Cel pracy został zdefiniowany w sposób jasny, ujmując istotę przyjętego zakresu badań, zmierzających do rozwiązania problemu

technologicznego kształtowania mikrostruktury i właściwości stali bainitycznej w procesie przeróbki cieplno-plastycznej.

Następnie, w rozdziale 4. *Metodologia badawcza*, Autor przedstawia metodykę badań, która obejmowała:

- próby dylatometryczne,
- opracowanie parametrów wytwarzania i produkcję nowych stali przy uwzględnieniu wprowadzania dodatków stopowych: Mn, Mo, Nb, V oraz Ti modyfikujących skład chemiczny referencyjnej stali 7MnB8,
- badania mikrostrukturalne przy zastosowaniu mikroskopu świetlnego LM oraz technik wysokorozdzielczej transmisyjnej (TEM, HRTEM, STEM) i skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM, EDS, EBSD),
- badania właściwości mechanicznych.

W części pracy, w której Doktorant zamieścił wyniki swoich badań (5. *Wyniki*), przedstawił i opisał uzyskane efekty prowadzonych badań zmierzających do osiągnięcia zakładanego celu badawczego, obejmujące:

- symulacje procesów walcowania uwzględniające: opis wpływu temperatury końca walcowania i przyspieszonego chłodzenia na rozmiar ziarna austenitu, obliczenia termodynamiczne;
- próby przemysłowe z wykorzystaniem opracowanych parametrów kształtowania właściwości stali komercyjnej 7MnB8 oraz po modyfikacji składu chemicznego;
- badania właściwości mechanicznych komercyjnej stali 7MnB8 po próbach walcowania wyznaczone w jednoosiowej próbie rozciągania, poprzez pomiary twardości i próby udarności;
- badania mikrostruktury komercyjnej stali 7MnB8 po próbach walcowania wykonane za pomocą mikroskopii świetlnej oraz skaningowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz analizy składu fazowego za pomocą dyfraktometrii XRD;
- badania wyprodukowanych nowych stali (S654, S657, S658, S659, S660), po modyfikacji składu chemicznego (o zmiennej zawartości takich pierwiastków jak: Mn, Mo, Nb, V i Ti) uwzględniające obliczenia termodynamiczne oraz badania dylatometryczne umożliwiające wyznaczenie temperatury przemian fazowych (wykresy CCT) oraz wpływ temperatury chłodzenia na objętość względną oraz rodzaj wydzielających się składników fazowych mikrostruktury;
- badania właściwości mechanicznych oraz badania mikrostrukturalne prętów wytworzonych ze stali różniących się zawartością dodatków stopowych, znajdujących się w różnych stanach (m.in. stan kucia i po procesie walcowania z użyciem opracowanych parametrów);
- badania mające na celu porównanie właściwości wyrobów ze stali komercyjnej 7MnB8 i wyrobów ze stali poddanych modyfikacji składu chemicznego.

Rozdziały pracy, w których Autor zamieścił wyniki badań własnych potwierdzają prawidłową organizację zadań eksperymentalnych oraz prowadzoną na dobrym poziomie dyskusję, w oparciu o uzyskane w trakcie realizowanej pracy doktorskiej wyniki. Niewątpliwie dobrą stroną wykonanej przez Doktoranta pracy, prowadzonych badań weryfikujących założenia procesowe w odniesieniu do wytworzenia stali charakteryzującej się zróżnicowaną zawartością dodatków stopowych odpowiedzialnych za możliwość kształtowania właściwości stali w czasie regulowanego walcowania, jest dążenie do uzyskania danych potwierdzających przyjęte założenia na etapie definiowania celu prac o charakterze wdrożeniowym i wykazania synergii oddziaływania parametrów technologii przeróbki

cieplno-plastycznej i mikrostrukturalnych na finalne właściwości użytkowe wyrobów w postaci prętów. Jednocześnie Autor potwierdził możliwość realizacji pracy w obszarze opracowania warunków procesu technologicznego umożliwiającego wytwarzanie prętów charakteryzujących się obiecującymi pod względem aplikacyjnym właściwościami mechanicznymi przy jednoczesnym zachowaniu relatywnie wysokiej odporności na kruche pękanie w temperaturze do -100°C .

Dyskusja wyników to ważna część pracy, w której Autor dokonuje analizy, interpretacji i porównania zebranych danych w odniesieniu do istniejącego stanu wiedzy, podkreślając kluczowe zależności, trendy oraz wyniki wskazujące na różnice w kształtowaniu finalnych właściwości stali mikrostopowej różniącej się zawartością kluczowych składników stopowych. Na podstawie dyskusji wyników Autor formułuje wnioski w postaci rozszerzonych konkluzji zinterpretowanych w odniesieniu przede wszystkim do opisu wpływu poszczególnych dodatków stopowych na kształtowanie mikrostruktury stali, w tym wielkość ziarna austenitu, skład i morfologię faz umacniających determinujących właściwości fizyczne oraz mechaniczne badanych stali.

3. Uwagi szczegółowe, w tym krytyczne

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Radosława Rozmusa stanowi niewątpliwie oryginalne, o bardzo dużym potencjale aplikacyjnym opracowanie, które uzupełnia istniejący stan wiedzy w zakresie podejmowanej tematyki. Zaprezentowane przez Doktoranta wyniki badań oraz wnioski zostały sformułowane na podstawie licznych eksperymentów. Pomimo staranności mgr inż. Radosław Rozmus nie ustrzegł się niedociągnięć w opisie i charakterystyce prowadzonych badań. Uwagi dotyczą następujących zagadnień:

- Warto zauważyć, że Autor posługiwał się językiem angielskim, który jest odmienny od języka polskiego pod względem konstrukcji zdaniowych i sposobu wyrażania myśli. Ta różnica językowa często przekłada się na zawikość oraz niejednoznaczność w przedstawieniu analiz i toku myślenia. Wyniki i wnioski, choć opisane zostały prawidłowym językiem angielskim to nie zawsze są klarownie i wyeksponowane w odpowiedni sposób z powodu konstrukcji zdań, co może stanowić trudność dla czytelnika w zrozumieniu pełnego kontekstu badania. Sugeruję, na przyszłość uwzględnienie różnic między językiem polskim a angielskim, dążąc do prostszych i klarowniejszych konstrukcji zdań, co poprawi czytelność oraz zrozumiałość przedstawionych treści.

Np. tezę pracy: „ *The selection of alloying additive content of bainitic steel, in conjunction with the development of parameters for an innovative one-step XTP thermomechanical rolling process, makes it possible to obtain a gradient structure leading to a reduction in the transition temperature of the material into the brittle state with no significant changes in the values of other basic mechanical properties of the bars, relative to conventional 7MnB8 steel*”

Można napisać w ten sposób:

The selection of alloying additive content in bainitic steel, combined with the development of parameters for an innovative one-step XTP thermomechanical rolling process, enables the achievement of a gradient structure that reduces the material's transition temperature to a brittle state without significantly altering the values of other fundamental mechanical properties of the bars, in comparison to conventional 7MnB8 steel.

Przeróbki są subtelne w zakresie zmian w konstrukcji zdań i sformułowań, jak *"enables the achievement"* zamiast *"makes it possible to obtain"*, ale taka korekta oraz dokonanie zmian w kolejności kilku wyrażen poprawia płynność i zrozumiałość zdania.

Kolejny przykład: w opisie metodyki badań Autor używa sformułowań *"the last parameter"* zamiast *"the final parameter"* w kontekście zmiany warunków chłodzenia: *"The last parameter changed as part of the process proposals was the cooling rate, the control of which is provided by swapping the layout of the cooling boxes and the water output for each of them. For the 48 most part, a 120;0;25 arrangement was used, that is, an arrangement of 2 boxes"*. Dalej w tym samym zdaniu: zamiast sformułowania *"the control of which is provided by swapping"* warto używać bardziej technicznych wyrażen, np.: *"controlled by altering"*.

Sam tekst w przypadku tego zdania wymaga również reorganizacji niektórych fragmentów w sposób zapewniający płynność przekazu informacji: *"The final parameter modified in the proposed process was the cooling rate, controlled by altering the arrangement of cooling boxes and their corresponding water outputs. Primarily, a 120;0;25 configuration was employed, which translates to an arrangement involving 2 boxes"*.

Strona 46 – *"After reaching the austenitizing temperature, two samples were intensively cooled to ambient temperature. Subsequently, samples were cooled to rolling temperature, one set of samples was deformed at this stage (marked by the arrows), while the rest was not processed"* – ten opis z kolei sugeruje, że próbki po wygrzaniu w temperaturze austenitizacji poddano szybkiemu chłodzeniu do temperatury pokojowej, a następnie schłodzono do temperatury walcowania, a jeden zestaw próbek został odkształcony na tym etapie obróbki, czy pozostałe nie były odkształcane? Nie ma w tym tekście konsekwencji opisu, trzeba się domyślać co Autor planował osiągnąć w planowanych próbach.

Takich błędów i niedociągnięć w tekście utrudniających lekturę pracy jest wiele i warto się w tym przypadku zastanowić, czy nie lepiej dla Doktoranta, który jest na początku swojej kariery naukowej, byłoby prowadzić dyskusję wyników badań w języku polskim, a dopiero na tej podstawie przygotowywać teksty w języku angielskim pod potrzeby publikacyjne w czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Doktorant przedstawia w swojej pracy wyniki wskazujące na badanie wpływu przeróbki cieplno-plastycznej na zmiany w mikrostrukturze determinujące właściwości mechaniczne stali komercyjnej oraz stali po modyfikacji składu chemicznego. Doktorant nie przedstawił w metodyce badań oraz w opisie wyników, a co najważniejsze w analizie i dyskusji, jakie wartości odkształcenia stosowano w czasie walcowania badanych stali. Jak można zatem dokonać oceny prawidłowo opracowanych wyników badań bez tej bardzo istotnej informacji? Doktorant wskazuje oczywiście ważne dla prowadzonej analizy warunki procesu walcowania, tj. temperatura wyżarzania austenitizującego, temperaturę walcowania oraz prędkość chłodzenia po walcowaniu i skład chemiczny stali. O ile w przypadku stali komercyjnej, ale i również w przypadku stali charakteryzujących się różnym składem dodatków stopowych (po wykonanej modyfikacji składu), można się spodziewać ich wpływu na finalne właściwości stali, to jednak zdefiniowane w pracy, w jej metodyce takich parametrów jak: prędkość odkształcania oraz stopień odkształcenia jest krytyczne dla finalnych właściwości stali. Zatem bez tych danych przeprowadzenie w sposób prawidłowy oceny wyników przedstawionych w pracy nie jest możliwe, zwłaszcza gdy Doktorant wprowadza ocenę wpływu procesu walcowania (ale bez zdefiniowanych warunków realizacji przeróbki cieplno-plastycznej) na mikrostrukturę, rozmiar ziaren, orientację ziaren w stali,

a przecież siłą pędną do opisanych efektów procesów dyfuzyjnych, odbudowy odkształconej mikrostruktury nie jest tylko w tym przypadku energia cieplna, ale i również energia wewnętrzna wynikająca z zastosowanego odkształcenia. Wszelkie zmiany w mikrostrukturze stali aktywowane energią cieplną oraz energią mechaniczną będą różne i zależne od warunków prowadzenia procesu walcowania, ale i również od warunków wyjściowych, których w tym przypadku Doktorant również nie definiuje – wskazuje jedynie, że stal przed badaniami poddana była procesowi walcowania „...in the initial state, i.e. after forging at ~1200°C” – jakie zastosowano w tym przypadku warunki walcowania, tego Doktorant już nie podaje.

- strona 45 – „Dilatometric samples were cut from 7MnB8 steel after hot rolling at 1000°C (initial state)” – jaki był faktyczny stan wyjściowy próbek? Walcowany w temperaturze 1000°C, a co się z tą stalą dzieje wcześniej i po walcowaniu? Jak się ten opis ma (stan wyjściowy po walcowaniu w tej temperaturze) do opisu zawartego na stronie 58, gdzie Autor pisze, że: „Then the structure and mechanical properties of the new steels were characterized in the initial state, i.e. after forging at ~1200°C”. Jaki zatem jest faktyczny stan wyjściowy stali? Czy ta wyższa temperatura walcowania wynika z modyfikowanego składu chemicznego stali? Dlaczego ~1200°C? Jeżeli autor porównuje stal komercyjną ze stalą charakteryzującą się zmodyfikowanym składem chemicznym, to wymagane byłoby w tym przypadku przygotowanie materiału wyjściowego przy zastosowaniu tych samych warunków wstępnej obróbki cieplnej, czy cieplno-plastycznej.

- Strona 47 – nie rozumiem dlaczego Autor opisuje w metodyce sposób chłodzenia z użyciem tzw. „skrzynek – boxes” – czy nie lepiej używać w tym przypadku do opisu chłodzenia uzyskanej prędkości chłodzenia w °C/s,

- Strona 49 – w jaki sposób wytworzono wytopy dla stali od S654 do S660? W jaki sposób potwierdzono skład chemiczny każdego gatunku materiału? Co to znaczy: „The material prepared in this way was then subjected to an oblique industrial rolling process at the Steeltec company”, tzn. jak?

- Jaki był cel prowadzenia badań/analiz mających wyznaczyć kąty dezorientacji granic ziarn poszczególnych składników fazowych mikrostruktury? Praca ma charakter wdrożeniowy i zastanawia mnie w jaki sposób Autor mógłby wykorzystać te wyniki w zakresie zastosowania praktycznego? Relacje pomiędzy obróbką cieplną, odkształceniem, czy wpływem dodatków stopowych dla stali są dobrze poznane i opisane, więc w tym przypadku opis wyników dla tego rodzaju badań ma oczywiście duży potencjał poznawczy, ale dla praktycznego użycia tych wyników, poza obliczeniami termodynamicznymi wątpliwy.

- Rozumiem, że wyniki dla rozdziału „5. Process simulations” uzyskano w próbach dylatometrycznych? Brakuje mi w tym przypadku wskazania w sposób bezpośredni w jakich warunkach realizowano te próby i na jakim urządzeniu. Ta sama uwaga do rozdziału „5.2. Industrial trials with the developed process parameters for 7MnB8 steel” – Autor znów nie podaje jakie urządzenie zostało zastosowane do realizacji prób przemysłowych. Dodatkowo w jakiej postaci stosowano stal do realizacji prób przemysłowych? Z czego wykonano próbki do badań wytrzymałościowych w próbie jednoosiowego rozciągania?

- Strona 77 – brak informacji w jaki sposób realizowano te próby, nie pozwala odpowiednio zinterpretować wyników badań np. pomiarów twardości. Np. dla rysunku 85, zmiana twardości na profilu nie wynika w tym przypadku z chłodzenia? Jaki profil był

poddany procesowi walcowania, bo jest to kluczowe? Czy wyższa twardość na powierzchni nie wynika z bardziej intensywnego chłodzenia niż dla rdzenia, co ma bezpośredni wpływ nie na rozdrobnienie ziarna, ale na skład fazowy? Potwierdzają to zdjęcia przekroju prętów jak i również mikrostruktur dla stali po walcowaniu, na rys. 89 – 92. Im wyższa prędkość chłodzenia tym widoczne w mikrostrukturze stali fazy bainityczne i martenzyt,

- Strona 88 i 111 - w jaki sposób wyznaczano austenit szcążkowy? Proszę o przedstawienie metodyki badań dla pomiarów dyfraktometrycznych? Przedstawiony opis zmian zawartości austenitu resztkowego dla stali różniące się składem chemicznym jest nieprecyzyjny. Wynika to przede wszystkim z braku na wykresie (rys. 137) błędu pomiarowego. Pamiętać trzeba, że te analizy realizowane były dla stali po procesie odkształcania plastycznego. Zatem różnice w tym przypadku mogą być niezauważalne dla tych zdefiniowanych na wykresie wyników pomiarów? Na rysunkach, które Autor zamieszcza i którymi podpira różnice w wynikach, tj. rys. 131 i 132 nie widać znaczących różnic w składzie fazowym, tym bardziej, że rysunki te są jedynie elementem całej mikrostruktury badanej stali.

- Na jakiej podstawie Autor dokonał opisu składników fazowych dla rysunków, w których zamieścił wyniki obserwacji mikrostruktury badanej stali komercyjnej, jak i również ze zmodyfikowanym składem chemicznym z użyciem SEM? Można dyskutować, czy np. zdefiniowane przez Autora fazy na rys. 128 stanowią fazę M/A? Czy to na pewno jest martenzyt/austenit – czy to nie są bloki austenitu resztkowego? I jak Autor rozróżnia austenit szcążkowy od austenitu resztkowego?

4. Podsumowanie oceny

Analiza części rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Rozmusa zawierającej wyniki badań własnych pozwala stwierdzić, że zostały spełnione zdefiniowane cele prowadzonych zadań badawczych. Autor opracował parametry procesu walcowania, z uwzględnieniem modyfikacji składu chemicznego stali bainitycznej 7MnB8 w zakresie kształtowania właściwości mechanicznych wyrobów w postaci prętów spełniających wysokie wymagania komercyjne. Opracowane parametry technologii ich przetwarzania zostały potwierdzone szerokim zakresem poprawnie dobranych metod badawczych dla charakteryzacji mikrostruktury i właściwości mechanicznych nowych wytworzonych stali o zmodyfikowanym składzie chemicznym. Bardzo duża ilość wartościowych wyników badań, sposób ich przedstawienia oraz analizy zasługuje na uznanie.

Ponadto stwierdzam, że przyjęty sposób dyskusji otrzymanych wyników badań prowadzony jest na poziomie dojrzałego pracownika naukowego, który potwierdził dobrą znajomość zagadnień związanych z tematyką rozprawy. Pan mgr inż. Radosław Rozmus udowodnił tym samym wysoki poziom wiedzy z obszaru technologii walcowania, charakteryzacji wyrobów wytworzonych z jej użyciem, a wyniki otrzymane i przedstawione w rozprawie uważam za nowatorskie i o dużym znaczeniu dla rozwoju technologii stali. Przedstawione w dysertacji wyniki charakteryzują się nie tylko wysokim stopniem użyteczności, ale również mają charakter poznawczy w zakresie charakteryzacji przemian fazowych oraz opisu morfologii składników fazowych mikrostruktury determinujących finalne właściwości stali po procesie regulowanego walcowania.

Niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta jest charakterystyka wpływu dodatków stopowych tj. Mn, Mo, V, Nb, Ti, Al i B, na właściwości stali mikrostopowej, przeznaczonej do przeróbki cieplno-plastycznej. Opracowanie nowej stali o mikrostrukturze tzw. gradientowej kształtowanej poprzez zastosowanie innowacyjnego procesu „XTP rolling” umożliwi wytwarzanie wyrobów charakteryzujących się obniżoną temperaturą przejścia materiału w stan kruchy bez negatywnego oddziaływania na podstawowe właściwości mechaniczne, w porównaniu z komercyjną stalą 7MnB8. Na szczególną uwagę zasługuje wytworzenie przez Doktoranta, przy zastosowaniu następujących warunków procesu XTP: $T_A = 980^\circ\text{C}$; $T_R = 700^\circ\text{C}$; szybkość chłodzenia 120;0;25 ($\sim 7,6^\circ\text{C/s}$) stali S660 oraz S659 o zmodyfikowanym składzie chemicznym zawierających Nb, dla których uzyskano najniższe wartości temperatury przejścia w stan kruchy (DBTT) - odpowiednio -150°C dla stali S660 i -180°C dla S659. Ponadto na podstawie otrzymanych wyników Autor ustalił, że dodatek Nb w tych stalach opóźnia proces rekrytalizacji, co pozwala uzyskać ich drobnoziarnistą mikrostrukturę.

Wyniki badań uzyskane przez Pana mgr inż. Radosława Rozmusa w recenzowanej pracy stanowią również znaczące osiągnięcie dla rozwoju sektora przemysłu związanego z produkacją wysokowytrzymałej stali. Poszerzają wiedzę na temat wpływu procesów odkształcania w zakresie przemian fazowych na właściwości użytkowe i jakościowe stali mikrostopowej. Godne pochwały są wykonane badania i analizy wyników zgodnie z przyjętą metodyką badawczą. Autor konsekwentnie w swojej pracy stosuje wybrane metody badawcze, które pozwalają czytelnikowi zapoznać się z właściwościami stali 7MnB8 po procesie walcowania, poprzez opis wpływu warunków technologii na właściwości mechaniczne, ale i również skład fazowy i morfologię składników fazowych mikrostruktury, co zostało poparte imponującymi badaniami wykonanymi przy zastosowaniu technik wysokorozdzielczej transmisyjnej (TEM, HRTEM, STEM) oraz skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM, EDS, EBSD). Pozwoliło to Autorowi na przedstawienie modelu zmian mikrostruktury stali komercyjnej 7MnB8 oraz po modyfikacji składu chemicznego w odniesieniu do prowadzonego procesu regulowanego walcowania. Stanowi to niewątpliwie osiągnięcie praktyczne dla celów rozwojowych procesu, jak i również materiału, który wciąż stanowi nowy materiał w zakresie zastosowania dla celów przemysłowych.

5. Wniosek końcowy

W opinii końcowej chciałabym stwierdzić, że pomimo przedstawionych uwag uważam recenzowaną rozprawę doktorską pt.: „Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process” za wartościową pod względem naukowym, podejmującą aktualne wyzwania techniczne i technologiczne w zakresie inżynierii materiałowej. Praca jest oryginalnym rozwiązaniem zaprezentowanego w niej zagadnienia i wnosi istotne elementy poznawcze i naukowe dotyczące wpływu dodatków stopowych i zastosowania zmodyfikowanych parametrów nowatorskiego procesu regulowanego walcowania XTP wyrobów (prętów) ze stali bainitycznej, umożliwiającego wytworzenie mikrostruktury gradientowej, zapewniającej obniżenie temperatury przejścia materiału w stan kruchy bez istotnego wpływu na właściwości mechaniczne stali. Autor wykazał się niezbędną wiedzą z zakresu przedmiotu pracy, umiejętnością do samodzielnego, twórczego prowadzenia badań oraz ich analizy. Opanował także wiele bardzo trudnych metod badawczych materiałów metalicznych.

Podsumowując recenzję stwierdzam, że przedłożona do oceny praca doktorska zatytułowana „*Effect of the chemical composition and processing parameters on the microstructure and mechanical properties of the bars subjected to innovative XTP process*” spełnia wymagania formalne stawiane pracom doktorskim określone ustawą Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późniejszymi zmianami), a mgr inż. Radosław Rozmus zasługuje na stopień doktora. Wniosuję zatem do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o przyjęcie pracy, przeprowadzenie dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Radosława Rozmusa do publicznej obrony.

