



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

AGH UNIVERSITY OF SCIENCE  
AND TECHNOLOGY

Prof. dr hab. inż. Piotr Bała

Kraków, dn. 02.06.2023

Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej  
Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Al. A. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Adama Skowronka**

pt. „**Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing**”

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej Pani Prof. dr hab. inż. Marii Sozańskiej, w związku z uchwałą Rady Dyscypliny z dnia 28 marca 2023 roku

### 1. **Ogólna charakterystyka pracy**

Praca doktorska Pana mgr. inż. Adama Skowronka, napisana pod kierownictwem Prof. dra hab. inż. Adama Grajcara, dotyczy badań zaawansowanych stali wielofazowych o wysokiej wytrzymałości, a ściślej niskowęglowej średniomanganowej stali. Praca ma układ klasyczny i składa się z 2 zasadniczych części (przeglądu literatury oraz części badawczej). Praca napisana jest w języku angielskim, liczy 152 strony, składa się z 7 rozdziałów, spisu literatury oraz streszczenia w języku angielskim i polskim oraz dodatkowo poszerzonego streszczenia

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 5.06.2023  
RDJMa. RMF. 512.4.2023  
nr ..... zał. ....

w języku polskim. W przeglądzie literaturowym Autor wprowadza czytelnika w zagadnienie materiałów używanych na karoserie w przemyśle motoryzacyjnym, a następnie w tematykę wysokowytrzymałych stali średniomanganowych, jasno określając brakujące w literaturze informacje. Wstęp napisany i opracowany jest na bardzo dobrym poziomie i oparty jest na odpowiednim przeglądzie literaturowym, który zawiera głównie specjalistyczne czasopisma (większość z ostatnich 10 lat) oraz kilka podręczników akademickich. Świadczy to o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w temacie wysokowytrzymałych stali i atrakcyjności wybranego tematu. Po przeglądzie literaturowym Autor przedstawił tezę oraz materiał i zakres badań. Następnie wyniki badań wraz z ich dyskusją. Doktorant przedstawił obliczenia termodynamiczne i opis przemian fazowych w badanej stali. Obliczenia termodynamiczne zweryfikował przy użyciu badań dylatometrycznych. Następnie Autor opisał wpływ temperatury, a potem czasu wyżarzania międzykrytycznego na mikrostrukturę i właściwości badanej stali, używając przy tym zaawansowanych technik badawczych, m. in. mikroskopii elektronowej transmisyjnej czy dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych (EBSD). Warto podkreślić, że każdy rozdział w części badań własnych kończy się syntezą najważniejszych wyników, co świadczy o dużej dojrzałości naukowej Doktoranta. Wyniki podsumowano w rozdziale podsumowanie i wnioski, w którym zawarto 9 wniosków szczegółowych. Praca napisana jest poprawnym technicznym językiem angielskim i jest bardzo dobrze opracowana pod względem graficznym. Cały układ pracy jest właściwy i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskich. Warto podkreślić, że odpowiednio (wzorcowo) zbalansowano przegląd literatury z częścią badawczą pracy. Czytając ją nie ma się uczucia zbędnych informacji czy rysunków, ani też brakujących informacji.

## **2. Ocena doboru tematyki i zakresu pracy**

Szerokie spektrum przedsiębiorstw i organizacji zaangażowanych w projektowanie, wytwarzanie, montaż, marketing i sprzedaż samochodów wchodzi w skład szerokopojętego przemysłu motoryzacyjnego. Wg przychodów jest to jedna z najważniejszych gałęzi przemysłu. W Unii Europejskiej co 15 osoba zatrudniona jest bezpośrednio lub pośrednio w branży motoryzacyjnej (około 12,7 mln osób). Najwięcej osób zatrudnionych w tym sektorze jest w Niemczech, Francji i Polsce. W 2019 r. w Polsce w ww. branży pracowało 224 tys. osób (dane Eurostatu).



Niewątpliwie rozwój materiałów, w tym stali czy stopów lekkich był stymulowany m. in. przez przemysł automotive. W ostatnich latach prace prowadzone były w trzech głównych nurtach, nierzadko stojących ze sobą w pewnej pozornej sprzeczności, jak na przykład obniżenie masy własnej samochodu w celu ograniczenia emisji CO<sub>2</sub>, czy podniesienie bezpieczeństwa pasażerów. Dlatego trwają poszukiwania kompromisu pomiędzy wytrzymałością oraz plastycznością materiału, a jego ekonomicznym wytwarzaniem. I tak, w ostatnich latach obserwowany jest rozwój technologii metalurgicznych, przeróbki plastycznej, zaawansowanych technologii obróbki cieplnej i powrót do analizy wpływu roli podstawowych pierwiastków stopowych w stopach żelaza, co przekłada się na podniesienie właściwości wytrzymałościowych i plastycznych stali. Daje to realne możliwości zysku na wielu płaszczyznach jak choćby bezpieczeństwa, emisji CO<sub>2</sub> czy kosztów. Wśród intensywnie badanych materiałów są zaawansowane wysokowytrzymałe stale (z ang. Advanced high strength steels – AHSS). Ich rozwój jest podyktowany ograniczoną możliwością podnoszenia wytrzymałości przez umocnienie roztworowe, dyslokacyjne i wydzieleniowe, gdyż wraz ze wzrostem wytrzymałości obniżeniu ulegają właściwości plastyczne stali. Dlatego od lat prowadzone są prace nad stalami przynajmniej dwufazowymi. Ich właściwości zależą od rodzaju faz, w tym w szczególności od ich udziału objętościowego, morfologii, wielkości i rozmieszczenia ziaren. Zazwyczaj stale wielofazowe składają się z ferrytu, bainitu, odpuszczonego martenzytu, świeżego martenzytu, austenitu szczątkowego. Mogą być zimno lub gorącowałcowane i dodatkowo pokrywane. Najczęściej charakteryzują się niską wartością ilorazu  $R_e/R_m$ , dużym umocnieniem odkształceniowym, względnie dużym wydłużeniem równomiernym i dużą absorpcją energii podczas odkształcenia w warunkach dynamicznych. Jest to szeroka gama wysokowytrzymałych stali 1-ej i 2-ej generacji takich jak stale DP, TRIP, TWIP i TRIPLEX oraz 3-ej generacji jak bainityczne TRIPY, stale Q&P i średniomanganowe stale. I to właśnie tym ostatnim Doktorant poświęcił swoją uwagę. Dlaczego? Powód jest prosty w stalach tych obniżono w odniesieniu do wysokomanganowych AHSS zawartość manganu, co pozwoliło obniżyć koszty wytwarzania i ograniczyć segregację pierwiastków stopowych. Jest jednak jeszcze sporo niewiadomych, których poznanie jest kluczowe z punktu widzenia komercyjnego stosowania na masową skalę. W większości z dotychczas opisanych w literaturze badań dotyczących średniomanganowych AHSS poświęcono stalom zimnowalcowanym. W swoich badaniach Doktorant wykorzystał stal po termomechanicznym walcowaniu skupiając się na udziale objętościowym, morfologii, wielkości ziaren i stabilności



austenitu uzyskanego w wyniku wyżarzania w zakresie międzykrytycznym (tj. pomiędzy  $Ac_{1s}$  a  $Ac_3$ ). Odpowiednio zaprojektowana i przeprowadzona obróbka cieplna daje możliwość uzyskania unikatowej kombinacji właściwości wytrzymałościowych i plastycznych. Uważam, że problematyka naukowa podjęta w opiniowanej rozprawie doktorskiej Pana Adama Skowronka jest aktualna, z punktu widzenia naukowego niezwykle ciekawa, technologicznego istotna, a ekonomicznego potrzebna. W oparciu o studia literaturowe i wyniki własnych badań doświadczalnych sformułowano tezę pracy: „Właściwe dobranie udziału i stabilności austenitu szczątkowego poprzez optymalizację temperatury i wyżarzania międzykrytycznego pozwala na uzyskanie stopniowej, indukowanej odkształceniem przemiany martenzytycznej kontrolowanej wielkością ziarna, a tym samym poprawę plastyczności stali, szczególnie w porównaniu ze stalą obrabianą termomechanicznie”. Teza jest poprawna, precyzyjnie określona i co bardzo ważne adekwatna do całości przedstawionych wyników. Aby udowodnić ww. tezę określono jasno cel badawczy, którym było wyjaśnienie zjawisk mikrostrukturalnych zachodzących podczas wyżarzania międzykrytycznego walcowanej na gorąco stali średniomanganowej z dodatkiem aluminium w zależności od zastosowanych parametrów temperaturowo-czasowych obróbki cieplnej oraz optymalizacja tych parametrów, skutkująca poprawą plastyczności badanej stali. Jest to modelowe podejście do zaplanowania i wykonania badań w ramach pracy doktorskiej. Praca ta ma bowiem charakter badań podstawowych jak i stosowanych, łącząc to co najistotniejsze dla inżyniera materiałowego, tj. zrozumienie i opisanie relacji pomiędzy technologią wytwarzania, składem chemicznym, mikrostrukturą i makroskopowymi właściwościami materiału.

### **3. Ocena merytoryczna pracy**

Zaplanowane badania oraz interpretacja wyników wykonane są bardzo starannie, z dbałością o szczegóły, z głęboką dyskusją wyników dobrze ułożonych w przeglądzie literatury i jako całość stanowią bardzo dobre opracowanie. Praca wykonana i napisana jest w sposób przemyślany, począwszy od wprowadzenia, które bardzo dobrze przedstawia zagadnienia stali stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym w tym AHSS, przez metodologię, gdzie w sposób prosty i przejrzysty Doktorant uzasadnia wybór stali do badań, obliczenia termodynamiczne wraz z weryfikacją przy użyciu badań dylatometrycznych oraz charakterystykę uzyskanych mikrostruktur i właściwości, na syntezie i dyskusji wyników badań własnych kończąc.



Doktorant jednoznacznie osiągnął postawiony cel badawczy i udowodnił postawioną tezę. W wyniku wyżarzania międzykrytycznego w badanej stali osiągnął wyższe właściwości mechaniczne niż w stanie po przeróbce termomechanicznej, przy czym jest to wynik świadomego sterowania mikrostrukturą przez odpowiednie zastosowane parametry obróbki cieplnej. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam

1. wyznaczenie parametrów obróbki cieplnej pozwalającej na uzyskanie znacznego udziału objętościowego austenitu szczątkowego o dużej stabilności, zapewniającego uzyskanie wysokich parametrów wytrzymałościowych przy zachowaniu dobrej plastyczności;
2. wykazanie, że lokalna stabilność austenitu szczątkowego w badanej stali jest kontrolowana m. in. przez zakres wielkości jego ziaren.
3. uzyskanie materiału (średniomanganowej AHSS) o silnym potencjale aplikacyjny m. in. w przemyśle motoryzacyjnym.

Czytając tak komplementarną pracę zawsze nasuwa się pokusa zgłębienia tematu. Uważna jej lektura nasuwa pewne spostrzeżenia natury polemicznej:

#### **Uwagi ogólne i dyskusyjne:**

1. Temperatury krytyczne w stalach wyznacza się zgodnie ze stosowną normą w zakresie szybkości nagrzewania  $180 \div 300^\circ\text{C}/\text{godz}$ . W pracy zastosowano szybkość nagrzewania  $3^\circ\text{C}/\text{s}$ , która daleka jest od warunków równowagowych. Miało to wpływ na określenie m. in. temperatury  $Ac_{1s}$ , której wartość jest zawyżona w odniesieniu do warunków równowagowych. W konsekwencji wpłynęło to na interpretacje wyników dla wytrzymania w temperaturze  $640^\circ\text{C}$ , wg Autora niższej od  $Ac_{1s}$  i nie mógł powstać austenit. Wydaje się jednak, że mogła powstać niewielka ilość austenitu bo efekt dylatacyjny na to wskazuje. Nasycony węglem i manganem austenit posiada niższą od temperatury otoczenia temperaturę  $Ms$ , dlatego nie obserwowano efektów dylatacyjnych od przemiany martenzytycznej podczas chłodzenia. Udział objętościowy austenitu był mały więc nie wykryto go podczas badań weryfikacyjnych przy użyciu XRD. Dla podparcia tej tezy polecam pracę autorstwa Bała P. i inni.: The analysis of forging of X20Cr13 steel in austenite-ferrite transformation temperature range. Steel Research International, 2012.

2. Stale manganowe cechuje z reguły duża pasmowość, wynikająca z segregacji podczas krystalizacji i następnej przeróbki plastycznej. Czy w stanie wyjściowym do badań była ona widoczna?
3. Mając do dyspozycji wyniki uzyskane przy użyciu TEM oraz EBSD można było pokusić się o opis zależności krystalograficznych pomiędzy poszczególnymi fazami.
4. Nie podano w pracy czy badana stal w stanie wyjściowym cechowała się teksturą i czy ewentualnie materiał po obróbce posiadał uprzywilejowaną orientację krystalograficzną.
5. Jednym z częstych trudności przy badaniu przy użyciu EBSD stali wielofazowych z udziałem martenzytu jest poprawne indeksowanie na granicach listw martenzytu, szczególnie jak między listwami martenzytu znajduje się austenit stabilizowany mechanicznie, czy nie było z tym problemów?

#### **Uwagi edycyjne:**

1. Jeśli przygotowuje się poszerzone streszczenie i zamieszcza się w nim wnioski to warto moim zdaniem zamieścić wszystkie lub ewentualnie uzasadnić czy też podkreślić dlaczego wymieniono tylko niektóre z nich.
2. W rozprawie w odniesieniu do mikrostruktury używane są *microstructure and structure*. Należało wybrać jeden sposób nazewnictwa.

Ww. uwagi nie wpływają w żadnym stopniu na przejrzystość i odbiór pracy. Moim zdaniem Pan mgr inż. Adam Skowronek bardzo dobrze poradził sobie z rozwiązaniem sformułowanego problemu badawczego i potwierdził postawioną tezę osiągając wartościowe wyniki.

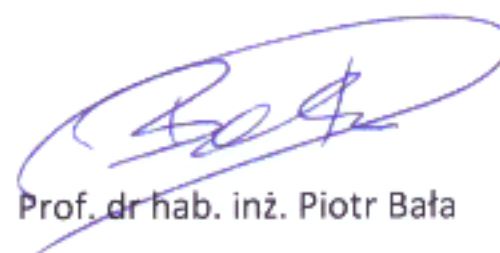
#### **4. Wniosek końcowy**

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa jest bardzo dobrze ulokowana w obecnym stanie wiedzy, dotyczy aktualnego zagadnienia, została zaplanowana, wykonana oraz napisana na bardzo dobrym poziomie naukowym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Doktorant wykazał, że posiada szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie wytwarzania i charakterystyki zaawansowanych średniomanganowych wysokowytrzymałych stali, zaplanował i przeprowadził obszerne badania, których wyniki zinterpretował i opisał



prawidłowo, z wielką dbałością o szczegóły, wyciągając logiczne i przydatne wnioski. Nie mam zatem żadnych wątpliwości, że potrafi samodzielnie prowadzić badania naukowe.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską Pana mgr. inż. Adama Skowronka pt.: „Improvement of the ductility of high-strength medium-Mn steels through intercritical annealing” stwierdzam, że spełnia ona wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późniejszymi zmianami) oraz wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ponadto biorąc pod uwagę jej wysoki poziom naukowy oraz osiągnięte rezultaty wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej o jej wyróżnienie. Jest to bowiem praca, którą należy docenić i promować, bo w pełni na to zasługuje.



Prof. dr hab. inż. Piotr Bała