

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tadeusza Pały
pt. *„Wytrzymałość i odporność na pękanie złączy spawanych laserowo ze stali ferrytycznych”*

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska podejmuje zagadnienie oceny wpływu technologii wykonywania połączeń spawanych stali o ferrytycznej strukturze na ich wytrzymałość i odporność na pękanie. Opracowanie stanowi oryginalne połączenie różnych metod badań z zakresu inżynierii mechanicznej zrealizowanych w celu uzyskania wyników o charakterze technologicznym i metodycznym.

Struktura rozprawy jest zgodna metodologią badań naukowych. Rozpoczyna ją rozdział pierwszy zatytułowany „Wstęp”, w którym uzasadniono potrzebę realizacji badań przedstawionych w pracy doktorskiej. Zwrócono przy tym szczególną uwagę na wzrastającą rolę technologii spawalniczych w procesach wytwarzania elementów maszyn i urządzeń.

Rozdział drugi rozprawy poświęcony został dwóm podstawowym problemom odnoszącym się do aplikacji nowych technologii wykonywania złączy spawanych, to znaczy zagadnieniu wpływu procesu przepływu ciepła na jakość i wytrzymałość złączy spawanych oraz zagadnieniu nowych, niekonwencjonalnych metod badań materiałów zawierających defekty wywołane technologią ich łączenia. Te dwa główne zagadnienia w dalszej części będą stanowiły podstawową treść pracy w odniesieniu do wybranych materiałów, dla których opracowano i zrealizowano program badań. Omówione w tym rozdziale metody badań, jak do chwili obecnej, w niewielkim stopniu stosowane były do oceny jakości laserowo spawanych elementów maszyn i urządzeń.

Po przedstawieniu wiadomości podstawowych z zakresu tematyki rozprawy Autor w rozdziale trzecim sformułował tezę i cele pracy. Teza pracy ma charakter technologiczny, jakkolwiek badania wykonane w ramach rozprawy koncentrują się w głównej mierze na zastosowaniu nowych niekonwencjonalnych metod badań materiałowych do oceny własności połączeń, wykonanych za pomocą różnych technologii spawalniczych, w tym

odporności na pękanie materiałów strukturalnie niejednorodnych. Sposób ujęcia zadania badawczego oraz zastosowane metody badań i analizy ich rezultatów stanowią przykład nowoczesnego połączenia zagadnienia z zakresu technologii materiałowych z problematyką badania zachowania się materiałów w próbach stanowiących symulację warunków ich użytkowania.

W rozdziale czwartym scharakteryzowano materiały, dla których wykonane zostały badania oraz przedstawiono ich metody. Rozdział ten zawiera zarówno szczegóły dotyczące podstawowych metod badań materiałowych takich jak badania metalograficzne, pomiary twardości czy też statyczna próba rozciągania i zginania jak również opis zastosowanej w rozprawie metody badania odporności na pękanie uwzględniającej niejednorodność własności materiałowych, wynikającą z zastosowanej technologii. Charakterystykę metod badań przewidywanych do zastosowania uzupełniono opisem pomiaru przemieszczeń z wykorzystaniem systemu cyfrowej korelacji obrazu i opisem sposobu modelowania przebiegu odkształcania w próbkach rozciąganych przy użyciu metody elementów skończonych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowana i przedstawiona w rozprawie metoda wyznaczania lokalnych podstawowych własności mechanicznych wyznaczanych na próbkach pobieranych ze złączy spawanych. Podstawowe własności wytrzymałościowe i plastyczne powiązane zostały następnie z rezultatami pomiarów twardości. W tej części rozprawy zamieszczono wyniki badań zależności pomiędzy wymienionymi własnościami i twardością.

Analizując wyniki zobrazowane w rozdziale 4 na rysunku 4.14 nasuwają się pewne wątpliwości i moim zdaniem niektóre kwestie wymagają wyjaśnienia.

- Należałoby wyjaśnić, czy charakterystyki przedstawione na rysunku 4.14 odnoszą się do jednego gatunku stali. Czy można przedstawione rezultaty zastosować do analizy zachowania się wszystkich rozpatrywanych materiałów oraz różnych rodzajów połączeń spawanych? Ten problem wymaga odrębnej analizy i uzasadnienia.
- Konieczne jest podanie informacji, w jaki sposób zdefiniowano granicę plastyczności. Uważam, że należałoby w tym miejscu przedstawić przykłady

wykresów zależności naprężenia od odkształcenia, wyznaczone dla różnych próbek z zaznaczeniem punktów, które odpowiadają przyjmowanej w pracy granicy plastyczności.

- Nie jestem przekonany, czy wyniki zamieszczone na rysunku 4.14 powinny znaleźć się w rozdziale „Materiały rodzime i metody badawcze”, czy raczej powinny być częścią pracy obejmującej rezultaty badań własnych.

Jakkolwiek analiza wyników w tej części rozprawy wymagałaby uzupełnień, a badania powinny być kontynuowane, sam zaproponowany w rozprawie sposób podejścia do oceny lokalnych własności materiału należy uznać za oryginalny i stwarzający możliwość dalszej bardziej wszechstronnej oceny zachowania się połączeń spawanych w tym analizie procesu ich odkształcania w warunkach rozciągania przy użyciu metod modelowania komputerowego.

W kolejnym rozdziale przedstawiono podstawowe parametry zastosowanych technologii spawania zamieszczając tabelaryczne ujęcie parametrów, przy zastosowaniu których wykonywano złącza dla każdego z trzech badanych materiałów. Moim zdaniem w tym miejscu wskazane byłoby uzasadnienie zawierające kryteria doboru parametrów technologii spawania, bez którego parametry zestawione w tabelach 5.1, 5.2, 5.3 mogą wydawać się przyjęte w sposób zbyt arbitralny.

Dalsza część rozprawy zawiera obszerny zbiór wyników badań stanowiących podstawę do wyciągania wniosków o technologicznym charakterze. Rozpatrywane stale omówiono w trzech odrębnych rozdziałach odnoszących się do stali 13CrMo4-5, 16Mo3 i S960QC. Każdy z nich zawiera:

- wyniki badań rozkładów twardości,
- badania metalograficzne,
- wyniki prób zginania,
- własności wytrzymałościowe wyznaczone na podstawie rezultatów badania twardości,
- wyniki badań odporności na pękanie w poszczególnych strefach złączy spawanych

- oraz wyniki badań pola odkształceń w tych samych próbkach z użyciem systemu Aramis.

Ponadto w rozdziałach 6 i 8 zamieszczone zostały wyniki symulacji numerycznej testu rozciągania wykonanego na próbkach zawierających złącza spawane i porównanie uzyskanych rezultatów z badaniami pola odkształceń z wykorzystaniem systemu Aramis.

Rozdział 7 nie zawiera wyników symulacji numerycznej a poszczególne zagadnienia w rozdziałach 6-8 omówione zostały mniej lub bardziej wyczerpująco, co powoduje, że praca staje się w pewnym stopniu w swej strukturze niejednorodna. Nie umniejsza to jednak w sposób istotny wartości rozprawy. Zarówno uzyskane rezultaty jak i różnorodność zastosowanych metod świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego wykonywania badań naukowych oraz opracowywania i analizy ich wyników.

Pewnym niedociągnięciem w zakresie prezentacji rezultatów badań jest również brak szczegółowych informacji w odniesieniu do przyjętego modelu materiału w programie „ABAQUS 6.12”.

- Czy zastosowano model sprężysto-plastyczny z liniowym czy nieliniowym umocnieniem, przyjęto wzmocnienie kinematyczne czy izotropowe?
- Czy wykresy rozciągania poszczególnych stref złączy spawanych zadeklarowane w modelach numerycznych to wykresy uzyskane z testów wytrzymałościowych czy też charakterystyki przyjęte w oparciu o wyznaczone wcześniej relacje pomiędzy podstawowymi własnościami mechanicznymi i twardością?

W części obejmującej wyniki badań własnych najbardziej wyczerpująco i szczegółowo omówione zostały właściwości złączy spawanych wykonanych ze stali S960Q6. Za szczególnie wartościową i godną uwagi uważam w tym wypadku część rozdziału 6 odnoszącą się do wyników badań lokalnej odporności na pękanie z uwzględnieniem wpływu temperatury. Bowiem charakterystyki przedstawione w tym miejscu pracy mogą stanowić podstawę do prognozowania mechanizmów powstawania uszkodzeń w złączach spawanych w elementach urządzeń wykonanych z rozpatrywanego materiału w warunkach eksploatacji.

Każdy z rozdziałów 6-8 obejmuje wyniki uzyskane dla danego materiału wraz z ich omówieniem i zakończony został podsumowaniem. Niezależnie od takiego sposobu zakończenia rozdziałów, będącego próbą syntetycznego ujęcia rezultatów, odnoszących się do każdego z materiałów, na końcu rozprawy zamieszczono rozdział „Podsumowanie oraz wnioski”, stanowiący próbę uogólnienia wyników i opracowania wniosków o aplikacyjnym charakterze oraz jednocześnie potwierdzenie tezy rozprawy. Ten końcowy rozdział rozprawy doktorskiej zawiera wnioski odnoszące się do własności wytrzymałościowych i odporności na pękanie połączeń wykonywanych ze stali 13CrMo4-5, 16Mo3 i S960QC za pomocą technologii spawalniczych. Zawiera również uwagi na temat możliwości stosowania przyjętej w pracy metodyki badań do oceny lokalnych własności materiałów o niejednorodnej strukturze. Tę część podsumowania rezultatów pracy uważam za oryginalną i szczególnie wartościową.

Wniosek końcowy

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Tadeusz Pała wykazał się umiejętnością opracowania i realizacji szerokiego i komplementarnego programu badań z zakresu inżynierii mechanicznej w celu wykazania użyteczności metod spawania laserowego do wykonywania połączeń wybranych gatunków stali o strukturze ferrytycznej. Udowodnił tym samym tezę rozprawy zakładającą, że przy użyciu technologii spawania laserowego można uzyskać złącza ze stali ferrytycznych w tym wysokowytrzymałej stali AHSS o wytrzymałości nie niższej niż materiału rodzimego.

Biorąc pod uwagę znaczenie przedstawionej w pracy problematyki, przyjęty program badań, założoną i udowodnioną tezę rozprawy oraz opracowane charakterystyki materiałowe stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, zgodnie z Dz.U z 2017 r. poz. 178 i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Tadeusza Pały do jej publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna w Politechnice Świętokrzyskiej.

Jan Okojni