



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ
I OKRĘTOWNICTWA

Gdańsk, 11.10.2023 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Seweryn

andrzej.seweryn@pg.edu.pl

tel. +48 786 899 909

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Mościckiego

nt. *Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła.*

promotor: dr hab. inż. Piotr Marek, prof. uczelni

promotor pomocniczy: dr inż. Jakub Pawlicki

Ocenę opracowano na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika z dnia 31.07.2023 r.

1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY.

Przedstawiona do mojej oceny rozprawa doktorska pt. *Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła* dotyczy badań doświadczalnych i modelowania numerycznego procesów zniszczenia (a właściwie – pękania) elementów wykonanych z materiału komórkowego jakim jest spienione szkło, w warunkach obciążenia mechanicznego lub termicznego. Materiały tego typu są coraz częściej stosowane w wielu gałęziach gospodarki, przede wszystkim w budownictwie. Spienione szkło należy do grupy materiałów charakteryzujących się niewielką gęstością, dość dobrą wytrzymałością oraz dobrymi właściwościami izolacyjnymi (termicznymi i akustycznymi). Jednakże jego kruchość powoduje asymetrię właściwości wytrzymałościowych oraz dużą czułość na nieidealny kontakt z podłożem, czy też na niejednorodne obciążenie. Trudność w analizie tych zjawisk powiększa dość skomplikowana struktura spienionego szkła powodująca lokalne stany zgięciowe w ściankach komórek. Stąd też ważne jest zarówno poznanie mechanizmów zniszczenia takiego materiału, jak i prognozowanie oraz przeciwdziałanie tym procesom. Obecny stan wiedzy w tym zakresie nie jest wystarczający.

Autor postawił następujący cel pracy: „zbadać wpływ budowy struktury porowatej na jej właściwości wytrzymałościowe, a w szczególności: określenie miejsca inicjacji zniszczenia,

znalezienie sposobu wprowadzenia obciążenia w strukturę tak, aby zwiększyć jej nośność, określenie ciśnienia wewnętrznego wewnątrz struktury porowatej i wskazanie jego wpływu na nośność, ustalenie wpływu obciążeń cieplnych na wytrzymałość.” Cel ten, choć w gruncie rzeczy odzwierciedla ideę części badań przedstawionych w rozprawie, to jednak powinien być podzielony na cel główny (np. identyfikacja mechanizmów zniszczenia materiału komórkowego wykonanego ze spienionego szkła w warunkach obciążeń mechanicznych i termicznych oraz opracowanie na tej podstawie metod prognozowania wytrzymałości tego materiału, a także zaleceń konstrukcyjnych powodujących zwiększenie jego nośności) oraz ewentualnie cele szczegółowe. Ponadto nie mogą być celem pracy badania jako takie, bo nasuwa się zaraz pytanie: a jaki był cel tychże badań?

Doktorant w swojej rozprawie postawił następującą tezę (cyt.): „modelowanie struktury porowatej za pomocą metody elementów skończonych, wsparte badaniami doświadczalnymi, pozwala na określenie lokalizacji inicjacji zniszczenia i sformułowanie wytycznych odnośnie wprowadzanie obciążeń w strukturę posiadającą wypełnienie w postaci szkła spienionego oraz umożliwia zbadanie wpływu ciśnienia w komórkach wypełniacza na wytrzymałość struktury”. Tak sformułowana teza jest zbyt ogólna i można ją potwierdzić na podstawie literatury, bez przeprowadzania przedstawionych w pracy badań. Należy dodać, iż poprawnie sformułowana teza odnosząca się bezpośrednio do zaprezentowanych w rozprawie metod i wyników badań nie jest warunkiem koniecznym w przewodach doktorskich.

Praca zawiera łącznie 119 stron i została podzielona na 7 rozdziałów, objaśnienia, bibliografię, spis treści oraz streszczenie w języku polskim i angielskim. W rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do tematyki pracy, informacje na temat technologii wytwarzania materiałów komórkowych w procesie spieniania szkła oraz krótki przegląd literatury dotyczący właściwości mechanicznych spienionego szkła w zależności od sposobu jego wytwarzania (ta część powinna się znaleźć w rozdziale trzecim). W rozdziale drugim sformułowano tezę pracy oraz przedstawiono główne cele badawcze i zakres pracy. W rozdziale trzecim przedstawiono ponownie przegląd literatury dotyczącej klasyfikacji, metod wytwarzania oraz zastosowania materiałów komórkowych, ze szczególnym uwzględnieniem pian metalowych i szklanych. Opisano także właściwości mechaniczne tych materiałów oraz to jaki wpływ na nie mają niedoskonałości struktury spienionego szkła. Pokróćce opisano też podstawowe hipotezy wytrzymałościowe. Rozdział czwarty poświęcono modelowaniu struktury geometrycznej materiałów porowatych na przykładzie pian szklanych. Zaprezentowano modele belkowe oraz płytowe wykorzystywane do obliczeń analitycznych, a także modele jedno- i wielokomórkowe metody elementów skończonych wykorzystujące

elementy bryłowe oraz powłokowe. W rozdziale piątym przedstawiono metody oraz wyniki badań doświadczalnych wytrzymałości próbek wykonanych ze spienionego szkła w warunkach jednoosiowego ściskania. Szczególną uwagę zwrócono na warunki podparcia i przyłożenia obciążenia. Do wyznaczenia pól przemieszczeń i odkształceń wykorzystano metodę cyfrowej korelacji obrazu. Opisano także metodę i wyniki pomiaru ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz komórek spienionego szkła. Rozdział szósty poświęcono numerycznemu modelowaniu pól odkształceń i naprężeń za pomocą metody elementów skończonych. Wykorzystano wyidealizowaną geometrię struktury spienionego szkła. Oszacowano wpływ ciśnienia gazu w porach oraz warunków podparcia i przyłożenia obciążenia na wytrzymałość badanego materiału komórkowego. Szczególną uwagę zwrócono na odporność materiału na szoki termiczne. Na podstawie wyników obliczeń numerycznych nieustalonego zagadnienia wymiany ciepła. Zaproponowano warunek wytrzymałościowy w postaci obwiedni dopuszczalnych naprężeń głównych w złożonych stanach obciążenia. Rozdział siódmy przedstawia podsumowanie przeprowadzonych w pracy badań oraz wynikające z nich wnioski, a także praktyczne wskazówki do projektowania konstrukcji, w których wykorzystywany jest materiał porowaty w postaci spienionego szkła. Pracę zakończono spisem literatury, obejmującym tylko 52 pozycje bibliograficznych. To niezbyt imponująca liczba w przypadku rozprawy doktorskiej.

2. OCENA ROZPRAWY, UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Przedstawiona praca stanowi autorskie opracowanie Doktoranta w zakresie badań doświadczalnych oraz modelowania numerycznego procesów degradacji i zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła pod wpływem obciążeń mechanicznych i termicznych. Tematyka pracy ma duże znaczenie zarówno poznawcze (zrozumienie procesów degradacji i zniszczenia struktury komórkowej), jak i użyteczne (ustalenie kryteriów wytrzymałościowych dla spienionego szkła) oraz mieści się w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Rozprawa zawiera elementy oryginalne, które przedstawię poniżej.

1. Za istotne osiągnięcie Doktoranta uznaję wyniki badań doświadczalnych procesów zniszczenia próbek wykonanych ze spienionego szkła. Przeprowadzono badania ściskania próbek na maszynie wytrzymałościowej. Problem nierówności brzegu próbki w miejscu przyłożenia obciążenia wywołujących nierównomierny jego rozkład, próbowano rozwiązać poprzez zastosowanie wzmocnienia z żywicy epoksydowej wyrównującego brzeg oraz mąki krupczatki zasypanej do otwartych komórek na brzegu. Analizę pól

przemieszczeń oraz odkształceń przeprowadzono z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (*DIC – Digital Image Correlation*). Wyznaczono również ciśnienie gazu, który pozostał w strukturze komórkowej po procesie spieniania szkła.

2. Ważnym elementem pracy jest prezentacja metod i wyników modelowania stanu naprężenia i odkształcenia w materiale komórkowym poddanym obciążeniom ściskającym (aż do zniszczenia), a także obciążeniom cieplnym oraz ciśnieniem (nadciśnieniem lub podciśnieniem) działającym na ścianki komórek spienionego szkła. W obliczeniach zastosowano metodę elementów skończonych (program komercyjny Ansys) oraz liniowo sprężysty model materiału. Wykorzystano klasyczne elementy bryłowe oraz powłokowe. Przeprowadzono również symulacje nieustalonych procesów wymiany ciepła, analizując stan naprężenia i odkształcenia struktury wywołany szokiem termicznym. W obliczeniach wykorzystano uproszczony model geometryczny struktury piany, jedno- i wielokomórkowy.
3. Autor podjął próbę opracowania kryterium pęknięcia (a właściwie hipotezy wyężeniowej) dla spienionego szkła w postaci obwiedni kół Mohra reprezentujących stan naprężenia w materiale (naprężenia lokalne w komórkach materiału porowatego oraz naprężenia efektywne dla struktury). W szczególności wykorzystano kryteria wytrzymałościowe Galileusza-Rankine'a oraz Mohra, wyznaczając parametry występujące w tych kryteriach. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych zaproponowano warunek wytrzymałościowy w postaci obwiedni dopuszczalnych (krytycznych) efektywnych naprężeń głównych w złożonych stanach obciążenia. Opracowana zależność, jak i praktyczne wskazówki dotyczące np. warunków podparcia struktury, opracowane w pracy doktorskiej mogą być bardzo przydatne dla projektantów wykorzystujących w swoich konstrukcjach elementy ze spienionego szkła.

Rozprawa zawiera również pewne elementy, które wymagają wyjaśnienia. Najważniejsze uwagi krytyczne (w pewnej mierze dyskusyjne), w kolejności ich powstawania podczas analizy pracy, przedstawiłem poniżej.

1. Mam pewne zastrzeżenia do wyników badań doświadczalnych przedstawionych na rysunkach 5.8, 5.12 oraz 5.16. Zaprezentowano tam rozkład osiowej składowej przemieszczenia w próbce spienionego szkła otrzymany metodą cyfrowej korelacji obrazu. Z rysunku wynika jednak, że cała próbka przemieszcza się znacznie w kierunku osiowym, co oznacza, że nieprawidłowo obrano punkt referencyjny, względem którego mierzone były przemieszczenia. Powinien on się znajdować na granicy bazy pomiarowej próbki. Ponadto na rysunkach widać, że lewa/prawa strona całej próbki przemieszcza się znacznie

bardziej od prawej/lewek. Czym to jest spowodowane? Domyślam się, że siłę mierzono za pomocą głowicy pomiarowej maszyny wytrzymałościowej. Ale w jaki sposób mierzono skrócenie bazy pomiarowej i jak obrano tę bazę? Ponieważ mamy do czynienia z siłą ściskającą oraz skróceniem próbki, to może wartości siły i przemieszczenia osiowego powinny być ujemne? Ważnym problemem jest też tarcie na powierzchni przyłożenia obciążenia. Będzie ono różne dla zastosowanych 3 sposobów przyłożenia obciążenia. Czy i jak uwzględniono jego efekt?

2. Mam także pytania do pomiaru ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz porów spienionego szkła. Jaki był błąd pomiaru ciśnienia i w jaki sposób błąd ten został wyznaczony? Czy nie jest on porównywalny z mierzonymi wartościami? Ponadto uważam, że wyznaczone zostało uśrednione ciśnienie gazu w całej próbce, a do prognozowania procesu pęknięcia piany lepiej byłoby przyjąć wartości ekstremalne. Pytanie tylko jak je wyznaczyć?
3. Ważną kwestią jest weryfikacja obliczeń numerycznych na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych. Szczególnie jest to istotne jeżeli w obliczeniach dokonano znacznych uproszczeń geometrii struktury komórkowej, a problemem jest właściwe przyłożenie obciążenia. Nasuwa się zatem pytanie: dlaczego nie porównano np. zależności siły od przemieszczenia w teście ściskania próbek? Zdecydowanie trudniejsze (ale nie niemożliwe) byłoby porównanie rozkładów przemieszczeń i odkształceń otrzymanych za pomocą metody elementów skończonych oraz cyfrowej korelacji obrazu.
4. Powrócę jeszcze do kwestii uproszczeń geometrii struktury komórkowej w obliczeniach numerycznych. Przyjęto strukturę „wyidealizowaną”, która zapewne sporo różni się od rzeczywistej. Aby to sprawdzić wystarczy wykorzystać mikrotomografię komputerową. Otrzymany za jej pomocą obraz przestrzenny objętości reprezentatywnej struktury, o dokładności rzędu 2 μm , można w prosty sposób wykorzystać do utworzenia modelu geometrycznego metody elementów skończonych. Co prawda w tym przypadku do prawidłowego jej odwzorowania potrzebnych będzie kilkaset tysięcy elementów bryłowych, ale obliczenia nie będą trwały długo, gdyż model materiału jest liniowo sprężysty. Może to być jeden z kierunków przyszłych badań Doktoranta, które w pracy zostały opisane dość skromnie.
5. Autor powinien rozgraniczyć pojęciowo naprężenia/odkształcenia lokalne uzyskane z uwzględnieniem geometrii struktury komórkowej, które można oznaczyć właśnie jako „lokalne” (a nie „mikro”) od naprężeń/odkształceń odnoszących się do zastępczego materiału jednorodnego, które powinny być oznaczone jako „efektywne” (a nie

„zastępcze”). To samo dotyczy stałych sprężystości: modułu Younga i współczynnika Poissona.

6. Mam także uwagi do sformułowania kryterium wytrzymałościowego dla spienionego szkła. Analizując otrzymane wyniki dla krytycznych stanów naprężeń lokalnych w postaci kół Mohra pokazanych na rys. 6.41 nasuwa się jeden wniosek: koła są styczne w jednym punkcie leżącym na osi σ (a nie w 2 punktach) i właściwym do opisu takiej sytuacji jest warunek maksymalnych naprężeń normalnych Galileusza, typowy dla materiałów kruchych. Warunek ten graficznie przedstawia linia prosta prostopadła do osi σ w punkcie określającym naprężenia niszczące dla szkła (wynoszące ok. 20 MPa). Potwierdza to po części także obwiednia dopuszczalnych naprężeń efektywnych dla struktury spienionego szkła przedstawiona w układzie naprężeń głównych na rys. 6.40. Dopuszczalne efektywne naprężenia główne dla rozciągania są tu ok. 2,5 razy mniejsze niż dla ściskania. Dla tego typu struktury komórkowej obciążenie rozciągające wywołuje 2-3 razy większe lokalne naprężenie rozciągające niż ściskające i na odwrót.

Ogólnie rzecz biorąc, edycja i układ pracy są dość staranne i nie budzą zastrzeżeń, a sama praca napisana jest w sposób zrozumiały oraz posiada właściwą kolejność opisu prezentowanych badań, ułożonych w logiczny ciąg, prowadzący do osiągnięcia założonych celów badawczych. Rysunki i zdjęcia są dobrej jakości i dają się łatwo interpretować. Na pewno przejrzystość pracy byłaby jeszcze lepsza gdyby przeglądy literaturowe znalazły się w jednym, oddzielnym rozdziale, a tak są porozrzucane po rozdziałach: pierwszym, trzecim i częściowo czwartym. Lektura recenzowanej rozprawy doktorskiej prowadzi także do innych, bardziej szczegółowych uwag dotyczących redakcji pracy, które przedstawiłem poniżej.

1. Cechą charakteryzującą materiał jest jego gęstość, a nie waga (str. 12).
2. Zamiast „prawdopodobieństwo uszkodzenia” lepiej używać „prawdopodobieństwo pęknięcia” (str. 16), zamiast „mechanizm uszkodzeń” – lepiej: „mechanizm pęknięcia/zniszczenia”.
3. Zamiast „nieprężeniami” powinno być „naprężeniami” (str. 17).
4. Doktorant powinien używać jednostek SI, a tak mamy np. jednostkę Psi (czyli funt-siła na cal kwadratowy) na str. 17 oraz bar na str. 75.
5. W publikacjach się nie „bada”, tylko przedstawia metody i wyniki badań, nie „analizuje”, tylko przedstawia się wyniki analiz (str. 19, 35)
6. „Mikro baloniki” pisze się łącznie, czyli „mikrobaloniki” (str. 20).
7. Po dwukropku zawsze pisze się małą literą (str. 22, 113).

8. Pojęcie „materiał sprężysto-kruchy” (w odniesieniu do szkła) powinno być zastąpione przez „materiał liniowo sprężysty” lub „materiał kruchy”. Nie ma bowiem materiału „plastyczno-kruchego” lub „sprężysto-ciągłego”.
9. Używanie zamiennie pojęć piana oraz materiał porowaty, nawet tylko dla potrzeb ocenianej rozprawy nie jest najlepszym rozwiązaniem, gdyż pojęcie materiały porowate jest pojęciem znacznie szerszym, obejmującym oprócz pian, także spieki, metamateriały powstałe metodami przyrostowymi itp. (str. 25).
10. Opisy na rysunkach powinny być w języku polskim (str. 31, 36, 103).
11. W wypunktowaniu na str. 38 dwukrotnie pominięto słowo „hipoteza”.
12. Rozprawa zawiera także informacje zbędne, np. zamieszczone na stronie 39 podręcznikowe informacje nt. koła Mohra.
13. Nie używa się sformułowania „w oparciu”, chyba, że dotyczy krzesła – powinno być np. „na podstawie” (str. 41, 43, 51, 53).
14. Zamiast „wyniki analiz numerycznych” lepiej użyć „wyniki obliczeń numerycznych” oraz „analiza wyników obliczeń” (str. 74, 115).
15. Autor napisał, że „efekty zgięciowe (...) manifestują się jako efekt działania gazu” – zamiast „manifestują się” powinno być: „powstają”.
16. Doktorant nie powinien wykorzystywać zeskanowanych rysunków innych autorów bez ich zgody (lub zgody wydawnictwa), nawet gdy podał ich źródło. Rysunki te lepiej było przerysować, a i tak nie zwalnia to od podania źródła.

3. WNIOSEK KOŃCOWY

Pomimo uwag krytycznych przedstawionych w poprzednim rozdziale opinii, których celem jest podniesienie jakości badań naukowych mgr. inż. Artura Mościckiego w przyszłości, uważam, że recenzowana praca doktorska zawiera wartościowe wyniki badań i stanowi ważne osiągnięcie naukowe Doktoranta. Przedmiotem rozprawy jest bowiem oryginalne rozwiązanie problemu naukowego poznania mechanizmów i prognozowania zniszczenia materiałów komórkowych na przykładzie spienionego szkła. Należy także podkreślić wysoki stopień trudności i szeroki zakres przeprowadzonych badań.

Praca doktorska prezentuje także ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, w szczególności w specjalności mechanika materiałów, a także pokazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych (eksperymentu oraz modelowania numerycznego). Badania te pozwoliły na sformułowanie wniosków i uwag

końcowych o charakterze zarówno poznawczym, jak i praktycznym. Ocenianą pracę postrzegam za wartościową pod względem naukowym oraz użytecznym.

Biorąc pod uwagę całość pracy, tj. jej wartość poznawczą i użyteczną oraz wkład własny Autora, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Artura Mościckiego nt. *Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła* spełnia zatem wymagania stawiane w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z poz.zm.) w odniesieniu do prac doktorskich, w szczególności określone w art. 187. Wniosuję zatem o dopuszczenie dysertacji do publicznej obrony.

