

dr hab. inż. Andrzej Nowotnik
Katedra Nauki o Materiałach
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska
ul. Żwirki i Wigury 4, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, 11 listopad 2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Mateusza MORAWCA** pt.: „**Wpływ szybkości odkształcenia na przemianę martenzytyczną w stalach wielofazowych z austenitem szczątkowym**”. Podstawa opracowania recenzji: pismo Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej, Pani prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej z dnia 21 września 2023 r.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza MORAWCA pt. „*Wpływ szybkości odkształcenia na przemianę martenzytyczną w stalach wielofazowych z austenitem szczątkowym*” stanowi opracowanie charakteryzowanych zagadnień uściślonych w jej tytule. Dotyczy badań wpływu prędkości odkształcenia na przemianę austenitu szczątkowego w martenzyt oraz opisu wpływu zmian w mikrostrukturze stali typu TRIP (*Transformation-Induced Plasticity*) na jej właściwości mechaniczne. Praca dotyczy technologii kształtowania finalnych właściwości materiałów przeznaczonych na elementy eksploatowane w trudnych warunkach środowiskowych, od których wymaga się wysokiej odporności na uderzenia i działanie naprężeń w warunkach wysokich prędkości odkształcania. W pracy potwierdzono, w części opisującej obecny stan zagadnienia w świetle danych literaturowych, brak wyników badań w obszarze opisu wpływu prędkości odkształcania na mikrostrukturę stali średniomanganowej (w zakresie 3 do 5% Mn) z austenitem szczątkowym, kształtowanej w warunkach przeróbki cieplno-plastycznej. Dobra znajomość tematyki dotyczącej charakterystyki stali wielofazowej, metod badawczych niezbędnych do prowadzenia prób wymagających zastosowania wysokich prędkości odkształcania oraz ograniczonej liczbie prac, w literaturze krajowej i światowej, odnoszących się do problemów opisanych w pracy doktorskiej, stanowiła podstawę sformułowania tezy pracy: „*Wzrost szybkości odkształcenia w zakresie od 250 do 1000s⁻¹ ma wpływ na przebieg przemiany martenzytycznej austenitu szczątkowego oraz własności mechaniczne wielofazowych stali średniomanganowych, determinowane dominującym mechanizmem umocnienia oraz stężeniem manganu w stali*”. Cel i teza pracy zostały zdefiniowane w sposób jasny, ujmując istotę przyjętego zakresu badań, zmierzających do rozwiązania problemu technologicznego kształtowania właściwości użytkowych stali w procesie przeróbki cieplno-plastycznej w warunkach wysokich prędkości odkształcania. W celu udowodnienia tezy

Doktorant przedstawił wyniki swoich prac w rozdziale 3. *Badania własne*, które poddał krytycznej analizie w rozdziale 4. *Omówienie i dyskusja wyników badań*, na podstawie której opracował wnioski zdefiniowane w rozdziale 5. *Wnioski*.

Realizacja prac badawczo-rozwojowych oraz prowadzenie badań podstawowych z obszaru przeróbki cieplno-plastycznej, w tym regulowanego walcowania stali niskostopowych wciąż należy do istotnych w kontekście rozwoju nauki i przemysłu. Wynika to przede wszystkim ze szczególnych właściwości stali, w tym średniomanganowych charakteryzujących się wyjątkową kombinacją wytrzymałości i udarności. Nowe badania realizowane na tych materiałach stanowią podstawę odkrycia nowych, nieznanych wcześniej możliwości ich eksploatacji. Proces walcowania to technologia, która w przypadku stali, stanowiącej podstawę prowadzonych badań w ramach doktoratu, determinuje możliwość wytwarzania produktów charakteryzujących się właściwościami trudnymi do uzyskania poprzez wykorzystanie tradycyjnych metod kształtowania mikrostruktury gwarantującej osiągnięcie zakładanych zmian ilościowych i jakościowych w kontekście składu fazowego. Istotne jest zatem prowadzenie działań z obszaru B+R w zakresie optymalizacji technologii walcowania z uwzględnieniem wpływu prędkości odkształcania na ostateczne właściwości stali, uwzględniając przy tym możliwość uzyskania większej efektywności, niższych kosztów procesu, ale przede wszystkim podwyższonej jakości wytwarzanych produktów. Zrozumienie parametrów walcowania, w tym głównie prędkości odkształcania, wpływu na właściwości stali wynikających z przemian fazowych, również z kinetyki przemiany martenzytycznej determinującej zawartość austenitu szczątkowego, jest kluczem do optymalizacji technologii. Prowadzone badania w tym zakresie, kluczowe dla rozwoju przemysłu stalowniczego, dostarczają fundamentów dla zastosowań nowych rozwiązań technologicznych przyczyniających się do uzyskania wyników produkcyjnych charakteryzujących się wysokim stopniem powtarzalności, co w przypadku produktów wytwarzanych ze stali jest krytyczne dla możliwości ich eksploatacji w warunkach dużych obciążeń krytycznych. Zainteresowanie tym obszarem badań na poziomie doktoratu oraz analiza danych literaturowych potwierdza ich aktualność i znaczenie w kontekście globalnych potrzeb rynkowych. W mojej ocenie zagadnienia naukowo-badawcze podjęte w opiniowanej rozprawie doktorskiej są ważne dla rozwoju dyscypliny inżynieria materiałowa. Obecny stan wiedzy z zakresu technologii stali wskazuje, że procesy przeróbki cieplno-plastycznej umożliwiające modyfikować stan materiału poprzez zmianę właściwości wynikającą z mikrostruktury kształtowanej w czasie wytwarzania gotowych produktów wciąż stanowią bardzo ważny element oddziałujący na postęp techniczny i kierunki rozwoju produktów

wytwarzanych ze stali wysokowytrzymałej (AHSS – *Advanced High Strength Steel*). Wybór i badania stali typu AHSS po procesie walcowania z zastosowaniem wysokich prędkości odkształcania, musi w tym przypadku, przy uwzględnieniu aspektu użytkowego uzyskanych w pracy wyników badań, zapewnić osiągnięcie prognozowanych właściwości materiału oraz wysokiej jakości, przy zachowaniu odpowiedniej wydajności produkcyjnej i ekonomii zastosowanych procesów wytwarzania gotowych elementów. Stanowiło to wyzwanie dla Doktoranta już w czasie prowadzonej analizy wyników badań w kontekście optymalizacji procesu walcowania przy zastosowaniu wysokich prędkości odkształcania, co wymagało głębszej wiedzy w zakresie technologii kształtujących właściwości stali w kontekście istniejących ograniczeń wynikających z podatności stali do przeróbki plastycznej, co w tym przypadku determinuje ich zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Przedmiotem badań prowadzonych przez Pana mgr. inż. Mateusza Morawca są kluczowe w obszarze inżynierii materiałowej procesy decydujące o możliwościach kształtowania właściwości stali z przeznaczeniem do jej zastosowania jako produkty w postaci blach czy taśm do zaawansowanych konstrukcji w przemyśle motoryzacyjnym, maszynowym czy energetycznym. Temat rozprawy jest zatem aktualny ze względu na skomplikowaną naturę badanych procesów i analizowanych parametrów – jest ambitny i idealnie wpisuje się w nurt współczesnej inżynierii materiałowej. Wybór materiału do badań, tj. stali wysokowytrzymałej zawierającej od 3 do 5% Mn, jak i również zakresu metod badawczych jest aktualny i ważny z uwagi na duży potencjał zastosowania wyników badań pozwalających określić odporność tych stali na naprężenia, które mogą powodować uszkodzenia eksploatowanych elementów. Jest to kluczowe w zastosowaniach, gdzie istnieje ryzyko pęknięć. Zatem przeprowadzone przez Pana mgr. inż. Mateusza Morawca badania pozwalają na ocenę stabilności stali w różnych warunkach środowiskowych, w tym oddziaływania wysokich wartości naprężeń lub przy zmieniającej się temperaturze. Są niezbędne, aby zoptymalizować technologię stali średniowęglowej do specyficznych wymagań zastosowań w warunkach dużych obciążeń, zapewniając trwałość, niezawodność i wydajność części przeznaczonych do pracy jako elementy maszyn czy pojazdów samochodowych.

2. Ocena rozprawy

Analiza treści rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Morawca zawierającej wyniki badań własnych pozwala stwierdzić, że spełnione zostały założone cele realizowanych jej kolejnych zadań badawczych. Opracowano parametry badań z uwzględnieniem zastosowania odpowiednich metod dla charakteryzacji wpływu wysokich prędkości odkształcania na mikrostrukturę stali oraz prawidłowo opisano wyniki ich badań.

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 139 stron maszynopisu, łącznie ze spisem literatury, rysunkami, tabelami, równaniami oraz spisem treści, składa się z trzech części merytorycznych, podzielonych na rozdziały, poprzedzone wstępem, w których Doktorant dokonał charakterystyki materiału do badań, przedstawił metody badawcze oraz przeprowadził analizę wyników badań, na podstawie których zdefiniował wnioski. We wstępie omówiono znaczenie stali w dzisiejszym przemyśle, szczególnie stali o wysokiej wytrzymałości, w kontekście zastosowań w motoryzacyjnych aplikacjach. Opisuje, jak kształtowała się produkcja stali na przestrzeni lat, zaznaczając, że stop ten pozostaje wciąż popularnym materiałem konstrukcyjnym. Wskazuje na znaczenie stali o wysokiej wytrzymałości w budowie pojazdów samochodowych, zwłaszcza w kontekście redukcji ich masy i zwiększenia bezpieczeństwa. Omawia wpływ prędkości odkształcania na właściwości mechaniczne stali, zwłaszcza w kontekście dynamicznych obciążeń występujących w czasie kolizji drogowych. Znaczenie wstępu należy docenić w odniesieniu do potwierdzenia dużego znaczenia badań nad wpływem odkształcania w warunkach dynamicznych na nowoczesne stale o wysokiej wytrzymałości, co jest istotne dla rozwoju bezpiecznych i lekkich konstrukcji w przemyśle motoryzacyjnym.

Rozdział drugi 2. *Przegląd piśmiennictwa*, na który składają się trzy podrozdziały, ma charakter szczegółowego wprowadzenia do zagadnień związanych z prowadzonymi badaniami, z uwzględnieniem bogatego przeglądu literatury z zakresu wybranego materiału do badań. Uwzględnia charakterystykę stali wielofazowej, w tym ferrytyczno-bainitycznej i bainitycznej zawierającej austenit szczątkowy oraz charakterystykę średniomanganowej stali wysokowytrzymałej. Następnie przedstawiono stan wiedzy i praktyki w odniesieniu do metod badawczych, które umożliwiają dokonać oceny wpływu wysokiej prędkości odkształcania na właściwości stali determinowanej przemianami fazowymi, jak i również zmianami mikrostruktury wywołanymi działaniem wysokich wartości naprężeń. Doktorant wybrał prawidłowe techniki umożliwiające prowadzić próby zapewniające uzyskać wyniki gwarantujące potwierdzić zdefiniowaną w pracy tezę. W podsumowaniu tego rozdziału (2.4. *Podsumowanie przeglądu piśmiennictwa*) Autor przedstawia stan wiedzy w odniesieniu do procesów kształtujących właściwości stali AHSS, wskazując na potrzebę poszerzenia wiedzy w zakresie odkształceń w warunkach dynamicznych zaawansowanych stali wysokowytrzymałych występujących podczas przetwarzania i użytkowania wyrobów zwłaszcza w motoryzacji, gdzie stosowane są technologie wytwarzania półwyrobów poprzez tłoczenie, hydroformowanie i gięcie. W tym przypadku materiał zachowuje się inaczej niż podczas odkształcania w warunkach klasycznej technologii przeróbki plastycznej, co stanowi

wyzwanie w odniesieniu do stosowania dostępnych metod badawczych umożliwiających dokonać opisu zjawisk odpowiadających za kształtowanie finalnych właściwości stali. Jak słusznie zauważa Autor pracy, chociaż istnieje wiele prac dotyczących stopów metali lekkich, stali austenitycznej i pierwszej generacji stali AHSS, to jednak wciąż brakuje systematycznych badań nad trzecią generacją stali AHSS, szczególnie stali przeznaczonej na wyroby wytwarzane w procesie regulowanego walcowania, które można obrabiać w ramach jednego ciągu produkcyjnego, co pozwala na kontrolowanie ich własności mechanicznych poprzez modyfikowanie wielkości ziarna składników fazowych. Stanowić to może podstawę optymalizacji procesu technologicznego pozwalającego obniżyć koszty produkcji i negatywne oddziaływanie procesu na środowisko, poprzez wytwarzanie w jednym procesie mniejszej ilości zanieczyszczeń. Badania nad stalami średniomanganowymi są istotne ze względu na złożony charakter zjawisk zachodzących podczas ich odkształcania w warunkach dynamicznych. Stwierdzono m.in. wzrost temperatury stali odkształcanej w tych warunkach, co ma bezpośredni wpływ na mikrostrukturę poprzez takie jak efekty jak np. TRIP, zdrowienie i rekrytalizację. Dlatego wymagane jest ciągle prowadzenie badań umożliwiających poszerzenie wiedzy dotyczącej modyfikacji właściwości stali AHSS kształtowanych w warunkach dynamicznych, krytycznych dla zrozumienia procesów wytwarzania i użytkowania tych materiałów, a także dla rozwoju zaawansowanych i wydajnych procesów produkcyjnych. W rozdziale tym Autor zawiera szczegółową charakterystykę metod badawczych oraz kryteria doboru parametrów prób umożliwiających dokonać prawidłową analizę wpływu wysokich prędkości odkształcenia na właściwości mechaniczne wybranych gatunków stali.

W rozdziale 3. *Badania własne*, Autor przedstawia genezę problemu badawczego (3.1. *Cel i teza pracy*) w odniesieniu do zdefiniowanej tezy pracy, opisany jest materiał badań (3.2. *Materiał do badań*), metodyka (3.3. *Metodyka badań*), zakres oraz wyniki przeprowadzonych badań (3.4. *Wyniki badań i ich omówienia*) wraz z opisem poszczególnych etapów prowadzenia badań (badania właściwości mechanicznych, badania strukturalne, badania rentgenowskie, badania EBSD, wyniki obserwacji TEM oraz wyniki badań faktograficznych). Dokonując analizy danych literaturowych oraz możliwych do zastosowania metod badawczych Doktorant zaproponował metodykę badań umożliwiającą skuteczną ocenę wpływu dużych prędkości odkształcania na właściwości wybranej stali. Rozdział 4. *Omówienie i dyskusja wyników badań* zawiera analizę uzyskanych wyników badań z oceną m.in. wpływu procesu odkształcania na stabilność austenitu szczątkowego w stali po procesie odkształcania w warunkach dynamicznych oraz na zmiany mikrostrukturalne

oddziałujące bezpośrednio na właściwości mechaniczne. Przedstawiono również ocenę wpływu prędkości odkształcania na kinetykę przemiany martenzytycznej austenitu szczątkowego. W punkcie pracy 5. *Wnioski* zawarte są konkluzje analiz wyników przeprowadzonych badań oraz wskazane są kierunki dalszych badań. W tym miejscu można mieć pewne uwagi do strony edytorskiej pracy, w odniesieniu do opisu metodyki badawczej, zwłaszcza w przypadku, kiedy Autor definiuje zakres badań i charakter omawianych w kolejnych rozdziałach wyników, np.:

Strona 71 – „*Wolne chłodzenie w tym zakresie temperatury miało na celu wytworzenie w strukturze pewnej frakcji ferrytu*” – co znaczy „pewnej”?

Strona 72 – „*Zmiana osnowy w przypadku stali 5Mn jest spowodowana wzrostem hartowności stali związanej ze zwiększoną zawartością manganu [4]*” – hartowność nie wzrasta, tylko stanowi dla danego gatunku podatność do hartowania określoną zdolnością do tworzenia martenzytu. Zatem zmiana mikrostruktury w tym przypadku wynika z rodzaju materiału i zastosowanej obróbki cieplnej.

Strona 77 – Doktorant stara się tłumaczyć zakres wykonanych prac stosując długie zdania, które można ograniczyć do jednego krótkiego opisu: I tak np.: „*W przypadku zastosowania analizy EBSD, próbki do badań zostały po procesie polerowania na zawieszinach diamentowych, poddane dodatkowo polerowaniu z użyciem zawiesziny OPU o wielkości cząstek wynoszącej 0,04 μm przez 30 min. Zabieg ten miał na celu zapewnienie dobrego indeksowania w trakcie analizy*” – czy nie lepiej było napisać: „*W celu uzyskania prawidłowych wyników w czasie badania struktury krystalicznej za pomocą EBSD, odkształcone próbki polerowano z użyciem zawieszin diamentowych, a następnie zawiesziny OPU*”. W tym przypadku lepiej używać terminu „badanie struktury krystalicznej”, czy „identyfikowanie orientacji krystalicznej ziaren” zamiast indeksowania. Indeksowanie oczywiście odnosi się do dynamicznego zbierania i analizy danych w czasie rzeczywistego skanowania próbki, co umożliwia właśnie identyfikowanie orientacji krystalicznych poszczególnych obszarów próbki.

Strona 77 – „*Lamelki do badań w elektronowym mikroskopie transmisyjnym wykonano przy zastosowaniu preparatyki zbieżną wiązką jonów galu (FIB - Focused Ion Beam)*” – w tym przypadku lepiej używać opisu „próbki w postaci lamel wycięto i ścieniowano z użyciem skupionej wiązki elektronowej FIB...”

Strona 78 – „*Do badań rentgenowskich próbki zostały poddane kilkukrotnemu trawieniu i polerowaniu. Procedura ta ma na celu usunięcie zdefektowanej warstwy powierzchniowej próbki, w której mogła zajść przemiana martenzytyczna austenitu szczątkowego, co mogłoby zaniżyć rzeczywisty udział tej fazy w strukturze stali*” – proszę o wyjaśnienie, na czym polegało przygotowanie próbek do badań rentgenowskich, w jaki sposób polerowano próbki? Polerowanie może wprowadzić naprężenia wpływające na pozycje i intensywności pików rentgenowskich w wynikach analizy. Zmiana stanu naprężeń (zmiana tekstury) wpływa również na rozpraszanie promieni rentgenowskich co prowadzi do rozszerzania lub zwężania pików rentgenowskich na obrazie dyfrakcyjnym, co może prowadzić do błędnej interpretacji wyników.

Powyższe uwagi stanowią dygresje Recenzenta wskazujące Doktorantowi na wykazanie w przyszłych pracach większej staranności przy opracowaniu kolejnych prac naukowych.

Zamieszczony wykaz literatury zawiera 208 pozycji (w tym 7 pozycji współautorskich Doktoranta), gdzie 167 pozycji jest w językach obcych, co stanowi 80% wszystkich cytowanych prac. Ponadto praca zawiera 112 rysunków i 3 tabele. Struktura pracy jest logiczna. Układ, kolejność i zakres poszczególnych części rozprawy jest starannie dobrany i w wyczerpujący sposób przedstawia przedmiot i zakres badań, cel i tezy pracy, metodykę badań, wyniki i analizy przeprowadzonych badań oraz wnioski końcowe. Stwierdzam, że przyjęty sposób prowadzenia dyskusji dotyczącej stanu zagadnienia w świetle danych literaturowych jest na bardzo dobrym poziomie. Doktorant prawidłowo definiuje cele badawcze dla stosowanych metod wytwarzania, opisuje wyniki badań odnoszące się do wybranego gatunku stali, w kontekście możliwości kształtowania jej właściwości w procesie przeróbki cieplno-plastycznej, co jest niezbędne dla realizacji badań przy zastosowaniu wybranych metod eksperymentalnych. Potwierdza znajomość tematyki dotyczącej stali wysokowytrzymałych oraz procesów stosowanych w technologiach wytwarzania blach i taśm wykorzystywanych w motoryzacji, a więc tych dotyczących głównych zagadnień związanych z tematyką rozprawy. Pan mgr inż. Mateusz Morawiec udowodnił w swojej pracy możliwość prowadzenia analizy danych literaturowych w kontekście ich wykorzystania jako dane wyjściowe determinujące prawidłowy charakter prowadzonych badań z uwzględnieniem kryteriów ustalonych i wymaganych dla kształtowania właściwości półwyrobów czy wyrobów w postaci elementów konstrukcyjnych wytwarzanych w procesie tłoczenia, hydroformowania czy gięcia.

3. Ocena prowadzonych badań i analizy ich wyników

W części drugiej rozprawy Doktorant prowadzi badania technologiczne oraz charakteryzację odkształcanych stali poprzez analizę mikrostruktury oraz właściwości fizycznych i mechanicznych. Stosuje w tych badaniach metody mikroskopii zarówno świetlnej, jak i elektronowej, a także analizę dyfraktometryczną w celu identyfikacji składu fazowego, ze szczególnym uwzględnieniem wyznaczenia austenitu szczątkowego w odkształcanej stali. Podstawą opracowania czynników wpływających na stabilność termodynamiczną austenitu szczątkowego oraz opisu wpływu prędkości odkształcania na zmiany w mikrostrukturze stali determinujące jej właściwości mechaniczne oraz nowych warunków prowadzenia procesów odkształcania wyrobów ze stali w warunkach dynamicznych jest staranna analiza wyników badań prowadzona przez Doktoranta. Wykonał dobrze przygotowane i pracochłonne badania.

Wyniki badań i sposób analizy wyników pozwoliły Doktorantowi na potwierdzenie stopnia trafności przyjętych założeń w zakresie przebiegu przemiany austenitu resztkowego

w martenzyt determinowanej odkształceniem w warunkach dynamicznych oraz składem chemicznym stali (głównie poprzez zawartość Mn), uwzględniając przy tym warunki stosowanych metod badawczych. Pan mgr inż. Mateusz Morawiec dokonał oceny wpływu prędkości odkształcania na mikrostrukturę definiującą finalne właściwości wysokowytrzymałej stali średniowęglowej. Wykazał tym samym dobre przygotowanie do prowadzenia pracy naukowo – badawczej i potwierdził doświadczenie z zakresu metod charakteryzacji właściwości mechanicznych, opisu parametrów procesowych oraz analizy struktury i mikrostruktury wysokowytrzymałych stali. Oceniając przyjęte założenia, cel oraz zakres wykonanych badań stwierdzam, że spełniają one oczekiwania stawiane pracom doktorskim zarówno w zakresie oryginalności, jak i kompletności w odniesieniu do programu badawczego zakończonego prawidłową dyskusją wyników i zdefiniowanymi wnioskami. Praca jest napisana poprawnie i dopracowana edytorsko. Godne podkreślenia jest odniesienie się Doktoranta, w trakcie prezentacji swoich wyników do podstawowych i aktualnych wyników badań podanych w literaturze światowej.

Pomimo staranności mgr inż. Mateusz Morawiec nie ustrzegł się niedociągnięć w opisie i charakterystyce prowadzonych badań. Często są wynikiem uszczegółowienia opisu prowadzonych prac i próby przedstawienia wyników bez wstępnej ich syntezy. Uwagi dotyczą następujących zagadnień:

Strona 79 – „*Dodatkowo w celu porównania własności w warunkach statycznych i dynamicznych, zestawiono również krzywe ze statycznej próby rozciągania przeprowadzanej w temperaturze pokojowej*” – chodziło zapewne o porównanie właściwości stali po przeprowadzonych próbach rozciągania.

Strona 80 – „*Natomiast wpływ szybkości odkształcenia (w analizowanym zakresie) na wartość wydłużenia w stali 5Mn jest praktycznie pomijalny*” – wpływ nie może być pomijalny, może Doktorant powinien użyć sformułowania: nie stwierdzono wpływu prędkości odkształcania na właściwości plastyczne, w tym przypadku na wydłużenie stali 5Mn

Strona 81 – Doktorant zamieszcza opis mikrostruktury „stali po odkształcaniu dynamicznym” (czy w tym przypadku i w całej pracy nie byłoby lepiej używać pojęcia/sformułowania: odkształcenie w warunkach dynamicznych? – odkształcenie odnosi się w tym przypadku do specyficznych dla próby warunków dynamicznych, gdzie szybko zmieniające się obciążenie wpływa na właściwości mechaniczne).

W opisach zawartych w części 3.4., w niektórych w zdaniach opisujących rezultaty przeprowadzonych prób brakuje danych, do których odnoszone są opisywane wyniki badań, i tak np.: Strona 81 – „*Krzywe stali 3Mn mają charakter narastający w zakresie od końca piku wynikającego z bezwładności do wartości odpowiadającej wytrzymałości na rozciąganie. Różnica naprężenia między tymi punktami wynosi kolejno 317, 240 i 286 MPa*” – można się

domyślić, że w tym przypadku chodzi o charakterystyki odkształcania dla poszczególnych prędkości odkształcania.

Strona 84 - W przedstawionym opisie mikrostruktury (rys. 82) Doktorant zamieszcza opis „*Jedyną różnicą widoczną w mikrostrukturze są postępujące wraz ze wzrastającą szybkością odkształcenia, efekty podobne do odpuszczania martenzytu. Tego typu efekty w większym powiększeniu można zaobserwować na rys. 82, przedstawiającym blokowe ziarno martenzytu, we wnętrzu którego pojawiły się cząstki węglików (najprawdopodobniej cementytu). Efekt ten może być wynikiem wygenerowanego w trakcie odkształcenia ciepła*” – czy to na pewno są listwy martenzytu? I czy w obszarze tych listew są węgliki powstałe w czasie odpuszczania? Czy czas, który w tym przypadku liczyć można w milisekundach i ciepło indukowane w czasie odkształcania jest wystarczające do wydzielania węglików o wymiarach dochodzących do kilkudziesięciu nanometrów? W tym przypadku należałoby oczekiwać wydzielania bardzo drobnych cząsteczek Fe_3C o dużej dyspersji, ale na granicach listew, czy na granicach byłego austenitu, co mogłyby ujawnić badania TEM. I skąd wiadomo, że to Fe_3C („*najprawdopodobniej*”) – dyfraktogramy nie wykazały obecności węglików? Czy to nie jest struktura bainityczna? Dodatkowo nie wykonano analizy składu chemicznego z analizowanego obszaru-

Doktorant pisze, że „*...widać, że powierzchnia martenzytu jest inna w zależności od obserwowanego obszaru, co może świadczyć o niejednorodnym przebiegu tego odpuszczania*” – obserwujemy powierzchnię zglądu, który został przygotowany poprzez szlifowanie i polerowanie, zatem efekt ten wynikać może z obserwacji ziarn/listew rozmieszczonych pod różnym kątem, stąd różnice w obserwacjach mikroskopowych.

Doktorant pisze, że temperatura w trakcie odkształcenia „*musiała być relatywnie wysoka*” – co to znaczy?

Strona 86 – brak zliczeń na dyfraktogramach na osi „*Intensywność*” ogranicza możliwość oceny wykonanej przez Doktoranta analizy wpływu odkształcania na zawartość austenitu szczątkowego. Tu prosiłbym Doktoranta o przedstawienie metodyki wyznaczania/wyliczenia zawartości austenitu szczątkowego dla uzyskanych dyfraktogramów dla stali 3Mn i 5Mn.

Strona 90 – „*...można zaobserwować drobne obszary charakteryzujące się granicami szerokokątowymi (czarne linie na mapach IPF) i odmienną orientacją krystalograficzną, co świadczy o powstaniu ziarna. Ziarna takie występują na granicach ziarna, ale również w ich wnętrzu (rys. 88e)*” – chodzi zapewne o zarodki nowych, nieodkształconych, powstałych w wyniku rekrytalizacji ziarn – ale czy na pewno nowe ziarna tworzą się we wnętrzu ziarn pierwotnych? Rysunki stworzone w czasie analizy EBSD wskazują, że nowe ziarna tworzą się na granicach silnie odkształconych ziarn?

Strona 90 – „*Obecność większej, niż ma to miejsce w przypadku stali 3Mn, ilości ziaren o granicach szerokokątowych w mikrostrukturze może świadczyć pośrednio o wyższej temperaturze wygenerowanej w czasie odkształcenia, co mogło przyspieszyć procesy odbudowy mikrostruktury stali (obecność nowych ziarna)*” – większa liczba ziaren powstałych w wyniku rekrytalizacji potwierdza w tym przypadku wpływ energii odkształcenia powstałej w czasie próby z użyciem wysokich prędkości odkształcania, która spowodowała odnowę silnie odkształconej mikrostruktury. Różnice mogą również wynikać z obszaru obserwacji, nie spodziewałbym się raczej różnic wynikających akurat dla tego

przypadku wytworzenia warunków umożliwiających uzyskanie wyższej temperatury oddziałującej na proces rekrytalizacji.

Strona 93 – „*W przypadku stali 5Mn (rys. 92) również widać duży poziom odkształcenia struktury, zdominowanej przez granice szerokokątowe*” – obecność w mikrostrukturze granic szerokokątowych (stabilnych termodynamicznie) jest charakterystyczna dla materiału po procesie chłodzenia z niską szybkością chłodzenia, co nie jest typowe dla silnie odkształconego materiału. Intensywny proces odkształcenia plastycznego powoduje zmiany w mikrostrukturze, również przy współdziałaniu procesów odnowy mikrostruktury, w tym rekrytalizacji, powodujące powstawanie granic niskokątowych.

Dalej, strona 93 – co to znaczy: „*Jednocześnie widać, że w odróżnieniu od stali 3Mn, szybkość odkształcenia nie miała tak istotnego wpływu na zmianę udziału pomiędzy granicami wąsko - a szerokokątowymi*”?

Strona – 97 – „*W strukturze obecne są także filmy nieprzemienionego austenitu szczątkowego (rys. 95b), którego szerokość listew nie przekracza 150 nm*” – użycie sformułowania „film” w opisie austenitu szczątkowego jest niezbyt fortunne, sugerowałbym używanie w tym przypadku opisu wskazującego na występowanie w strukturze bainitu blokowych ziarn (bądź też w tym przypadku warstw pomiędzy listwami bainitu) nieprzemienionego austenitu stabilizowanego węglem, zwanego austenitem resztkowym (dla odróżnienia od austenitu szczątkowego, występującego w martenzycie).

Podobnie na stronie 101 Autor używa stwierdzenia: „*stabilne pozostały jedynie filmy austenitu o grubości poniżej 120 nm, co jest związane z ich większą stabilnością mechaniczną*” – czy nie lepiej użyć stwierdzenia „płytki austenitu” – z uwagi na fakt, że właśnie austenit w takiej formie charakteryzuje się zdecydowanie większą stabilnością niż ten w formie blokowej, który łatwiej ulega przemianom martenzytycznym.

Strona 99 – „*W przypadku odkształcenia z szybkością $1000s^{-1}$ (rys. 97) dalej dominuje morfologia listwowa*” – może lepiej: dominują fazy o morfologii płytkowej/listwowej.

Osobiście jestem za stosowaniem w przypadku opisu prowadzonych prób odkształcania terminu „prędkość” zamiast „szybkość” – w języku potocznym są to synonimy, ale w terminologii fizycznej, czy technicznej ulec powinny różnicowaniu – „prędkość” odnosi się do miary szybkości poruszania się obiektu, zwykle wyrażanej w jednostkach odległości na jednostkę czasu. Na przykład, prędkość pojazdu to ilość przebytej drogi w jednostce czasu. W fizyce, „prędkość” jest wektorem, co oznacza, że ma zarówno wartość (ilość) jak i kierunek. Jest to bardziej precyzyjne pojęcie niż „szybkość”, które może odnosić się jedynie do ilości. Jeśli mówimy o ruchu fizycznym, co w tym przypadku odnosi się do ruchu trawersy, czy też części urządzenia realizującej odkształcenie, to „prędkość” jest bardziej precyzyjnym terminem i obejmuje zarówno ilość, jak i kierunek ruchu. W terminologii technicznej, „szybkość” często odnosi się do ilości czegoś, co jest wyrażone w jednostce czasu. Na przykład, w kontekście przesyłu danych, „szybkość transmisji” oznacza ilość danych, która może być przesłana w jednostce czasu. W innych dziedzinach technicznych, „szybkość” może również odnosić się do tempa jakiegoś procesu lub ilości wykonywanych działań w określonym czasie – np. szybkość reakcji chemicznej.

Czy na rysunku 97 (strona 100) na pewno są widoczne podziarna powstałe w wyniku procesu zdrowienia dynamicznego? Wygląda to na obszary wolne od podstruktury dyslokacyjnej, ale nie widać w nich niskoenergetycznych układów komórkowych charakterystycznych dla efektów odnowy odkształconych ziarn w materiale. Podobnie w przypadku analizy obrazów przedstawionych na rys. 98 – czy stwierdzony brak widocznych granic ziarn nie jest artefaktem wynikającym z kontrastu zamrożonego obrazu STEM? Brak granic ziarn spowodowany byłby w tym przypadku postępującą rekrytalizacją, z widocznymi efektami procesu odnowy mikrostruktury w postaci nieregularnego kształtu granic ziarn lub istnieniem szeregu małych niskokątowych granic ziarn. Podobnie jest w przypadku opisu rys. 100b.

Strona 105 (Omówienie i dyskusja wyników badań) – „*Wang i in. [156] stwierdzili, że wzrost wytrzymałości na rozciąganie przy zastosowaniu odkształcenia dynamicznego może wynikać ze spowolnienia anihilacji dyslokacji oraz zwiększania gęstości przeszkód dla ruchu dyslokacji*” – Autorzy zapewne mieli na myśli nie spowolnienie anihilacji, bo proces ten w przypadku realizowanego odkształcania, zwłaszcza w przypadku zastosowania dużych prędkości odkształcania, oddziałuje na podstrukturę dyslokacyjną w sposób ciągły. Można dyskutować, czy proces ten uległ spowolnieniu ... raczej występuje tu brak możliwości usunięcia skutków odkształcania przez procesy odnowy odkształconej mikrostruktury stali. Jeżeli nie jest możliwe dyssypowanie energii w czasie odkształcania poprzez rozpraszanie w wyniku ruchu dyslokacji, to następuje jej utrata w skutej innych zjawisk, np. cieplnych czy mechanicznych. Procesy te nie nadążają z odbudową silnie deformowanej mikrostruktury, co sprzyja umocnieniu w wyniku ciągłego blokowania ruchu dyslokacji, których liczba ciągle wzrasta mimo postępującego w tym samym czasie anihilowania dyslokacji, aż do momentu dekohezji materiału.

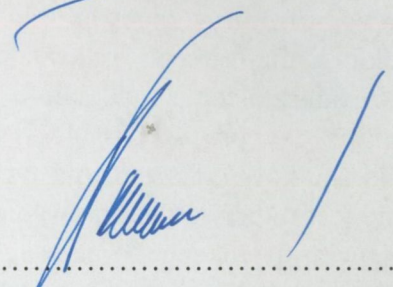
Strona 110 – Autor wskazuje, że na rysunku 105 obserwuje „...*lokalnie mikropasma charakteryzujące się dużym stopniem odkształcenia*” – z rysunku nie wynika, że takie mikropasma są widoczne? Czy na pewno przedstawione na rysunku drobne ziarna powstające w wyniku działania rekrytalizacji dynamicznej zarodkują w obszarze niejednorodnego odkształcania w formie mikropasm? Czy nie jest to granica ziarna? Autor przecież dalej pisze, że „... *dla analizowanych stali powstawanie adiabatycznych pasm ścinania jest mocno ograniczone...*”.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Morawca „*Wpływ szybkości odkształcenia na przemianę martenzytyczną w stalach wielofazowych z austenitem szczątkowym*”, przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Adama Grajcara, stwierdzam, że stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, Autor wykazał się szeroką wiedzą w obszarze inżynierii materiałowej. Potwierdził swoje duże umiejętności w zakresie formułowania problemów badawczych, planowania badań i doboru metodyki badawczej, a także praktycznej realizacji badań materiałowych z wykorzystaniem nowoczesnych, zaawansowanych metod badawczych i analizowania uzyskanych wyników. Autor pracy, Pan mgr inż. Mateusz Morawiec potwierdził tym samym doświadczenie w dziedzinie stanowiącej przedmiot pracy, opracował warsztat badawczy i metodykę badań potrzebną do realizacji zamierzonego celu i prawidłowo prowadził eksperymenty

z zastosowaniem urządzeń wymagających precyzji w zakresie stosowanych wysokich prędkości odkształcania, prawidłowo interpretował wyniki badań oraz przedstawił wartościowe wyniki z obszaru wpływu parametrów odkształcania w warunkach dynamicznych na właściwości wysokowytrzymałych stali średniomanganowych. Pan mgr inż. Mateusz Morawiec osiągnął zatem zamierzony cel i potwierdził swoją umiejętność do samodzielnego, twórczego prowadzenia badań oraz ich analizy.

W mojej opinii przedłożona do oceny rozprawa doktorska w pełni odpowiada warunkom stawianym w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14.03.2003 r. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 i na tej podstawie wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgra inż. Mateusza MORAWCA do publicznej obrony.


.....
dr hab. inż. Andrzej Nowotnik, prof. PRz