

Recenzja rozprawy doktorskiej

Przedmiotem niniejszej recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Aleksandra Błachuta, zatytułowana „**Wpływ siły naciągu włókna na wytrzymałość struktury zbiornika kompozytowego**”. Przewód doktorski jest prowadzony przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Recenzja została napisana na podstawie zlecenia i pisma nr 04/PRR/2024 z dnia 24 kwietnia 2024.

Rozprawa doktorska skupia się na badaniu wpływu naciągu włókna przy wykonaniu wysokociśnieniowych zbiorników kompozytowych do gromadzenia wodoru. Oprócz części eksperymentalnej rozprawa zawiera symulacje komputerowe algorytmu doboru parametrów w procesie nawijania. Badania rozprawy dotyczą wdrożenia technologii wodorowych, są oparte na interdyscyplinarnych badaniach eksperymentach i teoretycznych z dziedzin technicznych i informatycznych

Struktura pracy jest następująca: w Rozdziale 1 autor wprowadza czytelnika w tematykę rozprawy, przedstawiając proces transformacji energetycznej i surowcowej z udziałem technologii wodorowych z opisem typów używanych zbiorników wysokociśnieniowych.

W Rozdziale 2 autor opisuje stan wiedzy, w tym rolę kompozytów, zwracając szczególną uwagę na kompozyty polimerowe termoplastyczne w postaci żywicy z włóknami węglowymi, szklanymi itd. Zostały opisane współczesne technologie wytwarzania wysokociśnieniowych butli kompozytowych na wodór związane z technologią nawijania. Zwrócono uwagę na powstanie naprężenia własnego w zbiornikach kompozytowych.

Rozdział 3 przedstawia tezę rozprawy i cel badań teoretycznych oraz eksperymentalnych polegających na sterowaniu siły naciągu włókien w procesie nawijania w celu otrzymania optymalnych właściwości wytrzymałościowych zarówno włókien i całego zbiornika w skali makroskopowej.

W Rozdziale 4 przedstawiono dwie procedury badawcze, nazwane w rozprawie procedurą pierwszą (I) i drugą (II). Omówiono wyniki eksperymentalnych badań rur oraz zbiorników, przedstawionych na Rysunku 4.1, w tym dobór linera do nawijania oraz charakterystyki zastosowanych linerów. Procedurę nawijania zbiornika włóknem węglowym przeprowadzono wspólnie z pracownikami Uniwersytetu Technicznego w Dreźnie. Na powierzchni zbiornika zamontowano czujniki tensometryczne zgodnie z tabelą pokazaną na Rysunku 4.8. Stanowisko badawcze opisano szczegółowo i przedstawiono na schematach zamieszczonych na Rysunkach 4.10 i 4.11. W celu oszacowania wpływu naprężenia włókien na zachowanie się zbiornika kompozytowego pod obciążeniem ciśnieniem wewnętrznym zastosowano metodę emisji akustycznej.

W krótkim Rozdziale 5 przedstawiono ogólny opis teoretyczny oraz szczegółowo opisano warunki i zakres procedur numerycznych I i II. Procedura I została omówiona w Rozdziale 6. Procedura II

opiera się na matematycznej teorii homogenizacji, która polega na asymptotycznym badaniu kompozytu jako materiału z szybko i wolno zmieniającymi się zmiennymi przestrzennymi. Wykorzystano periodyczną komórkę reprezentacyjną dla pól mikrolokalnych szybko zmiennych. Po uśrednieniu obliczonych pól naprężenia i odkształceń powstaje układ równań makroskopowych, który jest używany do badania stanu butli pod różnymi warunkami obciążeń zewnętrznych, przede wszystkim ciśnieniem wodoru. W procedurze (modelu) I przyjęto idealną komórkę bez defektów. Symulacja stanu makroskopowego i zdjęcia próbek są przedstawione na Rysunku 6.1. Do obliczeń numerycznych w elementarnej komórce wykorzystano pakiet ANSYS Material Designer, z danymi przedstawionymi w Tabeli 6.1. Makroskopowe stałe obliczone dla komórki w skali mikro zostały użyte do obliczeń w skali makro w Podrozdziałach 6.3-6.4. Próby wytrzymałościowe wraz z odpowiednimi analizami statystycznymi są przedstawione w Podrozdziałach 6.5-6.6. Otrzymane wyniki, zastosowane do badania wpływu udziału objętościowego oraz siły naciągu na wytrzymałość rozważanych butli, zostały opisane i podsumowane na końcu Rozdziału 6.

Model przedstawiony w Rozdziale 6 został rozszerzony w Rozdziale 7 na bardziej realistyczne RVE zawierające niedoskonałości struktury. Przykładowe obrazy są przedstawione na Rysunku 7.1. Koncepcja modelowania polega na następujących krokach. Pierwszy krok - to analiza obrazu i jego cyfrowego przetwarzania w skali mikro. Analiza obrazu przedstawiona w szczegółach na Rysunku 7.4. Podjęto próby zastosowania analizy statystycznej. Następny krok polega na obliczaniu efektywnych własności wybranego RVE. Dalej makroskopowe stałe są używane w symulacji pól naprężenia i odkształcenia w skali makro.

Moim zdaniem, Rozdział 7 zawiera najcenniejsze wyniki symulacji materiałów kompozytowych i zasługuje na odrębną dyskusję. Pan mgr inż. Aleksander Błachut posługuje się podejściem stosowanym w grupie numerycznych materiałoznawców, tzn. uważa, że symulacje komputerowe opierają się wyłącznie na numerycznych modelach (MES) i nie bierze pod uwagę analitycznych modeli matematycznych. Autor wykorzystuje „naiwne” podejście do koncepcji RVE-MES, przyjęte przez pewną grupę inżynierów, zgodnie z którym skomplikowane zagadnienia homogenizacji kompozytów można rozwiązać jedynie numerycznie za pomocą MES. Założenia tego podejścia są precyzyjnie opisane na str. 80. Na str. 81 autor słusznie podaje problemy związane z wykorzystywanym podejściem, takie jak duża liczba pustek i stara się rozwiązać je poprzez rozwinięcie metody RVE-MES dla kompozytów wielofazowych, w tym z pustkami. W tabeli 7.1 przedstawiono dane wykorzystane do wygenerowania RVE i dalszych obliczeń zgodnie z omawianym schematem. Autor dokładnie rozumie mankamenty tego podejścia z punktu widzenia inżynierskiego, ale zgodnie z trendem RVE-MES uważa, że można uzyskać pewne wyniki w tym kierunku, co pokazuje w Rozdziale 7.

Rozdział 8 zawiera podsumowanie i sugestie dotyczące dalszych badań. Między innymi, na str. 98 w p.2, autor proponuje rozszerzenie algorytmu generowania RVE z pustkami poprzez zwiększenie liczby pustek i liczebności próbek. Moim zdaniem, jest to standardowa, myląca ścieżka RVE-MES, gdyż niektóre przykłady numeryczne są przedstawiane jako początek obliczeń olbrzymich wzorców materiałowych. W pracach matematyków stosowanych i fizyków można znaleźć przykłady, w których pokazano, że dla kompletnego rozwiązania zagadnienia brzegowego materiałów losowych potrzebna ilość operacji komputerowych przekraczająca liczbę atomów obserwowanego wszechświata. Liczbę wtrąceń rzędu 25 oraz pustek pokazanych na Rysunku 7.10 nie da się znacząco zwiększyć. Oprócz tego w metodzie RVE-MES nie ma poprawnego pojęcia losowości. Obrazek z głowy nazywa się losowo wybranym i dalsze wnioskowanie jest na podstawie tego wybranego obrazku. Własności materiału losowego zależą od rozkładu probabilistycznego wtrąceń i pustek. Teoretycznie liczba

rozkładów probabilistycznych jest nieskończona. O jakim rozkładzie chodzi, nie jest jasne w metodzie RVE-MES. Rozkład może być symulowany za pomocą metody Monte-Carlo, potrzebującej tysiące eksperymentów komputerowych. Nie jest to osiągalne przez współczesne komputery. Dla kompletnego opisu są potrzebne sumy strukturalne (funkcje korelacyjne) wyższych rzędów, nie omawiane w rozprawie.

Autor słusznie unika korzystania z wątpliwych metod analitycznych z uniwersalnym rozkładem wtrąceń, ponieważ zależność efektywnych stałych wyłącznie od koncentracji wtrąceń ogranicza zakres ich zastosowania do małych koncentracji. W obecnym zakresie badań teoria analitycznej RVE (*aRVE*) mogłaby być bardziej przydatna niż metoda RVE-MES, co najmniej w kontekście symulacji komórek reprezentacyjnych zgodnie z odpowiednimi rozkładami probabilistycznymi wtrąceń.

Wobec tego, Pan mgr. inż. Aleksander Błachut wykorzystał metodę RVE-MES w pełnym numerycznym zakresie, na ile to możliwe i uzyskał wnioski na podstawie przeprowadzonych obliczeń. Trzeba podkreślić, że podobne zaawansowane obliczenia są rzadkie w literaturze. Mam na myśli liczbę wtrąceń rzędu 25 z dodatkową pustką o kształcie nieregularnym.

Bibliografia rozprawy liczy 191 pozycji, liczba rysunków na liście wynosi 46.

Wszystkie teoretyczne wyniki pracy są poprawne. Nie znalazłem w niej żadnych istotnych uchybień w ramach wykorzystywanego modelu RVE-MES. Wyżej podałem ogólne wątpliwości numerycznej metody i w związku z tym mam pewne krytyczne uwagi:

1. Jaki jest związek obserwowanych rozkładów włókien i defektów z symulowanymi? Pytanie dotyczy w szczególności obrazków na Rysunku 8.1 w pierwszym i trzecim wierszach.
2. Na ile można zwiększyć liczbę nieregularnie ułożonych wtrąceń w zaawansowanych symulacjach przeprowadzonych w Rozdziale 7?
3. Na ile można zwiększyć liczbę defektów? Chodzi o konkretnych ustalonych kształtach pustek.
4. Czy można na podstawie przeprowadzonych obliczeń podać zależność efektywnych stałych od geometrycznych parametrów wtrąceń i pustek oprócz ich koncentracji?

Podane powyżej uwagi krytyczne nie pomniejszają wartości pracy. Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Aleksandra Błachuta jest zgodna z aktualnym kierunkiem teoretycznych i eksperymentalnych badań zbiorników kompozytowych wykonanych metodą nawijania. Podstawowym celem pracy doktorskiej było badanie teoretyczne i eksperymentalne wpływu sposobów nawijania na wytrzymałość kompozytowych zbiorników ciśnieniowych. Praca także zawiera zaawansowane próby badania metodami matematycznego modelowania i symulacji komputerowych.

Uważam, że praca jest merytorycznie poprawna i zawiera nowe wartościowe wyniki naukowe związane z badaniami zbiorników wysokociśnieniowych wytwarzanych metodą nawijania. Rozprawa stanowi wszechstronne opracowanie problemu inżynierskiego z zakresu materiałów kompozytowych na poziomach teoretycznym i eksperymentalnym, z zastosowaniem zaawansowanych narzędzi symulacji komputerowych metodą MES. Podsumowując, uważam, że recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki ustawowe. Tym samym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Aleksandra Błachuta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Me'fiuszew