

Kraków 2022-09-01

dr hab. inż. Tomasz MACHNIEWICZ, prof. AGH
Katedra Projektowania i Eksploatacji Maszyn
Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Roberta PAŁY

pt.: *„Wpływ grubości elementu konstrukcyjnego na odporność na pękanie z uwzględnieniem zjawiska delaminacji”*.

Podstawą formalną opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 26 maja 2022, w sprawie powołania recenzentów przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Oceniana praca koncentruje się na analizie odporności na pękanie materiałów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem, zgodnie z tytułem, ich grubości i zjawiska delaminacji, a ponadto znacznie szerszego zbioru zmiennych, obejmującego w szczególności różne rodzaje materiałów, wpływ temperatury oraz efekty związane z orientacją próbek. Synergiczny efekt wymienionych czynników tworzy szeroką przestrzeń dla badań naukowych o interesujących walorach poznawczych i dużym pragmatycznym znaczeniu, szczególnie w aspekcie wskazania kryteriów zapewniających bezpieczną eksploatację elementów konstrukcyjnych. W pełni uzasadnia to celowość podjęcia tematu rozprawy, a równocześnie pozwala uznać jej zakres badawczy za odpowiedni dla pracy doktorskiej.

Zastosowane metody badawcze, tj. w głównej mierze eksperymentalne badania charakterystyk wytrzymałościowych i odporności na pękanie różnych materiałów oraz odpowiadające im analizy MES stanów naprężenia w elementach zawierających pęknięcie kwalifikują przedstawione osiągnięcie do dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Praca ma formę książki formatu 165 x 235 mm i składa się z siedmiu rozdziałów rozmieszczonych na 119 stronach. Pierwszy z nich (16 stron) stanowi teoretyczny wstęp do rozprawy; pozostałe rozdziały (103 strony) dotyczą własnych badań Doktoranta. Całość poprzedza *wykaz ważniejszych oznaczeń* (2 strony), zamyka zaś, obejmujący 98 pozycji *spis literatury* (6 stron), oraz streszczenia w języku polskim i angielskim (po 1 stronie).

Praca zawiera łącznie 105 rysunków; 6 spośród nich dotyczy przeglądu literatury (*Wstęp*), zaś niemal 100 pozostałych stanowi w większości autorskie schematy, wykresy i ilustracje opisujące wykonane przez Doktoranta badania, analizy i ich wyniki. Część przeglądową uzupełnia 1 tabela; 29 tabel opisuje wyniki badań własnych Doktoranta. Przedstawione ilustracje i tabele cechuje wysoki poziom graficznego dopracowania, są przejrzyste, czytelne i łatwe w interpretacji.

Z przywoływanej bazy bibliograficznej 28 prac pochodzi z ostatnich 10 lat, w tym 10 publikacji z ostatnich pięciu lat – w statystycznym ujęciu, to dość mało. Warto zaznaczyć, że spis literatury obejmuje także 14 publikacji których Doktorant jest współautorem: osiem z nich jest indeksowanych w bazie WoS, w łącznie siedmiu z nich Doktorant jest pierwszym autorem, z tego w trzech z grupy publikacji indeksowanych w WoS (co dotyczy tylko prac cytowanych w rozprawie).

Jak wspomniano wyżej rozprawę rozpoczyna *Wstęp*. Zgodnie z dość powszechną praktyką służy on w pracach doktorskich przedstawieniu samej genezy pracy i uzasadnieniu celowości podjęcia jej tematu; dopiero w kolejnych rozdziałach przedstawiany jest na ogół aktualny stan wiedzy dotyczący rozważanej tematyki. W omawianej rozprawie całe omówienie zagadnień teoretycznych stanowiących podstawę do realizowanych w pracy eksperymentów i analiz zostało w bardzo zwięzły sposób ujęte na 16 stronach *Wstępu*, na których kolejno omówione zostały: (i) cele i metody stosowane w mechanice pękania, (ii) kryterium Griffitha, (iii) pola naprężeń przed frontem pęknięcia, (iv) strefa plastyczna, (v) rozwarcie wierzchołka pęknięcia, (vi) całka J, (vii) wyznaczanie odporności na pękania, (viii) wpływ grubości, temperatury, wtrąceń i delaminacji na odporność na pękania, (ix) podejście lokalne w mechanice pękania. Wprowadzenie podpunktów do tego rozdziału – np. jak tu wymienione – uczyniłoby go

bardziej przejrzystym. Zawarte we *Wstępie* informacje stanowią wystarczającą bazę do prezentacji badań i analiz realizowanych w ramach pracy, w bardzo skromnym jednak zakresie odnoszą się one do aktualnego stanu wiedzy z zakresu tematyki rozprawy.

Sformułowana w rozdziale 2 teza pracy została właściwie powiązana z celami badawczymi, a zarazem etapami pracy; ich zakres i ranga są odpowiednie dla pracy doktorskiej. Doktorant rozumie i właściwie odwołuje się do podejścia globalnego i lokalnego przy ocenie wytrzymałości resztkowej elementu konstrukcyjnego. Teza pracy koresponduje z aktualnym zapotrzebowaniem dotyczącym lokalnego podejścia, które ze względu na rozwój metod numerycznych, a w szczególności analiz MES jest coraz częściej wybierane, przy równoczesnym braku powszechnie uznawanych lokalnych kryteriów pękania.

Rozdział 3 (błąd w tytule) przedstawia opis badanych materiałów, uwzględniający ich zastosowanie, charakterystyki materiałowe, skład chemiczny i mikrostrukturę. Kolekcja badanych materiałów jest bogata i dobrze dobrana. Obejmuje 5 różnych gatunków stali (S235JR, S355, Hardox-400, S960QC, 42CrMo4) oraz staliwo (G17CRMo5-5). Jako dodatkowe zmienne materiałowe uwzględniono 3 różne partie próbek ze stali S235JR oraz 2 odmiany mikrostruktury staliwa G17CRMo5-5, tj. stan modyfikowany metalami ziem rzadkich i niemodyfikowany. Wybrane materiały różnią się znacznie pod względem składu chemicznego, charakterystyk wytrzymałościowych oraz mikrostruktury, co stwarza warunki by na podstawie uzyskanych wyników móc formułować wnioski o ogólnym charakterze. Równocześnie są to materiały często stosowane w budowie maszyn i konstrukcji, co poza walorami poznawczymi nadaje także realizowanym badaniom znaczenie praktyczne. Zakres przedstawionych charakterystyk materiałów jest właściwy, opisy są syntetyczne lecz równocześnie wyczerpujące.

Rozdział 4 pracy prezentuje metody badawcze, a więc opisy realizowanych eksperymentów (próby statycznego rozciągania oraz badania odporności na pęknięcie metodą trójpunktowego zginania), parametry tych badań, geometrie próbek, techniki pomiarowe oraz sposoby opracowania wyników. Przedstawione w tym rozdziale informacje są zwarte i kompletne.

Najobszerniejszy w rozprawie Rozdział 5 (40 stron; 1/3 objętości pracy) stanowi dokumentację całego programu badań eksperymentalnych zrealizowanego w ramach pracy. Tą część pracy uważam za jej główne osiągnięcie. Zakres zrealizowanych eksperymentów jest

imponujący. Dla wymienionych wcześniej zmiennych materiałowych zrealizowano próby statycznego rozciągania oraz badania odporności na pękanie, uwzględniając w przypadku każdego z materiałów od 4 do 7 różnych temperatur (zwykle 5) z zakresu od -130 °C do 20 °C, a w przypadku badań odporności na pękanie stali wysokowytrzymałościowych, także różne grubości próbek (Hardox-400 – 8 grubości, S960QC – 6 grubości, 42CrMo4 – 4 grubości). W badaniach stali S235JR uwzględniono ponadto różne orientacje próbek względem kierunku walcowania blach (T-L oraz L-T) oraz obecność pęknięć lamelarnych w postaci naturalnych wad materiałowych oraz w postaci wykonanych elektroerozyjnie nacięć. Tak duża liczba przeprowadzonych eksperymentów zasługuje na wysoką ocenę, co dotyczy szczególnie testów odporności na pękanie, gdzie każdy pomiar wymagał zmęczeniowego wygenerowania wstępnego pęknięcia. Przedstawiając uzyskane wyniki Doktorant dobrze panował nad dużą liczbą rozważanych zmiennych. Rozdział zredagowany jest w sposób uporządkowany; formy prezentacji wyników są właściwie dobrane i czytelne. Wyniki, przedstawiające wartości wyznaczonych stałych materiałowych, zestawione najczęściej w postaci wykresów i tabel, zostały uzupełnione o poparte analizą fraktograficzną opisy mechanizmów pękania.

Rozdziały 6 i 7 przedstawiają wyniki wykonanych przez Doktoranta analiz numerycznych MES dotyczących wpływu grubości i temperatury (na przykładzie stali Hardox-400), wpływu kształtu wtrąceń (na przykładzie staliwaG17CrMo5-5), oraz wpływu pęknięć lamelarnych (na przykładzie stali S235JR) na rozkłady naprężeń przed frontem pęknięcia. Symulacje MES odzwierciedlały zrealizowane badania odporności na pękania. Użyte w tych analizach modele materiałowe uwzględniające wpływ temperatury opracowano na podstawie omówionych wcześniej prób statycznego rozciągania. Wykonane symulacje służyły wyznaczeniu rozkładów naprężeń przed wierzchołkiem pęknięcia odpowiadających momentowi inicjacji jego rozwoju. Zastosowana metodyka analiz nie budzi strzeżeń.

2. Najważniejsze osiągnięcia Doktoranta

Do najważniejszych udokumentowanych w pracy osiągnięć Doktoranta zaliczyć należy:

- a) Zrealizowanie obszernego programu badań eksperymentalnych** (próby statycznego rozciągania oraz badania odporności na pękanie), obejmującego pięć gatunków stali, różniących się mikrostrukturą oraz parametrami mechanicznymi, oraz staliwo w dwóch wariantach budowy mikrostrukturalnej, z uwzględnieniem różnych temperatur i różnych grubości próbek. Na tej podstawie dla rozważanych materiałów wyznaczono zależności:

- charakterystyk mechanicznych od temperatury,
- odporności na pękanie od grubości elementu w różnych temperaturach,
- odporności na pękanie od temperatury przy różnych grubościach elementu.

Ponadto:

- wykazano istniejące ograniczenia dotyczące możliwości wyznaczenia odporności na pękanie w sposób zgodny z wymogami normatywnymi,
- dowiedziono, że obecność pęknięć delaminacyjnych objawia się wzrostem odporności na pękanie.

W wyniku zrealizowanych badań została wygenerowana bogata baza danych eksperymentalnych, mogąca służyć w przyszłości do weryfikacji wielu różnych hipotez badawczych.

b) Przeprowadzenie z użyciem MES symulacji testów odporności na pękania, w warunkach trójpunktowego zginania, na podstawie których:

- wyznaczono krytyczne poziomy naprężeń, przy których uaktywniał się proces kruchego pękania,
- powiązano sposób pękania z wartościami współczynnika trójosiowości stanu naprężeń,
- zaproponowano zależność pozwalającą oszacować wartość odporności na pękanie dla dowolnej grubości elementu,
- wykazano, że obecność pęknięcia lamelarnego prowadzi do obniżenia uśrednionych po grubości próbki rozkładów naprężeń przed frontem pęknięcia, co tłumaczy obserwowany w badaniach eksperymentalnych wzrost odporności na pękanie w tych warunkach.

Praca ujawnia, że Doktorant opanował szereg umiejętności potrzebnych do swobodnej pracy naukowej w reprezentowanej dyscyplinie, takich jak: planowanie eksperymentu, prowadzenie badań eksperymentalnych, sprawne posługiwanie się metodą elementów skończonych, umiejętności interpretacji wyników, w tym właściwego kojarzenia rezultatów badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych.

3. Uwagi krytyczne

Analiza tekstu rozprawy nasuwa także pewne uwagi krytyczne, bądź wątpliwości, zapewne w dużej części subiektywne, które stanowić mogą inspirację do dyskusji podczas publicznej obrony pracy.

3.1. Uwaga ogólna

Praca w nikłym stopniu odnosi się do aktualnego stanu wiedzy z rozważanej tematyki, zarówno jeśli chodzi o genezę pracy, jak również konfrontację uzyskanych wyników z danymi literaturowymi. Ma to także tę dobrą stronę, że w ten sposób większość pracy prezentuje wyniki własne Doktoranta, a nie wyniki innych. Z drugiej jednak strony ważne jest, aby – nawiązując do myśli Wisławy Szymborskiej – „szumieć w [naukowym] chórze lasu” a nie tylko „na własną miarę znać nadzieję”. Co prawda można domyślać się, że taką umiejętność Doktorant posiada, gdyż bez niej nie mógłby powiększać dorobku publikacyjnego, jednak w ocenianej rozprawie nie zaprezentował jej w pełnej okazałości.

3.1. Uwagi i wątpliwości szczegółowe

- a) Wykaz skrótów jest niekompletny, co w połączeniu z częstym ich stosowaniem utrudnia studiowanie rozprawy.
- b) We wstępie Doktorant podaje zależność Irwina (1.10) na rozmiar strefy plastycznej: $r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{R_e} \right)^2$ - dla PSN. W literaturze przedmiotu napotkać można równanie, także wiązane z modelem Irwina, wskazujące na dwukrotnie większą wartość. Jak wyjaśnić tę „oboczność”, jakie inne modele strefy plastycznej istnieją i której „wersji” równania Irwina są one liczbowo bliższe?
- c) Przytoczone bez powołania warunki stosowalności LSMP (1.9) są bardzo zachowawcze w stosunku do podanych dalej wymagań normowych (1.26). Zależność (1.9) wskazuje na ponad sześciokrotnie większe wymiary „a” i „b” niż wymiary wymagane według zależności (1.26). Jak wyjaśnić tę różnicę?
- d) W mojej opinii odróżnianie od siebie modułów Younga oraz granic plastyczności wyznaczonych na podstawie charakterystyk inżynierskich i rzeczywistych nie jest celowe.
- e) Dość często stosowane w rozprawie pojęcie „krytyczna wartość odporności na pękanie” jest według mnie pleonazmem.

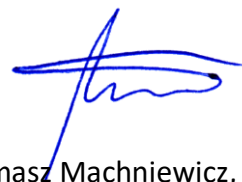
- f) Jak przyznaje sam Doktorant (str. 60), zaobserwowany dla stali wysokowytrzymałościowych trend wzrostu miar plastyczności wraz ze spadkiem temperatury jest zaskakujący, jednak „w ramach obecnej rozprawy nie prowadzono pogłębionych badań w celu wyjaśnienia takiego zachowania [...] materiału”. Choć godna podziwu jest konsekwencja w realizowaniu wyznaczanego z góry celu, to jednak takie podejście może prowadzić do przeoczenia doniosłych odkryć. Szkoda więc, że Doktorant nie zdecydował się jednak zaproponować/zaryzykować jakiejś hipotezy wyjaśniającej obserwowane efekty, lub chociaż nie powołał się na wyniki literaturowe, wskazujące na podobne, albo też przeciwne trendy. Być może obrona pracy stworzy ku temu okazję.
- g) Wskazana byłaby wizualizacja dopasowania równania 5.1 do danych eksperymentalnych (zależność granicy plastyczności od temperatury).
- h) W punkcie 6.2 prezentującym wyniki analiz MES dotyczące wpływu temperatury i grubości próbki na pola mechaniczne przed wierzchołkiem pęknięcia zabrakło informacji jakiego materiału dotyczą przedstawione wyniki; podpunkt „Wnioski” ujawnia dopiero, że przedmiotem analiz była stal Hardox-400. To jednak nie wyjaśnia tej samej wątpliwości dotyczącej następnego punktu.
- i) Jak podano (str. 97-98) wybór promienia zaokrąglenia wierzchołka pęknięcia, dokonywano na podstawie szeregu obliczeń numerycznych, przyjmując ostatecznie wielkość dającą zbieżność uzyskanych wyników przy dalszym zmniejszaniu jego wartości. Jak definiowano tą „zbieżność”? Przedstawiony przykład (Rys. 6.3) wskazuje na konsekwentny wzrost wartości naprężeń przed frontem pęknięcia wraz ze zmniejszaniem się promienia zaokrąglenia, bez widocznej tendencji do stabilizacji wyników.

Poza wymienionymi uwagami w pracy można natknąć się tu i ówdzie na drobne błędy edycyjne, bądź uchybienia stylistyczne, w liczbie akceptowalnej wobec objętości rozprawy i bez istotnego wpływu na jej wartość.

4. Wniosek końcowy

Z powyższej charakterystyki ocenianej rozprawy doktorskiej wynika, że podjęty w niej temat, o istotnym znaczeniu poznawczym i praktycznym, został, pomimo pewnych uwag krytycznych, zrealizowany na odpowiednio wysokim poziomie. Rozprawa prezentuje oryginalne osiągnięcie Doktoranta, jakim jest przeprowadzona na podstawie szerokiego zakresu badań eksperymentalnych oraz analiz numerycznych ocena zależności odporności na pękanie od temperatury, grubości elementu oraz obecności pęknięć lamelarnych. Zrealizowane badania i analizy pozwoliły na uzyskanie interesujących, opisanych wyżej wyników i zależności. Część z nich już wcześniej opublikowano, co oznacza, że ich wartość naukowa została także doceniona przez niezależne grono recenzentów decydujących o przyjęciu przedmiotowych publikacji do druku.

Ostatecznie można więc stwierdzić, że będąca przedmiotem niniejszej recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Roberta Pały spełnia wymogi określone ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i w związku z tym wnioskuję o jej dopuszczenia do publicznej obrony.



dr hab. inż. Tomasz Machniewicz, prof. AGH