

dr hab. inż. Tadeusz Szymczak, prof. ITS

Instytut Transportu Samochodowego
Zakład Homologacji i Badań Pojazdów
ul. Jagiellońska 80
03-301 Warszawa

tel. 22 43 85 307, e-mail: tadeusz.szymczak@its.waw.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej p. mgr inż. Tomasza Śliwińskiego
pt. "Wpływ chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne
spawanych konstrukcji nośnych pojazdów"**

Podstawa wykonania recenzji:

powołanie na recenzenta
przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Śląskiej uchwałą z dnia 22.05.2024 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawę doktorską zapisano na 107 stronach, tworząc 13 rozdziałów, w tym 10 merytorycznych i 3 informacyjne. Pierwsze z nich dotyczą analizy stanu zagadnienia w postaci opracowań zawierających cechy konstrukcyjne pojazdów, gatunki wysokowytrzymałych stali konstrukcyjnych, wybrane zagadnienia z obszaru spawalnictwa i napraw środków transportu. W kolejnych rozdziałach zamieszczono cel i zakres pracy, szczegóły badań wstępnych, następnie tezę oraz opis badań zasadniczych i uzyskanych rezultatów. Końcowa zawartość pracy zawiera bibliografię oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

Ocena merytoryczna rozprawy

Autor rozprawy doktorskiej w poprawny sposób opisał cechy konstrukcyjne środków transportu przeznaczonych osobom i towarom, kierując uwagę na ich zalety, jak również pośrednio wady - a tym samym na ewentualne postępowania zespołów projektowych oraz grup inspekcyjnych. Uwagę zwracają akapity dotyczące eksploatacji pojazdów i związanego z ich użytkowaniem stanu naprężenia, który zawiera kilka składowych i występuje w określonych strefach pojazdu. Zaprezentowanie rozkładu naprężenia efektywnego w ramie nośnej naczepy przy określeniu położenia strefy najbardziej wyjątkowej wskazuje, że Autor rozprawy doktorskiej w poprawny sposób kategoryzuje środki transportu względem bezpieczeństwa ruchu drogowego. Wynika to z faktu, że strefa sprzęgnięcia naczepy z ciągnikiem siodłowym z wykorzystaniem płyty podsiodłowej i siodła (ciągnik siodłowy) oraz sworznia sprzęgającego i płyty montażowej sworznia (naczepa) to komponenty przenoszące obciążenie dynamiczne i statyczne wskutek przetransportowywania ładunku. Według wymagań Regulaminu ONZ nr 55 pierwsze z dwóch wymienionych zespołów technicznych mogą być poddane badaniu homologacyjnemu (test statyczny i zmęczeniowy), bez możliwości wykorzystania obliczeń wytrzymałościowych jako metody alternatywnej. Autor rozprawy doktorskiej przeanalizował również sposoby napraw podłużnic pojazdów, w których - wskutek eksploatacji na przykład w trudnych warunkach - mogą pojawić się uszkodzenia.

W rozdziale dotyczącym stali wykorzystywanych w motoryzacji zawarto schemat blokowy wskazujący na stale konwencjonalne oraz wysokowytrzymałe. Opisano ich charakterystyczne cechy mikrostrukturalne i mechaniczne.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 13.06.2024
RDJ Me 10 H 511 2024
nr zał.

Zagadnienia związane z dziedziną spawania jak spawalność i spawalniczy cykl cieplny zostały przedstawione poprawnie z wykorzystaniem treści i wzorów, wskazując na równanie przy użyciu którego można obliczyć wartość temperatury w punkcie odległym od źródła ciepła.

Na uwagę zasługuje podrozdział dotyczący analizy naprawy pojazdu pod względem ekonomicznym, w którym zamieszczono schemat zawierający informacje niezbędne dla naprawy spawalniczej oraz schemat z etapami warunkowymi. Kolejny podrozdział skierowany na metody spawania jak: TIG, MIG/MAG oraz MMA, zawierający opis i schematy wymienionych technik spajania również został opracowany poprawnie. Następujący po nim podrozdział, dotyczący techniki spawania z wykorzystaniem metody chłodzenia mikrojetowego został przygotowany przez Autora rozprawy w sposób uwzględniający jej genezę, dotychczasowe wykorzystanie, zalety i ograniczenia oraz przyszły kierunek wykorzystania.

Cel rozprawy naukowej został zdefiniowany w następującej treści: *opracowanie autorskiego procesu spawania konstrukcji nośnych pojazdu z wykorzystaniem techniki mikrojetowego chłodzenia*. Sformułowano również cele pośrednie - w znaczeniu poznawczym - względem zaproponowanej techniki łączenia, uzyskania złącza spawanego o odpowiednich parametrach mechanicznych oraz analizy uzyskanych rezultatów badań.

Autor rozprawy doktorskiej wytypował do badań dwa gatunki stali jak S355J2G3 oraz Docol 1200M. W badaniu wstępnym porównał rezultaty uzyskane z wykorzystaniem próbek zawierających złącze spawane wytworzone klasyczną techniką łączenia (MAG) z wynikami badań pochodzącymi z prób przeprowadzonych przy użyciu próbek ze spoiną uzyskaną wymienioną metodą łączenia i przy udziale chłodzenia mikrostrumieniem.

Kalibrację metody MAG przeprowadzono z wykorzystaniem określonych wytycznych dotyczących wytwarzania złączy wykonanych ze stali niestopowych i stopowych (stal wysokowytrzymała) uwzględniając: odległość końcówki spawalniczej od materiału łączonego, prędkość wysuwu drutu, parametry prądowo-napięciowe, prędkość posuwu palnika spawalniczego oraz rodzaj gazu osłonowego. W odniesieniu do techniki spawania mikrojetowego na podstawie prób doświadczalnych Autor rozprawy doktorskiej wskazał mieszankę gazów (Ar + 10% CO₂) tożsamą z mieszanką osłonową metody MAG jako najkorzystniejszą dla procesu kontrolowanego chłodzenia metody spajania. Autor rozprawy doktorskiej przeprowadził również próby łączenia uwzględniające trzy wartości średnic dysz głowicy mikrojetowej jak 60 μm, 70 μm i 80 μm oraz trzy wartości ciśnienia mieszanki gazów 0.3 MPa, 0.5 MPa i 0.7 MPa. W szczególności omówił cechy konstrukcyjne i zasadę działania głowicy do schładzania z wykorzystaniem mikrostrumieni. Uwagę zwraca schemat badań wstępnych, ponieważ zawiera on czynniki istotne dla jakości procesu spawania a tym samym jakości złącza spawanego, wskazując na odpowiednie planowanie doświadczenia przez Autora rozprawy doktorskiej. Potwierdzenie można również odnaleźć w tabeli parametrów procesu chłodzenia mikrostrumieniem, zawierającej zestawienie wartości ciśnienia mieszanki chłodzącej i średnicy dyszy. Liczność wytworzonych próbek wynosząca 240 jako zbiór wstępny dla wskazania obiektów badań świadczy o dążeniu Autora rozprawy doktorskiej do uzyskania miarodajnych wyników. W rezultacie Autor rozprawy doktorskiej posługując się metodami nieniszczącymi (wizualna i magnetyczno-proszkowa) wytypował próbki do dalszych badań i tym samym wskazał parametry procesu łączenia (prędkość spawania, prąd spawania i wartość średnia napięcia oraz gaz osłonowy i chłodzący Corgon), przy których je wytworzono - jako najkorzystniejsze w uzyskiwaniu złączy spawanych z udziałem wybranych materiałów konstrukcyjnych.

W badaniu mikrostruktury spoiny wykonanej dla stali S355J2G3 uzyskano rezultat potwierdzający znaczenie techniki chłodzenia mikrostrumieniem w zarodkowanie drobnoziarnistego ferrytu AF, wskazując konkretne wartości wymienionej techniki, jak: ciśnienie o wartości 0.5 MPa i średnica dyszy modułu chłodzącego o wartości 60 μm. W przypadku spoiny dla stali Docol 1200M w jej mikrostrukturze pojawił się drobnoziarnisty ferryt AF i dodatkowo ferryt SPF.

Z kolei rezultaty prób twardości złącza spawanego stali S355J2G3 wskazały na niewielkie obniżenie wartości twardości w SWC złącza wytworzonego z udziałem techniki chłodzenia mikrojetowego w porównaniu z rezultatami dla złącza spawanego uzyskanego bez udziału wymienionej techniki łączenia. Poziom obniżenia wartości twardości był bardzo podobny do wzrostu wartości - rozpatrywanego

parametru mechanicznego - obserwowanego w spoinie. W rezultacie uzyskano zmniejszenie gradientu wartości twardości w strefie określonej SWC i spoiną.

W przypadku złącza spawanego dla stali Docol 1200M wpływ techniki chłodzenia mikrostrumieniem gazu był szczególnie widoczny w wartościach twardości spoiny, ponieważ były one o ok. 10 MPa niższe niż rezultaty dla tej strefy pochodzącej ze spajania bez udziału stosowanej techniki chłodzenia.

W badaniu złączy spawanych obu gatunków stali konstrukcyjnych wytworzonych z udziałem techniki chłodzenia mikrostrumieniem uzyskano wyższe wartości wytrzymałości na rozciąganie niż w przypadku połączenia wytworzonego bez udziału wytypowanej metody chłodzenia. Efekt ten był szczególnie widoczny w przypadku stali Docol 1200M, różnicując poziomem ok. 100 MPa w porównaniu do wyniku z klasycznej techniki spajania. Dodatkowo, w przypadku tego rodzaju materiału konstrukcyjnego uzyskano 1.5-krotny wzrost wydłużenia względnego, co w zestawieniu ze wzrostem wartości wytrzymałości na rozciąganie jest rezultatem zbieżnym z obecnymi wysiłkami producentów wysokowytrzymałych stali konstrukcyjnych.

W podsumowaniu wyników badań wstępnych Autor rozprawy doktorskiej słusznie zwrócił uwagę na znaczenie procentowej ilości ferrytu w mikrostrukturze w odporności mechanicznej złącza spawanego w warunkach oddziaływania obciążenia statycznego i zmęczeniowego.

W rezultacie Autor rozprawy doktorskiej poprawnie sformułował tezę pracy w następującej treści:

Chłodzenie mikrojetowe zastosowane w procesie spawania MAG umożliwi uzyskanie podwyższenia wytrzymałości zmęczeniowej oraz zapewni odpowiednio wysokie pozostałe parametry złącza spawanego stosowanego w budowie konstrukcji nośnych pojazdów wykonanych ze stali niestopowej oraz stali AHSS.

W celu udowodnienia tezy zaproponowano w sposób właściwy rodzaje badań mechanicznych jak: próba rozciągania, zmęczenia i udarności - zależne w doborze od grubości blach w gatunku stali konstrukcyjnych wytypowanych do badań. Uwagę zwraca stosunkowo niska wartość temperatury próby udarności określona przez $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podobnie jak w przypadku badań wstępnych Autor rozprawy doktorskiej zaproponował schemat procedury badawczej, uwzględniając w nim istotny czynnik wykorzystywanego procesu łączenia jakim jest w tym przypadku ciśnienie gazu chłodzącego oraz rodzaje prób mechanicznych, w tym wymieniona próba udarności i próba zmęczenia.

Wśród wyników badań testów zasadniczych złącza spawanego stali S355J2G3 uzyskanych z udziałem metody radiografii znajdowała się tylko jedna próbka z wadą spajania w postaci pęcherzyków. W przypadku złącza stali Docol 1200M jakość wytwarzania połączenia była 100% - owa, ponieważ w żadnym z przypadków połączenia spawanego nie wystąpiły wady spawalnicze możliwe do ujawnienia techniką radiograficzną.

Na podstawie rezultatów próby zginania przeprowadzonej do 180° można stwierdzić, że złącza spawane stali niestopowej i wysokowytrzymałej zostały wytworzone w wysokiej jakości, ponieważ tylko w jednym przypadku złącza stali S355J2G3 uzyskanego z wykorzystaniem techniki chłodzenia mikrostrumieniem ujawniły się wady spawalnicze. Z kolei w przypadku złączy spawanych stali Docol 1200M w żadnym z przypadków stref spajania uzyskany przy udziale chłodzenia mikrostrumieniem nie zaobserwowano wad spawalniczych.

Stosunkowo interesujące rezultaty uzyskano w teście udarności złącza spawanego stali S355J2G3 ponieważ dla każdego z połączeń spawanych wytworzonych przy udziale techniki chłodzenia mikrostrumieniem w porównaniu do złącza uzyskanego metodą klasyczną wystąpił 31%-owy wzrost wartości udarności prowadząc do 51 J w temperaturze $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tak znaczący efekt nie był obserwowany w teście udarności przeprowadzonym w 0 i $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. W rezultacie, na podstawie wyników próby udarności wytypowano najkorzystniejszą wartość ciśnienia medium chłodzącego (0.4 MPa).

Test zmęczeniowy przeprowadzono przy cyklach rozciągających z wykorzystaniem próbek wytrzymałościowych klepsydrycznych, zawierających w środku odcinka pomiarowego spoinę. Wyznaczono wykres Wöhlera i wartości granicy zmęczenia, które były reprezentowane przez 295 MPa (stal S355J2G3) i 530 MPa (stal Docol 1200M), uzyskując tym samym kluczowe dane do modelowania odporności mechanicznej komponentów zawierających złącza spawane i poddawanych oddziaływaniu obciążenia zmiennego cyklicznie dla naprężenia rozciągającego. Charakterystyki zmęczeniowe obu gatunków stali przedstawiono w układzie semi-logarytmicznym z podaniem funkcji regresji i wartości współczynnika determinacji.

Poprzez analizę SEM Autor rozprawy doktorskiej ujawnił zróżnicowanie rozmiarów wtrąceń niemetalicznych w zależności od cech technologii łączenia, z korzyścią dla techniki spajania z udziałem chłodzenia mikrostrumieniem, przy wykorzystaniu której w spoinach wymieniony rodzaj defektu był ok. czterokrotnie mniejszy.

Uwagi szczegółowe do ocenianego opracowania naukowego

W kilku miejscach rozprawy doktorskiej wykorzystano słownictwo zapożyczone z języka angielskiego jak: automotive, zamiast motoryzacyjny lub pochodzące z języka ogólnego, jak hak holowniczy zamiast zaczep kulowy, waga zamiast masa, rozciągliwość zamiast ciągliwość, struktura spoiny zamiast mikrostruktura.

Wartość naprężenia efektywnego występującego w ramie nośnej naczepy można było porównać z wartościami dopuszczalnymi naprężenia dotyczącymi wykorzystanego materiału konstrukcyjnego, podejmując w ten sposób jeszcze bardziej konstruktywną analizę.

Na rysunku 1.5, na którym zamieszczono sposoby wykorzystania wkładek wzmacniających podłużnice pojazdu z powodu wystąpienia uszkodzeń występuje brak zgodności a) i b) z opisem w tekście.

W zestawieniu stali wysokowytrzymałych zabrakło gatunku stali PHS (Press Hardening Steel), której możliwości zastosowania w przemyśle motoryzacyjnym są szczególnie szerokie. Dodatkowo stabelaryzowanie stali Docol zakończono na gatunku Docol 1500 gdy obecnie dostępny jest już gatunek tej stali o jeszcze wyższej wartości wytrzymałości na rozciąganie.

Sformułowanie „Granice plastyczności kształtują się ...” oznacza, że analizie poddawane są różne definicje wymienionego parametru mechanicznego.

Wykorzystywanie oznaczenia granicy plastyczności w postaci R_e w opisie parametrów mechanicznych stali Docol wskazuje, że w charakterystyce rozciągania tego materiału występuje plastyczne płynięcie poprzedzające umocnienie, a więc krzywa rozciągania tej stali w ogólnej analizie byłaby bardzo podobna do materiałów stosowanych w motoryzacji od wielu lat.

W niektórych akapitach wskazujących na korzystanie z pozycji literaturowych podczas ich opracowywania nie występują odwołania do określonych artykułów naukowych. Jest to zauważalne w podrozdziale 2.7.

Sformułowania Autora rozprawy doktorskiej dotyczące wartości twardości stref złącza spawanego i materiału rodzimego pochodzące z wykorzystania obu rodzajów stali konstrukcyjnych nie uwzględniają pewnego znaczenia wytwórczego i inspekcyjnego, zwłaszcza, że skutek wykorzystania techniki chłodzenia mikrostrumieniem przyniósł odmienne rezultaty zależne od rodzaju łączonego materiału.

W opisie badań zasadniczych Autor rozprawy doktorskiej jedynie ogólnie zapisał – badania zmęczeniowe wykonano zgodnie z wytycznymi określonych norm bez podawania ich numerów i tytułów.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Cel i teza rozprawy doktorskiej w postaci uzyskania stosunkowo wysokich wartości granicy zmęczenia połączeń wytworzonych z udziałem chłodzenia mikrojetowego zostały spełnione.

W rozprawie doktorskiej zauważalne jest logiczne postępowanie względem eksperymentu, polegające na projektowaniu programu badań wieloetapowo i w odpowiedniej kolejności, zarówno w przypadku prób wstępnych, jak i zasadniczych. Zaprezentowanie technologii łączenia w szczegółach i utrzymanie założenia o miarodajności wyników badań poprzez wykorzystanie wysokiej liczności próbek stanowi o jakości zrealizowanego zadania technologicznego i badawczego rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska jest zbieżna z wysiłkami grup badawczych i badawczo-rozwojowych przemysłu motoryzacyjnego dotyczącymi wytwarzania komponentów z wykorzystaniem stali wysokowytrzymałych oraz prowadzenia prac naprawczych konstrukcji uzyskanych poprzez zastosowanie stali niestopowych. W bezpośredni sposób rozszerza zakres wiedzy w obszarze spawania stali Docol 1200M, ponieważ jest nośnikiem określonych parametrów tej technologii, przy których można uzyskać połączenie o zadowalających parametrach mechanicznych i mikrostrukturalnych. Również zagadnienie napraw środków transportu zawierających komponenty wytworzone ze stali S355J2G3 uzyskało dodatkowe informacje specjalistyczne - w postaci parametrów procesu spawania.

Uzyskane rezultaty badań mechanicznych, jak wartości twardości, wytrzymałości na rozciąganie, granicy zmęczenia mogą być wykorzystywane przez konstruktorów komponentów, zabudów i pojazdów, w tym służących transportowaniu towarów, ponieważ mogą być one bezpośrednio implementowane w oprogramowaniu specjalistycznym np. MES w celu prowadzenia analiz stanu naprężenia i określania odporności mechanicznej oraz szacowania trwałości zmęczeniowej.

Wniosek końcowy

Uwagi dotyczące rozprawy doktorskiej mają jedynie znaczenie dyskusyjne i nie umniejszają jej jakości naukowej.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa doktorska p. mgr inż. Tomasza Śliwińskiego spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym (z dnia 21 kwietnia 2017 roku) oraz zgodnie z zapisami art.179 ust. 1 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. (przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dz.U. z 2018 r., poz. 1669).

W końcowym sformułowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska może być formalnym opracowaniem naukowym w celu nadania jej Autorowi stopnia doktora nauk technicznych w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*. Tym samym wnoszę o wprowadzenie rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

