

Wrocław, 28. kwietnia 2019 r.

prof. dr hab. inż. Jerzy Kaleta
Kierownik
Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny
Politechniki Wrocławskiej
ul. Smoluchowskiego 25
50-370 Wrocław

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Mgr inż. URSZULI JANUS-GAŁKIEWICZ pod tytułem
"Badanie mechanizmów procesu pękania kruchego
przy dużych odkształceniach plastycznych",
wykonanej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. ANDRZEJA NEIMITZA
z Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

Opis identyfikacyjny: maszynopis sygnowany przez Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach (2019).

Podstawa formalno-prawna:

- pismo (nr pisma: MD-510/44/2019 z 25. lutego 2019 r.; wpłynęło do recenzenta 25. marca br.) Prof. dr. hab. inż. Tomasza L. Stańczyka, Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej,
- Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19. stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. poz. 261).

OCENA PRACY DOKTORSKIEJ

A. Wprowadzenie

Głównym zamierzeniem Autorki była jakościowa i ilościowa ocena mechanizmów procesu pękania kruchego przy dużych odkształceniach plastycznych, na przykładzie stali Hardox-400, z wykorzystaniem metody automatów komórkowych. Założono, iż w ten sposób możliwe będzie oszacowanie poziomu krytycznych naprężeń jak i minimalnej wielkości obszaru, w którym dochodzi do pękania łupliwego, gdy naprężenia są większe od krytycznych. Tematyka podjętego zagadnienia lokuje się w ramach Mechaniki Pękania, a szerzej mieści się w obszarze Mechaniki Ciała Odkształcalnego.

Mimo, iż pojęcie samoreplikujących się automatów (maszyn) zostało wprowadzone przez Johna von Neumanna 70 lat temu (we współpracy ze Stanisławem Ulamem) i rozwinięte przez Edgara Franka Cotta ponad 50 lat temu (to on w roku 1968 opublikował pracę „Cellular Automata” i termin ten się upowszechnił), to dopiero aktywność Stephena Wolframa (szczególnie dwie prace z roku 1983¹ i 1984²) stanowiły przełom i początek licznych

¹ Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of modern physics*, 55(3), 601.

² Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(5985), 419.

zastosowań. Udokumentowane są liczne przykłady sukcesów tej metody w zakresie modelowania takich zjawisk jak trzęsienia ziemi, mechanika skał, materiałów budowlanych i kości, kryptografii, biologii i ekonomii. Zaletą podejścia jest możliwość modelowania zagadnienia z użyciem różnych skal długości (ang.: multiscale modelling), gdzie możliwe jest powiązanie procesów lokalnych (mikroskala) przez fazę mezo- aż do opisu zjawiska w całym obiekcie (makroskala). Zagadnienia te podejmowane są w renomowanych ośrodkach badawczych. W ostatnich latach obserwuje się także próby zastosowania automatów komórkowych do modelowania procesu pęknięcia metali. Szerszy komentarz w tej sprawie zawarto w dalszej części recenzji.

Projektując pracę na stopień Autorka przedstawiła zwięźle aktualny stan wiedzy z zakresu mechaniki pęknięcia z opisem podstawowych wielkości. Następnie zaprezentowała przyjęty w literaturze przedmiotu opis mechanizmów zniszczenia. Na tej podstawie sformułowała tezę, cele i główne zadania do podjęcia w rozprawie. Następnie opisała metodykę badań własnych (eksperymentalnych, numerycznych i z użyciem automatów komórkowych) oraz uzyskane rezultaty. Rozprawę zakończono podsumowaniem oraz wnioskami z przeprowadzonych badań.

Podsumowując na wstępie zamierzenia Autorki pracy i mając na uwadze stan wiedzy należy przyjąć, iż zagadnienie opisu procesu pęknięcia kruchego przy dużych odkształceniach plastycznych z wykorzystaniem metody automatów komórkowych jest ambitnym, aktualnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Wynika to z interdyscyplinarnego charakteru zjawiska, w którym występują zagadnienia z zakresu fizyki, mechaniki teoretycznej i eksperymentalnej, inżynierii materiałowej oraz budowy maszyn. Równie istotne są aspekty ekonomiczne i społeczne zagadnienia. Poszukiwanie poprawnego modelu zjawiska i szerzej skutecznego prognozowania żywotności obiektów jest zatem nadal bardzo zasadne. Pozwala to łącznie stwierdzić, że wybór tematyki badawczej zawartej w przedłożonej rozprawie jest w pełni aktualny naukowo i aplikacyjny.

B. Charakterystyka pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa podzielona została na pięć rozdziałów i 21 podrozdziałów. Dodatkowo zawarto podsumowanie z wnioskami, zestawiono literaturę przedmiotu oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. Monografia obejmuje 158 stron, zilustrowana została 138 rysunkami oraz 17 tabelami. Zestawienie cytowanej literatury zawiera 122 pozycje, z których 16 autorstwa pracowników rodzimego Wydziału, w tym w trzech przypadkach współautorstwa Doktorantki. Należy zauważyć, iż wyników zawartych w rozprawie nie opublikowano dotychczas w znaczącym czasopiśmie (z tzw. listy filadelfijskiej).

W *pierwszym rozdziale (Wstęp)* przytoczono, za literaturą przedmiotu, podział na dwa podstawowe mechanizmy pęknięcia, czyli kruchy oraz ciągliwy i ich zależność od wielkości fizycznych charakteryzujących pole mechaniczne przed frontem szczeliny oraz od mikrostruktury. Zestawiono też kryteria, które służą do budowy modeli procesu wymieniając: energetyczne, siłowe i odkształceniowe. Inny stosowany podział rozróżnia kryteria globalne i lokalne. Następnie skrótowo omówiono kryteria wykorzystujące następujące wielkości: a) współczynnik intensywności naprężenia K , b) współczynnik uwalniania energii G , c) całość J , d) rozwarście wierzchołkowe pęknięcia δ_t . Kryteria omówiono zwięźle przytaczając prace pionierów, w tym M.L. Williams'a, A.A. Griffith'a, J.R. Rice'a, G.P. Cherepanov'a oraz A.A. Wells'a.

W *rozdziale drugim (Mechanizmy zniszczenia)* opisano stan wiedzy i dominujące teorie w zakresie dwóch głównych mechanizmów zniszczenia: ciągliwego i krucho-lupliwego. W pierwszym przypadku opisano mechanizmy pęknięcia przez poślizg, wzdłuż płaszczyzn najgęstszego upakowania atomów oraz mechanizm pustkowy, czyli polegający kolejno na

inicjacji, wzroście i łączeniu się pustek. Szczegółowo następnie rozważono mechanizm pustkowy, który występuje zarówno w procesie pękania ciągliwego jak i łupliwego. W tym celu przytoczono aktualne teorie nukleacji pustek lub mikropeknięć, w których zakłada się, iż ich źródłem powstawania mogą być cząstki drugiej fazy (siarczki, azotki, węgliki). Podkreślono zależność nukleacji od struktury krystalograficznej, wielkości i kształtu ziaren, objętościowego udział wtrąceń i wydzielen, a także od charakteru pola odkształceń i naprężeń. Dalej opisano modele wzrostu/rozwoju już istniejących pustek, czyli drugiego etapu procesu pękania ciągliwego. Opisano następnie modele łączenia pustek, czyli ostatni etap pękania ciągliwego. W drugiej części rozdziału opisano modele opisujące mechanizm krucho-łupliwy. Zwrócono uwagę, iż mechanizm kruchy, czyli najbardziej niekorzystny sposób pękania może zachodzić po płaszczyznach łupliwości lub po granicach ziaren. Przytoczono dominujące interpretacje pękania łupliwego z wykorzystaniem kolejno dyslokacji, obecności wtrąceń oraz koncepcji pękania magistralnego, w tym modeli uwzględniających różne typy barier blokujących pęknięcie. Omówiono także podejście lokalne Beremin'a oraz model Ritchie'go-Knott'a-Rice'a (RKR).

W rozdziale trzecim (*Teza i cel pracy*) przyjęto na wstępie założenie, iż analiza procesów kruchego pękania, przy obecności dużych odkształceń plastycznych, możliwa jest przy wykorzystaniu automatów komórkowych. Stwierdzono przy tym, iż cytując.: „Metoda ta nie była często stosowana dla opisu mechanizmów pękania, a jeśli była to w analizie całym innymi zagadnieniami”. To drugie stwierdzenie wymaga komentarza, co uczyniono w dalszej części.

Sformułowano trzy tezy szczegółowe, które sprowadzić można do stwierdzenia, iż przy pomocy metody automatów komórkowych możliwe jest określenie krytycznych parametrów sterujących procesem pękania łupliwego, takich jak: poziom naprężeń oraz wielkość charakterystycznego obszaru, w którym naprężenia rozciągające muszą być większe od granicznych, aby pęknięcie nastąpiło. Przy czym wielkość krytycznego obszaru jest cechą materiału, zależną wyłącznie od mikrostruktury.

Zdefiniowano cele w zakresie badań doświadczalnych (określenie zależności pomiędzy poziomem odkształceń a liczbą powstałych pustek i mikropeknięć) i obliczeń numerycznych (wpływ kształtu wtrąceń i poziomu więzów na proces nukleacji pustek i mikropeknięć). Przyjęto też obiekt badań (stal Hardox-400), warunki przeprowadzenia testów (rodzaj próbek, temperatura badań, sposób obserwacji przełomów) algorytm obliczeń i wizualizacji procesu pękania za pomocą automatów komórkowych oraz kryterium weryfikacji algorytmu.

Obszerny rozdział czwarty (Badanie procesu nukleacji pustek i mikropeknięć) zawiera opis badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych. Przytoczono skład badanej stali i właściwości mechaniczne. W próbie rozciągania analizowano dwa przeciwstawne procesy, czyli umocnienie materiału oraz osłabienia struktury w następstwie nukleacji i wzrostu pustek. Analizowano mikrostrukturę (mikroskop skaningowy) odpowiednio spreparowanych zglądów. Wykryto liczne wtrącenia (np. azotki tytanu, siarczki manganu, tlenki magnezu oraz glinu). Zaobserwowano, że liczba powstałych pustek zwiększała się wraz z rosnącym odkształceniem. Następnie przedstawiono analizę numeryczną pól naprężeń i odkształceń wewnątrz i wokół wtrąceń o różnych kształtach (eliptycznym, okrągłym oraz wydłużonym). Wykorzystano oprogramowanie ADINA 8.8. Badano możliwy proces nukleacji dla modelu osiowosymetrycznego, który dotyczył pustki w próbie jednoosiowego rozciągania oraz modelu w płaskim stanie odkształcenia dla pustki przed frontem szczeliny. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla czterech poziomów odkształceń: 1%, 1,2%, 1,5% oraz 3%. Wyliczono maksymalne naprężenia rozwierające i naprężenia efektywne. Dla modelu w płaskim stanie odkształcenia przeprowadzono analizę wpływu więzów płaskich w próbce ze szczeliną, przy kontrolowanym stosunku u_y/u_z . Stwierdzo-

no, iż im mniejszy stosunek u_y/u_z tym większe prawdopodobieństwo wystąpienia mechanizmu łupliwego. Generalnie badania eksperymentalne i obliczenia numeryczne pozwoliły na zebranie danych przydatnych do modelowania z użyciem automatów komórkowych.

Rozdział piąty (Badanie procesu wzrostu makropęknięć) zawiera wyniki badań doświadczalnych i numerycznych wykorzystanych następnie w analizie rozwoju pęknięć metodą automatów komórkowych. Badania doświadczalne stali Hardox-400 obejmowały próbę trójpunktowego zginania oraz jednoosiowego rozciągania, obserwacje mikroskopowe i obliczenia MES. Badania przeprowadzono w szerokim zakresie temperatur. Zaobserwowano różne mechanizmy pęknięcia. Następnie wyznaczono wartości naprężeń krytycznych dla analizowanych próbek i obliczono średnie naprężenia krytyczne dla każdej temperatury. Podczas obliczeń numerycznych rozkładu naprężeń przed frontem pęknięcia przyjęto założenie skończonych odkształceń i założono stopień wierzchołka pęknięcia. Obliczenia wykonano wykorzystując program ADINA System 8.9. Analiza numeryczna pól naprężeń przed wierzchołkiem szczeliny wykazała, że położenie maksimum naprężeń zmienia się wraz z temperaturą. Wykazano, iż w przypadku stali Hardox-400 obszar krytyczny podczas mechanizmu pęknięcia łupliwego znajduje się w znacznie większej odległości od frontu pęknięcia, niż to podaje literatura przedmiotu. Wynikiem analizy numerycznej były parametry automatu komórkowego i symulacja mechanizmów pęknięcia.

Następnie zamodelowano proces łupliwego pęknięcia za pomocą automatów komórkowych (AK). Najpierw określono przestrzeń komórek, liczbę stanów oraz reguły przejścia. Głównym celem było w tej fazie odwzorowanie powierzchni przełomu. Modelowano przy tym wyłącznie pierwszy skok wg mechanizmu pęknięcia łupliwego. Przyjęto, że jedna komórka AK odpowiada jednemu ziarnu o średniej wielkości $10\mu\text{m}$. Zdefiniowano komórki tzw. żywe, osłabione i martwe. Następnie przeprowadzono symulację procesów łączenia się mezopęknięć. Najlepsze wyniki AK uzyskiwano dla próbek, w których pierwszy skok był niewielki. Największe rozrzuty wyników otrzymano dla próbek w temperaturze -50°C . Wykazano, iż ilość wtrąceń wpływa znacząco na dynamikę procesu pęknięcia, ale jedynie w początkowym etapie pęknięcia.

W kolejnym *nienumerowanym rozdziale* (Podsumowanie oraz wnioski z przeprowadzonych badań) zawarto główne rezultaty prac, by wykazać, iż tezy rozprawy zostały udowodnione, a cele osiągnięte. Badania doświadczalne stali Hardox-400 na próbkach trójpunktowo zginanych z wygenerowaną szczeliną zmęczeniową pozwoliły uzyskać różne mechanizmy zniszczenia. Badania numeryczne z kolei pozwoliły na analizę wpływu temperatury na położenie maksimum naprężeń oraz gradient naprężeń rozwierających. Wykazano też zależność między długością odcinka krytycznego, a mechanizmem pęknięcia. Generalnie obliczenia numeryczne dostarczyły niezbędnych danych dla modelu automatu komórkowego. Z kolei badania doświadczalne oraz obserwacje mikroskopowe na próbkach cylindrycznych pozwoliły na określenie momentu nukleacji pustek, zależności pomiędzy poziomem odkształceń a ilością pękniętych wtrąceń oraz rozróżnienie wpływu dużych i małych wtrąceń na początkowy etap pęknięcia. Badania numeryczne nad pustkami pozwoliły oszacować wartości naprężeń krytycznych koniecznych do pęknięcia poszczególnych typów wtrąceń, wykazać wpływ kształtu wtrącenia na poziom naprężeń, a tym samym na proces nukleacji oraz brak wpływu wielkości wtrącenia na poziom naprężeń rozwierających, itp. Podkreślono też, że kluczowa dla pracy symulacja procesów łączenia się mezopęknięć z użyciem automatów komórkowych wykazała, iż ewolucja komórek zależy od charakterystycznego otoczenia, liczby stanów, warunków brzegowych oraz reguł przejścia, a inicjatorami pęknięcia łupliwego w obszarze krytycznym są wtrącenia. Analizowano też zgodność modelu w zależności od temperatury, długości pierwszego skoku pęknięcia łupliwego, kąta nachylenia płaszczyzn łupliwości oraz ilości wtrąceń.

C. Uwagi krytyczne i sugestie

1. W literaturze przedmiotu występują automaty ruchome lub nieruchome, które się istotnie różnią. Doktoranta nie odnosi się do tej ważnej kwestii w swojej pracy.
2. Przegląd literatury przedmiotu z zakresu automatów komórkowych jest zbyt ubogi. Wzmianki na temat prac „klasyków gatunku” (John von Neumann, Edgar Frank Codd, Stephen Wolfram) można ostatecznie uznać za wystarczające, to już analizy prac z zakresu zastosowań AK do modelowania mechaniki pęknięcia w zasadzie nie ma.

Na stron. 39 Autorka stwierdza, cyt.: „W niniejszej pracy do analizy procesów krucho-pęknięcia przy obecności dużych odkształceń plastycznych wybrano metodę automatów komórkowych. Metoda ta **nie była często stosowana dla opisu mechanizmów pęknięcia**, a jeśli była to w analizie całkiem innych zagadnień”. Trudno to pozostawić bez komentarza. Autorka wymienia co prawda (ale bliżej nie omawia) prace P. Koziola [104], Y. Yamamoto [105], H. Halberga [106] i K. Janssens [107], ale to tylko fragment reprezentatywnej literatury z tego zakresu.

Korzystając z przeglądarki Google Scholar można uzyskać następujące wskazania dla wybranych zestawów słów kluczowych, a mianowicie:

- cellular automata fracture mechanics: łączna liczba prac 8800, (z tego od 2015: 2270),
- cellular automata fracture mechanics of steel: 13800 (3870),
- cellular automata cleavage fracture mechanism: 5500 (1280).

Nawet jeśli przyjąć, co wynika z doświadczenia recenzenta, że tylko 5% wskazań jest szczególnie trafnie dobranych, to liczba prac z tego obszaru jest bardzo duża.

By nie być gołosłownym poniżej dwa przykłady szczególnie rażących braków, a mianowicie:

- Pierwszy dotyczy zespołu, którego liderem jest Sergey G. Psakhie (Institute of Strength Physics and Materials Science, Russian Academy of Sciences), a który wspólnie z autorami z Rosji, USA, Niemiec i Słowenii legitymuje się kilkudziesięciami pracami. Dwie z nich cytuję poniżej w stopce^{3,4}.
- Warto też zapoznać się z pracami Antona Shterenlikhta (cytowany również jako A. Chterenlikht) z Uniwersytetu w Bristolu. Dwie przykładowe prace, to ^{5,6}.

Należy również doceniać i popularyzować dorobek polskich naukowców. Prace autorów wrocławskich (tu przepraszam za lokalny patriotyzm), głównie M. Rybaczuka i D. Aniszewskiej, to kilkanaście pozycji łatwo dostępnych i cytowanych. Przytaczam w stopce tylko wybrane dwie ^{7,8}. Warto też pamiętać o pracach zespołu z Akademii Górniczo-Hutniczej, np. ⁹

³ Psakhie, S. G., Horie, Y., Ostermeyer, G. P., Korostelev, S. Y., Smolin, A. Y., Shilko, E. V., ... & Zavšek, S. (2001). Movable cellular automata method for simulating materials with

⁴ Smolin, A. Y., Shilko, E. V., Astafurov, S. V., Konovalenko, I. S., Buyakova, S. P., & Psakhie, S. G. (2015). Modeling mechanical behaviors of composites with various ratios of matrix-inclusion properties using movable cellular automaton method. *Defence Technology*, 11(1), 18-34.

⁵ Shterenlikht, Anton, and Lee Margetts. "Three-dimensional cellular automata modelling of cleavage propagation across crystal boundaries in polycrystalline microstructures." *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471.2177 (2015): 20150039.

⁶ Li, Y., Shterenlikht, A., Ren, X., He, J., & Zhang, Z. (2019). CAFE based multi-scale modelling of ductile-to-brittle transition of steel with a temperature dependent effective surface energy. *Materials Science and Engineering: A*.

⁷ Czopor, J., Aniszewska, D., & Rybaczuk, M. (2012). The influence of defects on strength of ceramics modeled with Movable Cellular Automata. *Computational Materials Science*, 51(1), 151-155.

⁸ Aniszewska, D. (2015). Fractal characteristics of defects growth in porous ceramics modeled with the Movable Cellular Automata. *Applied Mathematical Modelling*, 39(8), 2409-2415.

⁹ Perzynski, K., Wang, J., Radwanski, K., Muszka, K., & Madej, L. (2019). Identification of critical strains for the random cellular automata finite element failure model based on in-situ tensile test. *Mechanics of Materials*.

Reasumując, tematyka podjęta przez Doktorantkę wymaga dobrej znajomości literatury przedmiotu. Jest to warunek niezbędny, by publikować wyniki w renomowanym czasopiśmie. Poza tym kontynuacja badań, do czego bardzo zachęcam, bo tematyka jest bardzo aktualna i lokuje się na froncie badań (cutting-edge) z zakresu mechaniki pękania, wymagać będzie współpracy i wymiany informacji z innymi zespołami naukowymi.

3. Wskazane byłoby naszkicowanie w części końcowej rozprawy koncepcji dalszych badań. Aktualnie jest to już standardem w pracach na stopień.

Dalej wybrane uwagi szczegółowe.

4. Strona 17. Nienumerowane wzory poniżej 1.14. Zamiast znaku równości powinno być mnożenie ("razy"), czyli:
$$b, B, W, a > 25 \cdot J_{IC} / \sigma_y,$$
oraz
$$b, B, W, a > 175 \cdot J_{IC} / \sigma_y.$$
5. Autorka słusznie zauważa, że cyt.: „Istnieją dwie techniki wyznaczania krytycznej wartości całki J: technika zmiany podatności i technika zmiany potencjału”. Obie techniki dotyczą tzw. metody jednej próbki, natomiast znana jest także metoda wielu próbek. A którą stosowano w pracy? Szczególnie, że doniesienia literaturowe wskazują na znaczne rozbieżności między nimi.
6. Strona 24 i inne. W przypadku oznaczenia stali dobrze jest podać oprócz np. AISI 4340, A508 itd., jej polski odpowiednik, zgodny z obowiązującym Eurokodem stali, np. w nawiasie, przy zachowaniu oryginalnej nazwy w przypadku cytowania prac.
7. Str. 26: mikron. Nazwa mikron oraz symbol μ była oficjalnie uznawana w latach 1879–1967. Aktualnie - mikrometr (symbol: μm) – podwielokrotność metra, podstawowej jednostki długości w układzie SI.
8. Str. 31. Zamiast Body Centered Cubic (BCC) system należy używać polskiego odpowiednika: struktura regularna przestrzennie centrowana (A2).
9. Str. 51. Tabela 4.1. W jaki sposób wyznaczono skład chemiczny? Metodą spektralną?
10. Str. 51. Rozdział 4.1 i dalej. Brak jest zestawienia planu badań (ile próbek, ile pomiarów na próbkę itd.). Dlaczego nie pokazano rysunku (geometria i wymiary) próbek do zginania i rozciągania?
11. Str. 51. Tabela 4.1.2. Czy dla tej stali wyznaczono R_e czy $R_{0.2}$? – Z wykresu 4.1.1. wynika, że jest to $R_{0.2}$.
12. Str. 51. Cyt.: „Proces zatrzymywano w momencie, gdy odkształcenia osiągnęły wartości: 0,4%, 0,6%, 0,9%, 1,2%, 1,7%, 2%, 2,3%, 4,9%, 5,1% oraz 6,5%.” Chodzi o odkształcenia całkowite, czy plastyczne? Jakiego ekstensometru użyto (baza)? Czy weryfikowano, np. metodą optyczną, stopień uśrednienia odkształceń w bazie pomiarowej ekstensometru? Szczególnie dyskusyjne staje się to w strefie „szyjki” gdzie lokalne odkształcenia mogą być większe. Generalnie wskazane poszerzenie opisu procedury.
13. Str. 52. Cyt.: „Odciążone próbki przecięto na pół wzdłuż osi, szlifowano, a następnie polerowano.” W jaki sposób przecinano próbki? Czy poza zaproponowaną metodą Autorka próbowała ocenić stopień „porowatości” materiału np. metodami nieniszczącymi, w tym np. z wykorzystaniem tomografu?
14. Str. 52. Rys. 4.1.2. Na podstawie kształtu można wywnioskować, że jest to np. azotek tytanu. Mając na uwadze, że badania przeprowadzono z użyciem mikroskopii SEM, czy wykonano także analizę przy pomocy sondy EDS?
15. Str. 55 i dalej. 4.2. Obliczenia numeryczne. Jaki model konstytutywny materiału został użyty w symulacjach? Na str. 56 napisano, cyt.: „Do modelu numerycznego zastosowano związek konstytutywny uzyskany w jednoosiowej próbie rozciągania stali Hardox-400 badanej w temperaturze +20°C”. Co to dokładnie oznacza, model R-O,

- czy zwyczajne „wczytanie” krzywej? Czy analizowano wpływ zastosowania innych modeli np. Chaboche’a na uzyskane wyniki numeryczne?
16. Str. 78. Hipoteza HvM? Chodzi zapewne o hipotezę Hubera-Misesa-Hencky’ego (HMH).
17. Uwaga ogólna. Zamiast pisać „siatka” lepiej użyć określenia „model dyskretny”.

PODSUMOWANIE

Przedstawioną pracę o tytule *„Badanie mechanizmów procesu pękania kruchego przy dużych odkształceniach plastycznych”*, niezależnie od zgłoszonych uprzednio uwag, oceniam całościowo jednoznacznie i zdecydowanie pozytywnie. Opis procesu pękania z wykorzystaniem metody automatów komórkowych jest ambitnym i ważkim zagadnieniem w zakresie badań podstawowych i stosowanych. Tematyka jest bardzo aktualna i lokuje się na froncie badań (cutting-edge) z zakresu mechaniki pękania

Praca ma charakter zarówno eksperymentalny jak i obejmuje szerokie spektrum zagadnień z zakresu modelowania. Walory rozprawy w obu tych obszarach mają kluczowe znaczenie dla wysokiej oceny wysiłków Doktorantki.

Wyraźnie sformułowano cel i konsekwentnie rozwiązano zadania szczegółowe. Szczególną wartość pracy należy upatrywać w spójnym i logicznym połączeniu badań wytrzymałościowych i strukturalnych z modelowaniem z użyciem MES oraz zastosowaniem automatów komórkowych do opisu procesu wzrostu makropęknięć. Pozwala to łącznie stwierdzić, iż tezy pracy zostały dowiedzione, a cele rozprawy osiągnięte. Monografia wyróżnia się ponadto pozytywnie edycyjnie, zarówno w zakresie tekstu jak i materiału ilustracyjnego (zdjęcia, rysunki, tabele)

Ponadto z bazy danych Biblioteki Politechniki Świętokrzyskiej wynika, że Doktorantka jest współautorką 13 prac, w tym opublikowanych w czasopiśmie: Archives of Metallurgy and Materials (2 prace), Key Engineering Materials (1), Przegląd Mechaniczny (1), Solid State Phenomena (2). Pozostałe, to streszczenia lub komunikaty konferencyjne.

Mając na uwadze wszystkie wymienione powyżej aspekty stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca spełnia wymagania stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. z 2017 r., poz. 1789) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika. Wnoszę jednocześnie o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

/prof. dr hab. inż. Jerzy KALETA/

- 000001614 -
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
KATEDRA MECHANIKI
I INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ
Wybrzeże St. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
NIP 8960005851 (1)

KIEROWNIK KATEDRY
Prof. dr hab. inż. JERZY KALETA, prof. zw.

