

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Artura Mościckiego

pt.: „*Mechanizmy zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła*”

1. Podstawa opracowania oceny

Ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Mościckiego wykonanej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Piotra Marka, prof. uczelni i promotora pomocniczego dr inż. Jakuba Pawlickiego opracowano na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna z dnia 6 września 2023 roku powołującej mnie na recenzenta przedmiotowej rozprawy doktorskiej oraz pisma przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika z dnia 8 września 2023 r.

2. Treść pracy

Doktorant podjął się opracowania prostych modeli analitycznych oraz modeli numerycznych dla reprezentatywnego elementu objętościowego (RVE) pozwalającego analizować stan naprężeń w materiale komórkowym. Badania prowadzono przyjmując jako materiał komórkowy spienione szkło. Modele budowano zarówno dla materiału o komórkach otwartych jak i zamkniętych. Prowadzone badania miały na celu analizę wpływu sposobu obciążenia mechanicznego i termicznego, przyjętego modelu, uwzględnienie naprężeń własnych wynikających z produkcji piany szklanej oraz ciśnienia wewnątrz komórek zamkniętych materiału.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska ma formę monografii. Autor we wstępie przybliży zarys historyczny zastosowania różnych materiałów pokazując na tym tle jak rozwijają się różnego rodzaju materiały komórkowe ze szczególnym uwzględnieniem pian szklanych. Autor przybliży metody produkcji, skład w tym strukturę oraz właściwości materiałowe szkła. Krótko wspomina o spienionym szkłe i metodach wyznaczania podstawowych właściwości materiałowych jak i ich wartości na podstawie dostępnej literatury oraz sposobu wytwarzania. W rozdziale tym przedstawione są również główne obszary, gdzie spienione szkło znajduje swoje zastosowanie. Przedstawiono również jeden przypadek, w którym element konstrukcyjny ze spienionego szkła uległ uszkodzeniu.

Kolejny rozdział ocenianej rozprawy to definicja celu i zakresu pracy. Rozdział trzeci zatytułowany „wytrzymałość materiałów komórkowych” ponownie przybliży obiekt badań. Doktorant w rozdziale tym klasyfikuje materiały komórkowe, opisuje sposób ich wytwarzania, przybliży właściwości materiałowe i możliwość ich kształtowania, obszary zastosowań tego typu materiału, przedstawia wpływ niedoskonałości na właściwości oraz przybliży hipotezy wytrzymałościowe stosowane do wyznaczania naprężeń efektywnych pozwalających określać wytrzymałość elementów konstrukcyjnych wykonanych z pian szklanych.

Kolejne rozdziały przedstawiają wyniki badań Doktoranta. W rozdziale czwartym mgr Artur Mościcki przedstawia przyjęty model analityczny i numeryczny MES. Kolejny rozdział

poświęcony jest badaniom doświadczalnym w ramach, których wyznaczano: wytrzymałość piany szklanej na ściskanie dla różnych próbek w tym różnych sposobów „podparcia” oraz ciśnienie gazu zamkniętego wewnątrz struktury spienionego szkła. W rozdziale kolejnym przedstawiono wyniki analiz numerycznych MES, gdzie zaprezentowano wyniki: (i) dla różnych sposobów obciążenia (wprowadzenia obciążenia), (ii) wpływu ciśnienia gazu wewnątrz komórek piany na stan naprężeniowo – odkształceniowy przy obciążeniach mechanicznych oraz termicznych, (iii) wpływu obciążenia termicznego w tym szoków cieplnych. Autor rozprawy przedstawił również obwiednie stanów niszczących dla rozpatrywanej struktury spienionego szkła.

Ostatni rozdział stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań oraz płynące z otrzymanych wyników wnioski.

3. Ocena pracy

Lektura pracy doktorskiej mgr inż. Artura Mościckiego pozwala dostrzec złożoność problemów jakie pojawiają się podczas podjętej próby opisu zachowania się materiałów komórkowych pod obciążeniem mechanicznym i termicznym (w tym szoków termicznych) z uwzględnieniem sposobu wprowadzania obciążenia czy uwzględnienia ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz komórek piany oraz zmiany tego ciśnienia wraz ze zmianą temperatury.

Doktorant zaplanował i przeprowadził próby ściskania z użyciem nowoczesnej techniki jaką jest cyfrowa korelacja obrazu, używając zamiast komercyjnego zestawu do śledzenia odkształceń próbki własny zestaw (aparaturę fotograficzną) i oprogramowanie typu „open source”. Trudność z jaką przy takim podejściu musiał zmierzyć się Doktorant to problemy z korelacją uzyskanych obrazów z obciążeniem.

Pozytywnie ocenić należy poszukiwanie przez Doktoranta prostych i skutecznych metod do określenia poszukiwanych wielkości – w niniejszej pracy zaproponowano stosunkowo nieskomplikowane stanowisko i metodę wyznaczania ciśnienia wewnątrz komórek spienionego szkła.

Na pozytywną ocenę zasługuje również zaproponowana różnorodność modeli MES

Do osiągnięć doktoranta można zaliczyć:

- Opracowanie stanowisk badawczych, zaplanowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych stosunkowo trudnego obiektu (materiał porowaty).
- Zaproponowanie różnych modeli MES, pozwalających badać wpływ różnych wielkości na pracę materiału komórkowego – spienionego szkła.
- Racjonalny dobór sposobu wprowadzania obciążenia do elementów wykonanych ze spienionego szkła pozwalający na minimalizację koncentracji naprężeń.
- Przygotowanie dla przyjętej hipotezy wytrzymałościowej obwiedni naprężeń dopuszczalnych dla struktury spienionego szkła.

Efekt końcowy prowadzonych prac badawczych ma charakter poznawczy. Przedstawione wyniki pokazują jak rozkładają się naprężenia w materiale piany szklanej oraz jaki wpływ ma temperatura czy gaz zamknięty w przestrzeniach komórkowych.

Pierwiastka utylitarne dopatrywać można w metodach badawczych, które zastosować można w przyszłości w procesie projektowym tego typu struktur.

Niestety dysertację cechuje pewna doza niestaranności. Jej czytanie i zrozumienie utrudniają liczne skrótowe myślowe, nieprecyzyjne sformułowania, brak dokładnego opisu przyjętych założeń oraz warunków brzegowych dla zaproponowanych modeli MES. Niefortunna jest również struktura pracy jak i nazwy niektórych rozdziałów, np. w rozdziale trzecim zatytułowanym „Wytrzymałość Materiałów Komórkowych” tylko dwa ostatnie podrozdziały są związane z tym tytułem. W odniesieniu do struktury pracy zauważyć można,

że Autor po wstępie, w którym częściowo przedstawia obiekt podjętych badań, definiuje cel i zakres pracy, po czym w kolejnym rozdziale ponownie przybliża badany obiekt korzystając z doniesień literaturowych. Na jednej stronie przedstawiono zaledwie sześć prac innych autorów zajmujących się badaniem i modelowaniem materiałów porowatych. W odczuciu recenzenta brak jest rozdziału z dogłębną analizą obecnego stanu wiedzy dotyczącej tematyki i obiektu podjętych badań ze wskazaniem jak ten stan został uzupełniony czy rozszerzony.

Pomimo powyższego, pozytywnie oceniam przedstawioną do oceny dysertację, dostrzegając zaangażowanie Doktoranta oraz wymienione na wstępie niniejszego punktu zalety pracy i osiągnięcia jej Autora.

4. Uwagi krytyczne

Autor przygotowując rozprawę doktorską nie ustrzegł się "potknięć" i/lub niedociągnięć, najczęściej w postaci niewłaściwych i nieprecyzyjnych sformułowań, które jednak nie pomniejszają oceny pracy doktorskiej i wartości naukowej prowadzonych badań.

4.1. Uwagi ogólne

Lektura przygotowanej dysertacji nasuwa następujące uwagi i pytania o charakterze ogólnym.

- 1) Rozprawa zawiera zaledwie jedną stronę odniesień i omówienia aktualnego stanu wiedzy dotyczącego badań i analiz wytrzymałości materiałów porowatych w tym spienionego szkła. W odczuciu recenzenta takich prac w literaturze światowej można znaleźć bardzo dużo. Tak skromny przegląd literatury dotyczący tematyki pracy nie pozwolił precyzyjnie wskazać jakie obszary uzupełnia lub poprawia przedstawiona do oceny praca doktorska
- 2) Dlaczego zarówno w model numeryczny jak i analityczny nie wprowadzono parametru pozwalającego uwzględniać niedokładność kształtu, skoro na podstawie analiz literaturowych wykazano w rozdziale 3.5 (rys. 3.12), że zmiana pofalowania ścianek zdefiniowana jako długość ścianki do promienia jej krzywizny w zakresie od 0 do 0.5 powoduje zmianę znormalizowanego modułu Younga nawet o 60% (od wartości 1 do 0.4)?
- 3) Zaprezentowany model MES nie ma swojej formy geometrycznej. Nie podano na jakiej podstawie przyjęto wielkość (wymiary) pojedynczej komórki oraz co determinowało dobór wielkości elementów przyjętych do dyskretyzacji. Nie opisano precyzyjnie dla wszystkich zastosowanych modeli (również dla modelu pojedynczej komórki) przyjętych warunków brzegowych i sposobu obciążenia oraz podstaw stosowania uproszczeń przyjmowania modeli o konkretnej liczbie komórek $5 \times 5 \times 5$ czy $4.75 \times 4.75 \times 4.75$ i jak wygląda fragment komórki to znaczy jej 0.75 części?
- 4) Jaki przyjęto model wymiany ciepła pomiędzy objętością (gaz) modelowaną elementami bryłowymi a ścianami modelowanymi przez elementy powłokowe?
- 5) W badaniach dotyczących ciśnienia gazu wewnątrz komórek spienionego szkła zabrakło informacji jak i jakie parametry procesu produkcji wpływają na wartość ciśnienia wewnątrz komórkowego.
- 6) Nie zaproponowano czytelnej formy prezentacji wyników obliczeń numerycznych MES. Mapy naprężeń głównych przedstawione na całym badanym modelu są nieczytelne, ze względu na mały rozmiar obrazu i duże zmiany kolorów na małych powierzchniach, co prowadzi do braku możliwości interpretacji przedstawionych na nich wyników. Jedyne legendy na tych wykresach pozwalają stwierdzić w jakim zakresie zmieniają się wartości naprężeń.
- 7) Analiza wyników doświadczalnych i numerycznych nasuwa następujące pytanie: Jeżeli wyniki MES dla komórki obciążonej cieplnie nie są zbieżne z eksperymentem to czy zaproponowany model jest poprawny?

4.2. Uwagi szczegółowe

- 1) Jaki jest cel przedstawiania na rysunku 3.1 określeń, skoro i tak w dalszej części pracy nie przywiązuje się żadnej wagi do nich, a wręcz pomija się je stwierdzeniem na kolejnej stronie „Niemniej jednak na potrzeby niniejszej pracy pojęcie piany będzie stosowane zamiennie i uznawane za tożsame z ciałem porowatym.”
- 2) Przytoczony na stronie 25 podział materiałów komórkowych nie został precyzyjnie opisany. Zaproponowane przykłady mające pokazać różnice pomiędzy strukturą płaską a przestrzenną nie przybliżają ich i wręcz utrudniają zrozumienie zastosowanego podziału. Czy nie lepiej było posłużyć się definicją, jeżeli istnieje? Czy konieczny jest ten podział na potrzeby tej rozprawy?
- 3) Czemu w pracy pominięto dobrze znaną hipotezę Burzyńskiego, która pozwala wyznaczać naprężenia efektywne dla materiałów o różnej wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie?
- 4) Przedstawione w pracy równanie 4.4 nie zostało wyprowadzone. Autor odwołuje się do publikacji, która według spisu treści nie jest opublikowana – ma status „w przygotowaniu”.
- 5) Rysunek 4.8 przedstawia pojedynczą komórkę, czy całą? czy może jej fragment/część? Skomplikowany kształt zaprezentowany na płaszczyźnie jest trudny do wyobrażenia – można by tu posłużyć się np. rzutami lub zastosować inne zabiegi graficzne, aby czytelnik mógł sobie zobrazować kształt. Prezentując model MES dobrze jest najpierw przedstawić model geometryczny, a potem dyskretny.
- 6) Na stronie 56 w odniesieniu do zastosowanej metody cyfrowej korelacji obrazu pojawia się stwierdzenie: „Na podstawie operacji, jakie można dokonać na tych obiektach, określany zostaje stan wewnątrz analizowanej próbki”, które sugeruje możliwość analizy tego co dzieje się wewnątrz badanej próbki na podstawie przemieszczeń wyznaczonych na fotografowanym fragmencie powierzchni – proszę o wyjaśnienie jak to jest możliwe.
- 7) Zastosowana metoda cyfrowej korelacji obrazu z wykorzystaniem jednej kamery pozwala na badanie powierzchni płaskich, a analizie poddawana jest powierzchnia cylindryczna. Prawdopodobnie tylko na tworzącej i w bliskiej odległości od niej pomiary są stosunkowo dokładne, co jest wyraźnie widoczne na obrazach prezentujących wyniki, gdzie przemieszczenie pionowe nie jest identyczne na szerokości próbki (str. 60 i 61 – różnica skrócenia nawet do 1 mm po widocznej części obwodu). Wydaje się, że stwierdzenie ze strony 56 „W analizowanym przypadku próbki miały kształt cylindryczny, główny obszar analizy zlokalizowany był w ich środku, z tego powodu kształt próbki miał niewielki wpływ na wyniki badań.” jest nieuprawnione. Proszę o dowód, że tak przeprowadzone badania pozwalają na uzyskanie miarodajnych wyników.
- 8) Czy przyjęte założenie dotyczące rozkładu ciśnień na powierzchni ścian, które zaprezentowano na rysunku 6.1 jest prawdziwe dla każdego przypadku, czy tylko dla cienkich i o stałych grubościach ścian międzykomórkowych (idealny rozkład pęcherzy powietrza)?
- 9) Komentując wyniki stwierdzono, że pękanie rozpoczyna się na zewnątrz. Niestety na rys. 6.6 i kolejnych tego nie widać. Dodatkowo wartości naprężeń głównych σ_1 (obszary czerwone wg. legendy) występują również wewnątrz, a dodatkowo czy w części środkowej ze względu na swobodę odkształceń w kierunkach prostopadłych nie ma możliwości generowania naprężeń rozciągających? Przy okazji warto by zdefiniować co autor rozumie przez określenia „wewnątrz” i „na zewnątrz”.

- 10) Czy równomierny rozkład naprężeń na obciążonym brzegu dla modeli z żywicą i mąką nie wynikają bezpośrednio z przyjętych warunków brzegowych i czy na pewno te warunki odpowiadają warunkom rzeczywistym? Odnosi się wrażenie, że brak w modelu elementów modelujących żywicę czy mąkę prowadzi do wyników numerycznych odmiennych od tych, które występują w elemencie rzeczywistym.
- 11) Analizując wyniki i ich omówienie zaprezentowane na str. 85-88 nasuwa się pytanie, czy występowanie nadciśnienia nie jest najważniejszym obciążeniem wpływającym na stan naprężeń? Takie sprawdzenie jest stosunkowo łatwo wykonać, np. poprzez porównanie wyników z samym nadciśnieniem oraz nadciśnieniem i obciążeniem ściskającym próbkę.
- 12) Jak wyglądałby wykres 6.18 w jednostkach bezwymiarowych np. na osi pionowej T/T_{max} ? Czy wówczas wnioski w sprawie prędkości byłyby podobne? albo czy obecne wnioski nie wynikają przypadkiem bezpośrednio z różnicy w zmianie temperatur 20-100 i 20-350?
- 13) Czy dla modeli wyekstrahowanych komórek obciążonej ciśnieniem wynikającym ze średniej temperatury gazu analizowano również wpływ różnicy temperatury?
- 14) Spadek E dla wzrostu temperatury to ok. 3% a zatem dla zagadnienia liniowego i tych samych odkształceń naprężenia spadną o 3% czy ta zmiana jest istotna?
- 15) Jak rozumieć wymuszenie kinematyczne 0.31 MPa lub ściskanie naprężeniem 4.9 MPa? Jak dobrano wielkość obciążenie w postaci „ciśnienia” o wartości 4.9 MPa?
- 16) Proszę o wyjaśnienie jaka jest relacja między wynikami zaprezentowanymi na rys. 6.36 i 6.41. Dlaczego nie wyznaczono kryterium stanu granicznego, czyli parametrów równania stycznej do kół Mohra?
- 17) Wniosek dotyczący sypkiego podłoża jest niepełny, gdyż zachowanie zależeć będzie od wielkości ziaren materiału sypkiego w odniesieniu do wielkości otwartych przestrzeni w materiale porowatym zatem różnica pomiędzy żwirem i mąką może być znacząca.
- 18) Proszę wskazać rysunek w pracy pokazujący wyniki, które pozwoliły zapisać w części podsumowania następujące stwierdzenie: „Stan zgięciowy w ściankach komórek jest wielokrotnie większy niż stan błonowy”
- 19) Jaka jest relacja pomiędzy komórką jednostkową a czternastościanem foremnym (rys. 6.37 i 6.38), jak część tego czternastościanu wpisuje się w komórkę jednostkową, jakie przyjęto warunki brzegowe i schemat obciążenia?
- 20) Proszę o sprecyzowanie ostatniego wniosku (str. 114).

4.3. Uwagi edytorskie

W pracy pojawia się wiele niefortunnych sformułowań, skrótów myślowych i nieprecyzyjnych opisów, co utrudnia zrozumienie co dokładnie autor miał na myśli. Wszystkie te uwagi wraz z uwagami o charakterze czysto edytorskim zamieszczono poniżej.

- 1) Na stronie 16 użyto jednostek ksi (kilo funt na cal kwadratowy), lepiej stosować jednolite jednostki w całej pracy, a w przypadku pracy w języku polskim układ SI.
- 2) Z niezrozumiałych powodów akurat na końcu wstępu pojawia się opis awarii izolacji wykonanej ze spienionego szkła.
- 3) Pierwsza część pierwszego zdania w rozdziale drugim nie jest wystarczająco precyzyjna, ma charakter typowego zdania z raportu lub ekspertyzy „Niniejsza praca dotyczy określenia wytrzymałości ... spienionego szkła pod wpływem obciążeń mechanicznych i termicznych”. Zdecydowanie lepiej brzmiałoby np. zdanie „Niniejsza praca przedstawia nowe metody / aspekty / niezbędne czynniki konieczne przy określaniu

wytrzymałości ... spienionego szkła pod wpływem obciążeń mechanicznych i termicznych”.

- 4) Dlaczego w polskojęzycznej pracy zamieszczono rysunki z opisami anglojęzycznymi (rys. 3.10). Dlaczego nie przygotowano własnego rysunku prezentującego te zależności na podstawie danych literaturowych?
- 5) Równanie 3.7 i jego opis jest definicją wytrzymałości na ściskanie, w którym siła jest maksymalną siłą powodującą zniszczenie, o czym nie napisano.
- 6) Zdanie na stronie 33 „Można też określić jaka będzie finalna masa części przy zachowaniu takiej samej nośności” nie jest precyzyjne i jest tylko częściowo prawdziwe, gdyż zakres gęstości jest określony, a mianowicie dla różnych gęstości piany charakteryzuje się inną wytrzymałością na ściskanie czy rozciąganie, a zatem możliwy jest dobór takiej gęstości piany, aby maksymalizować nośność minimalizując masę.
- 7) Powtórzenia treści, np. informacja o tym, że piany są bardzo dobrymi pochłaniaczami energii występuje w pracy kilkakrotnie.
- 8) W zdaniu na str. 38: „Dla typowych materiałów konstrukcyjnych wraz ze wzrostem obciążenia, w pewnym momencie dochodzi do zjawiska płynięcia materiału” pojawia się kolokwializm „w momencie”, proponuję raczej np. następujące sformułowanie „... dla danego obciążenia rozpoczyna się proces płynięcia materiału ...”.
- 9) W kolejnym zdaniu na str. 38 zamiast stwierdzenia „jakiegoś urządzenia” w tego typu pracach stosowałbym „danego urządzenia” lub po prostu „urządzeń / konstrukcji / maszyn”.
- 10) Sformułowanie „czyste rozciąganie” nie jest powszechnie stosowane, proponuje używać „jednokierunkowe rozciąganie” bądź „rozciąganie”. Sformułowanie „czyste” odnosi się do zginania.
- 11) Zdanie na stronie 45 wraz z rysunkiem 4.6 „Podczas ściskania obciążeniu poddane są tylko 4 z 6 kwadratowych ramek składowych komórki elementarnej (rys. 4.6).” nie wyjaśniają zawartego w nim stwierdzenia, dlaczego tylko 4 ramki są ściskane i jak zdefiniowana jest ramka oraz co z pozostałymi dwoma „ramkami”?

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a w szczególności planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych i analiz numerycznych MES.

Wyniki pracy mają głównie charakter poznawczy oraz częściowo element użytkowy w postaci zaproponowanych modeli MES, które mogą służyć do symulacji pracy konstrukcji lub elementów konstrukcyjnych wykonanych z pian szklanych.

Mimo przedstawionych uwag krytycznych stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Artura Mościckiego p.t.: „*Mechanizmy zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła*” przedstawia rozwiązanie ważnego i oryginalnego problemu naukowego oraz w stopniu wystarczającym spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. 2022 poz. 574 z późn. zm.).

Biorąc powyższe pod uwagę wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

