

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; Tel.: +48 600 297 300

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Prochenki pt. „*Badanie stalowych połączeń spawanych laserowo w warunkach obciążenia dynamicznego*”, opracowana na podstawie pisma Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej z dnia 27.02.2023, (uchwała Rady nr 06/RDN IM/2023 z dn. 15.02.2023). Promotorem rozprawy jest Pan płk rez. dr hab. inż. Jacek Janiszewski, a promotorem pomocniczym Pani dr inż. Judyta Sienkiewicz.

Tematyka, zakres i teza pracy

Recenzowana praca została wykonana w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie pod opieką merytoryczną dr. hab. inż. Jacka Janiszewskiego oraz dr inż. Judyty Sienkiewicz. Tematyka pracy dotyczy jednego z priorytetowych kierunków rozwoju WAT, tj. obszaru projektowania, badań, aplikacji i użytkowania nowych materiałów i konstrukcji zapewniających bezpieczeństwo w warunkach wysokoenergetycznych oddziaływań uderzeniowych.

Dążenie do obniżenia masy pojazdów przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa biernego to wciąż silnie rozwijane obszary i duże wyzwanie badawczo-technologiczne. Rozwój gatunków stali oraz technologii spajania zapewniają stosowanie coraz lżejszych konstrukcji, w tym absorberów o wysokiej skuteczności ochronnej (zdolności do pochłaniania energii podczas zderzenia). Istotnym zagadnieniem w tej dziedzinie jest rozwój metod badań, szczególnie dotyczących oceny zachowania się materiału i następnie elementu wykonanego z tego materiału w warunkach symulujących rzeczywiste użytkowanie. W tym aspekcie przedmiotowa praca wykazuje wysoki potencjał badawczy, aplikacyjny i rozwojowy.

Osiągnięte rezultaty oraz zdobyte doświadczenie Doktoranta stanowią podstawy do rozwoju w obszarze projektowania i wytwarzania materiałów, konstrukcji, metod badań i interpretacji wyników obserwacji mikrostruktury, właściwości mechanicznych, w tym dynamicznych nowoczesnych gatunków stali spawanych laserowo.

Materiałem badań w pracy były innowacyjne gatunki stali, które są przeznaczone w przemyśle motoryzacyjnym, np. do wytwarzania elementów konstrukcji odpowiedzialnych za bezpieczeństwo w trakcie ekstremalnych sytuacji. Zarówno materiał jak i konstrukcja powinny spełnić szereg wymagań dotyczących właściwości użytkowych, w szczególności w warunkach oddziaływań dynamicznych. Istotnym zagadnieniem badawczym i technologicznym w pracy była ocena połączeń spawanych laserowo w testach z zastosowaniem miniaturowej prototypowej konstrukcji, poddanej badaniom z zastosowaniem pręta Hopkinsona. Ten aspekt pracy ma szczególną wartość z uwagi na podobieństwo do rzeczywistych warunków użytkowania, w zakresie materiału-gatunku stali, techniki spajania i przewidywanego stanu naprężenia i odkształcenia przy określonej szybkości obciążenia.

Zakres niniejszej pracy obejmował badania mikrostruktury, jakości połączeń spawanych laserowo oraz właściwości mechaniczne w testach statycznych i dynamicznych. W ramach realizacji pracy

opracowano unikatową metodę badań miniaturowych absorberów energii zawierających połączenia spawane, będące także przedmiotem szczegółowych analiz.

Celem pracy było wykazanie zasadności uzupełnienia zakresu badań statycznych właściwości mechanicznych złączy spawanych o testy zapewniające uzyskanie szybkości odkształcenia o wartościach 10^{-3} , 10^0 i 10^3 s^{-1} . Badaniom poddano 5 gatunków stali komercyjnych wysokowytrzymałych stosowanych do produkcji konstrukcji w przemyśle motoryzacyjnym. Materiał w stanie dostawy stanowiły blachy arkusze o grubości 2 mm, które spajano metodą spawania laserowego stosując dwie średnice wiązki 0,3 i 0,6 mm. Stosowano także podgrzewanie strefy spawanej przed i po spajaniu celem poprawy ciągliwości próbek połączenia lub absorbera.

Doktorant w rozdziale 2 zatytułowanym „Cel i zakres pracy” sformułował tezę, która brzmi: „standardowe metody oceny jakości połączeń spawanych są niewystarczające do oceny wytrzymałości konstrukcji z blach stalowych poddanych obciążeniom dynamicznym”. Tym samym Doktorant zaproponował uzupełnienie metod oceny właściwości mechanicznych połączenia spawanego o technikę dzielonego pręta Hopkinsona. Wskazał także cel naukowy jako poszukiwanie korelacji pomiędzy jakością procesu spawania laserowego cienkich blach ze stali o podwyższonej wytrzymałości a wytrzymałością dynamiczną połączenia spawanego, w tym na podstawie badań prototypowych miniaturowych absorberów.

Charakterystyka rozprawy

Praca ma tradycyjną formę i układ z wydzieloną częścią dotyczącą przeglądu literatury oraz opisem wyników badań własnych, ich analizą wraz z dyskusją, podsumowaniem i wnioskami. Rozprawa została podzielona na wprowadzenie, analizę literatury i rozdział 2 w którym sformułowano cel i tezę pracy oraz rozdział 3 dotyczący materiału badań i zastosowanych metod badawczych. Kolejne 3 rozdziały (nr 4, 5 i 6) dotyczą prezentacji wyników badań własnych i analizy otrzymanych wyników. Dyskusję wyników badań i wnioski przedstawiono w ostatnim rozdziale pracy zatytułowanym „Wnioski końcowe”. Sumarycznie praca zawiera 208 stron oraz 15 stronicowy Załącznik, 124 rysunki i 9 tablic. Wprowadzenie i analizę literatury opracowano na 62 stronach z materiałem ilustracyjnym w liczbie 25 rysunków. Na 20 stronach (26 rys. i 2 tablice) szczegółowo opisano materiał i zastosowane metody badawcze oraz techniki pomiarowe. Główne rozdziały dotyczące prezentacji i analiz wyników badań i pomiarów przedstawiono na 83 stronach (71 rysunków) a wnioski końcowe na 6 stronach. Na uwagę zasługuje uporządkowanie pracy z podziałem na stosowane materiały, techniki łączenia, przeprowadzone eksperymenty i rodzaj badań właściwości i mikrostruktury.

W przeglądzie literatury wskazano 123 pozycje, w tym 1 publikację autorstwa Doktoranta. Pierwszym autorem tej publikacji jest mgr inż. Paweł Prochenka. Publikację wydano w roku 2021 w czasopiśmie Materials o wysokim wskaźniku IF.

Układ pracy został opracowany prawidłowo, co ułatwia ocenę i analizę uzyskanych rezultatów, a jedyne zastrzeżenia dotyczą niektórych sformułowań, które wskazano w recenzji. Obszerny materiał eksperymentalny stanowiący rezultaty pracy poddany został przez Doktoranta dyskusji, stanowiącej podstawę do opracowania wniosków oraz potwierdzenia przyjętych tez pracy. Można stwierdzić, że sposób opracowania wyników badań, zrealizowanych z zastosowaniem szerokiej gamy metod badawczych, świadczy o dobrym przygotowaniu do samodzielnej pracy eksperymentalnej i naukowej. Na uwagę zasługuje fakt kompleksowego podejścia do rozwiązania postawionych problemów naukowych, w szczególności kompleksowa analiza charakterystyk materiałowych w zakresie mikrostruktury i właściwości mechanicznych oraz ich zmian w warunkach symulujących użytkowanie przedmiotowego wyrobu-absorbera. Istotny jest także aspekt dotyczący technologii spajania materiału, który analizowano w pracy, w celu wytypowania najkorzystniejszego wariantu do zastosowania przemysłowego.

Zaplanowany i zrealizowany zakres eksperymentów i badań oraz dobrane metody były adekwatne do postawionego problemu badawczego. W szczególności wykonano badania mikrostruktury złączy z zastosowaniem mikroskopii świetlnej, pomiary twardości oraz wyznaczono właściwości

mechaniczne w statycznej próbie rozciągania i metodą dzielonego pręta Hopkinsona. W ten sposób osiągnięto szeroki zakres szybkości odkształcenia, które potencjalnie mogą wystąpić w trakcie użytkowania przedmiotowej konstrukcji. Bardzo ważnym elementem pracy były badania miniaturowych absorberów kolumnowych, które z określonym podobieństwem w zakresie rodzaju materiału, konstrukcji, w tym połączenia spawanego, odzwierciedlają zachowanie się rzeczywistych absorberów w trakcie odkształcenia z dużymi szybkościami (do 10^3 s^{-1})

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 Autora pracy zaliczyć można:

- opracowanie i wdrożenie metodyki badań właściwości mechanicznych złącz spawanych laserowo w warunkach testu Hopkinsona na rozciąganie,
- określenie wpływu czynników technologicznych procesu spawania laserowego na reakcję mechaniczną złącz spawanych rozciąganych z różnymi szybkościami odkształcenia 10^{-3} ; 1 i 10^3 s^{-1} ,
- wykazanie różnic w zachowaniu się konstrukcji spawanych laserowo w postaci miniaturowych, kolumnowych absorberów energii mechanicznej, poddanych obciążeniom quasi-statycznym i dynamicznym.

W pracy przedstawiono także perspektywę i potrzeby dalszych badań w celu pełnej charakterystyki materiału, konstrukcji i połączeń spawanych laserowo. Badania te są w pełni uzasadnione i obejmują m.in. rozszerzenie zakresu temperatur testów, stosowanie zaawansowanych laserów wielomodowych, modyfikację układu pręta Hopkinsona oraz wpływ zmęczenia materiału na jego zdolność do pochłaniania energii uderowej.

Opiniowana rozprawa zawiera fragmenty, wymagające dyskusji i dodatkowych wyjaśnień. Autor stosuje skróty myślowe i/lub sformułowania wymagające zdefiniowania. Poniżej przedstawiono główne uwagi, sugestie i komentarze, które z punktu widzenia tematyki pracy są istotne i wymagają uściśleń. Proszę o odniesienie się Doktoranta i dyskusję nt. niżej przedstawionych komentarzy.

Komentarz 1. Str. 67

W tablicy 4 podano skład chemiczny badanych gatunków stali na podstawie certyfikatu producenta. Czy certyfikat producenta zawiera dane nt. właściwości mechanicznych wyznaczanych w statycznej próbie rozciągania ($R_e/R_{p0,2}$, R_{eH} , R_m , A , Z) oraz udurości i twardości w stanie dostawy. Tego rodzaju dane stanowiłyby uzupełnienie charakterystyki materiału w stanie dostawy i punkt odniesienia do wyników pomiarów uzyskanych w ramach pracy (np. w warunkach quasi-statycznych, twardości).

Komentarz 2. Str. 100

Rozkład twardości złącz dla gatunku stali S700MC wskazuje na wzrost twardości w SWC do ok. 350 HV, szczególnie w strefach przy powierzchniach blachy (wiązka 0,3 mm) i na całej grubości (wiązka 0,6 mm). Proszę o wyjaśnienie przyczyny osiągnięcia tak wysokiej twardości (uwzględniając skład chemiczny stali) podczas spawania laserowego ?

Str. 101 (stal S700MC)

Proszę o wyjaśnienie niższej wytrzymałości (1005 MPa) dla złącz spawanych wiązką 0,3 mm w porównaniu do złącz spawanych wiązką 0,6 mm (1060 MPa) ?

Proszę o wyjaśnienie mechanizmów tzw. *osłabienia odkształceniowego*, o którym Doktorant pisze, interpretując krzywe rozciągania złącz spawanych ze stali w gatunku S700MC ?

Komentarz 3. Str. 109, 125, 135 (rys. 64c, 79d, 87d) – dot. gatunków Docol 800DP, 1200DP, 1500DP

Rozkład twardości w obszarze spoiny dla złącz wygrzewanych po spawaniu, wskazuje na wyraźne różnice pomiędzy badanymi obszarami. Proszę o wyjaśnienie przyczyny różnic twardości, w tym dlaczego najniższą twardością charakteryzuje się obszar w środku grubości blachy ?

Komentarz 4. Str. 147

Cytat: „Większość próbek ze złączami spawanymi wykazała większe wydłużenie podczas testów prowadzonych w warunkach obciążenia dynamicznego niż quasi-statycznego” koniec cytatu.

Str. 150 (próbki ze złączami spawanymi)

Cytat: „...najwyższe wartości wydłużenia otrzymano na podstawie danych z testów w warunkach obciążenia dynamicznego” koniec cytatu

Proszę o wyjaśnienie przyczyn/podanie mechanizmów takiego zachowania się złącz ? (gatunek stali-mikrostruktura, metoda spawania, charakterystyczne cechy złącza-poszczególnych stref....)

Komentarz 5. Str. 162

Doktorant stwierdził, że przyczyną obniżenia wrażliwości mechanicznej (wpływ szybkości odkształcenia na wytrzymałość) w przypadku stali S700MC są dodatki stopowe takie jak: P, Mn oraz Si. Analizowany gatunek stali nie jest stałą stopową. Zawartość fosforu w większości gatunków stali powinna być jak najniższa. Z kolei Mn i Si w zawartościach stosowanych w tym gatunku nie są traktowane jako dodatki stopowe. Proszę o komentarz i wyjaśnienia dotyczące składu chemicznego stali w aspekcie wytrzymałości w warunkach zmiany szybkości odkształcenia w badanym zakresie.

Proszę także o wyjaśnienie sformułowania/zjawiska: „struktura ta (martenzytyczna) wykazuje bardziej atermiczny charakter związany z ruchem dyslokacji niż w przypadku struktury ferrytycznej, występującej w stalach DP”.

Komentarz 6. Str. 172

Doktorant stwierdził, że z uwagi na efekt odbicia fali od czoła pręta odbiorczego i jej powrotu w postaci fali rozciągającej, na wykresie siła-skrócenie absorbera, występują ujemne wartości siły

co stanowi główną wadę zaproponowanej metody pomiaru energochłonności z zastosowaniem techniki SHPB.

Czy istnieje możliwość modyfikacji układu pomiarowego aby zminimalizować ww. efekt lub uwzględnić go w metodyce wyznaczania energochłonności ?

Komentarz 7. Str. 184

Badania miniaturowych absorberów kolumnowych w warunkach obciążeń dynamicznych stanowiły istotny element pracy doktorskiej o wysokim potencjale aplikacyjnym z uwagi zarówno na ocenę materiału i spoiny jak i konstrukcji. Proszę o komentarz w aspekcie podobieństwa zastosowanego kształtu próbki i metodyki badania do rzeczywistych warunków użytkowania (kształt i wielkość absorberów, stan obciążeń, szybkość odkształcenia, itp.). Czy analizowano rozkład naprężenia, odkształcenia, prędkości odkształcenia itp. w badanej próbce obciążonej dynamicznie ?

Uwagi o charakterze ogólnym i edycyjnym (nie wymagające komentarza ze strony Doktoranta):

Str. 9 – 4 linia od dołu – sformułowanie „konstrukcji blaszanych” lepiej „konstrukcji stalowych”
Str. 16 – 12 linia od dołu: podając po raz pierwszy w tekście zawartości pierwiastków dobrze jest zdefiniować czy są to % masowe czy % atomowe. Często informuje się wówczas czytelnika, że zawartości pierwiastków w całej pracy podano w % masowych, chyba że określono inaczej (np.)

Str. 19 – 4 linia od dołu: sformułowanie „granica wytrzymałości na rozciąganie” nie jest prawidłowa. Według obowiązujących definicji i norm stosuje się: „wytrzymałość na rozciąganie”. Prawidłowo użyto określenia „granica plastyczności”.

Str. 19 – linia 3 od dołu: zamiast „tzw. zapas plastyczności” poprawniej jest stosować określenie „zakres umocnienia odkształceniowego”

Str. 20 – „wytrzymałość resztkowa.....” brak definicji lub wyjaśnienia w odniesieniu do stali (co to za parametr ?)

Str. 22 – 6 linia od dołu: „granicę wytrzymałości na rozciąganie” – patrz komentarz do Str. 19

Str. 24 – 15 linia od dołu: „niob 8-10%” – raczej chodzi o Ni (nikiel). Popularne stale odporne na korozję 18-8 to ok. 18%Cr i 8%Ni

Str. 27 – 14 linia od dołu: „zjawiskami dyslokacyjnymi” to sformułowanie nie jest zrozumiałe. W wyniku odkształcenia dochodzi np. do wzrostu gęstości dyslokacji.....

Str. 64 – 5 linia od dołu: sformułowanie: „rozciągających badań wytrzymałościowych”. Powinno być np. wyznaczenie właściwości mechanicznych w statycznej próbie rozciągania (właściwości mechaniczne to m.in. R_e -granica plastyczności (lub $R_{p0,2}$), R_m -wytrzymałość na rozciąganie, A -wydłużenie całkowite, Z -przewężenie...

Str. 99, 106, 108, 114, 122, 123, 124, 131, 132, 133 – Fotografie złącza to MAKROSTRUKTURA. Na obrazach mikrostruktury czcionka na markerach jest nieczytelna (np. rys. 54, 63, 68, 75, 77, 78, 83, 85, 86)

Str. 136 – 5/4 linie od dołu: określenie: „nominalny poziom naprężeń maksymalnych w warunkach obciążenia quasi-statycznego” . Czy chodzi tutaj o wytrzymałość na rozciąganie (R_m)?

Str. 165 – tytuł rozdziału 6.1 powinno być: „MECHANICZNEJ”

Str. 178 – 1/2 linia od dołu: „prędkości odkształcenia 0,005 m/s” – prędkości pręta ...

Sformułowania (przykładowe nieścisłości, skróty myślowe)

Str. 43: ..wytrzymałościowa ocena złącz...

Str. 64: Wykonanie rozciągających badań wytrzymałościowych

Str. 94: obciążenia zgniatającego

Str. 181: reakcja mechaniczna połączenia spawanego

Str. 182: ...zachowaniem mechanicznym złącz spawanych...

Str. 183: struktura ferrytyczna, która jest wrażliwa na szybkość odkształcenia (raczej stal o strukturze ferrytycznej jest)

Podsumowując, stwierdzam że wskazane powyżej komentarze o charakterze polemicznym i uzupełniającym oraz edytorskie nie zmieniają pozytywnej oceny pracy, która stanowi samodzielne opracowanie naukowe rozwiązujące postawione tezy. Przedstawione zastrzeżenia nie obniżają istotnie wartości naukowej zamieszczonych w rozprawie oryginalnych wyników badań dotyczących perspektywicznych materiałów stosowanych do wytwarzania absorberów i technologii ich łączenia oraz propozycji dodatkowej techniki badań w celu oceny konstrukcji. W mojej opinii Doktorant wykazał umiejętność rozwiązania problemu badawczego w szerokim kontekście zakresu działań od rozpoznania stanu wiedzy, przez dobór metod badawczych oraz zaplanowanie i wykonanie eksperymentów, po wnikliwą analizę i dyskusję uzyskanych wyników oraz opracowanie wniosków. Na szczególną uwagę zasługuje fakt podjęcia wieloaspektowego zagadnienia badawczo-aplikacyjnego, którego kompleksowe i finalne rozwiązanie wymaga zaangażowania doświadczonego zespołu i znaczących środków finansowych. Rozprawa zawiera także szczegółowo opisany plan kontynuacji działań co jest istotne dla postępu w osiąganiu kolejnych rezultatów, w tym o charakterze aplikacyjnym. Zrealizowany w ramach pracy doktorskiej zakres badań, potwierdza dojrzałość Doktoranta do samodzielnego prowadzenia prac badawczych, w tym o charakterze aplikacyjnym.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania obowiązującej *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym* i wnioskuję o dalsze procedowanie przewodu mgr. inż. Pawła Prochenki, w tym przyjęcie i dopuszczenie niniejszej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej.

