

prof. dr hab. inż. Jerzy Małachowski
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 839 140
E-mail: jerzy.malachowski@wat.edu.pl

Warszawa, 22.11.2023 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej zatytułowanej w j. polskim
„Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła”
autorstwa mgra inż. ARTURA MOŚCICKIEGO

1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania stanowi pismo (sygn. RNDIM/521.39/2023) od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, Pana prof. dr. hab. inż. ROBERTA SITNIKA, i dołączona do niego rozprawa doktorska mgra inż. ARTURA MOŚCICKIEGO pt. *„Mechanizm zniszczenia materiałów komórkowych wykonanych ze spienionego szkła”*. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. PIOTR MAREK, prof. uczelni, a promotorem pomocniczym dr inż. JAKUB PAWLICKI.

2. Omówienie pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została napisana w języku polskim, łącznie na 120 stronach maszynopisu formatu A4. W skład jej wchodzi: streszczenie rozprawy w języku polskim i języku angielskim, 8 rozdziałów i wykaz oznaczeń. Tytuły poszczególnych rozdziałów są następujące: (1) Wprowadzenie; (2) Cel i zakres pracy; (3) Wytrzymałość materiałów komórkowych; (4) Modele struktury materiałów porowatych; (5) Badania eksperymentalne; (6) Wyniki analiz numerycznych; (7) Podsumowanie i (8) Bibliografia.

Za cel główny dysertacji Doktorant przyjął *„zbadanie wpływu budowy struktury porowatej na jej właściwości wytrzymałościowe”*. Jako cele szczegółowe do realizacji Autor zdefiniował:

- 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
- analiza zachowania się siatek w warunkach naturalnych dla potrzeb walidacji modelu numerycznego.

Doktorant dla potrzeb realizacji badań, osiągnięcia celu i udowodnienia postawionej tezy, która brzmi:

„Modelowanie struktury porowatej za pomocą metody elementów skończonych, wsparte badaniami doświadczalnymi, pozwala na określenie lokalizacji inicjacji zniszczenia i sformułowanie wytycznych odnośnie sposobu wprowadzania obciążeń w strukturę posiadającą wypełnienie w postaci szkła spienionego oraz umożliwia zbadanie wpływu ciśnienia w komórkach wypełniacza na wytrzymałość struktury.”, zaprogramował dwa główne etapy badawcze. W pierwszym zrealizował badania eksperymentalne mikrostruktury materiału porowatego w celu określenia właściwości wytrzymałościowych z wykorzystaniem metody cyfrowej korelacji obrazu (ang. DIC – *Digital Image Correlation*) mając na względzie zbadanie wpływu czynników technologicznych (ciśnienia wewnątrzkomórkowego) oraz sposobu wprowadzania obciążeń mechanicznych w strukturę pianki szklanej na wytrzymałość i przebieg procesu destrukcji materiału. W etapie drugim zaproponował realizację badań numerycznych opartych na modelowaniu MES materiału o zamkniętych komórkach, który po procesie walidacji posłużył do wyznaczenia obwiedni stanów granicznych spienionego szkła w złożonych stanach naprężenia. Tak zaproponowane rozwiązanie problemu naukowego pozwoliło Doktorantowi na sformułowanie wniosków dotyczących poprawy właściwości wytrzymałościowych szkła spienionego poddanego obciążeniom mechanicznym i termicznym poprzez opracowanie zaleceń dotyczących technologii wytwarzania, wytycznych projektowych odnośnie metod łączenia z podłożem oraz sposobów obciążania mając na uwadze asymetrię właściwości wytrzymałościowych.

Należy podkreślić aktualność podjętej w rozprawie tematyki, która jak wstępnie wspomniano, dotyczy badań związanych z wyznaczeniem wytrzymałości materiału komórkowego w postaci spienionego szkła w warunkach prostych i złożonych stanów obciążeń mechanicznych i termicznych. Doktorant zaproponował oryginalne modele przestrzenne struktury materiałów porowatych, które następnie dla wybranej regularnej i adekwatnej geometrii komórki opisał analitycznie w przypadku komórki otwartej i opracował model numeryczny MES dla komórki o strukturze zamkniętej. W swoich badaniach przeprowadził także serię testów wytrzymałościowych na próbkach ze spienionego szkła dla różnych wariantów podparcia i obciążenia struktury, rejestrując jednocześnie proces deformacji i rozwoju uszkodzenia w badanej strukturze. Pozwoliło to Doktorantowi na ocenę wpływu sposobu obciążania struktury pod kątem wyznaczenia jej nośności i analizy przebiegu procesu niszczenia. Takie ujęcie problematyki badawczej umożliwiło na sformułowanie wniosków i zaleceń praktycznych dotyczących preferowanych metod projektowania i wykonywania powierzchni podłoży oddziaływujących mechanicznie ze spienionym szkłem. Za cenny element należy uznać zbadanie wpływu sposobu podparcia, który jest niekorzystny i powinno się go unikać w trakcie procesu projektowania

konstrukcji z zastosowaniem tego materiału. Ważnym elementem badań i testów laboratoryjnych była możliwość walidacji modeli numerycznych MES struktur oraz zbadanie wpływu ciśnienia gazu uwięzionego wewnątrz struktury. Opracowane modele numeryczne posłużyły także do zbadania mechanizmu zniszczenia spienionego szkła w aspekcie zwiększenia nośności testowanej struktury. Autor zaadaptował dla szkła kryteria wytrzymałościowe Galileusza-Rankine'a i Mohra i na tej podstawie wyznaczył obwiednie stanów granicznych piany szklanej w złożonych stanach obciążeń mechanicznych. Doktorant wykazał przy tym zmniejszenie efektu asymetrii właściwości wytrzymałościowych struktury spienionego szkła wobec materiału litego wskazując na wpływ efektów lokalnych. Dodatkowo Autor przeanalizował wpływ ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury piany na jej wytrzymałość w zdefiniowanych warunkach obciążenia uwzględniając przy tym istnienie obciążeń termicznych. Za cenny element należy również uznać identyfikację przez Doktoranta potencjalnego mechanizmu zniszczenia, który inicjowany jest utratą ciągłości materii. Recenzent potwierdza za Autorem dysertacji, że zaproponowane badania bez wątpienia pozwalają lepiej zrozumieć fizykę procesu niszczenia struktury spienionego szkła i dostarczają cennych wskazówek, dzięki którym będzie można w sposób optymalny projektować konstrukcje z zastosowaniem tego typu materiału.

Mgr inż. Artur Mościcki jest współautorem 3 artykułów naukowych zarejestrowanych w bazie Scopus opublikowanych w czasopiśmie naukowym (dwie prace w *Engineering Failure Analysis* (wydawca Elsevier) i jedna w *Journal of Materials Science* (wydawca Springer Nature)). Jest to publikacyjność na poziomie spełniającym wymagania ustawowe. Publikacje te były już dziesięciokrotnie cytowane (na dzień przygotowania recenzji), a indeks Hirscha Doktoranta wynosi obecnie 2.

3. Pytania merytoryczne oraz uwagi dyskusyjne

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, Recenzent chciałby otrzymać komentarze oraz odpowiedzi/wyjaśnienia na następujące kwestie:

- 1) Recenzent po zapoznaniu się z zakresem badań stwierdza, iż celowym byłoby zamieszczenie całego algorytmu badawczego, co znacznie ułatwiłoby zrozumienie i usystematyzowanie zaprojektowanego programu badań.
- 2) Autor przedstawił zestaw podstawowych kryteriów wytrzymałościowych. W literaturze znanych jest szereg innych kryteriów i modeli konstytutywnych, w tym własnych modeli włączonych do kodów komercyjnych. Jakie kryteria i analizy przeprowadził Autor, w tym badania walidacyjne, które zadecydowały o wyborze kryterium wytrzymałości Galileusza-Rankine'a i Mohra-Coulomba? Zachęcam Doktoranta do przestudiowania następującej pozycji literaturowej: Shams, Adel, Andrea Panteghini, Lorenzo Bardella,

and Maurizio Porfiri. "A Micromechanical Model to Study Failure of Polymer-glass Syntactic Foams at High Strain Rates." *Computational Materials Science* 135, (2017): 189-204, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2017.04.007>.

- 3) Do stworzenia modelu pojedynczej komórki o ścianach zamkniętych Doktorant użył dwa typy elementów skończonych, elementy bryłowe oraz powłokowe charakteryzujące się różną liczbą stopni swobody w węzłach. Jaki rodzaj opisu przyjęto by uzyskać ciągłość opisu pola przemieszczeń w miejscach ich połączenia? Czy były prowadzone analizy wrażliwości w zakresie zachowania się komórki/komórek pod kątem liczby zastosowanych elementów skończonych? Czy prowadzono analizy statystyczne badanych struktur spienionego szkła w zakresie wielkości porów i grubości ścian przechodząc następnie do ich modelowego opisu w ujęciu MES? Na ile i jakimi cechami charakteryzuje się modelowany wycinek mając na względzie jego reprezentatywność?
 - 4) Jak Autor poradził sobie z problemem lokalnych niejednorodności zarówno geometrycznych, jak też i materiałowych, dokonując opisu numerycznego struktury spienionego szkła?
 - 5) Do opisu pola ciśnienia wewnątrz struktury Autor użył inżynierskiego podejścia ze stałym polem ciśnień. Znanych jest szereg metod numerycznych, w których można odwzorowywać różne rozkłady nacisków gazu wewnątrz zamkniętej objętości podczas opisu zmiany jej deformacji z implementacją równań stanu, a co jest znacznie bliższe rzeczywistości. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie i stosowny komentarz.
 - 6) Na szeregu wykresach (np. rys. 5.15, 5.20) z badań eksperymentalnych opisujących zmianę wartość siły nacisku w funkcji przemieszczenia (skrócenia próbki) widoczny jest w pierwszym etapie efekt utraty stateczności lokalnej ściskanej struktury piany. Jak z tym zagadnieniem Doktorant poradził sobie w badaniach numerycznych? Jak w związku z tym przebiegała realizacja warunków początkowo-brzegowych w ujęciu numerycznym? Dlaczego dla tego typu badań nie przeprowadzono analiz pod kątem energochłonności tych struktur?
 - 7) Podczas modelowych analiz termicznych spienionego szkła w bardzo niejasny sposób Autor zaprezentował opis numeryczny realizacji obciążenia polem temperatury na analizowaną strukturę. Czy tego typu badania mając na względzie niejednorodność geometryczną struktury nie powinny być realizowane z wykorzystaniem metod typu CFD w pierwszej fazie i następnie w kolejnym etapie badanie symulacyjne wpływu temperatury na lokalne zachowanie tej złożonej geometrycznie struktury? Jak w związku z tym poradzono sobie z istniejącymi w strukturze porami wypełnionymi gazem?
- W opinii Recenzenta, taka dwuetapowa metoda jest jak najbardziej wskazana z uwagi na

realizację procesu nieustalanej wymiany ciepła w realizacji numerycznej w spienionym szkłe z zamkniętymi porami gazowymi.

- 8) Ja Autor dysertacji widzi proces realizacji zniszczenia w opisywanej strukturze uwzględniając takie jego etapy jak np. inicjację pęknięcia, dalszy rozwój pęknięć i powstanie uszkodzeń w celu ich numerycznego odwzorowania?

4. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska posiada przede wszystkim ważny walor poznawczy z ukierunkowaniem na potencjalną aplikacyjność. Doktorant słusznie kontestuje otrzymane wyniki wykazując, że badanie spienionego szkła jest dużym wyzwaniem od strony samej realizacji, ale także ze względu na dużą liczbę zmiennych parametrów (np. właściwości materiałowe, niedoskonałości (niejednorodności) struktury wewnętrznej, duże wahania ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury). Należy podkreślić, iż istnieje możliwość uzyskania zadowalających wyników pozwalających na optymalne wykorzystanie właściwości spienionego szkła. Autor realizując swoje badania na drodze analitycznej, numerycznej i eksperymentalnej mógł na podstawie otrzymanych wyników sformułować szereg interesujących i oryginalnych wniosków, do których można m.in. niewątpliwie zaliczyć następujące stwierdzenia, że:

- 1) sposób wprowadzenia obciążenia na badaną strukturę ma kluczowy wpływ na jej nośność,
- 2) wewnątrz spienionego szkła, podczas typowego procesu wytwarzania, powstają duże różnice ciśnienia pomiędzy poszczególnymi komórkami wewnątrz struktury,
- 3) analizy numeryczne MES pokazały, że w przypadku wyrównanego ciśnienia gazu zamkniętego wewnątrz struktury, nagłe zmiany jego wielkości spowodowane szokami cieplnymi nie powinny spowodować uszkodzenia struktury spienionego szkła,
- 4) ciśnienie gazu zamkniętego wewnątrz komórek wpływa na zachowanie się struktury spienionego szkła przy jego brzegu: nadciśnienie powoduje zmniejszenie nośności struktury na ściskanie, a podciśnienie pogarsza nośność przy rozciąganiu,
- 5) duże gradienty temperatury mogą doprowadzić do uszkodzenia struktury w wyniku zjawiska rozszerzalności termicznej prowadzącego do zniszczenia komórek wewnątrz struktury,
- 6) analiza stanów granicznych przeprowadzona na podstawie analiz MES dla spienionego szkła wykazała, że limitujące są lokalne wartości naprężenia głównego.

Pan mgr inż. Artur Mościcki dzięki zrealizowanej rozprawie wniósł szereg interesujących i wartościowych wyników badawczych, które mogą znaleźć swoje zastosowanie także w takich

obszarach, jak inżynieria materiałowa czy inżynieria produkcji. Za bardzo cenne należy uznać przedstawienie przez Doktoranta szeregu propozycji w zakresie poprawy parametrów spienionego szkła.

Doktorant wykazał się umiejętnością stworzenia i realizacji badań zarówno numerycznych, jak też eksperymentalnych w skali laboratoryjnej. Swoim zaproponowanym programem badawczym potwierdził osiągnięcie postawionego celu badawczego, a zrealizowanymi analizami numerycznymi udowodnił postawioną tezę, że *„modelowanie struktury porowatej za pomocą metody elementów skończonych, wspartych badaniami eksperymentalnymi, pozwoliło na określenie lokalizacji inicjacji zniszczenia i sformułowanie wytycznych odnośnie sposobu wprowadzania obciążeń w strukturę posiadającą wypełnienie w postaci spienionego szkła oraz umożliwiło zbadanie wpływu ciśnienia w komórkach wypełniacza na wytrzymałość struktury.”*

Zarówno osiągnięte wyniki zaprezentowane w niniejszej dysertacji oraz opublikowane trzy artykuły w czasopismach z *IF*, jak też i przeprowadzone badania analityczno-numeryczne oraz testy eksperymentalne potwierdziły, że Autor dysertacji posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Recenzent widzi duży potencjał badawczy w zakresie wykorzystania opracowanych modeli numerycznych dla potrzeb prowadzenia dalszych badań pod kątem poszukiwania parametrów wrażliwych i wpływających na nośność projektowanych struktur ze szkła spienionego. Tego typu studium daje także przyczynek do analiz optymalizacyjnych uwzględniając przy tym niedeterministyczny i lokalnie zmienny charakter cech mechanicznych materiału oraz panujących warunków początkowo-brzegowych. Może to także pozwolić na odtworzenie i zarazem przybliżenie się do problematyki braku stuprocentowej powtarzalności wszystkich parametrów na etapie realizacji procesu produkcyjnego.

5. Wniosek końcowy

Recenzent stwierdza, że przedstawiona dysertacja doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną *Ustawę* i stawia wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przez mgra inż. ARTURA MOŚCICKIEGO.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mieści się w zakresie dziedziny nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie naukowej *inżynieria mechaniczna*.

