

Prof. dr. hab. inż. Jerzy Napiórkowski
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Wydział Nauk Technicznych
Katedra Pojazdów i Maszyn
ul. Michała Oczapowskiego 11
10-719 Olsztyn

e-mail: napj@uwm.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. Mateusz Dziubek**

**pt. Wykorzystanie mechanizmu rekrytalizacji typu PSN w procesie dwuetapowej
obróbki cieplnej stali X120Mn12 w celu zwiększenia odporności na zużywanie ścierne**

Promotor pracy: dr hab.inż Dominika Grygier, prof. PWr

Promotor pomocniczy: dr inż. Małgorzata Rutkowska-Gorczyca

Recenzja rozprawy doktorskiej została opracowana na podstawie uchwały nr 205/11/RDND07/2024-2028 z dnia 8 lipca 2025 r. Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej we Wrocławiu z w zw. z art.190 ust.2 i art.183 z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz.1571). Zaświadczenie nr W10/RDND07/148/2025.

1. OCENA DOBORU TEMATYKI ORAZ CELU I ZAKRESU PRACY

Wśród materiałów wykorzystywanych w budowie szeroko pojętych konstrukcji i maszyn niewiele jest stali charakteryzujących tak szerokimi działaniami innowacyjnymi poprawiającymi jej właściwości użytkowe. Jedną z nich jest stal Hadfielda, spotykana również pod nazwą stali wysokomanganowej – gatunek, który wciąż jest przedmiotem wielu badań poznawczych. Pierwsze praktyczne wykorzystanie tego typu stali sięga XIX wieku. W miarę upływu czasu poprzez zmianę procesów technologicznych wytwarzania dostosowywano jej właściwości do zachowania odpowiednich parametrów w warunkach eksploatacji. Nadal ta stal należy do najbardziej fascynujących i użytecznych tworów nie tylko metalurgii. Właściwości stali Hadfielda kształtują się odwrotnie od większości pozostałych stali stopowych – w stanie początkowym jest ona stosunkowo miękka, a dopiero pod wpływem obciążeń i uderzeń zaczyna się umacniać. Jest to stal austenityczna, charakteryzująca się wysoką zawartością manganu (11-14%) oraz węgla (około 1%). Kluczowym elementem tej stali jest jej zdolność do znacznego utwardzania się w wyniku obciążenia mechanicznego, co sprawia, że jest staje się ona odporna na uderzenia, a w miarę oddziaływania udarnościowych uderzeń zwiększa swoją odporność na zużycie ścierne. Mechanizm ten określa się mianem

umocnienia odkształceniowego lub dynamicznego. Gdy materiał zostaje poddany silnym naprężeniom, w jego strukturze tworzą się mikrobliźniaki – gęste defekty sieci krystalicznej, które skutecznie blokują ruch dyslokacji. W efekcie powierzchnia staje się twarda i odporna na ścieranie, a rdzeń zachowuje ciągliwość. Stal Hadfielda wykazuje dobre właściwości mechaniczne, takie jak wysoka uderzalność oraz zdolność do absorbowania energii w ekstremalnych warunkach eksploatacyjnych. pod wpływem obciążenia powodująca powstanie sieci mikrobliźniaków. To właśnie one są kluczem do zwiększonej jej trwałości. Im bardziej materiał jest poddawany obciążeniom – tym bardziej jego powierzchnia się wzmacnia. Za utrzymanie struktury austenitycznej po hartowaniu odpowiada mangan. Jego wysoka zawartość powoduje też zanik ferromagnetyzmu. Oprócz tego w składzie pojawiają się śladowe ilości krzemu, fosforu i siarki. Krzem poprawia odlewalność, a niskie zawartości fosforu i siarki ograniczają kruchość. W nowoczesnych wariantach dodaje się też niewielkie ilości chromu lub molibdenu, aby zwiększyć odporność na korozję i stabilność struktury. Wytop i obróbka stali Hadfielda wymagają dużej precyzji. Materiał ten jest bardzo wymagający – łatwo ulega segregacji pierwiastków, a jego odlewanie wiąże się z ryzykiem pęknięć cieplnych. Aby zachować jednorodność struktury, stosuje się piece elektryczne łukowe i procesy odgazowywania próżniowego. Pomimo opracowania i wdrożenia do praktyki zaawansowanych kompozytów, ceramiki i stali wysokostopowych stal Hadfielda znajduje nadal powszechne zastosowanie. Znajduje ona szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, głównie w przemyśle wydobywczym (szczęki kruszarek i stożki, części przesiewaczy i podajników), kolejnictwie (rozjazdy kolejowe), przemyśle budowlanym (okładziny młynów i mieszalników), przemyśle hutniczym (piece, mieszalniki), przemyśle energetycznym (turbiny wodne), przemyśle zbrojeniowym (poszycie pojazdów) oraz w przemyśle kosmicznym (materiały odporne na uderzenia). Właściwości tej stali są często inspiracją do projektowania nowych rozwiązań funkcjonalnych stali wykazujących właściwości umacniania powierzchniowego TRIP i TWIP (np. stal Creusabro, Armox), które również wykorzystują mechanizm mikrobliźniaków i umocnienia odkształceniowe. Paradoks stali Hadfielda polega na tym, że pomimo mniejszej twardości od stali konstrukcyjnej ulepszonej cieplnie, charakteryzuje się większą odpornością na zużycie ścierne w stanie wyjściowym. Wynika to z faktu że oddziaływanie na warstwę wierzchnią nie prowadzi do ubytku materiału, lecz do jego lokalnego umocnienia. W przypadku gdy naciski nie występują lub o słabym oddziaływaniu siłowym odporność na zużycie ścierne jest znacznie niższa od stali niskowęglowych martenzytycznych (np. podczas użytkowania w masie ścierniej piaszczystej). W tym przypadku nie zachodzą warunki do jej umocnienia.

W literaturze zagadnienia przedstawionej dość szczegółowo przez Doktoranta na przestrzeni czasu dokonywano wiele przedsięwzięć naukowo-aplikacyjnych celem dostosowania właściwości tej stali do warunków eksploatacji. Ukierunkowane one były przede wszystkim na:

- ✓ Wprowadzania nowych pierwiastków w procesie odlewania. Najczęściej zmiany dotyczyły zawartości mangan - węgiel oraz dodawanie takich pierwiastków jak Nb, Ti, czy N.
- ✓ Opracowywania nowych technologii obróbki cieplnej, między innymi uzyskanie jednorodnego austenitu.
- ✓ Generowania powstawaniem umocnień odkształceniowych, między innymi poprzez powstanie ruchliwości dyslokacji.

Zdolność dostosowania właściwości stali wysokomanganowej wiąże się z faktem unikalnych właściwości oraz możliwością zastosowania w wielu warunkach eksploatacji maszyn. Każda z tych modyfikacji zmieniała wzajemne relacje pomiędzy wytrzymałością, twardością, plastycznością i udarnością. Nowym podejściem do zmiany właściwości było opracowanie technologii dwuetapowej obróbki cieplnej umożliwiającej takie uzyskanie mikrostruktury aby poprawić właściwości mechaniczne stali. Dwa podstawowe etapy to izotermiczne wyrzanie i reaustynityzacja

Istotnym aspektem poruszonym przez Doktoranta jest analiza procesu kruszenia w aspekcie tribologicznym. Zwrócił On uwagę na synergię procesu zużywania elementów kruszarek. Zużycie ściernie i udarowościowe występują jednocześnie, a intensywność oddziaływania danego sposobu zużywania zależy od właściwości kruszonej skały i materiału z jakiego wykonano elementy kruszarek. Za literaturą Doktorant stwierdził, że podczas zużywania udarowościowego dochodzić może równocześnie do następujących elementarnych procesów zużywania takich jak:

- ✓ usuwanie tlenków;
- ✓ adhezji;
- ✓ zużycia ściernego;
- ✓ odkształcenia plastycznego;
- ✓ pęknięcia powierzchniowego lub zmęczeniowego;

Pierwsze cztery sposoby oraz część piątego są w zasadzie przypisane zagadnieniom tribologicznym z udziałem sił tarcia. Należy podkreślić że procesy te występują równoległe i bardzo trudne jest analizowanie ich oddzielnie. Bardzo słusznie Doktorant nazwał jeden z podrozdziałów jako zużywanie udarowościowo - ściernie (rozdział 1.2.3) uwzględniając

synergiczne oddziaływanie elementarnych procesów zużywania. Ważnym aspektem zagadnienia jest sformułowanie, że dobór odpowiedniego składu chemicznego i obróbki cieplnej umożliwia dostosowanie właściwości tribologicznych stali wysokomanganowych do charakteru obciążeń w danym węźle tarcia. Bardzo istotnym problemem zwiększenia odporności na zużycie jest zachowanie równowagi pomiędzy właściwościami materiału w aspekcie zużywania mechanicznego poprzez mikroskrawanie i bruzdowanie z oddziaływaniem udarowościowym. Ważnym stwierdzeniem jest stwierdzenie, że w obu przypadkach o intensywności zużywania odgrywa intensywne odkształcenie plastyczne w warstwie wierzchniej, wynikające ze wzrostu dyslokacji oraz bliźniakowania wywołane odkształceniami plastycznymi.

Jednym ze sposobów zwiększenia odporności na zużycie ścierne jest rekrytalizacja prowadząca do uzyskania rozdrobnionej jednorodnej mikrostruktury. Autor szczególną uwagę zwrócił na proces nukleacji nowych ziaren poprzez termiczną regenerację strefy zdeformowanej wokół dużych niezdeformowanych wydzieleni w stopach dwufazowych (PSN). W literaturze, jak dotychczas, dużo uwagi poświęca się mechanizmowi PSN w materiałach o prostej budowie mikrostrukturalnej (np. stopy aluminium, magnezu). Mechanizm PSN powiązany jest nie tylko z rozmiarem cząstek oraz stopniem odkształcenia, ale również skumulowania wydzieleni drugiej fazy w grupy. Doktorant szczegółowo opisał teorię powstawania nowych ziaren nukleacji opracowaną przez Humphreysa. W następnych rozdziałach słusznie dość często odnosił się do tej teorii rekrytalizacji.

Genezą podjęcia przed Doktoranta tematu były spostrzeżenia z wyników badań w rzeczywistej eksploatacji okładzin kruszarek szczękowych i stożkowych w przemyśle wydobywczym. Metodyka badań eksploatacyjnych obejmowała :

- ✓ pomiar zmian geometrii współpracujących okładzin w kruszarce szczękowej;
- ✓ pomiar zmian natężenia pobieranego prądu przez kruszarkę;
- ✓ badania laboratoryjne materiału surowca uzyskanego po pierwszym i drugim stopniu kruszenia.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono intensywne zużywanie ścierne szczęk kruszących wykonanych ze stali wysokomanganowej, w szczególności zębów, co spowodowało pogorszenie właściwości kruszonego surowca oraz zwiększenie natężenia prądu niezbędnego do realizacji procesu technologicznego. Konkluzją z przeprowadzonych badań było stwierdzenie, że istnieje konieczność dalszego ulepszania właściwości ściernych stosowanych stali wysokomanganowych szczególnie w przypadku stosunkowo słabego oddziaływania udarowościowego. Godne podkreślenia jest opracowanie tabeli 2.2, w której

zestawiono podstawową literaturą opisującą zarówno problematykę stosowania stali wysokomanganowej jak i propozycje nowych technologii prowadzących do poprawienia jej właściwości.

Recenzowana praca doktorska mgr. inż. Mateusza Dziubka wypełnia zidentyfikowaną lukę badawczo-technologiczną dotyczącą opracowania procesu takiej obróbki cieplnej aby dla przedstawionego materiału zwiększyć w opisanych sytuacjach eksploatacyjnych zwiększyć ich odporność na zużycie ścierne.

Doktorant postawił nowatorski problem do rozwiązania, opracowania nowej dwuetapowej obróbki cieplnej stali wysokomanganowej z wykorzystaniem PSN oraz wykazania ilościowego związku pomiędzy parametrami zastosowanej obróbki cieplnej a relacjami pomiędzy jej podstawowymi właściwościami eksploatacyjnymi.

Biorąc pod uwagę fakt, że użytkownicy stali i staliw manganowych oczekują odpornych na zużycie ścierne, a zarazem energooszczędnych i utrzymujących nominalne parametry procesu technologicznego w zakresie dokładności rozdrabniania, podjęcie przez Autora rozprawy doktorskiej takiego tematu pracy jest w pełni uzasadnione. Temat jest trafiony pod względem naukowym, ponieważ w aktualnym stanie wiedzy brakuje wiedzy z zakresu wpływu mechanizmu rekrytalizacji PSN podczas dwuetapowej obróbki cieplnej stali X120MN12 na jej właściwości zużyciowe. W literaturze brak jest informacji o właściwościach zużyciowych stali wysokomanganowej poddanej dwuetapowej obróbce cieplnej. Zaprezentowane podejście do problematyki kształtowania właściwości tego typu stali jest oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego, gdyż:

- ✓ oceniono właściwości stali w stanie dostarczenia podczas badań eksploatacyjnych jak i laboratoryjnych;
- ✓ opracowano parametry dwuetapowej obróbki cieplnej z 10 wariantami temperatury obejmującej izotermiczne wygrzewanie oraz ponową reaustenityzację poprzez uruchomienie mechanizmu stymulacji cząstkami (PSN);
- ✓ przeprowadzono badania porównawcze właściwości obrabianej stali będącej przedmiotem badań w zakresie oceny mikrostruktury, pomiarów twardości, składu chemicznego i odporności na zużycie;
- ✓ opracowanie zasad doboru parametrów obróbki z punktu widzenia właściwości przeciwzużyciowych stali.

Cel pracy został zdefiniowany następująco::

- ✓ *opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja dwuetapowego procesu obróbki cieplnej stali wysokomanganowej X120Mn12, obejmującej izotermiczne wyżarzanie i ponowną reaustenityzację*

Z przedstawionego tekstu można wyszczególnić jeszcze jeden cel, a mianowicie:

- ✓ *Zamierzeniem pracy była ocena wpływu zmian mikrostrukturalnych, powstałych w wyniku zastosowanej obróbki cieplnej, na właściwości mechaniczne i tribologiczne stali wysokomanganowej w warunkach zużywania ściernego.*

Do realizacji postawionego celu dodatkowo Autor sformułował tezę, która brzmi :

Zastosowanie dwuetapowej obróbki cieplnej stali wysokomanganowej X120Mn12- obejmującej izotermiczne wygrzewanie oraz ponowną reaustenityzację – umożliwia skuteczne uruchomienie mechanizmu rekrytalizacji stymulowanej cząstkami (PSN), prowadząc do istotnego rozdrobnienia struktury. W efekcie uzyskuje się wyraźną poprawę właściwości mechanicznych, w szczególności zwiększenie odporności na zużywanie ściernie oraz poprawę uderzalności, czyniąc ją efektywną w zastosowaniach przemysłowych na elementy robocze kruszarek.

Na podstawie założonego celu pracy Doktorant sformułował pięć zadań do realizacji.

Znamienne jest, że w rozdziale cel i teza pracy postawił dwie hipotezy statystyczne:

Hipoteza zerowa: Proponowana obróbka cieplna nie zmienia odporności na zużywanie ściernie stali Hadfielda.

Hipoteza alternatywna : Proponowana obróbka cieplna znacznie poprawia odporność na zużywanie ściernie stali Hadfielda.

Zakres pracy został poprawnie dobrany do celu rozprawy oraz odpowiada jej tytułowi. Prowadzenie prac badawczo-analitycznych w przedstawionym zakresie umożliwia uzupełnianie stanu wiedzy o jeszcze nieznane lub słabo rozpoznane zagadnienia, czego w ramach pracy naukowo-badawczej oraz rozprawy doktorskiej podjął się mgr inż. Mateusz Dziubek. Tytuł rozprawy doktorskiej jednoznacznie oddaje jej tematykę, która jest aktualna, a materiał w niej przedstawiony jest wartościowy i oryginalny.

Praca wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynieria mechaniczna w zakresie opracowania innowacyjnego procesu technologicznego poprzez zastosowanie dwuetapowej obróbki cieplnej z wykorzystaniem procesu PSN celem poprawienia właściwości użytkowych stali wysokomanganowych na przykładzie X120Mn12 (powszechnie znanej jako Hadfielda).

Dla jasności i jednoznaczności przeprowadzonych rozważań przedstawiam uwagi oraz pytania, które nasunęły się podczas lektury omawiania prezentowanych zagadnień rozprawy doktorskiej. Uwagi te powinny zostać przeanalizowane oraz ewentualnie znaleźć odzwierciedlenie w przyszłych opracowaniach naukowo-badawczych z udziałem doktoranta.

Uwagi dyskusyjne i krytyczne

Idea pracy zaprezentowana przez Doktoranta jest wyrazista. Jasno sformułowane są problemy badawcze do zrealizowania. Jednak sposób wyartykułowania celu i tezy w pracy budzi wiele wątpliwości.

- ✓ Autor niefortunnie sformułował tezę pracy, a biorąc pod uwagę oryginalność pracy powinna być sformułowana przede wszystkim hipoteza. Hipoteza badawcza to przypuszczenie lub prognoza dotycząca badanego zjawiska, która wymaga empirycznego sprawdzenia. Jest punktem wyjścia badań i podlega testowaniu – może zostać potwierdzona lub odrzucona w toku analizy naukowej. Natomiast teza została już udowodniona i może być tylko potwierdzona. Ponadto zamiast trybu oznajmującego powinien być tryb przypuszczający. Czym się różni postawiona teza od celu pracy?
- ✓ W zakończeniu rozdziału 3 pojawia się pojęcie problemu badawczego, który wcześniej nie został zdefiniowany. Moim zdaniem nie było by problemu z tezą czy hipotezą gdyby autor to wszystko ograniczył do scharakteryzowania problemu badawczego. W naukach technicznych jest niezmiernie trudno prawidłowo sformułować te pojęcia.
- ✓ W tym też rozdziale (nr 3) Autor sformułował dwie hipotezy statystyczne. Nie są to jednak hipotezy statystyczne. Formuluje się inaczej. Trudno też znaleźć w tekście odniesienie do nich. Moim zdaniem są one zbędne, a ewentualnie opisane powinny być w metodyce badań.
- ✓ Niezrozumiały jest także cel pracy. Czy to jest jedno zdanie, czy fragment tekstu? Ile zdefiniowano celów pracy? W dalszej kolejności Autor używa sformułowania głównych celów eksperymentu. Można to było zaprezentować mniej zawile.
- ✓ Podrozdział 1.2 nazwano „Tribologia procesów kruszenia”. Powstaje pytanie jak Autor rozumie słowo Tribologia ? Tribologia jest nauką i obejmuje triadę pojęć tarcie, zużywanie, smarowanie. Dwóch pozostałych aspektów Autor w pracy nie poruszał. W tym też podrozdziale znajdują się błędnie podpunkty opisujące zużywanie udarowościowe i udarowościowo-ściernie. Przypisano ich przebieg procesom tribologicznym.
- ✓ Czy mikropęknięcie może być elementarnym procesem zużywania ściernego. Zapewne Autor miał na uwadze wyrwania zmęczeniowe warstwy wierzchniej ?
- ✓ Co Autor rozumie pod pojęciami efektywność eksploatacyjna, efektywność kruszenia grafitu ? Czy nie lepiej było nazwać to jako skuteczność, sprawność, itd. Efektywność jest bardzo szerokim pojęciem i jest stosunkiem nakładów otrzymanych do włożonych (np. kosztów, czasu).
- ✓ Rys.2.1 Metodyka nie może być podpisem pod rysunkiem.

2. OCENA STRUKTURY PRACY

Przedstawiona do recenzji praca liczy 158 stron, w tym strona tytułowa, podziękowania, dwie strony spisu treści, wykaz pojęć i skrótów oraz cztery strony streszczenia w języku polskim i angielskim. Zasadnicza część pracy obejmuje 120 stron. Uzupełniają ją pięciostronowy wykaz rysunków, jednostronowy wykaz tabel, jedenastostronowy wykaz 205 pozycji literatury, aneks obejmujący 9 stron przedstawiający rysunki ilustrujące morfologię dla różnych stanów stali X120Mn12.

Rozprawa doktorska składa się z siedmiu głównych rozdziałów. Najważniejsze merytorycznie dla pracy to rozdziały 4, 5, 6 i 7, w których Doktorant przedstawia metodykę badań własnych, uzyskane wyniki i ich analizę.

Nie jestem przekonany do kolejności rozdziałów i podrozdziałów. Swoje uwagi zawarłem poniżej. Praca napisana jest na dość dobrym poziomie językowym z nielicznymi błędami pojęciowymi oraz skrótami branżowymi. Szata graficzna pracy została prawidłowo przygotowana i obejmuje liczne ilustracje, rysunki, fotografie oraz tabele i wykresy, wyraźnie podnoszące walory poznawcze pracy. Należy szczególnie podkreślić szeroki materiał graficzny dokumentujący sposób postępowania i uzyskane wyniki, szczególnie rysunki 4.2 i 6.1.

Uwagi dyskusyjne i krytyczne

- ✓ Wykaz pojęć i skrótów istotnie ułatwia czytanie i analizę pracy, tylko dlatego nie wprowadzono wszystkich pojęć np. SFE ? Czemu miały służyć podanie danych o wielu sławnych badaczach, którzy nic nie wnieśli do rozwoju stali będącej przedmiotem pracy.
- ✓ Uważam za błędne używanie w pracy rozdziałów o tych samych nazwach np. Wprowadzenie, Metodyka badań.
- ✓ Nazwa rozdziału 2 'Tło badań' trochę nie trafione. Wystarczyło by nazwać ten punkt „Uzasadnienie.....”.
- ✓ Autor ma tendencję przed każdym rozdziałem streszczać jego zawartość np. Wprowadzenie, Tło badań, Wyniki badań. Jest to zbyteczne i wprowadza bałagan podczas analizy tekstu. Pomijam aspekt formalny zasad stosowania podpunktów. W przypadku rozdziału 3 pierwsze zdanie to już jest wniosek. Nie za bardzo rozumiem o co chodziło Autorowi?
- ✓ Dlaczego zastosowano podwójną numerację stron, cyfry rzymskie (najprawdopodobniej) i arabskie? Jakie znaczenie w pracy mają puste kartki iii – iv oraz xi -xii ?
- ✓ Stosowanie języka żargonowego np. jest napędzany dążeniem do wzmocnienia, badania dowodzą, badanie poboru prądu, żywotność wykładzin, praca przechodzi.

- ✓ Wątpliwości budzi podpis po rysunkiem 1.2. „Schematyczne grafiki.....”. Bo nie są to schematy, a także grafiki w ujęciu technicznym.
- ✓ Jakie były przesłanki do podwójnej numeracji wniosków 1-7 dla celów poznawczych i 1-5 dla użytkowych ?

3. OCENA CZĘŚCI MERYTORYCZNEJ ROZPRAWY

Ocena aktualnego stanu wiedzy

Aktualny stan wiedzy zamieszczono w rozdziale pierwszym, w którym Autor przedstawił szeroki materiał dokumentacyjny dotyczący problemu jaki zamierzał rozwiązać w swojej dysertacji. Do najważniejszych aspektów przedstawionego aktualnego stanu wiedzy można zaliczyć:

- ✓ Charakterystykę właściwości stali i staliw wysokomanganowych wraz z historią ich modyfikacji i aplikacyjnego zastosowania.
- ✓ Charakterystykę aspektów zużywania tribologicznego podczas kruszenia surowca.
- ✓ Opis procesów zużywania udarnościowego.
- ✓ Opis synergii procesów zużywania udarnościowego i ściernego.
- ✓ Charakterystykę rekrytalizacji wraz z mechanizmem nukleacji nowych ziaren (PSN)

Sposób i formę przedstawienia aktualnego stanu zagadnienia należy uznać za poprawny. Zawarte informacje istotnie wprowadzają, w aspekcie teoretycznym i aplikacyjnym do zagadnień podejmowanych w rozdziałach opisujących badania własne. Na uwagę zasługuje szczegółowy opis parametrów użytkowych stali wysokomanganowej wraz z potencjalnymi możliwościami sterowania jest właściwościami użytkowymi. Szczególnie podkreślić należy opracowanie chronologiczne, przedstawione tabelarycznie, badań związanych z ulepszaniem właściwości przedmiotowej stali. Autor wykazał się wiedzą zarówno z zakresu odlewnictwa, materiałoznawstwa oraz oceny właściwości warstw wierzchnich. Zawarty w tym rozdziale opis stanowi bardzo dobre wprowadzenie do przedmiotu podjętych w rozprawie badań. W podsumowaniu autor stwierdził, że dotychczasowe próby ulepszania stali wysokomanganowej nie zapewniają dobrej odporności na zużycie ściernie w przypadku stosunkowo niskich oddziaływań udarnościowych. Powyższe stwierdzenie stanowiło inspirację Doktoranta do dalszego ulepszania właściwości stali poprzez zastosowanie obróbki cieplnej z wykorzystaniem mechanizmu PSV.

Autor przedstawił w pracy 205 pozycji literatury. Uszeregowano ją według kolejności powoływania się. Uważam że jest to liczba dość imponująca. Przedstawiona ona została w przystępny sposób graficzny. Autor bardzo głęboko sięgnął do historii rozwoju właściwości stali manganowej powołując się aż na 7 publikacji wynalazcy stali Hadfielda z lat 1884-1903

i 63 publikacje z ubiegłego wieku. Zabrakło mi zestawienie powoływanych w pracy norm. Podsumowując, uważam, że przegląd aktualnego stanu wiedzy jest przygotowany poprawnie i dobrze wprowadza w czytelnika w tematykę rozprawy doktorskiej.

Ocena zastosowanej metodyki badawczej

Metodykę badań przedstawiono w 4 punkcie pracy. W pierwszym z nich opisano materiał będący przedmiotem badań. Była to blacha o grubości 4 mm ze stali wysokomanganowej o gatunku zbliżonym do X120Mn12, co odpowiada składowi chemicznemu staliwa Hadfielda. Następnie scharakteryzowano plan badań. Ograniczono się w nim tylko do przebiegu zabiegów cieplnych tj. izotermicznego wygrzewania oraz re Austenitizacji stali przy 10 wartościach temperatury. Opisano także stanowisko badawcze w którym przygotowywano próbki. Zasadniczą metodykę badań przedstawiono bardzo umiejętnie na graficznym diagramie. Wyszczególniono zakres badań laboratoryjnych, który obejmował:

- ✓ analizę składu chemicznego metodą optycznej spektroskopii emisyjnej;
- ✓ analizę mikrostruktury przy użyciu mikroskopii świetlnej;
- ✓ obserwacje morfologii wykorzystując skaningową mikroskopię elektronową SEM/EDS/EBSD;
- ✓ identyfikację faz z wykorzystaniem mikroskopii elektronowej TEM/SEAD;
- ✓ pomiary twardości metodą VICKERSA;
- ✓ pomiary umocnienia powierzchniowego metodą Vickersa i Brinella;
- ✓ pomiary udarności wykonanej młotem Charpy'iego;
- ✓ pomiary odporności na zużywanie ściernie w obecności luźnego ścierniwa;
- ✓ obserwacje propagacji pęknięć in-situ z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego

Autor zastosował rozbudowane procedury badawcze. Zastosowane techniki badawcze oraz wykorzystana aparatura charakteryzują się wysokim poziomem naukowym i gwarantowały wysoki standard merytoryczny uzyskanych wyników. Doktorant nie ustrzegł się jednak kilku błędów, których wyjaśnienie moim zdaniem podniesie poziom merytoryczny pracy.

Uwagi dyskusyjne i krytyczne

- ✓ Dlaczego w tabeli 4.1 przedstawiono wymagania składu chemicznego wynikające z literatury, a nie charakterystykę własnego materiału. W tym podpunkcie powinna być dokładna charakterystyka własnego materiału badawczego.
- ✓ Dlaczego przyjęto grubość blachy 4 mm, skoro w przypadku badania udarności ta grubość próbek wynosiła 5 mm?
- ✓ Brakuje mi liczności badanych próbek. Np. ile próbek badano w danym wariancie temperaturowym podczas oceny intensywności zużywania ?

- ✓ Zbyt pochopne jest stwierdzenie, że norma GOST 23.208-79 jest odpowiednikiem normy ASTM G65-16:2021. Pomijając zróżnicowaną kinematykę ścieranego elementu istotne jest stosowanie zróżnicowanych ścierniw.
- ✓ Punkt 4.2 w zasadzie nie jest planem badań i dla przejrzystości pracy bym dołączył go do punktu 4.3 w którym przedstawiono ilustrację planu badań.
- ✓ Punkt 4.3.3. i 4.3.4 noszą nazwę zastosowanych procedur badawczych nie zaś co jest nimi oceniane, tak jak w przypadku pozostałych 7 punktów.

4. OCENA CENA UZYSKANYCH WYNIKÓW BADAŃ I DYSKUSJI

Wyniki badań własnych obejmują 61 stron i są zawarte w trzech głównych punktach pracy tj. 5, 6 i 7. W pierwszej części wyników przedstawiono dane uzyskane z badań dotyczących efektów dwuetapowej obróbki cieplnej. Scharakteryzowano właściwości materiału po izotermicznym wygrzewaniu oraz wielostopniowej reustenitizacji. Przedstawiono graficznie rozkłady pierwiastków po wygrzewaniu i zbadano ilościowy skład pierwiastków warstwy wierzchniej. Otrzymane wyniki udokumentowano uzyskanymi wartościami twardości na poziomie 435 HV30. W dalszej kolejności przedstawiono efekt graficzny i wartości twardości stali poddanej przesyceniu w zakresie temperatur 650-1100°C co 50 °C. Analiza uzyskanych wyników badań charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym. Uzupełnia on wiedzę z zakresu zmian właściwości stali wysokomanganowej poddanej dwustopniowej obróbce cieplnej. Jest to oryginalny fragment pracy rozszerzający wiedzę o właściwościach stali wysokomanganowej w tym charakterystyce niezbędnych warunków do zachodzenia zjawiska nukleacji nowych ziaren w otoczeniu dużych niedeformowalnych wydzielen.

W kolejnych podrozdziałach zawarto wyniki badań twardości, udarności i ocenę odporności na zużycie ścierne. Rezultatem tych badań było wskazanie najlepszego zakresu temperatur reustenitizacji w aspekcie oczekiwanych zmian mikrostrukturalnych poprawiających właściwości mechaniczne stali. Wykazano, że właściwości zużyciowe stali wysokomanganowej nie są zależne od jej twardości a przede wszystkim od właściwości mikrostrukturalnych. Uzyskane wyniki uzupełniono analizą przebiegu propagacji pęknięć pod wpływem obciążeń rozciągających.

W podsumowaniu pracy przedstawiono syntetycznie wyniki oraz interpretację uzyskanych wyników badań. Przedstawiono odniesienie uzyskanych wyników do danych zawartych w literaturze. Przeanalizowano warunki w jakich stanach obróbki cieplnej stali wysokomanganowej dochodzi do nukleacji nowych ziaren. W badanej stali X120Mn12 drobne, rozproszone wydzielienia oraz lokalne skupiska większych cząstek pełniły funkcję efektywnych

ośrodków zarodkowania. Wykazano, że proces zarodkowania zachodzi nie tylko w otoczeniu pojedynczych cząstek nowej fazy, lecz również w obszarach ich nagromadzenia. Skupiska węglików o rozmiarach typowych dla aktywnego obszaru PSN stanowiły efektywne centra nuklacji, co jest zgodne z mechanizmem zaproponowanym przez Humphreysa. W podsumowaniu wykazano, na podstawie uzyskanych wyników, dalsze kierunki badań. Są to spostrzeżenia bardzo słuszne.

Wnioski zawarte zostały w osobnym, siódmym rozdziale pracy. Dotyczą one najważniejszych zależności uzyskanych podczas badań empirycznych. Sformułowane wnioski mają duże znaczenie poznawcze i użytkowe, gdyż wyznaczono przebieg procesu technologicznego umożliwiającego zapewnienie badanej wysokomanganowej stali polepszonych właściwości ściernych, jak i odporności na uderzenia. Należy także podkreślić, że uzyskane wyniki w pełni potwierdziły założenia poczynione w tezie i celu pracy. Godnym potwierdzenia jest fakt, że Doktorant uzyskane wyniki odnosił do danych literaturowych, co umożliwiło mu umiejscowienie uzyskanych wyników w świetle badań światowych.

Istotnym stwierdzeniem Autora doktoratu jest sformułowanie, że na wzrost odporności na zużycie ścierne większy wpływ ma drobnoziarnista struktura niż uzyskana twardość warstwy wierzchniej. Największym dokonaniem Doktoranta jest wskazanie w procesie technologicznym obróbki stali wysokomanganowej przedziału wartości temperatur obróbki dla zapewnienia aktywności mechanizmu rekrytalizacji indukowanej cząstkami PSN. Informacje te uzupełniają istotnie wiedzę z zakresu dostosowania właściwości stali wysokomanganowej do warunków jej eksploatacji. Podsumowując, uważam, że założone w rozprawie doktorskiej cele badań zostały osiągnięte, a problemy badawcze potwierdzone.

PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania zagadnienia naukowego, Autor rozprawy doktorskiej wykazał się szeroką wiedzą z zakresu uprawianej dyscypliny naukowej oraz umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Wobec spełnienia wymogów artykułu art.190 ust.2 i art.183 z dnia 20 lipca 2018 r. -Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r.poz.574 z późn. zmianami) formułuję wniosek o dopuszczenie mgr inż. Mateusza Dziubka do publicznej obrony opiniowanej pracy jako pracy doktorskiej reprezentującej dyscyplinę Inżynieria Mechaniczna