

dr hab. inż. Lidia Gałda, prof. uczelni
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
ul. Powstańców Warszawy 8
35-959 Rzeszów
tel. +48 17 8561904
e-mail: lgktmiop@prz.edu.pl

Rzeszów, 14.08.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Martyny Zemlik

pt. Wpływ obróbki cieplnej stali Hardox i ich połączeń spawanych na odporność na zużywanie ścierne i obciążenia balistyczne

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

Promotor pomocniczy: dr inż. Łukasz Konat

Podstawą recenzji jest pismo o numerze W10/RDND07/53/2023 Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 5. czerwca 2023 roku.

1. Uzasadnienie podjętego problemu

Niskostopowe stale martenzytyczne z dodatkiem boru, znane pod nazwą Hardox, to materiały o wyjątkowych właściwościach użytkowych. Stale te charakteryzują się wysoką twardością i wytrzymałością, co powoduje, że znajdują zastosowanie w produkcji wysoko obciążonych elementów maszyn i urządzeń, takich jak łyżki koparek, płyty wykładzinowe kruszarek i podajników czy młoty stosowane w recyklingu materiałów. Ze względu na bardzo dobre właściwości mechaniczne i zadowalające właściwości plastyczne niskostopowe stale martenzytyczne z borem są również stosowane na osłony balistyczne, zapewniające bezpieczeństwo chronionym obiektom. Problem z niskostopowymi stalami martenzytycznymi z dodatkiem boru pojawia się w przypadku konieczności wykonania połączenia spawanego w celu zbudowania bardziej złożonej konstrukcji. Procesy spawania wysokowytrzymałych stali powodują istotne obniżenie właściwości mechanicznych i tribologicznych zarówno w strefie materiału stopiwa, jak również w strefie wpływu ciepła. Powyższy problem może zostać rozwiązany przez zastosowanie odpowiednich procesów spawania oraz przeprowadzenie obróbki cieplnej przywracającej w zadowalającym stopniu parametry materiału sprzed procesu spawania. Przedstawiona do oceny praca doktorska dotyczy w głównej mierze analizy materiałowej wybranych stali Hardox, poddanych zróżnicowanym procesom technologicznym i testowanym przy założonych obciążeniach i w warunkach odzwierciedlających środowisko

pracy. Jako że niskostopowe stale martenzytyczne z dodatkiem boru w sposób szczególnie dedykowane są na elementy maszyn, od których wymaga się wyjątkowo wysokiej odporności na zużywanie ścierne, Autorka pracy poświęciła dużo uwagi na ten aspekt badań, ale słusznie rozpatrzono również inne ważne właściwości i charakterystyki badanych materiałów. Już biorąc pod uwagę same badania tribologiczne wąskie analizowanie czynników, potencjalnie wpływających na zużywanie par ciernych, może prowadzić do niepełnych, czasem nawet niewłaściwych wniosków, dlatego w tribologii w sposób wyjątkowy oczekiwane jest podejście wieloaspektowe w analizie przyczyn danego stanu. Dodatkowo, co również podkreśla Autorka pracy, często jest tak, że poprawiając jakość pewnych cech materiału, pogarszamy inne właściwości, a otrzymany kompromis charakterystyk materiału jest niezadowalający.

Biorąc pod uwagę wymienione powyżej argumenty, tj. trudna do utrzymania mikrostruktura martenzytyczna stali Hardox po procesie spawania, zapewniająca wysokie właściwości wytrzymałościowe materiału, karb mikrostrukturalny w strefie wpływu ciepła, złożoność zjawisk i mechanizmów podczas procesów technologicznych i brak kompleksowego opracowania dotyczącego opisu zjawisk zachodzących podczas realizowanych procesów i optymalnego rozwiązania problemu obniżonej jakości połączeń spawanych stali Hardox, należy uznać, że podjęcie przez Autorkę rozprawy doktorskiej tematu pracy jest w pełni uzasadnione. Temat jest trafny pod względem naukowym, ponieważ wciąż nie wyjaśniono w pełni wpływu zmian mikrostrukturalnych po dodatkowej obróbce cieplnej następującej po procesie spawania stali Hardox na właściwości mechaniczne, odporność na zużycie ścierne i obciążenia dynamiczne. Biorąc pod uwagę utylitarny wynik pracy, należy zauważyć, że opracowana technologia obróbki cieplnej połączeń spawanych wybranych stali Hardox może być wykorzystana do podwyższenia właściwości mechanicznych tych stali, umożliwiając ich stosowanie do budowy bardziej skomplikowanych konstrukcji.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji praca obejmuje 310 stron, w tym strona tytułowa, podziękowania, 3 strony spisu treści, 1 strona z wykazem pojęć, streszczenia w języku polskim (2 strony) i angielskim (2 strony), 259 stron zajmuje część zasadnicza pracy, 3 strony zajmuje wykaz tabel, 25 stron zajmuje wykaz ilustracji, na 8 stronach przedstawiono spis literatury (185 pozycji). Rozprawa doktorska składa się z 9 głównych rozdziałów. Kolejność rozdziałów i podrozdziałów oraz podział treści tworzą spójny i logiczny układ pracy.

Pierwszy rozdział pracy stanowi **Wprowadzenie**, w którym Autorka dokonuje przeglądu literatury, omawiając zagadnienia związane z realizowaną pracą. W tej części pracy Pani mgr inż. Martyna Zemlik charakteryzuje procesy zużywania tribologicznego, zwracając szczególną uwagę na zużywanie ścierne, któremu poddawane będą badane stale Hardox. W jednym z podrozdziałów przedstawiono wybrane rodzaje materiałów stosowanych na elementy narażone na zwiększone zużywanie ścierne w wyniku poddawania ich złożonym obciążeniom i pracującym w ciężkich warunkach. Autorka akcentuje istotność takich właściwości materiałów jak wysoka twardość, odporność na obciążenia dynamiczne, kruche pękanie, ale także odporność korozyjną i możliwość stosowania wybranych technologii łączenia i obróbki cieplnej. W przeglądzie literatury zwrócono uwagę na aspekty strukturalne niskostopowych stali martenzytycznych i obecność mikrododatku boru, który wpływa na znaczne podwyższenie hartowności. Autorka odniosła się też do wyników badań dotyczących analizy wpływu rozmiaru ziarna byłego austenitu na zużywanie ścierne wysokowytrzymałych stali

martenzytycznych. Omówiono również możliwości zastosowania procesu spawania dla wybranych stali i konsekwencje stosowania takiego procesu łączenia elementów stali Hardox w postaci obniżenia wskaźników wytrzymałościowych i odporności na zużywanie ściernie w wyniku zmian strukturalnych wywołanych przegrzaniem materiału rodzimego i dendrytyczną krystalizacją materiału stopiwa.

Przegląd literatury jest obszerny, ale jednocześnie zakres pracy, przyjęty i zrealizowany przez Panią mgr inż. Martynę Zemlik, był znaczny i wymagający szerokiej wiedzy, dlatego tak wyczerpujący przegląd literatury jest uzasadniony.

W następnym rozdziale Pani mgr inż. Martyna Zemlik zdefiniowała **tezę** pracy, w której twierdzi, że odpowiednio przeprowadzona obróbka cieplna po procesie spawania niskostopowych stali martenzytycznych z borem umożliwi uzyskanie drobnolistwowej mikrostruktury martenzytycznej w materiale stopiwa i w strefie wpływu ciepła a to w konsekwencji zapewni podwyższenie właściwości mechanicznych, odporności na zużywanie ściernie i obciążenia dynamiczne połączeń spawanych stali Hardox. Zdefiniowane zostały również **cele** pracy z wyróżnieniem celu naukowego i aplikacyjnego oraz przedstawiono zadania, które umożliwią osiągnięcie wyznaczonych celów.

Kolejno Autorka pracy doktorskiej jako rozdział 3 przedstawia **Przedmiot badań**, w którym podano charakterystyki wybranych materiałów, tj. stali Hardox 450, Hardox 500, Hardox 600 i Hardox Extreme, parametry procesu spawania stali Hardox 450 i Hardox Extreme oraz parametry wszystkich realizowanych procesów obróbki cieplnej.

Następny rozdział pracy stanowi opis **metod badawczych** wykorzystanych do realizacji postawionych celów. Na uwagę zasługuje fakt, iż Pani mgr inż. Martyna Zemlik zastosowała sporo różnych metod i technik badań, w tym m.in. analiza składu chemicznego metodą spektralną, badania z zastosowaniem mikroskopii świetlnej oraz mikroskopii elektronowej, badania wielkości ziarna byłego austenitu, badania twardości, badania wytrzymałościowe (statyczna próba rozciągania), badania udarności za pomocą młota Charpy'ego, badania odporności na zużywanie ściernie w obecności luźnego ścierniwa oraz różnych typów głebowej masy ścierniej i badania balistyczne z zastosowaniem zróżnicowanej amunicji.

Począwszy od rozdziału piątego Autorka pracy prezentuje i omawia otrzymane **wyniki badań własnych**. Badania i analiza wyników dotyczyły szeregu właściwości wybranych stali Hardox przed poddaniem ich procesom spawania i obróbki cieplnej po spawaniu i stanowiły pewnego rodzaju wstęp do dalszych badań zasadniczych a także pewien poziom odniesienia. Przeanalizowano skład chemiczny i mikrostrukturę stali Hardox 500, Hardox 600 i Hardox Extreme w stanie dostarczenia. W wyniku obserwacji oceniono, że materiały charakteryzowały się przede wszystkim jednorodną budową drobnolistwowego martenzytu odpuszczania o średnim rozmiarze ziarna byłego austenitu w zakresie od 12,2 μm (Hardox 600) do 19,5 μm (Hardox Extreme). Badania odporności na zużywanie w głebowej masie ścierniej zrealizowano dla trzech wybranych stali Hardox i z zastosowaniem trzech różnych typów gleby: lekkiej, średniej i ciężkiej. Najmniejszy ubytek masy otrzymano przy zastosowaniu gleby lekkiej i stali Hardox 600, charakteryzującej się najmniejszym średnim rozmiarem ziarna byłego austenitu spośród badanych materiałów. W oparciu o obrazy powierzchni i mikrostrukturę przekrojów próbek poddanych badaniom zużywania określono mechanizmy zużycia. Wybrane stali poddano również badaniom tarcia w celu określenia odporności na zużywanie w obecności luźnego ścierniwa. W tym przypadku zidentyfikowano liniową korelację między twardością

materiału a jego odpornością na zużywanie. Ze względu na zauważone różnice w zależnościach odporności zużywania od twardości Autorka postanowiła rozszerzyć badania o bardziej szczegółową analizę wpływu wielkości ziarna byłego austenitu na wybrane właściwości stali Hardox Extreme. Pani mgr inż. Martyna Zemlik wskazała, że zabiegi obróbki cieplnej w zakresie 850 - 900°C zapewniają utrzymanie drobnoziarnistej struktury, natomiast zwiększanie temperatury austenitowania powoduje rozrost ziarna do średniej wielkości równej w przybliżeniu 125 μm ($T_A = 1200^\circ\text{C}$). Dodatkowo Autorka przeprowadziła badania właściwości stali Hardox Extreme przy zróżnicowanej temperaturze odpuszczania w zakresie 100 - 250°C, wykazując, że wraz ze wzrostem temperatury odpuszczania zwiększa się ubytek masowy badanego materiału.

Rozdział szósty rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Martynty Zemlik to najbardziej obszerny rozdział części badawczej pracy. Wyniki badań połączeń spawanych stali Hardox 450 i Hadrox Extreme w stanie bezpośrednio po spawaniu jednoznacznie potwierdzają negatywny wpływ procesów cieplnych zachodzących w czasie spawania na makro- i mikrostrukturę materiału spoiny i wokół niej. Znajduje to odzwierciedlenie w obniżeniu niektórych istotnych właściwości połączeń spawanych, w tym wyraźne zmniejszenie twardości, wytrzymałości na rozciąganie czy wskaźników udarnościowych, szczególnie w obniżonych temperaturach, tj. przy obniżeniu bariery temperaturowej do -40°C , wartości udarności stopiwa kształtowały się poniżej progu kruchości (na poziomie $KCV_{-40} = 17 \text{ J/cm}^2$). Połączenia spawane poddane próbie udarnościowej w ujemnej temperaturze charakteryzowały się budową przelomu łupliwego z wyraźnymi: rzeźbą rzek i granicami ziaren. W swojej rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Martyna Zemlik zaproponowała szereg zabiegów cieplnych, mających na celu poprawę właściwości mechanicznych oraz użytkowych połączeń spawanych stali Hardox i podjęła próbę rozpoznania mechanizmów towarzyszących zachodzącym zmianom. W odniesieniu do połączeń spawanych stali Hardox 450 zastosowano normalizowanie w temperaturze 900°C oraz hartowanie z temperatur w zakresie $900\text{-}1200^\circ\text{C}$, co pozwoliło na istotne podwyższenie parametrów mechanicznych: R_m , A i Z oraz twardości materiału stopiwa i strefy wpływu ciepła. Udarność, badana w temperaturze $+20^\circ\text{C}$ połączenia spawanego po obróbce cieplnej z temperaturą austenitowania w przedziale temperatur $900\text{-}1200^\circ\text{C}$, pozostawała powyżej progu kruchości ($110\text{-}51 \text{ J/cm}^2$), natomiast w obniżonej temperaturze udarność kształtowała się w pobliżu progu kruchości lub znacznie poniżej wartości 35 J/cm^2 . Wyniki badań udarności połączenia spawanego stali Hardox 450 dobrze korelują z wynikami analizy wielkości ziarna byłego austenitu, gdzie hartowanie z wyższych temperatur tj. 1100°C i 1200°C powodowało znaczący wzrost średniej wielkości ziarna do ponad $28 \mu\text{m}$ i prawie $42 \mu\text{m}$ ($900\text{-}1000^\circ\text{C}$ ok. $22 \mu\text{m}$) – materiał rodzimy. W materiale stopiwa w wyniku procesów hartowania z zakresu temperatur $900 - 1200^\circ\text{C}$ średnia wielkość ziarna zwiększa się do około $33 - 34 \mu\text{m}$ i są one mniejsze niż wielkości ziarna w materiale rodzimym po odpowiadających procesach obróbki cieplnej. Największym zróżnicowaniem wielkości ziarna charakteryzuje się obszar z linią wtopienia, ale średnia wielkość ziarna w strefie linii wtopienia jest porównywalna do tej w obszarze materiału stopiwa. Ważnym aspektem zastosowanych zabiegów cieplnych złączy spawanych jest przeprowadzone przez Autorkę badanie odporności na zużywanie zmodyfikowanych materiałów. W wyniku realizacji badań zużywania w obecności luźnego ścierniwa złącze spawane stali Hardox 450 po przeprowadzonej kompleksowej obróbce cieplnej odznaczało się istotnie mniejszym zużyciem w porównaniu do połączenia bezpośrednio po spawaniu. Podobnie korzystne rezultaty otrzymano w badaniach tribologicznych z zastosowaniem naturalnych mineralnych mas ściernych. Ubytek masowy

złącza w stanie obrobionym cieplnie przy zastosowaniu gleby średniej był o około 36% mniejszy w porównaniu do zużycia złącza bezpośrednio po spawaniu i o około 25% mniejszy niż materiału rodzimego. W glebie lekkiej zmniejszenie zużycia występowało w mniejszym zakresie.

Zastosowanie spawania w celu połączenia elementów ze stali Hardox Extreme również spowodowało pogorszenie właściwości mechanicznych i tribologicznych, i w tym przypadku Autorka rozprawy doktorskiej zaproponowała dedykowany kompleksowy schemat obróbki cieplnej. Pani mgr inż. Martyna Zemlik przeprowadziła badania wpływu niskiego odpuszczania, różnicując również wartości temperatury wyjściowej procesów hartowania (850°C, 900°C i 950°C), wygrzewanie realizowano przy dwóch różnych temperaturach tj. 100°C i 250°C. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że zastosowanie temperatury austenitowania równej 850°C i odpuszczania izotermicznego w temperaturze 250°C pozwala na uzyskanie zadowalających wskaźników mechanicznych, a także właściwości tribologicznych połączeń spawanych stali Hardox Extreme. Wytrzymałość na rozciąganie R_m wynosiła blisko 1500 MPa, udarność nie osiągnęła poziomu przejścia granicy kruchości zarówno w temperaturze +20°C, jak i -40°C.

Autorka w kolejnym rozdziale pracy doktorskiej zamieściła wyniki badań **odporności balistycznej połączeń spawanych** stali Hardox 450. Należy podkreślić, że stale Hardox ze względu na wyjątkowe właściwości znajdują zastosowanie m.in. na konstrukcje, od których wymagana jest wysoka odporność na obciążenia dynamiczne. Jak wynika z przedstawionych rezultatów pracy, połączenie spawane osłabia niektóre właściwości stali Hardox, co może stanowić znaczące ograniczenie zastosowania stali Hardox do bardziej złożonych konstrukcji. Rozwiązanie problemu zmniejszonej odporności na obciążenia balistyczne połączeń spawanych stali Hardox stanowi ważny aspekt aplikacyjny badanych stali Hardox. Pani mgr inż. Martyna Zemlik przeprowadziła szczegółową analizę powierzchni oraz mikrostruktury stref przypowierzchniowych złączy spawanych blach ze stali Hardox 450 po testach balistycznych z zastosowaniem amunicji pośredniej 7,62 x 39 mm nb. wz. 43 z poc. PS oraz amunicji karabinowej 7,62 x 54R mm nb. kb. ŁPS. W badaniach uwzględniono przedmiotową obróbkę cieplną, ale także zróżnicowaną grubość blach ze stali Hardox 450. W przypadku stosowania amunicji pośredniej 7,62 x 39 mm nb. wz. 43 z poc. PS złącze spawane zostaje przebite na tzw. korek zarówno dla blach o grubości 4 mm, jak i 5 mm. Dopiero po zastosowaniu obróbki cieplnej i grubości blach 5 mm ciągłość materiału złącza spawanego zostaje zachowana. Przy testach z użyciem amunicji karabinowej 7,62 x 54R mm nb. kb. ŁPS ciągłość materiału została zachowana przy grubości blach 8 mm i w stanie obrobionym cieplnie. W strefie przypowierzchniowej obserwowano odkształcenia plastyczne bloków martenzytu, licznie występujące pasma ścinania i częściowe stopienie pocisku.

W kolejnym rozdziale 8 Autorka rozprawy doktorskiej przedstawiła syntetyczne **Podsumowanie** dotyczące wyników badań własnych.

W następnym rozdziale Autorka przedstawiła **Wnioski**, dzieląc je na poznawcze i utylitarne.

Następnie zamieszczono **Wykaz tabel** oraz **Wykaz ilustracji**.

Praca kończy się spisem **bibliograficznym**, gdzie Autorka zamieściła 185 źródeł literatury w kolejności pojawiania się w treści rozprawy doktorskiej. Wśród wymienionych pozycji

znajdują się przede wszystkim książki renomowanych wydawnictw oraz recenzowane artykuły. Wiele artykułów jest w języku angielskim. Wymienione publikacje są aktualne oraz związane z tematyką pracy. Wśród publikacji są również artykuły, których współautorem jest Pani mgr inż. Martyna Zemlik.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Przestawiona do oceny praca doktorska stanowi obszerne i bardzo interesujące opracowanie dotyczące poprawy właściwości spawanych połączeń stali Hardox. Pani mgr inż. Martyna Zemlik istotnie poszerzyła zakres wiedzy z obszaru analizy zjawisk i mechanizmów zachodzących podczas procesu obróbki cieplnej połączeń spawanych niskostopowych stali martenzytycznych z dodatkiem boru, a uzyskane rezultaty pracy umożliwiły znaczące podniesienie jakości spawanych połączeń blach stali Hardox. Podjęcie takiej tematyki przez Autorkę rozprawy doktorskiej oceniam bardzo wysoko.

Treść rozprawy jest zgodna ze sformułowaniem tematem pracy, wszczętym w przewodzie doktorskim reprezentującym dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Pani mgr inż. Martyna Zemlik dokonała krytycznej analizy literatury, wyciągając słuszne wnioski, które pozwoliły na sformułowanie trafnej tezy pracy: *„Odpowiednio przeprowadzone zabiegi obróbki cieplnej po procesie spawania niskostopowych stali martenzytycznych z borem umożliwiają uzyskanie drobnolistwowej mikrostruktury martenzytycznej w materiale stopiwa i w strefie wpływu ciepła. Nastęstwem uzyskania takich struktur jest podwyższenie właściwości mechanicznych, a także odporności na zużywanie ścierne i obciążenia dynamiczne połączeń spawanych stali Hardox”*. W wyniku realizacji poszczególnych zadań teza pracy została udowodniona oraz poszczególne cele zostały w całości osiągnięte.

Mocną stroną rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Martyny Zemlik jest zastosowanie właściwych technik pomiarowych i metod badawczych wiele wnoszących do prawidłowej oceny i wnioskowania. Dodatkowo merytoryczna analiza oraz interpretacja wyników sprawia, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Martyny Zemlik stanowi zbiór nowych informacji istotnie poszerzających zakres wiedzy z obszaru badawczego rozprawy doktorskiej. Oprócz wymienionych wcześniej metod badawczych Autorka stosowała również wybrane metody z zakresu statystyki, wśród których należy wymienić metody oceny istotności wpływu zastosowanych sposobów obróbki na odporność na zużywanie w określonym środowisku (test Duncana).

Praca Pani mgr inż. Martyny Zemlik napisana jest bardzo starannie i poprawnym językiem. Występują jedynie drobne usterki edytorskie tzw. literówki (np. rys. 324 dotyczy krateru nr 3 a nie krateru nr 1) i przy tak dużej liczbie rysunków lepiej byłoby ponumerować je, uwzględniając numerację rozdziałów. Drobne uwagi edytorskie nie mają wpływu na wysoką wartość merytoryczną pracy Pani mgr inż. Martyny Zemlik.

Chciałabym dopytać Autorkę rozprawy doktorskiej czy, analizując obliczone wartości błędów pomiaru w postaci odchylenia standardowego, porównywano je do maksymalnego błędu charakteryzującego urządzenie, na którym realizowano badania.

Podsumowując ocenę rozprawy doktorskiej stwierdzam, że praca spełnia wymóg oryginalnego rozwiązania zagadnienia naukowego, Autorka rozprawy doktorskiej wykazała się szeroką ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu uprawianej dyscypliny naukowej oraz umiejętnościami samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

4. Wniosek końcowy

W oparciu o przeprowadzoną ocenę stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Martynty Zemlik pt. **Wpływ obróbki cieplnej stali Hardox i ich połączeń spawanych na odporność na zużywanie ściernie i obciążenia balistyczne** spełnia wymagania ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2022, poz. 574 z póź. zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.

Lidia Gajdo