

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Roberta Pały

pt.:

„Wpływ grubości elementu konstrukcyjnego na odporność na pękanie z uwzględnieniem zjawiska delaminacji”

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo MAA-510/90/2022 z dnia 15.06.2022 r. Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej, dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk.

Praca doktorska mgra inż. Roberta Pały poświęcona jest bardzo ważnej i aktualnej tematyce dotyczącej badań i modelowania wpływu grubości próbek na odporność materiału na powstawanie pęknięć uwzględniając zjawisko delaminacji przy użyciu różnych rodzajów materiałów.

Rozwój pęknięć i trwałość należą do bardzo ważnych i intensywnie badanych zjawisk mechaniki ciała stałego. Rozwój pęknięć może mieć charakter niebezpiecznie kruchy lub łagodny (gdy występuje tępienie wierzchołka pęknięcia) – ten ostatni obserwuje się w materiałach plastycznych. Kruche pękanie spotyka się najczęściej w materiałach takich jak: żeliwo, szkło, ceramika. Szybki i niezwykle niebezpieczny, doprowadzający do katastrof, rozwój pęknięć może się również pojawiać w materiałach, które mają wewnętrzne wady materiałowe (np.: pory, zgorzeline) lub w przypadkach, gdy podczas procesu spawania nastąpi zmiana struktury materiału. Bardzo ważnym elementem w konstrukcji i budowie urządzeń oraz części maszyn pracujących w warunkach różnych obciążeń jest dobór materiału o jak największej odporności na pękanie. Podstawy do rozwoju mechaniki pęknięcia zostały opracowane w latach dwudziestych XX wieku przez Griffitha, a następnie Irvina. Intensywny rozwój nauki dotyczącej zagadnień mechaniki pęknięcia nastąpił w okresie II wojny światowej i dotyczył statków Liberty, które niejednokrotnie tonęły na skutek pęknięć spowodowanych niewłaściwym sposobem spawania (wadliwe spoiny). Zagadnienia te były kontynuowane w okresie powojennym rozwijając mechanikę pęknięcia statyczną i cykliczną.

Rozprawa doktorska o objętości 136 stron maszynopisu napisana została w języku polskim i złożona jest z 9 rozdziałów i 14 podrozdziałów, takich jak streszczenia w języku polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, podsumowanie oraz wnioski i spis literatury zawierający 98 pozycji, w której to literaturze jest wymienionych 15 pozycji współautorskich Doktoranta.

1. Zakres rozprawy

We wstępie opisano problematykę dotyczącą tematu pracy i przedstawiono krótki przegląd literaturowy. Rozdział 2 to cele i teza pracy, które obejmują badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne z użyciem MES. Podano na podstawie przeglądu literatury, że do oceny wytrzymałości elementów konstrukcyjnych stosuje się dwa podejścia, tzn. globalne i lokalne. Rozdział 3 zawiera wykaz materiałów do badań. Opisano sześć rodzajów materiałów, które poddano badaniom, w tym pięć stali o różnych właściwościach i

staliwo. Rozdział 4 dotyczy zastosowanych metod badawczych, a mianowicie metod wykonywania próbek i prowadzonych badań eksperymentalnych. Rozdział 5 to wpływ temperatury i grubości elementu na charakterystyki wytrzymałościowe i odporność na pękanie materiałów konstrukcyjnych. Wpływ temperatury badano w zakresie zmiany mechanizmu pękania w testowanych materiałach, mianowicie od całkowicie kruchego do plastycznego, i dla stali ferrytycznych jest to przedział temperatur od -130 do 20°C . Następnie badano odporność na pękanie poszczególnych materiałów oraz krytyczne wartości odporności na pękanie J_{IC} lub K_{IC} . Testy przeprowadzono na próbkach trójpunktowo zginanych (SENB), uwzględniając orientację pęknięcia głównego względem kierunku walcowania, co umożliwiło zaobserwowanie pęknięć delaminacyjnych. Otrzymane wyniki pokazano w postaci wykresów i tabel oraz przełomów próbek. Dwa pierwsze podrozdziały kończą się podsumowaniem. Obserwowano występowanie pęknięć delaminacyjnych oraz ich wpływ na poziom odporności na pękanie. W rozdziale 6 przedstawiono analizę numeryczną wpływu grubości i temperatury na rozkład naprężeń przed frontem pęknięcia. Zaprezentowano analizowany model próbki trójpunktowo zginanej oraz wpływ wielkości promienia i wielkości siatki w wierzchołku pęknięcia na rozkład naprężeń, który to rozdział zakończono krótkim podsumowaniem. Dokonano analizy wpływu grubości elementu (próbki) na stan trójosiowości naprężeń przed frontem pęknięcia w obszarze pękania kruchego i przejścia krucho-plastycznego. Następnie dokonano oceny wpływu kształtu cząstek (wtrąceń) na pola naprężeń przed frontem pęknięcia, używając do oceny wyników staliwa G17CrMo5-5. Rozdział 7 dotyczy występowania pęknięcia delaminacyjnego i jego wpływu na pola naprężeń przed wierzchołkiem pęknięcia głównego. W celu wyznaczenia naprężeń stosowano obliczenia numeryczne, których wyniki następnie poddano analizie. Wykazano, że inicjacja pęknięcia delaminacyjnego ma miejsce w strefie podwyższonej koncentracji wtrąceń i wysokich poziomów naprężeń. Krótkie podsumowanie kończy ten rozdział. Rozdział 8 to podsumowanie całej pracy i wnioski. Następnie podano przypis końcowy, w którym podano realizowane projekty badawcze. Biografia i streszczenia w języku polskim i angielskim zamykają rozprawę.

Objętościowo większa część pracy przedstawia własny wkład Doktoranta wzbogacając aktualny stan wiedzy o nowe wyniki eksperymentalne, obliczeniowe i analizy w tym zakresie, które w reprezentowanej dyscyplinie naukowej należy traktować jako cenne. Duża liczba przywołanych pozycji literaturowych na etapie pobieżnej oceny rozprawy wskazuje na dobre rozeznanie Doktoranta o stanie wiedzy dotyczącej podejmowanej w pracy tematyki.

Na podkreślenie zasługuje zakres badań eksperymentalnych, jaki został zrealizowany i ich opis. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego zaplanowania badań i ich realizacji. Wyniki badań zostały opracowane właściwie i przedstawione w sposób czytelny.

Mgr inż. Robert Pała w swoim dorobku naukowym posiada współautorstwo 12 artykułów opublikowanych w czasopismach z listy JCR (baza Scopus stan na dzień 29.06.2022), mianowicie: *Materials* (5 artykułów), *Materials Science* (1 artykuł), *Acta Mechanica et Automatica* (3 artykuły), *Metals* (1 artykuł), *Archives of Metallurgy and Materials* (2 artykuły) oraz publikacje wydane w recenzowanych materiałach konferencyjnych, między innymi w AIP Conference Proceedings. Dane nauko-metryczne Doktoranta wynoszą odpowiednio: 77 cytowań, a indeks Hirscha jest równy 6. **Dorobek publikacyjny, zgodnie z aktualną ustawą, w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawą doktorskim.**

2. Charakterystyka rozprawy

W pracy przedstawiono badania literaturowe i badania eksperymentalne oraz obliczenia z użyciem MES dotyczące odporności materiałów na powstawanie pęknięć. Badania eksperymentalne dotyczyły wpływu temperatury i grubości próbki na charakterystyki wytrzymałościowe z uwzględnieniem delaminacji, która występuje przy dużej koncentracji wtrąceń niemetalicznych oraz wyznaczenie odporności na pękanie poszczególnych materiałów. Zastosowane do badań materiały różniły się mikrostrukturą oraz właściwościami i były to stale: S235JR, S355, Hardox-400, S960QC, 42CrMo4 i staliwo G17CrMo5-5 niemodyfikowane i modyfikowane. Użyte i badane parametry to krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia (WIN) K_{IC} lub krytyczna wartość całki $J - J_{IC}$. Badania wykonywano na maszynach wytrzymałościowych MTS-250 i Zwick-100 do jednoosiowego rozciągania i trójpunktowego zginania wyposażonych w zautomatyzowane systemy sterowania procesem obciążenia oraz rejestracji sygnałów pomiarowych. Rozwijające się pęknięcia rejestrowano metodą zmiany podatności i metodą spadku potencjału. Badano mechanizmy pękania (zniszczenia) od całkowicie kruchego, poprzez mieszany krucho-plastyczny, do całkowicie plastycznego realizowanego poprzez nukleację, wzrost i łączenie pustek występujących w zależności od różnych temperatur. Wyniki badań przedstawiono w postaci różnych charakterystyk, jak np. siła – ugięcie czy naprężenie – odkształcenie, odporność na pękanie w funkcji temperatury dla różnych grubości próbek. Badania prowadzono w szerokim zakresie temperatur -130 do 20°C. Obserwowano różne mechanizmy pękania. Wyznaczano krytyczne wartości WIN dla różnych grubości próbek i badanych zakresów temperatur zgodnie z kierunkiem walcowania i prostopadle do kierunku walcowania. Przeprowadzono również badania odporności na pękanie próbek z rzeczywistymi i modelowanymi szczelinami delaminacyjnymi. Obliczenia numeryczne prowadzono w programie Adina 8.9 dla sprężysto-plastycznego modelu materiału. Badano rozkłady naprężeń i odkształceń w obszarze wierzchołka pęknięcia dla różnych grubości próbki i temperatury. Korzystając z tych wyników określano jak zmienia się mechanizm pękania. Na podstawie analizy rozkładów naprężeń i badań fraktograficznych powierzchni pęknięć próbek określano krytyczny poziom naprężenia rozwierającego. Przy wykorzystaniu rozkładów naprężeń i odkształceń obliczano takie wielkości jak współczynnik trójosiowości naprężenia i parametr Lode, które wskazują na rodzaj mechanizmu pękania. Na podstawie badań zauważono, że na poziom krytycznej wartości odporności na pękanie duży wpływ ma kształt wtrąceń w materiale. Występowanie delaminacji podczas obciążania próbki zakłóca poprawny przebieg próby i prowadzi do „wzrostu” odporności na pękanie.

Metodyka badawcza, opracowanie i analiza otrzymanych wyników nie budzą zastrzeżeń. Podczas recenzowania pracy pojawiło się kilka uwag i pytań, których wyjaśnienie powinno podnieść jakość pracy.

Stwierdzam, że zrealizowany zakres pracy włożonej przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej stanowi istotny wkład w rozwój problematyki naukowej dotyczącej mechaniki pękania.

3. Uwagi krytyczne i ocena redakcyjna rozprawy

Pomimo pozytywnej oceny pracy, zauważono następujące niedociągnięcia:

1. Dlaczego Autor stosuje w pracy dwa różne oznaczenia, a nawet trzy do opisu granicy plastyczności, R_e i σ_{YS} , σ_y (literatura angielsko-języczna), i wytrzymałości na rozciąganie R_m i σ_{UTS} .

2. Skrót WIN oznacza współczynnik intensywności naprężenia a nie naprężeń (jak pisano w rozprawie), ponieważ jest to tłumaczenie angielskiego wyrażenia Stress Intensity Factor (SIF), które to wyrażenie pokazano również w pracy na str. 9.

3. W analizie literatury, we wstępie, brak jest istotnych informacji, np. na str. 21 w artykule Yanga i innych podano, że „...i temperatura silnie wpływały na rozmiar i ilość pęknięć delaminacyjnych.” ale nie podano jak. Powstaje pytanie czy nie było tego opisu w przytoczonym artykule czy po prostu Autor rozprawy ich nie zamieścił?

4. W opisie materiałów do badań na str. 29 i w dalszej części pracy podano dwa oznaczenia stali S355J2 i S355JR, która stal była badana?

5. Proszę wyjaśnić dlaczego wyznaczając właściwości mechaniczne w pracy nie podano modułów Younga badanych materiałów poza stalą Hardox-400 i 42CrMo4.

6. W pracy brakuje informacji ile próbek zbadano i czy była powtarzalność wyników? Dla zastosowanych technik pomiarowych metody zmiany podatności i spadku potencjału oraz testowanych temperatur czy grubości próbek badania wykonywano na jednej próbce czy wielu?

7. Jeśli chodzi o obliczenia numeryczne nie jest jasne czy użyty model był liniowy czy nieliniowy. Ponadto brakuje wielu informacji dotyczących modelowania, np. z ilu elementów skończonych składał się model?

8. Pod koniec rozdziałów 5.2 i 6.2 podano podrozdziały zatytułowane „Wnioski”, które są podsumowaniem i tak też powinny być zatytułowane, jak w pozostałych rozdziałach pracy.

9. W rozdziale 3 dla stali Hardox-400 podano analizę składu chemicznego wykonanego metodą EDS, natomiast w przypadku pozostałych badanych materiałów brak takiej analizy. Dlaczego nie zamieszczono wyników analizy metodą EDS dla innych badanych materiałów? Podobnie wygląda sytuacja z pomiarem twardości, podano wyniki tylko dla niektórych materiałów, a dlaczego nie dla wszystkich?

10. Dobrze byłoby pod koniec rozprawy podać propozycje (kierunki) przyszłych badań.

Praca zredagowana i napisana jest w sposób jasny i przystępny dla czytelnika, stosowana terminologia jest raczej poprawna, dobór ilustracji właściwy. Układ tematyczny pracy jest logiczny. Pomimo tego Autor nie ustrzegł się szeregu usterek redakcyjnych jak:

- w całej pracy używa się kropek zamiast przecinków w przypadku wartości dziesiętnych itd., np. tabela 3.1,

- str. 21, rys. 1.4 brak skali na rysunkach a) i b),

- str. 22⁰³ jest ...zładów..., powinno być ...zgładów...,

- str. 29³ styl, powinno być ...o składzie chemicznym zamieszczonym w tabeli 3.2,

- str. 37 brak w tekście wprowadzenia do rys. 4.1,

- str. 71 brak w tekście wprowadzenia do rys. 5.31 i brak skali na rysunkach (w podpisie podano grubości próbek ale widać różnice dla b i d).

4. Ocena końcowa rozprawy

Z przedstawionej oceny rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty w niej temat, o istotnym znaczeniu poznawczym i użytecznym, został zrealizowany przez Doktoranta na odpowiednio wysokim poziomie.

Na podstawie badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych oraz uzyskanych wyników Doktorant wykazał duży zasób wiedzy, zrealizował cele pracy doktorskiej i udowodnił tezę, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych.

Na wartość naukową rozprawy doktorskiej składają się następujące oryginalne elementy:

1. Podjęcie próby modelowania i numerycznego opisu rozkładu naprężeń przed frontem pęknięcia podczas rozwoju pęknięć z uwzględnieniem delaminacji oraz określanie mechanizmu pęknięcia.
2. Zaprezentowany współczynnik trójosiowości stanu naprężenia i parametr Lode, który może być zastosowany do oceny charakteru pęknięcia w próbce.
3. Realizacja eksperymentalna wpływu różnych temperatur i grubości próbki na odporność na pęknięcie dla różnych materiałów i szeroka baza uzyskanych wyników badań eksperymentalnych.

Otrzymane i prezentowane wyniki badań stanowią bardzo cenny materiał naukowy będący inspiracją do prowadzenia dalszych dociekań i analiz.

5. Wniosek końcowy

W związku z powyższym uważam, że przedstawiona do oceny praca mgr inż. Roberta Pały spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 03 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018, poz. 1669, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony, w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn aktualnie inżynieria mechaniczna, przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej.



