

RECENZJA

pracy doktorskiej mgr inż. Michała Piotrowskiego pt:

„Badania i obliczenia trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych”

wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny

Inżynieria Mechaniczna

Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich

w Bydgoszczy

na podstawie uchwały z dnia 20 kwietnia 2021 r.

Wprowadzenie

Wysokie wymagania dotyczące właściwości eksploatacyjnych części i wyposażenia pojazdów szynowych powodują konieczność stosowania do ich wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych oraz nowoczesnych technologii. Jednymi z najnowocześniejszych i równocześnie najbardziej powszechnie stosowanymi w przemyśle technologiami są technologie spawalnicze. Technologie te są ważnym elementem wytwarzania części maszyn i urządzeń o specjalnych właściwościach użytkowych. Umożliwiają one uzyskanie połączeń o wymaganych właściwościach eksploatacyjnych. Procesy spawalnicze są procesami specjalnymi, to jest takimi, których wyniku nie można ocenić w trakcie ich trwania, a niezgodności mogą się ujawnić dopiero po ich zakończeniu. Z tego względu zasadne i konieczne jest szczegółowe zbadanie tych procesów w celu ich wykorzystania do precyzyjnego kształtowania właściwości eksploatacyjnych połączeń. Nie jest to jednak możliwe bez znajomości właściwości fizycznych i wynikających z nich właściwości eksploatacyjnych złączy spawanych, w tym trwałości zmęczeniowej. Zagadnienie wpływu obciążeń zmiennych na rozwój pęknięć w złączach spawanych jest dotychczas zbadane w niewielkim stopniu.

Podjęcie przez mgr inż. Michała Piotrowskiego pracy doktorskiej o charakterze teoretyczno – doświadczalnym pt: **„Badania i obliczenia trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych”** należy uznać za wybór trafny ze względu na znaczenie tematyki w zakresie poznawczym jak również możliwość praktycznego zastosowania wyników badań. Problematyka, którą Doktorant podjął jest mało zbadana, a przy tym bardzo istotna z naukowego i użytkowego punktu widzenia. Dlatego uważam, że temat pracy jest uzasadniony, interesujący i aktualny.

Treść rozprawy

Praca doktorska pt: „**Badania i obliczenia trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych**” składa się z dwóch podstawowych części, to jest części literaturowej oraz części badawczej i zawiera 191 stron tekstu, 34 tablice, 171 rysunków oraz 118 pozycji bibliograficznych.

W części literaturowej Doktorant przedstawił zagadnienia dotyczące zmęczenia konstrukcji spawanych. W tej części szczegółowo omówił naprężenia spawalnicze, metody analizy trwałości zmęczeniowej konstrukcji spawanych oraz wpływ spoin na właściwości mechaniczne obiektu. Dokonał krytycznej oceny obecnego stanu wiedzy w odniesieniu do zjawiska zmęczenia połączeń spawanych, poprawy ich trwałości oraz projektowania struktur spawanych. Część teoretyczną Autor zakończył przedstawieniem metody projektowania złożonych struktur spawanych. Na podkreślenie zasługuje trafny wybór zagadnień przedstawionych w części literaturowej, stosowny do tematu pracy zakres ich omówienia oraz zwięzły i przejrzysty sposób prezentacji.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literaturowego Autor sformułował cel pracy, którego istota sprowadza się do opracowania oraz doświadczalnej weryfikacji metody projektowania spawanego obiektu technicznego w której ograniczona zostanie liczba kosztownych badań eksperymentalnych całych obiektów. Celami dodatkowymi była poprawa bezpieczeństwa i niezawodności złożonych, odpowiedzialnych struktur spawanych oraz analiza możliwości uwzględnienia w procesie projektowo-konstrukcyjnym złożonych struktur spawanych nowoczesnych metod numerycznych i badań doświadczalnych.

Doktorant postawił oryginalną tezę pracy: „**Stosowane obecnie procedury projektowania złożonych i odpowiedzialnych struktur spawanych charakteryzują się dużą kosztochłonnością i zawodnością. Istnieje możliwość ograniczenia liczby kosztownych badań pełnowymiarowych obiektów technicznych poprzez ich częściowe zastąpienie badaniami elementarnych węzłów spawanych bez obniżania ich projektowanej trwałości**”

Z celu oraz postawionej tezy wynikał cel, zakres i metodyka badań przedstawionych w drugiej, doświadczalnej części pracy.

W tej części pracy Doktorant przeprowadził obszerne badania, których celem była doświadczalna analiza trwałości zmęczeniowej uzyskanej na tych samych poziomach odkształcenia dla różnej postaci geometrycznej próbek i węzłów spawanych. Celem dodatkowym była doświadczalna analiza wpływu wybranych czynników na wyniki badań.

Program badań obejmował badanie właściwości mechanicznych zarówno materiału podstawowego, jak i złączy spawanych, w tym udarności i wytrzymałości na rozciąganie. Badania składu chemicznego i ocenę jakości złącza spawanego na podstawie badań wizualnych, badania odkształceń i pomiar naprężeń oraz badania zmęczeniowe próbek spawanych, węzła spawanego oraz złożonej struktury jaką jest rama wózka.

Uzyskane wyniki przedstawił w postaci wykresów oraz tabelaryzowanych wartości liczbowych. Przeprowadził obliczenia trwałości zmęczeniowej, bazując na określeniu odkształcenia materiału wywołanym spiętrzeniem naprężeń w złączu spawanym.

Na podstawie uzyskanych wyników Doktorant sformułował czternaście wniosków dotyczących trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych.

Ocena rozprawy oraz uwagi ogólne

Wybór tematu rozprawy doktorskiej należy uznać za bardzo trafny i aktualny, mieszczący się we współczesnych tendencjach rozwojowych zastosowania badań trwałości zmęczeniowej złączy spawanych. Doktorant przeprowadził obszerne badania doświadczalne mające na celu sprawdzenie związku między karbem strukturalnym i stanem naprężenia po spawaniu, a trwałością zmęczeniową złączy spawanych. Szczególnie cenne są wyniki badań związane z powiązaniem trwałości zmęczeniowej produktu, zespołu, podzespołu, elementu i próbki.

Stanowi to znaczący, nowatorski wkład Doktoranta w rozwój badań nad trwałością zmęczeniową elementów spawanych.

W pierwszej części rozprawy Doktorant dokonał przeglądu stu osiemnastu pozycji literatury dotyczącej badanego zagadnienia, uwzględniając ważne publikacje ostatniej dekady. W tym zakresie Doktorant wykazał się dobrą znajomością zagadnienia i prawidłową oceną zjawisk związanych z trwałością zmęczeniową.

Ogólna koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Autora poprawnie, a jej realizację oceniam pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna i zawiera szereg wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza szczególnie ważnej weryfikacji doświadczalnej przeprowadzonych obliczeń oraz bardzo obszernej, szczegółowej i ciekawej analizy wyników. Doktorant skutecznie zastosował nowoczesne, doświadczalne metody badań. W wyniku przeprowadzonych obszernych i różnorodnych badań uzyskał interesujące i wartościowe wyniki, które następnie poprawnie zinterpretował.

W podsumowaniu chciałbym podkreślić, że zaplanowany cel i zakres pracy zostały osiągnięte i dlatego całość rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Piotrowskiego oceniam pozytywnie. Doceniam zwłaszcza trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dojrzałości badawczej Doktoranta. Sposób przygotowania rozprawy i jej szata graficzna nie budzą moich zastrzeżeń

W trakcie szczegółowej analizy rozprawy nasunęło mi się jednak kilka uwag ogólnych dotyczących jej treści, warunków prowadzenia badań oraz zakresu eksperymentu.

1. Na stronie 13 Doktorant podaje „z rozwojem nowych technologii spawania (spawanie laserowe, zgrzewanie tarciove czy wybuchowe)”. Technologie te są znane i stosowane od kilkudziesięciu lat i uważam, że stosowanie do nich terminu „nowe” nie jest uzasadnione. Pragnę również zaznaczyć, że zgrzewanie tarciove czy wybuchowe nie jest technologią spawania. Tutaj bardziej odpowiednie byłoby użycie terminu „spajanie”, który obejmuje zarówno spawanie, jak i zgrzewanie.

2. W opisie rysunku 6 na stronie 19 podano terminologię dotyczącą niezgodności spawalniczych na podstawie pozycji literaturowej z 1989 roku, a nie na podstawie aktualnie obowiązującej normy PN-EN ISO 6520.
3. Na stronie 19 Doktorant pisze „Na Rys. 7 pokazano w sposób schematyczny podstawowe obszary dwóch odmiennych typów spoin” podczas, gdy przedstawiono na nim złącze spawane i złącze zgrzewane.
4. Wyjaśnienia wymaga zapis ze strony 19 „Jeżeli dla metody spawania łukiem krytym zostaje zastosowana mieszanka gazów osłonowych Ar+CO₂, to uzyskuje się zmniejszenie profilu lica spoiny i powiększenie wartości kąta pomiędzy licem spoiny a blachą łączoną”. Spawanie łukiem krytym wyklucza zastosowanie gazu do osłony spoiny od strony lica. Te rolę pełni topnik.
5. Wyjaśnienia wymaga również stwierdzenie podane na stronie 20 „Naprężenia spawalnicze powstają w prawie każdym procesie spawania. Są nieodłącznie związane z przemianami fazowymi zachodzącymi w materiale łączonym”, podczas gdy większość naprężeń powstaje w wyniku działania karbu geometrycznego np. od niezgodności spawalniczych.
6. Na stronie 37 Doktorant pisze „optymalny kształt”. Nie podaje jednak ze względu na jakie kryterium. Proszę o wyjaśnienie.
7. W podrozdziale 2.4.1. Badania na próbkach materiałowych a) Wytrzymałość połączeń spawanych Autor opisuje między innymi próbę statycznego rozciągania poprzecznego złącza spawanego. Ze względu na to, że złącze spawane jest niejednorodne (materiał rodzimy, SWC, spoina, SWC, materiał rodzimy) określa się wyłącznie wytrzymałość złącza spawanego i miejsce w którym nastąpiło zerwanie próbki. Na potrzeby badań naukowych dopuszczalne jest określenie również innych wielkości, które podano na rysunku 153 i w tabelicy 30 na stronie 153. Proszę o wyjaśnienie czemu miały służyć opisane badania.
8. Na stronie 62 Autor używa terminu „obszar wpływów cieplnych”, natomiast prawidłowy, stosowany w normach i literaturze z zakresu spawalnictwa to termin „strefa wpływu ciepła (SWC)”.
9. W podrozdziale 2.4.1. Badania na próbkach materiałowych b) Trwałość zmęczeniowa Doktorant podaje wyniki badań zmęczeniowych materiału podstawowego, złączy doczołowych z umiejscowionymi wzdłużnie do kierunku działania obciążenia spoinami czołowymi i złącza krzyżowego ze spoinami pachwinowymi. Najmniejszą trwałość zmęczeniową uzyskano dla złącza krzyżowego ze spoinami pachwinowymi. Autor odnosi się do tego na stronie 64 „Powyższe wyjaśniono największym strumieniem energii cieplnej dostarczonej do węzła podczas wykonywania węzła krzyżowego”, nie podając jednak nigdzie tego wyjaśnienia. Uważam, że uzyskany wynik badania trwałości zmęczeniowej wynikał z karbu geometrycznego, jakim jest normalny i wynikający z istoty spoin pachwinowych brak ciągłości materiału w całym przekroju poprzecznym złącza. Jest to powszechnie znane i opisane w literaturze z zakresu spawalnictwa. To samo zjawisko Autor wyjaśnia w prawidłowy sposób na stronie 67 „Na podstawie przeprowadzonej analizy uszkodzeń badanych węzłów oraz miejsca inicjacji pęknięć stwierdzono, że sprzyjały im lokalne wady samej spoiny pachwinowej

oraz uszkodzenia powstałe podczas obróbki mechanicznej spoin. Inicjacji pęknięcia sprzyjał np. brak przetopu materiału w obszarze występowania maksymalnych naprężeń gnących”. To samo, prawidłowe wyjaśnienie Autor zamieścił w podrozdziale 2.5.1 na stronie 76. Proszę o wyjaśnienie.

10. Na stronie 91 Doktorant podaje warunki brzegowe w oparciu o które prowadzono dekompozycję i wybór podzespołu. Proszę o ich szersze omówienie i uzasadnienie wyboru podanych warunków.
11. W nawiązaniu do opisanej na stronie 94 dekompozycji proszę o przedstawienie jaki jest związek warunków obciążenia wydzielonych próbek z warunkami obciążenia kompletnych zespołów.
12. Proszę o wyjaśnienie dlaczego przeprowadzono badania niskocyklowe próbek.
13. Proszę o wyjaśnienie sposobu przedstawienia wyników badań na rysunku 134 ze strony 138. Zamieszcza się albo pojedyncze punkty, albo dokonuje ich aproksymacji za pomocą odpowiedniej funkcji.
14. Wniosek 4 ze strony 174, wniosek 6 i 9 ze strony 175 oraz 14 ze strony 177 mają charakter stwierdzeń ogólnych i nie wynikają bezpośrednio z badań przedstawionych w pracy doktorskiej. Moim zdaniem można zrezygnować z ich zamieszczania.

Najważniejsze uwagi szczegółowe

1. W Spisie ważniejszych oznaczeń nie podano jednostek miary w których są one wyrażone. Proponuję ich podanie.
2. Na stronach 23, 102 Doktorant użył terminu „spoina doczołowa” podczas, gdy prawidłowy termin to „spoina czołowa”.
3. Na stronach 16, 18 i 29 Doktorant używa terminu „wada”. Uważam, że bardziej zasadne byłoby użycie terminu „nieciągłość”, gdyż „wada” to nieciągłość która według przyjętych kryteriów nie jest dopuszczalna. Termin ten został prawidłowo użyty na stronie 18.
4. Na stronie 34 Autor używa terminu „krawędź spoiny”, a na stronie 36 „krawędź lica”, natomiast prawidłowy termin to linia przejścia spoiny do materiału podstawowego.
5. Autor wielokrotnie używa terminu „dedykowane”. Proponuję używanie terminu „przeznaczone do”.

Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomimo wymienionych uwag ogólnych i szczegółowych stwierdzam, że Autor osiągnął cele postawione w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie nie tylko poznawcze, ale również szczególnie istotnych dla zastosowania wiedzy z zakresu trwałości zmęczeniowej złożonych struktur spawanych do praktyki przemysłowej. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo – badawczej.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Na tej podstawie składam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Michała Piotrowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszcy.

