



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Dr hab. inż. Dariusz Fydrych, prof. PG

Gdańsk, 03.06.2024 r.

Zakład Technologii Materiałów Konstrukcyjnych i Spajania

Instytut Technologii Maszyn i Materiałów

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa

Politechnika Gdańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Tomasza Śliwińskiego pt.:
„Wpływ chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne
spawanych konstrukcji nośnych pojazdów”

wykonanej pod opieką promotora Pana Prof. dr. hab. inż. Tomasza Węgrzyna
opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna
Politechniki Śląskiej z dnia 22 maja 2024 r.

Wprowadzenie

Wśród wielu czynników wpływających na spawalność metali szczególnie istotnym, a w wielu przypadkach najważniejszym, jest historia cieplna złącza. Można ją zdefiniować jako przebieg zmian temperatury spawanych elementów przed spawaniem, w jego trakcie i podczas ewentualnych technologicznych zabiegów cieplnych prowadzonych na wytworzonym złączu spawanym. Jest to pojęcie ściśle związane z cyklem cieplnym spawania oddziałującym na formowane złącze. Kontrolowanie cyklu cieplnego jest jednym z podstawowych warunków wytworzenia złączy spawanych o właściwościach umożliwiających podjęcie decyzji o oddaniu ich do eksploatacji. Opracowywanie metod sterowania przebiegiem cykli cieplnych stanowi od początku nowoczesnego spawalnictwa podstawowy trend rozwojowy, dzięki któremu możliwe jest pokonywanie kolejnych barier wynikających z opracowywania nowych materiałów i konieczności wytwarzania złączy odpowiednich do eksploatacji w ekstremalnych warunkach środowiskowych. Właściwie zaprojektowany poprzez sterowanie parametrami technologicznymi i warunkami konstrukcyjnymi proces cieplny spawania powoduje korzystne zmiany strukturalne i fizyko-chemiczne w obrębie złącza oraz polu naprężeń pozostających. W wielu przypadkach te działania decydują o możliwości wykonania złączy spawanych spełniających zdefiniowane w normach i innych przepisach wysokie kryteria jakościowe. Będące przedmiotem opiniowanej rozprawy chłodzenie mikrojetowe jest jedną z wielu metod sterowania cyklem cieplnym spawania. W świetle analizy literatury i własnego doświadczenia w zakresie oddziaływania

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 04.06.2024
RD JHE 1 981 511 2024
nr zał.

krótkich cykli cieplnych na spawalność metali podjęcie przez Pana mgr. inż. Tomasza Śliwińskiego tematyki oceny wpływu przyspieszonego chłodzenia na jakość złączy spawanych stali stosowanych w przemyśle transportowym uważam za uzasadnione. Cel, przedmiot i zakres merytoryczny recenzowanej pracy doktorskiej są ściśle dopasowane do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna i wpisują się w szkołę naukową Pana Prof. dr. hab. inż. Tomasza Węgrzyna.

Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Opiniowana praca doktorska cechuje się nieco zmodyfikowaną (poprzez podział badań własnych na wstępne i zasadnicze) strukturą typu IMRaD, co nie jest wymogiem koniecznym dla prac badawczych, ale ułatwia jej lekturę. Autor podzielił rozprawę na 13 rozdziałów (umieszczonych na 107 stronach formatu A4), z czego 10 stanowi główną część pracy, a ostatnie 3 sekcje zawierają bibliografię i streszczenia w języku polskim i angielskim. Doktorant nie zamieścił wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, spisów tabel i rysunków oraz załączników, które nie są wprawdzie wymagane, jednak są często umieszczane w pracach doktorskich. W pierwszych 3 merytorycznych rozdziałach (Wprowadzenie, Stan zagadnienia i Podsumowanie przeglądu literatury) czytelnik zostaje zaznajomiony z tematyką pracy oraz aktualnym stanem wiedzy dotyczącym konstrukcji nośnych pojazdów, spawalności stali, napraw spawalniczych pojazdów oraz (co najistotniejsze z punktu widzenia celów pracy) zastosowania chłodzenia mikrojetowego w spawalnictwie. Uważam, że ta część pracy jest dobrze przygotowana i zawiera informacje, które właściwie wprowadzają czytelnika do części badawczej. Mam jednak uwagę formalną dotyczącą numeracji rysunków, które w tej części są ponumerowane w inny sposób, niż w kolejnych rozdziałach.

Jako cele pracy Doktorant wskazał (strona 34.): „Głównym celem naukowym pracy jest opracowanie autorskiego procesu spawania konstrukcji nośnych pojazdu z wykorzystaniem chłodzenia mikrojetowego, który zapewni: – zwiększenie doraźnej wytrzymałości na rozciąganie złącza wykonanego ze stali AHSS przy budowie konstrukcji nośnych pojazdów, co przełoży się na zmniejszenie ich masy, dzięki czemu pojazdy będą energooszczędne i co za tym idzie bardziej przyjazne środowisku, – zwiększenie właściwości plastycznych złącza wykonanego ze stali niestopowej, co jest istotne ze względu na bezpieczeństwo bierne pojazdów w kontekście ekstremum pogodowych, w szczególności niskich temperatur.” oraz dalej na tej samej i kolejnej stronie: „Określenie wpływu chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne spawanych konstrukcji nośnych pojazdów poprzez badania metalograficzne oraz wytrzymałościowe. Cel ten można podzielić na cele pośrednie: – systematyka i analiza zalecanych metod spawalniczych stosowanych podczas napraw i przebudów konstrukcji nośnych pojazdów, – analiza procesów zachodzących podczas wykonywania połączenia spawalniczego, w tym przebieg spawalniczego cyklu cieplnego oraz formowania struktur spoiny i strefy wpływu ciepła, – określenie warunków skrajnych prawidłowego funkcjonowania inżektora mikrojetowego, – badania właściwości plastycznych powstałych spoin oraz ich struktur,

– analiza otrzymanych wyników.” Cel ogólny jest sformułowany prawidłowo, jednak w moim odczuciu, podpunkty opisane terminami: „analiza” „badania”, a w szczególności: „analiza otrzymanych wyników” nie powinny być traktowane jako cele pracy naukowej, a jako środki służące osiągnięciu określonego celu, a więc stanowią one opis zakresu pracy. Doktorant ma tego świadomość, ponieważ rozdział jest zatytułowany: „Cel i zakres pracy”, jednak nie wyróżnił tych dwóch elementów w treści rozdziału.

W rozdziałach 5 i 6 Pan mgr inż. Tomasz Śliwiński przedstawił stanowisko badawcze i plan badań wstępnych wraz z ich wynikami. Badania wstępne obejmowały dobór parametrów procesu (zarówno spawalniczych jak i chłodzenia), wykonanie próbek, badania nieniszczące wizualne i magnetyczno-proszkowe, badania metalograficzne mikroskopowe, pomiary twardości metodą Vickersa oraz badania wytrzymałości na rozciąganie.

Na podstawie analizy stanu wiedzy oraz wyników badań wstępnych Doktorant postawił tezę pracy (rozdział 7), która brzmi: „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.” Uważam, że teza pracy jest sformułowana prawidłowo.

Badania zasadnicze zostały opisane w rozdziale 8, a ich wyniki skomentowane w Podsumowaniu (rozdział 9) i w postaci wniosków (rozdział 10). Doktorant zrealizował na tym etapie badania ukierunkowane na ocenę właściwości eksploatacyjnych próbek wykonanych z chłodzeniem mikrojetowym stosując metodę porównawczą (z próbkami spawanymi tradycyjnie, bez chłodzenia). Oprócz badań radiograficznych przedstawił wyniki próby zginania, uderności oraz wytrzymałości zmęczeniowej wraz z analizą SEM mikrostruktury.

Spis literatury zawiera polsko- i angielskojęzyczne artykuły naukowe, pozycje książkowe oraz 15 norm. Doktorant jest współautorem 8 zacytowanych artykułów, co dobrze świadczy o jego aktywności w tematyce poruszonej w rozprawie. Pozycje literaturowe zostały dobrze dobrane tematycznie i są aktualne, jednak opis bibliograficzny nie jest jednolity, a źródła nie zostały uporządkowane wg tradycyjnym porządku: albo kolejności cytowania, albo kolejności alfabetycznej.

Praca cechuje się dobrym, właściwym dla prac naukowych, poziomem językowym. W kilku przypadkach stwierdziłem błędy gramatyczne, np.: strona 34.: „Określenie wpływu chłodzenia mikrojetowego na właściwości eksploatacyjne spawanych konstrukcji nośnych pojazdów poprzez badania metalograficzne oraz wytrzymałościowe.” (równoważnik zdania zamiast zdania). Poza tym Autor nie ustrzegł się innych błędów formalnych i edytorskich, wśród których wskazuję:

- brak konsekwencji w stosowaniu kroju czcionki, np.: wartości w Tablicy 1.2,

- literówki, np.: „ponieżej”, „nić” (zamiast: „niż”), „zależny” (zamiast: „zależy”), „metrykom” (zamiast: „metryką”),
- skróty powinny być wyjaśniane przy pierwszym użyciu, np. „MAC” jest wyjaśniony dopiero przy kolejnym użyciu.
- błędy interpunkcyjne: głównie brak przecinków.

Ocena merytoryczna rozprawy

Praca ma charakter eksperymentalny, a jej przedmiotem jest ocena wpływu chłodzenia mikrojetowego na strukturę i właściwości złączy wykonanych z dwóch gatunków stali (S355J2G3 oraz DOCOL 1200M) stosowanych w przemyśle transportowym, w szczególności (zgodnie z zamysłem Autora) na konstrukcje nośne pojazdów samochodowych. Prace badawcze zostały prawidłowo zaplanowane i obejmują złożony cykl badawczy obejmujący trzy główne etapy: analizę literatury, badania wstępne i badania zasadnicze. Oba plany badań (wstępny i zasadniczy) zostały przedstawione w postaci czytelnych schematów (odpowiednio: rysunki 5.6 i 8.1), co ułatwia analizę treści rozprawy. Dysertacja zawiera interesujące i wartościowe z praktycznego punktu widzenia wyniki. Za najważniejsze osiągnięcie Doktoranta zaprezentowane w recenzowanej pracy uważam wykazanie, że zastosowanie chłodzenia mikrojetowego w przypadku stali S355J2G3 prowadzi do przemian strukturalnych skutkujących korzystnymi, zwłaszcza w aspekcie udarnośći w niskiej temperaturze, zmianami właściwości plastycznych. Równie ciekawy i perspektywiczny dla praktyki przemysłowej jest sformułowany przed Autorem wniosek: „możliwe jest uzyskanie prawidłowych złączy z wykorzystaniem stali DOCOL 1200M i zastosowaniem gazu chłodzącego Ar + 10% CO₂ jako gazu osłonowego i mikrojetowego” (strona 92.). Dyskusja wyników badań stanowiąca podsumowanie rozprawy jest napisana poprawnie i dotyczy wszystkich zaprezentowanych w pracy badań. Pan mgr inż. Tomasz Śliwiński nie ograniczył się jedynie do wyciągnięcia podstawowych informacji z otrzymanych wyników, ale podjął również próbę, poprzez analizę EDS wydzieleni niemetalicznych, wyjaśnienia mechanizmu decydującego o wpływie chłodzenia na zmiany właściwości mechanicznych złączy. Świadczy to o Jego naukowej dociekliwości i kompetencjach badawczych i dobrze rokuje w kontekście dalszego rozwoju.

Podczas lektury pracy nasunęło mi się kilka uwag dyskusyjnych o charakterze terminologicznym:

- Strona: 33.: „złączy niepodobnych” – to termin rzadko używany. Lepiej stosować: „złącze różnoimienne”, ewentualnie, w uzasadnionych przypadkach: „złącze różnorodne”.
- Strona 38.: „posuw końcówki prądowej”. Lepiej stosować: „prędkość spawania”
- Strona 38.: „łuski spawalniczej. Powinno być: „dyszy spawalniczej”.
- Strona 71. i 90.: „pęcherzyki”. Powinno być: „pęcherze gazowe”.

- Rysunek 5.2 ma nieprawidłowy podpis: „Kalibracja warunków spawania na automatycznym stole spawalniczym”. W rzeczywistości na zdjęciu widać proces spawania.

Uważam również, że opis eksperymentów wymaga uzupełnień, dzięki którym każdy czytelnik mógłby powtórzyć badania. Doktorant podaje, że wyniki pracy mogą zostać użyte jako podstawa do opracowania WPQR, jednak nie zamieścił w pracy wszystkich parametrów i warunków spawania, które są konieczne do przygotowania takiej instrukcji.

W niektórych przypadkach Doktorant stosuje skróty myślowe, np. na stronie 84. pisząc: „Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość stosowania w praktyce inżynierskiej współczynnika 0,55 dla obliczeń szacunkowej granicy wytrzymałościowej złączy wykonanych z obu badanych gatunków stali.” We wcześniejszych rozdziałach nie znalazłem informacji na temat tego współczynnika.

Praca napisana jest językiem przystępnym, z zachowaniem większości reguł przyjętych dla prac naukowych oraz z zastosowaniem prawidłowej terminologii technicznej, zwłaszcza spawalniczej. Nieliczne błędy wskazuję w niniejszej recenzji. Szkoda, że Doktorant nie skonfrontował wyników własnych z danymi dostępnymi w literaturze, co podniosłoby walory naukowe pracy. W dwóch podsumowujących całość pracy rozdziałach brakuje informacji, że teza pracy została potwierdzona. Jest to podane dopiero w ostatnim zdaniu Streszczenia (strona 105.).

Podkreślam, że powyższe uwagi nie obniżają wysokiej oceny, na którą zasługuje opiniowana dysertacja. Mam nadzieję, że przysłużą się one Doktorantowi w przyszłych pracach naukowych i badawczych.

Uwagi dyskusyjne

Poniżej wyszczególniam uwagi i pytania, które nasunęły mi się podczas lektury pracy. Bardzo proszę o odpowiedzi i komentarze do wymienionych zagadnień:

1. Na stronie 32. Autor pisze: „Należy jednak mieć na uwadze, że obok wyżej wymienionych struktur w spoinie może występować także austenit szczątkowy, a także bainit oraz martenzyt, przy czym ich zawartość procentowa w spoinie nie przekracza zwykle 5%.” Proszę o wyjaśnienie, czy zawartość 5% struktur hartowniczych na pewno dotyczy spoiwa.
2. Na stronach 39. i 40. Doktorant pisze: Do badań stali niestopowych wykorzystano stal konstrukcyjną EN S355J2G3 oraz „Do badań stali wysokowytrzymałych AHSS wykorzystano stal DOCOL 1200 M”. Na stronie 89. Można znaleźć zbieżne znaczeniowo sformułowanie: „Jako przedstawiciela pierwszej z tych grup

wytypowano powszechną w użyciu stal S355J2G3.” Proszę o rozwinięcie tych stwierdzeń. Czy zdaniem Doktoranta można przenosić wyniki badań jednego gatunku stali na całą grupę stali?

3. Strona 40.: opis procedury wykonania próbek jest niekompletny z punktu widzenia możliwości zastosowania tej technologii w praktyce. Mam w tym zakresie kilka bardziej szczegółowych wątpliwości i uwag. Z treści pracy nie wynika, czy próbki były spawane, czy napawane. Jakimi były wymiary próbek? Jak przygotowano materiały przed spawaniem? Prędkość podawania drutu elektrodowego wyraża się powszechnie w jednostkach: m/min (Autor używa m/s). W tabeli 5.2 Doktorant użył terminu: „odległość palnika od elementu”, natomiast w tekście stosuje: „odległość końcówki spawalniczej od spawanego materiału”. To są prawdopodobnie dwa różne parametry spawania powiązane z tzw. długością wolnego wylotu drutu elektrodowego i parametrem CTWD. Proszę o uszczegółowienie tych informacji.

Pomimo powyższych wątpliwości pracę oceniam pozytywnie pod względem merytorycznym i naukowym. W moim przekonaniu, Doktorant udowodnił, że jest dobrze przygotowany do planowania i realizacji badań naukowych.

Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Tomasz Śliwiński przedstawił do oceny rozprawę doktorską, którą oceniam jako dzieło oryginalne i wartościowe pod względem merytorycznym i naukowym. Zaprezentował w niej wyniki komplementarnych prac eksperymentalnych, których wyniki mają duże znaczenie praktyczne i wnoszą elementy nowości w obszarze naukowym. Doktorant właściwie wykonał zadania badawcze służące osiągnięciu celu pracy i weryfikacji postawionej tezy naukowej: przeprowadził i zaprezentował przegląd literatury, zaproponował i zrealizował właściwe badania eksperymentalne i analizę ich wyników oraz sformułował odpowiednie wnioski. Autor wykazał się samodzielnością i dojrzałością badawczą w realizacji badań i interpretacji ich wyników.

Opiniowana praca doktorska spełnia wymagania Ustawy z dnia 20.07.2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2023 r. pozycja 212, z późn. zm.) oraz innych stosownych regulacji prawnych i wnioskuje do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Tomasza Śliwińskiego do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Sporządził:

Dariusz Frydrych