

Gliwice, 23 października 2023

*Dr hab. inż. Jarosław Marcisz**Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny**ul. Karola Miarki 12-14**44-100 Gliwice*E-mail: [Jaroslaw.Marcisz@git.lukasiewicz.gov.pl](mailto:Jaroslaw.Marcisz@git.lukasiewicz.gov.pl); Tel.: +48 600 297 300

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Morawca, pt.: „*Wpływ szybkości odkształcenia na przemianę martenzytyczną w stalach wielofazowych z austenitem szczątkowym*”, opracowana na podstawie pisma Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej RDIMa.RMT.512.17.2023 (RDMiA/RMT/140/51/2023) z dnia 21.09.2023.

Promotorem rozprawy jest Prof. dr hab. inż. Adam Grajcar.

### Tematyka, zakres i teza pracy

Recenzowana praca została wykonana na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod opieką merytoryczną prof. Adama Grajcara. Tematyka pracy dotyczy jednego z priorytetowych kierunków rozwoju Politechniki, tj. obszaru projektowania, badań i eksploatacji nowych materiałów, w tym wytwarzanych z zastosowaniem zaawansowanych zabiegów obróbki termomechanicznej, które znalazły zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym.

Dążenie do optymalizacji procesów wytwarzania poprzez projektowanie składu chemicznego i dobór parametrów obróbki cieplno-mechanicznej w połączeniu z zaawansowanymi analizami w zakresie przemian fazowych to wciąż aktualny trend w rozwoju materiałów. Intensywnie rozwijają się także modele numeryczne oraz zastosowanie sztucznej inteligencji w dziedzinie inżynierii materiałowej i technologii. Nowe trendy wynikają dodatkowo z dostępności zaawansowanych urządzeń i automatyzacji procesów, które umożliwiają precyzyjne sterowanie i kontrolę parametrów produkcji. Z kolei odbiorca / użytkownik materiałów i konstrukcji jakim jest przemysł motoryzacyjny stawia wysokie wymagania w zakresie redukcji masy elementów przy zapewnieniu sztywności konstrukcji i jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa biernego. Ponadto szczególnie w dobie wysokich cen energii, pierwiastków stopowych czy kosztów pracy, cena nowych rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych ma również znaczenie na etapie wdrażania technologii wytwarzania seryjnego.

Materiałem badań w pracy były dwa gatunki stali średniomanganowych wielofazowych o zaprojektowanym składzie chemicznym uwzględniającym stosowane zabiegi obróbki cieplno-mechanicznej w celu uzyskania określonego składu fazowego oraz warunki użytkowania, włącznie z sytuacjami ekstremalnymi w których występuje odkształcenie dynamiczne z szybkościami w szerokim zakresie (np. 250-1000 s<sup>-1</sup>). Stale stosowane na elementy konstrukcyjne w przemyśle motoryzacyjnym powinny spełnić szereg wymagań co do właściwości mechanicznych statycznych i dynamicznych, w tym w ekstremalnych warunkach użytkowania. Jednocześnie kształtowniki wykonane z tych gatunków stali stanowiące elementy konstrukcji, zapewniają sztywność nadwozia i stanowią w znaczącej mierze o masie pojazdu. Przedmiotowa praca obejmowała szeroki zakres badań mikrostruktury i właściwości mechanicznych w stanie stosowanym do wykonania konstrukcji oraz

Biuro Dziekana



podczas eksploatacji w ekstremalnych warunkach odkształcenia dynamicznego. Analiza ilościowa i jakościowa składników strukturalnych i fazowych po zastosowanych wariantach obróbki cieplno-plastycznej, umożliwiła wskazanie optymalnego rozwiązania dla elementów konstrukcyjnych co m.in. stanowiło rezultat pracy.

„Celem pracy było określenie wpływu szybkości odkształcenia na przemianę martenzytyczną indukowaną odkształceniem plastycznym oraz zależności pomiędzy mikrostrukturą a własnościami mechanicznymi w wysokowytrzymałych, wielofazowych stalach średniomanganowych.”

Doktorant w rozdziale 3.1 zatytułowanym „Cel i teza pracy” sformułował następującą tezę: „wzrost szybkości odkształcenia w zakresie  $250-1000\text{ s}^{-1}$  ma wpływ na przebieg przemiany martenzytycznej austenitu szcążkowego oraz własności mechaniczne wielofazowych stali średniomanganowych, determinowane dominującym mechanizmem umocnienia oraz stężeniem manganu w stali”.

### **Charakterystyka rozprawy**

Praca ma tradycyjny układ z wydzieloną częścią dotyczącą przeglądu literatury oraz opisu wyników badań własnych wraz z ich analizą, podsumowaniem i wnioskami. Rozprawa została podzielona na następujące rozdziały: wstęp, przegląd piśmiennictwa i rozdział w którym sformułowano hipotezę i cel pracy oraz metodykę badań, wyniki badań i ich dyskusja i podsumowanie z wnioskami. Opracowano także streszczenie w języku polskim i angielskim. Sumarycznie praca zawiera 139 stron na których zamieszczono 112 rysunków i 3 tablice. Wstęp i analizę stanu zagadnienia wraz z jego podsumowaniem opracowano na 68 stronach z materiałem ilustracyjnym w liczbie 70 rysunków. Następnie na 10 stronach opisano tezę i cel pracy, zakres i materiał badań oraz zastosowane metody badań mikrostruktury i pomiarów właściwości mechanicznych. Główne rozdziały pracy: dotyczącej prezentacji wyników badań i pomiarów przedstawiono na 37 stronach, omówienie i dyskusję wyników opracowano na 13 stronach, a wnioski na 2 stronach.

W analizie literatury wskazano 208 pozycji, w tym 7 publikacji doktoranta, spośród których był głównym autorem 6. Doktorant publikował wyniki badań w punktowanych czasopismach o wysokim Impact Factor w latach 2017-22, a większość z nich w latach 2020-21. Zakres i obszar tematyczny analizowanej literatury został prawidłowo dobrany w aspekcie zrealizowanych badań w pracy doktorskiej. Pozytywnie oceniono szeroki zakres tematyczny analizowanych publikacji w celu odniesienia uzyskanych wyników badań własnych do już wykonanych w uznanych ośrodkach naukowych.

Układ pracy został opracowany prawidłowo, co ułatwiło ocenę i analizę uzyskanych rezultatów. Uwagę zwraca staranność redakcyjna pracy, w tym ilustracje i diagramy oraz poprawność językowa. W szczególności opracowano przegląd literatury z podsumowaniem, szczegółową prezentację i omówienie wyników badań oraz ich dyskusję i wnioski. Obszerny materiał eksperymentalny stanowiący rezultaty pracy poddany został przez Doktoranta dyskusji, stanowiącej podstawę do opracowania wniosków oraz potwierdzenia przyjętej tezy pracy i osiągnięcie założonych celów. Stwierdzam, że sposób opracowania wyników badań, zrealizowanych z zastosowaniem prawidłowo dobranych metod badawczych, świadczy o dobrym przygotowaniu do samodzielnej pracy eksperymentalnej i naukowej. Na uwagę zasługuje kompleksowe podejście do rozwiązania postawionych problemów naukowych, w szczególności analiza charakterystyk materiałowych dotyczących mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz ich zmian w warunkach symulujących środowisko użytkowania. Istotny jest aspekt praktyczny uzyskanych wyników, w postaci analiz umożliwiających ocenę zachowania się konstrukcji w ekstremalnych warunkach użytkowania. Ten aspekt rozprawy jest szczególnie istotny z punktu widzenia potencjalnego zastosowania materiału.



Zaplanowany i zrealizowany zakres eksperymentów i badań oraz dobrane metody były adekwatne do postawionego problemu badawczego. W szczególności wykonano badania mikrostruktury z zastosowaniem mikroskopii świetlnej, skaningowej mikroskopii elektronowej i transmisyjnej mikroskopii elektronowej co jest szczególnie istotne w analizie przemian fazowych, w tym zachodzących w wyniku odkształcenia plastycznego w szerokim zakresie szybkości odkształcenia. Zastosowane metody badań i techniki pomiarowe pozwalają na kompleksową ocenę morfologii mikrostruktury, a w szczególności charakterystykę fazową ilościową i jakościową oraz właściwości mechaniczne w próbie rozciągania ze zróżnicowaną szybkością odkształcenia.

Na podstawie przedstawionej analizy wyników badań i osiągniętych rezultatów można stwierdzić, że zaplanowany cel pracy został osiągnięty, a postawiona hipoteza w założonym zakresie merytorycznym udowodniona. Do najistotniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczyć można:

- określenie wpływu składu chemicznego (zawartości Mn) na skład fazowy uzyskany w wyniku zastosowanego procesu technologicznego wytwarzania (obróbka termomechaniczna) dla dwóch gatunków stali – stan wyjściowy materiału do badań,
- charakterystyka ilościowa i jakościowa składników strukturalnych i fazowych, w szczególności martenzytu powstałego z austenitu szczątkowego w rezultacie odkształcenia plastycznego w szerokim zakresie szybkości odkształcenia (testy rozciągania statycznego oraz z szybkościami 250, 500 i 1000 s<sup>-1</sup>),
- wyznaczenie właściwości mechanicznych badanych gatunków stali wielofazowych w szerokim zakresie szybkości odkształcenia oraz korelacja uzyskanych wyników pomiarów ze składem fazowym w aspekcie zastosowań wyrobów wytwarzanych z tych gatunków,
- opanowanie zaawansowanych metod badań i interpretacja uzyskanych wyników, w szczególności analizy mikrostruktury z zastosowaniem SEM-EBSD, TEM (obserwacje w jasnym i ciemnym polu widzenia, mikrodyfrakcja).

Osiągnięte rezultaty oraz zdobyte doświadczenie Doktoranta stanowią podstawy do rozwoju w obszarze projektowania i wytwarzania materiałów, metod badań i interpretacji wyników obserwacji mikrostruktury oraz pomiarów właściwości mechanicznych i korelacji ww. cech materiału.

Opiniowana rozprawa zawiera fragmenty, wymagające dyskusji i dodatkowych wyjaśnień. Autor stosuje skróty myślowe i/lub sformułowania wymagające zdefiniowania. Poniżej przedstawiono te uwagi, sugestie i komentarze, które z punktu widzenia tematyki pracy są istotne i wymagają uściślenia.

**Komentarze zaznaczone pogrubioną czcionką wymagają w szczególności dyskusji merytorycznej i odniesienia się do nich Doktoranta.**

#### **Komentarz 1**

Str. 71 Tablica - Skład chemiczny materiału badań

Badane stale zawierały duże zawartości tlenu (40 ppm) a gatunek 3Mn także wysoką zawartość siarki (0,014% masy).

Czy w ocenie czystości metalurgicznej stali stwierdzono występowanie tlenków z uwagi na wysokie zawartości Si i Al oraz siarczków (np. MnS) ?

#### **Komentarz 2**

Str. 71 Stosowano homogenizację przed walcowaniem wstępnym – 1200°C/3 godziny.



Jaki był cel tej obróbki cieplnej ? Czy tego rodzaju procesy są stosowane w przemysłowych warunkach wytwarzania wyrobów z badanych gatunków stali ?

### **Komentarz 3**

Str. 76 Obszar obserwacji znajdował się w odległości ok. 2 mm od przelomu próbki.

Proszę o uzasadnienie wyboru miejsca badania mikrostruktury próbek po rozciąganiu ? Czy analizowano rozkład naprężenia i odkształcenia w obszarze zerwania próbki oraz potencjalne miejsca lokalizacji odkształcenia w zastosowanym sposobie rozciągania (np. z punktu widzenia geometrii próbki i sposobu obciążenia) ?

### **Komentarz 4**

Str. 84 Stwierdzone po odkształceniu próbek ze stali w gatunku 5Mn (rys. 82, 83, 84) obszary z jasnymi wydłużonymi wydzieleniami występowały także w tym materiale po obróbce termomechanicznej (stan przed odkształceniem – rys. 73b).

Czy biorąc pod uwagę krótki czas procesu odkształcenia, na co w zwraca uwagę Doktorant, możliwe jest w takich warunkach odpuszczanie martenzytu ? Należy zwrócić uwagę, że w reakcji tworzenia węglików żelaza, dyfundują nie tylko atomy C ale także Fe (o znacząco niższym współczynniku dyfuzji).

Czy podczas obróbki termomechanicznej (w procesie wytwarzania materiału) istnieją warunki do odpuszczania martenzytu ?

### **Komentarz 5**

Str. 101 Stabilność cienkich warstw austenitu (film).

Z czego, poza usytuowaniem, wynika stabilność tej frakcji austenitu w warunkach odkształcenia plastycznego ? Proszę o komentarz dotyczący np. zawartości węgla w austenicie blokowym w porównaniu do listwowego lub inne różnice mające potencjalny wpływ na przemianę w martenzyt (fresh martensite) ?

### **Komentarz 6**

Str. 107 (rys. 103)

Dla obydwu badanych gatunków stali stwierdzono nieznaczny przyrost  $R_m$  ze wzrostem szybkości odkształcenia w zakresie  $250-1000 \text{ s}^{-1}$ . Wyniki wskazują, że niemal cały austenit szczątkowy (blokowy) ulega przemianie bez względu na szybkość odkształcenia w badanym zakresie.

Czy z punktu widzenia użytkowania konstrukcji w ekstremalnych warunkach, taka cecha materiału jest pozytywna ?

### **Komentarz 7**

Str. 112 Powstawanie adiabatycznych pasm ścinania (ASB-adiabatic shear bands) dla badanych gatunków stali jest ograniczone.

Czy skłonność materiału do powstawania pasm ścinania w warunkach odkształcenia dynamicznego stanowi pozytywną czy negatywną cechę w aspekcie zastosowań do konstrukcji absorberów energii ? Proszę o komentarz także w odniesieniu do tezy, że proces tworzenia ASB (lub innych pasm odkształcenia) wymaga dużego wydatku energetycznego, czyli ma udział w pochłanianiu energii ....

### **Komentarz 8**

Str. 117 Podczas rozciągania objętość materiału rośnie.

Proszę o wyjaśnienie tego sformułowania.

Ponadto proszę o wyjaśnienie że: cyt. „austenit szczątkowy przemienia się najłatwiej gdy poddawany jest rozciąganiu”. Należy pamiętać, że podczas rozciągania jednoosiowego stan naprężenia jest złożony i występują także naprężenia ściskające i ścinające.



## Komentarz 9

Str. 119 Wniosek nr 1

Proszę o wyjaśnienie mechanizmów wzrostu wytrzymałości podczas odkształcenia z szybkością  $250 \text{ s}^{-1}$  w wyniku działania (zachodzenia) procesów aktywowanych cieplnie np. zdrowienia i rekrytalizacji dynamicznej (jak stwierdzono w pracy) ?

### Skróty myślowe/usterki edycyjne

Str. 11. Rys. 8. Jako źródło informacji przedstawionych na rys. podano pracę magisterską. Tego rodzaju dane powinny posiadać inne materiały źródłowe (książka, artykuł recenzowany – np. uznanego w dziedzinie autora...)

Str. 17. Brak jednostki na osi OX rys. 12 (na osi OY jest)

Str. 21 (11 linia od góry) – powinno być “równe”

Str. 25. (9 linia od dołu) – powinno być rys. 20b

Str. 30 (10 linia od góry) – stwierdzenie “...wyższej od temperatury zahartowania.” To skrót myślowy. Jest temperatura austenitowania, Ms, Mf, .....itp.

Str. 41 brak jednostki na osi OY (rys. 40)

Str. 55 (4 linia od góry) powinno być “szybkości”

Str. 57 (7 linia od góry) stwierdzenie “dyslokacji las” – definicja (?)

Str. 57 (12 linia od dołu) ...jako całość powierzchni pod wykresem... Raczej jako “pole powierzchni pod wykresem” (wyznaczane np. za pomocą całkowania ....)

Str. 57 (7 linia od dołu) – powinno być “energia”

Str. 58 (6 linia od góry) - określenie w zakresie (do  $1080 \text{ s}^{-1}$ ) – powinno być ..od ...do ...

Str. 59 (7 linia od dołu) – powinno być “najwyższej”

Str. 75 (ostatnia linia) – ...długość odcinka pomiarowego wynosiła 14 mm (z rys. 77 wynika, że długość wynosiła 20 mm, chyba że uwzględniono promień krzywizny – wartość promienia nie jest podana na rys. )

Str. 84 (ostatnia linia) ... znajdujące się na powierzchni martenzytu... Wprawdzie obserwacje dotyczą powierzchni (zglądu/przekroju) ale należy pamiętać, że traktujemy materiały w przestrzeni trójwymiarowej. Określenie na powierzchni martenzytu nie jest zrozumiałe.

Str. 88 (10 linia od dołu) – powinno być “oddziaływania”

Str. 90 (14 linia od dołu) – powinno być “ziarn”

Str. 90 (ostatnia linia) – określenie “wytrzymałością struktury” – wytrzymałość (i struktura) to cechy materiału.

Str. 93 (11 linia od dołu) – powinno być “ podziarn”

Str. 97 **3.4.5** Wyniki transmisyjnej mikroskopii elektronowej – raczej powinno być np. Wyniki badań mikrostruktury z zastosowaniem transmisyjnego mikroskopu elektronowego

Str. 101 (podpis rys. 93 b)) – “obszar charakteryzujący się obszarami” (?)

Str. 101 (4 linia od dołu) – powinno być “oddziaływania”

Str. 101 (2 linia od dołu) – powinno być “ziarn”

Str. 103 (11 linia od dołu) – “Mechanizm pękania...” O mechanizmach pękania raczej mówi się w przypadku np. badania udarności. W próbach rozciągania powstają powierzchnie zerwania i typowe efekty towarzyszące rozdzieleniu tych powierzchni – podobnie określenie przelom jest kojarzone z próbą udarności (?)

Str. 108 (5 linia od dołu) – powinno być “wydłużenie”

Str. 107, 108 (rys. 103, 104) – brak jednostek na osi OX ( $\text{s}^{-1}$ )

Str. 113 (10 linia od dołu) – powinno być “wysoką gęstością dyslokacji” (nie “poziomem”)

Str. 115 (rys. 109) – brak wyjaśnień skrótów RD, ZD

Str. 119 – wniosek nr 3 – dwie kropki na końcu zdania

Str. 134. Poz. 171 – brak tytułu artykułu

Str. 138. (5 linia od góry) – powinno być „Część”



Podsumowując, stwierdzam że wskazane powyżej komentarze i uwagi o charakterze polemicznym i uzupełniającym oraz edytorskie nie zmieniają pozytywnej i wysokiej oceny pracy, która stanowi samodzielne opracowanie naukowe rozwiązujące postawione tezy. Przedstawione komentarze nie obniżają istotnie wartości naukowej zamieszczonych w rozprawie oryginalnych wyników badań, dotyczących perspektywicznych materiałów konstrukcyjnych. W mojej opinii Doktorant wykazał umiejętność rozwiązania problemu badawczego w szerokim kontekście zakresu działań od szczegółowego rozpoznania stanu wiedzy, przez dobór materiału i metod badawczych oraz zaplanowanie i wykonanie eksperymentów, po wnikliwą analizę i dyskusję uzyskanych wyników oraz opracowanie wniosków. Na szczególną uwagę zwraca fakt podjęcia wieloaspektowego zagadnienia badawczo-aplikacyjnego. Zrealizowany w ramach pracy doktorskiej zakres badań, potwierdza dojrzałość Doktoranta do samodzielnego prowadzenia projektów badawczych, w tym o charakterze aplikacyjnym.

**Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach i naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dn. 14 marca 2003 r. Dz.U. z 2017 r. poz. 1789 i wnioskuję o dalsze procedowanie przewodu mgr. inż. Mateusza Morawca, w tym przyjęcie i dopuszczenie niniejszej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej.**

**Wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Morawca biorąc pod uwagę uzyskane oryginalne wyniki badań i analiz oraz szczegółową ich dyskusję i interpretację. Ponadto zwraca uwagę duża liczba publikacji w renomowanych czasopismach o wysokich wskaźnikach bibliograficznych (7 sztuk), w tym 6 artykułów których pierwszym autorem jest doktorant. Publikacje opracowano w latach 2017-22, a 6 z nich w latach 2020-22.**

