

Prof. dr. hab. inż. Lucyna Jaworska
Katedra Metaloznawstwa i Metalurgii Proszków
Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej
Akademii Górniczo Hutniczej im. S.Staszica

Kraków 14.01.2024

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Furmańczyka pt. „Badanie procesu pękania elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przelomów”

Recenzja została sporządzona w związku z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej i pismem Dyrektora Rady dr hab. Sławomira Błasiaka, prof. PŚK, z dn. 22.11.2023 r., która powołała mnie do pełnienia funkcji recenzenta, w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna Panu mgr inż. Piotrowi Furmańczykowi.

Charakterystyka tematyki rozprawy doktorskiej

Badania odporności na kruche pękanie materiałów mają zasadnicze znaczenie biorąc pod uwagę intensywny rozwój nowych materiałów. Począwszy od roku 1920, kiedy A.A. Griffith opublikował wyniki badań dotyczące pękania materiału sprężystego, wielu naukowców podejmowało tematykę i badania pękania materiałów oraz wysiłki w zakresie matematycznego opisu zjawisk towarzyszących pękaniu. Obecnie najczęściej proces pękania opisuje się określając krytyczne wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} dla kruchego mechanizmu pękania, całki J , J_{IC} lub rozwarcia wierzchołka pęknięcia dla ciągliwego mechanizmu pękania.

Częściej niż obliczenia wyżej wymienionych wartości spotykamy we współczesnych badaniach materiałowych analizy przełomów. Są one bardzo ogólne i często sprowadzają się do oceny wizualnej mikrostruktur i odpowiedzi na pytanie czy przełom jest kruchy, plastyczny czy mieszany i czy pękanie jest transkrystaliczne, czy po granicach ziaren.

Podjętą tematykę pracy uważam za aktualną, ważną, o charakterze zdecydowanie użytecznym. Wartości tych charakterystyk takich jak wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} dla kruchego mechanizmu pękania, całki J , J_{IC} lub rozwarcia wierzchołka pęknięcia dla ciągliwego mechanizmu pękania wyznacza się na podstawie normy ASTM E1820 „Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness” lub normy ISO 12135 „Metallic materials – Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness”. W pracy zaproponowano nowe podejście do pomiarów szerokości strefy stępienia poprzez wprowadzenie narzędzia analizy obrazu pozwalającego wykonać pomiar powierzchni strefy stępienia oraz przeprowadzono obliczenia odporności na pękanie na podstawie pomiaru parametrów chropowatości za pomocą bezdotykowego profilometru.

Stwierdzam zatem, że praca ma zdecydowanie elementy nowości naukowej i stanowi wkład w rozwój inżynierii mechanicznej i dodatkowo inżynierii materiałowej, w zakresie wykorzystania nowoczesnych technik w badaniach przełomów metali oraz badaniach podstawowych zjawisk towarzyszącym procesowi pękania.

Formalna ocena pracy

Praca doktorska Pana mgr. inż. Piotra Furmańczyka jest napisana w formie klasycznej dysertacji. Łącznie stanowi ją 150 stron. Składa się ze: spisu treści, zestawienia i ważniejszych oznaczeń i skrótów, części literaturowej (stanowiącej dwadzieścia dziewięć stron), części badawczej (stanowiącej znakomitą większość rozprawy), podsumowania, wniosków, spisu literatury, streszczenia w języku polskim i angielskim.

Jako cel pracy Doktorant zaproponował: „opracowanie metod wyznaczania odporności na pękanie stali konstrukcyjnych na podstawie badań morfologii powierzchni przełomu przy zastosowaniu współczesnej aparatury i metodyk badawczych”. Cel został sprecyzowany jasno.

Przedstawiony stan zagadnienia, „Zarys mechaniki pękania” dobrze naświetla problem badawczy i tematykę doktoratu. Doktorant w logicznym wywodzie prowadzi czytelnika przez ocenę mechanizmów pękania, energetyczne kryterium pękania w ujęciu Griffitha, przedstawia modyfikacje tego kryterium, a także rozwiązanie pola naprężeń dla materiału liniowo-sprężystego przed wierzchołkiem szczeliny. Na podstawie analizy literatury Doktorant zaprezentował badania, które pozwoliły zdefiniować całkę J , krytyczną wartość całki J_{IC} oraz modele, które posłużyły do uzyskania wzorów na obliczenie wartości rozwarcia wierzchołka pęknięcia. Ostatnim etapem referowania stanu literatury jest obszerny opis zastosowania badań metalograficznych i fraktograficznych w analizie pękania materiałów. Cennym elementem części teoretycznej pracy są oryginalne, własne mikrostruktury obrazujące różne rodzaje przełomów, schematy pomiarów szerokości strefy stępienia i schematy rozwoju mikropęknięcia. Część teoretyczna jest silnie podparta literaturą przedmiotu, począwszy od pozycji źródłowych, kończąc na najnowszych modyfikacjach modeli i formuł. Zacytowano 144 pozycje literaturowe. W jedenastu cytowanych pozycjach literaturowych Doktorant jest ich współautorem.

Praca napisana jest w sposób zrozumiały, widać, że Doktorant swobodnie porusza się w obszarze podjętej tematyki badawczej. Zastosowany język jest poprawny pod względem stylistycznym, jakkolwiek pojawiły się nieliczne błędy gramatyczne (np. na stronach 36, 37).

W dysertacji znalazłam kilka nieprawidłowości, które mają charakter głównie edytorski.

Podstawowym rozwiązaniem w części teoretycznej pracy było przyjęcie źródłowych oznaczeń i skrótów, stosowanych w opisie wzorów, które należało wskazać w pracy. Takie podejście, pociąga to za sobą wielokrotne zastosowanie tych samych oznaczeń do opisu współczynników i charakterystyk, o różnym znaczeniu, np. α lub β . Częściej powinno zostać zastosowane rozwiązanie zaproponowane przez samego Doktoranta np. α – współczynnik w prawie Ramberga-Osgooda.

Na stronie 36 Doktorant odwołuje się do formuły 2.1, w pracy nie ma wzoru o takim numerze.

Na stronie 91 Doktorant odwołuje się do rozdziału 2.4, takiego rozdziału nie ma i chodzi prawdopodobnie o rozdział 4.2.

Na stronie 99 Doktorant odwołuje się do wzoru 2.9 w rozdziale 1.4.2, nie ma takiego wzoru w tym rozdziale.

Na stronie 57 wymieniono parametry struktury geometrycznej powierzchni bez wyjaśnienia ich definicji. Definicje pojawiają się na stronach 100-101, powinny pojawić się przy pierwszej informacji.

Na stronie 76 przywołano rysunek 6.18 b, jednak ta strefa stępienia jest ciągła, czy na pewno to jest ten numer rysunku?

W języku polskim separatorem dziesiętnym jest przecinek. W całej pracy Doktorant zarówno w tekście jak i tabelach stosuje kropkę.

Doktorant pomija też jednostki, we wzorach zalecanych do obliczenia końcowych wartości, ale także i w tabelach np. tabela 7.1. Praca ma charakter metodyczny, a nie teoretyczny więc jednostki bardzo by się przydały dla osób korzystających z tej pracy w przyszłości.

Merytoryczny zakres rozprawy

Pan mgr inż. Piotr Furmańczyk w trakcie realizacji badań opisanych w rozprawie podjął się wielu wymagających eksperymentalnie zadań. Pracę rozpoczął od charakterystyki zastosowanych stali konstrukcyjnych S355JR, Hardox-4000, 42CrMo4 i staliwa G17CrMo5-5 w stanie niemodyfikowanym i modyfikowanym metalami ziem rzadkich, przedstawienia ich składu chemicznego, parametrów zastosowanej obróbki cieplnej. Doktorant przedstawił mikrostruktury badanych materiałów, przed i po obróbce cieplnej. Wybór stali nie był przypadkowy i zakładał szeroki zakres charakterystyk wytrzymałościowych i odporności na pękanie oraz występowanie różnych mechanizmów pękania. Następnie zrealizowano badania właściwości wytrzymałościowych tych materiałów w próbie rozciągania, w temperaturach od -150°C do $+250^{\circ}\text{C}$. Kolejnym etapem badań było zmierzenie odporności na pękanie na próbkach z jednostronnym pęknięciem SENB (Single Edge Notch in Bending) trójpunktowo zginanych. Badania wykonano zgodnie z normą ASTM E1820-15.

Dalszy etap prac stanowią szeroko zakrojone badania mikrostrukturalne przełomów i analizy struktury geometrycznej przełomów. Wyznaczono szerokość strefy stępienia postępując zgodnie z normą ASTM oraz wykorzystując modyfikację polegającą na pomiarze powierzchni strefy stępienia i obliczeniu jej średniej szerokości. Drugi sposób oszacowania wartości strefy stępienia polegał na wykorzystaniu profilu liniowego powierzchni przełomu uzyskanego przy użyciu profilometru optycznego. Jednak metoda ta na chwilę obecną jest bardzo pracochłonna, z uwagi na zniekształcenie obrazu topografii przełomów. Do porównań zastosowano także wartości szerokości strefy stępienia wyliczone z rozwarcia wierzchołka pęknięcia, z wykorzystaniem modeli MES przygotowanych w programie Abaqus ver. 6.12. Do badań wytypowano próbki po analizie strefy stępienia, za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, wybierając próbki charakteryzujące się ciągłym mechanizmem pękania. Porównano wartości szerokości strefy stępienia wyliczone na podstawie trzech przedstawionych powyżej metod. Obliczono także wartości odporności na pękanie w momencie inicjacji pęknięcia podkrytycznego - J_i opartych na pomiarze szerokości strefy stępienia. Wartości te porównano z J_{IC} wyznaczonymi na podstawie normy ASTM.

Jako ostatni etap pracy wyznaczono odporność na pękanie na podstawie pomiarów geometrycznych powierzchni przełomu. Skonfrontowano tradycyjne podejście wykorzystujące

pojęcie mikrochropowatości, z parametrami określającymi chropowatość powierzchni: największą zmianą profilu Rz , całkowitą wysokością profilu Rt i średnią wysokością elementów profilu Rc . Wielkości te zostały wykorzystane do obliczenia wartości odporności na pękanie dla próbek w których występował ciągły przyrost pęknięcia.

Zaplanowanie i opracowanie metodyki badań dla tak szeroko ujętego eksperymentu polegającego na ocenie odporności na kruche pękanie można uznać za bardzo znaczące osiągnięcie. Zaprezentowana analiza wyników jest bardzo silną częścią rozprawy i świadczy o rozbudowanym warsztacie naukowym Doktoranta oraz dogłębnym zrozumieniu zjawisk towarzyszących właściwościom materiałów i zjawisku pęknięcia. Kolejnym cennym elementem rozprawy jest obszerne podsumowanie wyników, które wyjaśnia i porządkuje kwestie przedstawione w części badawczej.

Za najbardziej wartościowe i oryginalne wyniki rozprawy można uznać:

- Zaproponowaną metodę wyznaczenia szerokości strefy stępienia, opierającą się na analizie obrazu wykonanego za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego. Metoda polega na wyznaczeniu pola powierzchni strefy stępienia i obliczeniu na tej podstawie wartości szerokości stępienia. Metoda ta zastępuje dyskretne pomiary szerokości strefy stępienia, na podstawie których wyznaczano średnie wartości.
- Zaproponowany w pracy przebieg strefy stępienia, stanowi wzór do wykorzystania dla badań fraktograficznych. Pozwala ocenić szerokość tej strefy, ale także wskazać jej nieciągłość.
- Opracowano metodykę przygotowania próbek do wyznaczenia szerokości strefy stępienia nową metodą i metodykę wykonywania pomiarów.
- Podjęto próbę wykorzystania parametrów określających chropowatość powierzchni do wyznaczenia odporności na pękanie.

Zarówno identyfikacja problemu badawczego jak i sposób jego rozwiązania zostały zdaniem recenzenta zrealizowane w pracy w sposób prawidłowy. Wnioski przedstawione na zakończenie dysertacji wskazują, że cel rozprawy został osiągnięty.

Uwagi szczegółowe

Choć rozprawa nie budzi większych zastrzeżeń merytorycznych znalazły się w niej fragmenty wymagające uszczegółowienia lub uzupełnienia. Poniższe uwagi mają na celu ich wskazanie.

Z uwagi na stosunkowo dużą ilość zagadnień badawczych poruszanych w dysertacji pomocny byłby schemat przedstawiający zakres przeprowadzonych badań.

W rozdziale 9 sformułowano cztery ogólne, a w dalszej części kolejne bardzo szczegółowe wnioski. Czy nie należało zrobić założeń dla metodyki wyznaczania odporności na pęknięcie bazujących na pomiarach chropowatości powierzchni przełomu, np. w zakresie ogólnej charakterystyki materiałów dla których można zastosować tą metodę, określenia zalecanej długości odcinka, na którym należy wykonywać pomiar i przeprowadzić analizę, dotyczącą wyboru jednego z parametrów chropowatości?

Dysertacja ma na celu opracowanie metodyki (jej modyfikacji), stąd w podsumowaniu oczekuje się krytycznego podejścia, **zaleceń**, ewentualnie wskazania nowych kierunków badań.

Wartościowe byłoby wskazanie we wnioskach końcowych w jakich warunkach warto by było zastąpić badania prowadzone zgodnie z normą ASTM proponowanymi w pracy metodami i dlaczego?

Ocena końcowa

Zdaniem recenzenta, oceniana dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta w zakresie inżynierii mechanicznej, doskonałego opanowania warsztatu badawczego w tym przypadku elektronowego mikroskopu skaningowego, a także potwierdza umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

W świetle powyżej opinii, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Furmańczyka zatytułowana: „Badanie procesu pęknięcia elementów konstrukcyjnych na podstawie analizy morfologii przełomów”, **spełnia wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim** określone w art. 13 ust 1 Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (t. j. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 wraz z późniejszymi zmianami) w związku z art. 179 ust. 1 i ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm.).

Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Piotra Furmańczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym publicznej obrony rozprawy, a także wnioskuję o wyróżnienie pracy.