

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Kotyka

p.t. *"Analiza odporności na pękanie materiału warstwowego Al-Ti"*.

Podstawa formalna opracowania recenzji. Niniejszą recenzję opracowano na podstawie Uchwały Rady Wydziału Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy z dnia 12.06.2018 roku na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej prof. dr hab. inż. Janusza Semprucha.

1. Dane ogólne

Praca została wykonana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich w Bydgoszczy pod opieką promotora dr hab. inż. Dariusza Borońskiego, profesora nadzwyczajnego UTP. Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego PBS2/A5/35/2013 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Rozprawa przedstawiona w postaci rękopisu. Praca składa się ze 149 stron i podzielona została na dziewięć rozdziałów, spisu wykorzystanej literatury oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Spis cytowanej literatury zawierają 168 pozycji. Cytowana literatura zawiera pozycje klasyczne, w tym starsze, jak i niedawno opublikowane.

2. Charakterystyka treści rozprawy doktorskiej

Współczesne potrzeby stawiane do rozwoju techniki wymagają zastosowań materiałów, których charakterystyki wychodzą poza zakresy obecnie znanych i powszechnie wykorzystywanych materiałów konstrukcyjnych. Materiały te jednocześnie powinni posiadać wysokie charakterystyki wytrzymałościowe i plastyczne, odporne na inicjację i rozwój pęknięć a wykonane elementy charakteryzować się niską wagą. Wymagano też zachowanie się tych właściwości w szerokim zakresie temperaturowym – od temperatur kriogenicznych do temperatur otoczenia naturalnego oraz do temperatur podwyższonych (nawet ponad 600 °C).

Jednym z kierunków, który pozwala tworzyć materiały o wymaganych właściwościach, jest tworzenie materiałów o strukturze warstwowej. Nowe materiały wykonane za pomocą łączenia warstw materiału o różnych właściwościach znajdują coraz szersze zastosowanie w budowie i eksploatacji maszyn. W celu prawidłowego projektowania oraz bezpiecznego i

niezawodnego użytkowania elementów konstrukcyjnych wykonanych z tych materiałów koniecznym jest ustalenie charakterystyk tych nowostworzonych materiałów dla przewidywanych zakresów eksploatacji.

Właśnie nad zagadnieniami związanymi z wyznaczaniem charakterystyk warstwowego materiału wykonanego ze stopów *Al* i *Ti* w temperaturach otoczenia naturalnego i kriogenicznej Doktorant skupia się w badaniach przedstawionych w rozprawie doktorskiej. Przedstawiony w rękopisie materiał rozdzielić można na dwa podstawowe nurty: pierwszy – to opracowanie stanowiska do przeprowadzenia badań; drugi – wyznaczanie charakterystyk materiałów w tych temperaturach.

2.2. Rozdziały 1-5

Rozdział 1 jest krótkim wprowadzeniem, w którym Autor uzasadnia ważność podjętego problemu, formułuje tezę, cele rozprawy doktorskiej.

Odporność na pękanie materiału warstwowego, wytwarzanego poprzez zgrzewanie wybuchowe stopu aluminium AA2519 i stopu tytanu Ti6Al4V nie wynika bezpośrednio z odporności na pękanie materiałów bazowych.

Kriogeniczne warunki badań wpływają na charakter pękania materiału warstwowego i materiałów bazowych.

Cele pracy polegają na wyznaczeniu charakterystyk materiałów bazowych (stopu aluminium AA2519 i stopu tytanu Ti6Al4V) oraz wytworzonego na ich bazie materiału warstwowego Al-Ti a także w przeprowadzeniu analizy powstałych pól mechanicznych przed wierzchołkiem pęknięcia.

Rozdziały 2-5 stanowią wstęp do podstawowej części pracy, w których Autor dokonał przeglądu literatury dotyczącej zagadnień analizowanych w rozprawie doktorskiej. W *rozdziale 2* Doktorant wprowadza podstawowe pojęcia i definicje dotyczące Mechaniki Pękania. Również przytacza opis sposobów zgrzewania wybuchowego dwóch płyt metali (Roz. 2.2). W rozdziałach 2.3 – 2.6 opisano badania właściwości mechanicznych materiałów warstwowych zbudowanych na bazie stopów aluminium, stopów tytanu lub ich kompozycji. Zamieszczono tu dane dotyczące charakterystyk mechanicznych (wytrzymałościowych, twardości, zginanie, ścinanie ...) różnych metali, blach zgrzewanych oraz zabiegów technologicznych i ich wpływu na zmianę tych właściwości.

Rozdział 3 dotyczy opisu metod stosowanych w badaniach wykonywanych w celu wyznaczania charakterystyk odporności na pękanie materiału. Bardzo skrótowo przedstawia Doktorant informacje dotyczące *Współczynnika Intensywności Naprężeń (WIN)* oraz metody wyznaczania krytycznej wartości $WIN - K_{IC}$. Również zamieszczone tu niektóre informacje na temat *Całki J* oraz sposobów wyznaczania jej krytycznej wartości – J_{IC} . Krótko wspomniano o krytycznej wartości *WIN* przy obciążeniach dynamicznych (udarowych) oraz o wyznaczeniu odporności na pękanie metodą pomiaru rozwarcia pęknięcia.

W *Rozdz. 4* Autor podaje informacje o metodach badań właściwości mechanicznych w obniżonych temperaturach.

W *Rozdz. 5* Doktorant przedstawia opis zastosowań testowanego materiału warstwowego AA2519-AA1050-Ti6Al4V oraz stopów bazowych. Również podano tu informacje badaniach wykonanych na tych materiałach przez innych badaczy.

W rozdziałach od 6 do 9 przedstawiono wyniki uzyskane przez Autora.

W *Rozdz. 6* opisano metodyki badań. Zaprezentowano stanowisko badawcze do przeprowadzenia badań w temperaturach otoczenia naturalnego i ciekłego azotu. Przedstawiono typy i wymiary próbek stosowane do wyznaczania charakterystyk wytrzymałościowych i odporności na pękanie. Opisano podejścia wykorzystywane podczas wyznaczania krytycznych wielkości odporności na pękanie w przypadkach gdy pękanie występowało w zakresie liniowo-sprężystego lub sprężysto-plastycznego odkształcania się próbek. Zaprezentowano metodę cyfrowej korelacji obrazu, która została wykorzystana podczas wyprowadzenia wstępnych pęknięć zmęczeniowych, jak i podczas rejestracji przyrostu podkrytycznego.

Rozdz. 7 zawiera wyniki badań w celu wyznaczenia charakterystyk wytrzymałościowych i odporności na pękanie. Przedstawiono dane uzyskane na próbkach wykonanych w całości z materiałów jednorodnych bazowych oraz wykonanych z płyt połączonych metodą wybuchową w temperaturach otoczenia naturalnego i kriogenicznych.

W *Rozdz. 8* przedstawiono porównania uzyskanych wartości charakterystyk wytrzymałości i odporności na pękanie stopów bazowych i bimetalu AL-Ti w temperaturach otoczenia naturalnego i kriogenicznych. Zamieszczono też zdjęcia charakteryzujące morfologie przelomów próbek badanych w celu wyznaczania odporności na pękanie podczas występowania ciągłego przyrostu pęknięcia. Przedstawiono również rozkłady naprężeń i odkształceń uzyskane w wyniku obliczeń numerycznych badanych próbek.

W *Rozdziale 9* zamieszczono wnioski dotyczące przeprowadzonych badań oraz propozycje kierunków badań planowanych.

Spis literatury zawiera 168 pozycji, w tym 5 pozycji to są publikacje współautorskie i 1 publikacja autorska Doktoranta. Należy odznaczyć publikację [26] w czasopiśmie *Materials & Design* (2017) z wykazu JRC (lista A, 35P)

3. Ocena rozprawy doktorskiej

3.1. Uwagi formalne i redaktorskie

Moim zdaniem należałoby nieco zmienić strukturę przedstawionego materiału. Opis stosowanych metod badawczych i uzyskane wyniki podawać w jednym rozdziale. Wyeliminowało by to niektóre niezgodności w oznaczeniach tych samych wielkości stosowanych w różnych miejscach pracy.

Tekst rękopisu zawiera stosunkowo dużą liczbę usterek i błędów oraz żargonowych a nawet niepoprawnych sformułowań. [Lista uwag została przekazana Autorowi.] Dużej części tych usterek i błędów można byłoby uniknąć, przy wnikliwym przeczytaniu rękopisu pracy.

Ponieważ praca w dużym stopniu dotyczy Mechaniki Pękania sugeruje Autorowi dostosować się do słownictwa i sformułowań używanych w literaturze fachowej dotyczącej tej dyscypliny.

Sugeruje również Autorowi podczas opisu procedury i wyznaczania charakterystyk odporności na pękanie jednoznacznie stosować aktualne normy ASTM, w tym ASTM E1820 z późniejszymi uzupełnieniami.

3.2. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Tezy pracy:

1. **Odporność na pękanie materiału warstwowego, wytwarzanego poprzez zgrzewanie wybuchowe stopu aluminium AA2519 i stopu tytanu Ti6Al4V nie wynika bezpośrednio z odporności na pękanie materiałów bazowych.**
2. **Kriogeniczne warunki badań wpływają na charakter pękania materiału warstwowego i materiałów bazowych.**
 1. Brak jakichkolwiek konkretnych danych. Co oznacza „...nie wynika bezpośrednio...”? Że nie da się jej obliczyć na podstawie znanych krytycznych wartości odporności na pękanie materiałów bazowych? Jak Autor zweryfikował tę tezę?
 2. Jest całkiem oczywista.

Podczas wyznaczania krytycznej wartości współczynnika intensywności na pękanie należy sprawdzić warunek na grubość próbki. Aby uzyskana wartość K_Q była uznana za charakterystykę materiału K_{IC} , grubość próbki powinna być większa od krytycznej. Dopiero spełnienie warunku na grubość oznacza, że uzyskana wartość K_{IC} jest niezależna od grubości. Wtedy dopiero możemy porównywać wartości odporności na pękanie i wnioskować o ich zmianie wraz ze zmianą temperatury. Natomiast, jeśli warunek na grubość nie jest spełniony, to uzyskana wartość K_Q zależy też od grubości. Wnioskować więc o wpływie temperatury jednoznacznie nie możemy, ponieważ na wartość odporności na pękanie wpływa też grubość próbki.

Ta sama uwaga dotyczy krytycznej wartości całki $J - J_{IC}$. Sprawdzanie warunku na grubość próbki jest konieczne.

Uwagi stosownie procedury wyznaczania krytycznej wartości całki $J - J_Q$. Z opisu przedstawionego w rozprawie (rozdz. 3) i zamieszczonych wykresów (rozdz. 7) nie zrozumiałem jak wyznaczano krytyczną wartość całki $J - J_Q$. Na wykresach w rozdz. 7 zamieszczono po 2-3 ważne punkty, co jest niewystarczająco do wyznaczania linii regresji i odpowiednio wyznaczania wartości krytycznej. Ze zdjęć (tab.7.16) przyrost pęknięcia podkrytycznego dla stopu AA2519 jest ponad 10 mm. Dlaczego na wykresach 7.19, 7.20 ograniczono się Pan do 0.5 - 0.7 mm przyrostu? Wg normy ASTM należy uwzględniać wartości całki $J - J_i$ do przyrostu 1.5 mm. Wyznaczoną przez Autora krytyczną wartość całki J nie można uznać za stałą materiałową J_{IC} .

Ze zdjęć przełomów próbek CT z bimetalu (tab. 7.17) jasno widać pęknięcia międzywarstwowe, delaminacyjne. Wyjaśnia to znacznie wyższe wartości J_Q w próbkach z bimetalu w porównaniu do próbek z materiałów bazowych. [Powstawanie pęknięć delaminacyjnych podczas prób prowadzi do wzrostu pochylenia krzywej J_R i uzyskaniu wyższych poziomów krytycznej wartości J_Q .] Pytanie: Czy we wszystkich próbkach z bimetalu występowały pęknięcia delaminacyjne? Też warto przedstawić wykresy obciążania próbek P_{uCOD} , zwłaszcza z bimetalu. Ponieważ proces pękania w próbkach z bimetalu nie jest normatywny moment inicjacji pęknięcia podkrytycznego można ustalić na podstawie przebiegu wykresu i obliczyć krytyczną wartość odporności na pękanie.

Zdjęcia przełomów próbek (Rys. 8.21 – 8.24) są zbyt małe. Właściwie nie ma możliwości zobaczyć te szczegóły ich budowy, na które zwraca uwagę Autor w opisie.

Uważam, że warto przedstawić zdjęcia mikrostruktury badanych materiałów bazowych. Wzbogaciłoby to opis w rozdz. 5 oraz pomogłoby w zrozumieniu opisu w rozdz. 8.5.

Szereg uwag dotyczy modelowania numerycznego i obliczeń MES.

Z rysunku 8.25 nie jasno jak został zamodelowany wierzchołek pęknięcia i siatka dookoła wierzchołka. Dlaczego nie wykorzystuje Pan symetrii próbek (czwartki, pół próbki)?

Próbki warstwowe i jednolite mieli różną grubość, jak to zostało uwzględnione przez Pana? Jeśli w modelu Pan założył jednakową grubość (a badane próbki mieli różne grubości), to z tego mogą wynikać różnice w rozkładach naprężeń pomiędzy próbkami warstwowymi i jednolitymi. Również niejasno czy warstwy w próbkach były tej samej grubości.

Zupełnie jest pominięta kwestia warstwy łączącej i modelowania łączenia warstw. Ponieważ w bimetalu występowały pęknięcia delaminacyjne i ich występowanie właściwie decydowało o odporności na pęknięcie tego materiału, kwestia pęknięcia warstwy łączącej jest kluczowa. Warto tu przeprowadzić analizę składowych naprężeń przed wierzchołkiem pęknięcia w momencie występowania pęknięcia delaminacyjnego.

Uważam że materiały bazowe w bimetalu po złączeniu wybuchowym mogą posiadać inne charakterystyki wytrzymałościowe i odporności na pęknięcie niż materiały przed złączeniem, ponieważ podczas zastosowania tej technologii materiały mocno się odkształcają, zwłaszcza stop *Al*. Pasowało by pobierać próbki z odpowiednich warstw bimetalu. Czy takie badania były wykonywane?

Związek konstytutywny (zależność rzeczywistych naprężeń-odkształceń) dla materiału przedstawiono w postaci dla małych odkształceń ($\epsilon < 0.15$). I przedstawione wyniki obliczeń też wykonano w zakresie małych odkształceń ($\epsilon < 0.025$), co odpowiada warunkom prawie liniowo-sprężystego zachowania się materiału. W rzeczywistości przed wierzchołkiem pęknięcia podczas występowania ciągłego mechanizmu wzrostu pęknięcia podkrytycznego poziomy odkształceń w krytycznych momentach znacząco wyższe ($\epsilon > 1.0$), i strefa obszaru plastycznego odpowiednio znacznie większą. Dlaczego więc Autor ograniczył się analizą przy tak małych odkształceniach?

Proszę Autora o udzielenie odpowiedzi na wyżej sformułowane uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym podczas referowania pracy na seminarium podczas obrony. Pozwoliłoby to na wyjaśnienie szeregu wątków niezbyt dokładnie opisanych w przedstawionym rękopisie.

Mimo szeregu uwag o charakterze krytycznym i dyskusyjnym przedstawiona praca zawiera pewne osiągnięcia oryginalne.

1. Istotnym i bardzo ważnym osiągnięciem Doktoranta jest opracowanie i budowa stanowiska i metodyk badawczych do wyznaczania charakterystyk wytrzymałościowych i odporności na pęknięcie w środowisku ciekłego azotu. Zaproponowana kilka oryginalnych rozwiązań technicznych dotyczących konstrukcji komory, mocowania próbek, redukcji obciążenia powstającego podczas procesu schładzania a także utrzymywania zadanej kriogenicznej temperatury w trakcie badań próbek. Ważnym oryginalnym elementem wprowadzonym do systemu sterowania jest system cyfrowej korelacji obrazu, który pozwala rejestrować długość wzrastającego pęknięcia w czasie bieżącym oraz sterować procesem obciążania. Niestety w rozprawie przedstawiony opis stanowiska nie jest

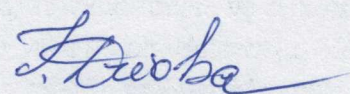
całościowy, opisane odzienne węzły i funkcję. Uważam, że Doktorantowi należało większą uwagę zwrócić na tą część – bardziej szczegółowo i dokładnie opisać, przedstawić schematy i rysunki wykonawcze.

2. Dużym osiągnięciem Doktoranta też jest przeprowadzenie prób wytrzymałościowych i odporności na pękanie w środowisku ciekłego azotu. Publikację dotyczące rezultatów badań w temperaturach kriogenicznych są rzadko spotykane w literaturze fachowej. Też w literaturze fachowej mało wyników można odnaleźć dotyczących odporności na pękanie stopów *Al* i bimetalu zawierającego stopy *Al*. A stosownie temperatur kriogenicznych, brak tych wyników w dostępnych źródłach. Dlatego mimo, że nie zawsze zgadzam się z interpretacją niektórych rezultatów podaną przez Doktoranta, uważam sam fakt ich uzyskania ważnym osiągnięciem.
3. Pozytywnie oceniam podejście do interpretacji procesu rozwoju pęknięć podkrytycznych w badanych próbkach na podstawie analizy przełomów faktograficznych. Potwierdza ona rezultaty wyników eksperymentalnych. A w przypadku próbek z bimetalu pozwala zrozumieć szczegóły procesu ich pękania.

4. Podsumowanie i ocena końcowa

Na podstawie wyżej przedstawionych uwag i ocen szczegółowych rozprawę doktorską pt. „*Analiza odporności na pękanie materiału warstwowego Al-Ti*” przedstawioną przez mgr inż. Macieja Kotyka oceniam pozytywnie. Uważam, że ona spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim wg przepisów ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.).

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony przed Radą Wydziału mającą uprawnienia do nadawania stopnia doktora w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn.



Ihor Dzioba