

Prof. Mariusz Kaczmarek
Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Kazimierza Wielkiego
ul. Kopernika 1, Bydgoszcz

Bydgoszcz 29 grudnia 2014

OCENA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Nowaka

p.t.

Analiza deformacji i zniszczenia struktur komórkowych w zastosowaniu do symulacji procesu infiltracji pianki korundowej ciekłym metalem

Ocenę sporządzono na zlecenie Dyrektora IPPT PAN w Warszawie,
prof. dr hab. inż. T. Burczyńskiego, Umowa nr 167/D/1900/2014 z dnia 9.09.2014.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 110 stron. Zawiera streszczenia w językach polskim i angielskim, spis treści, wykaz oznaczeń i skrótów, 7 rozdziałów, 3 dodatki, bibliografię i skorowidz. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Zdzisław Nowak.

1. Przedmiot i cel pracy, zastosowane narzędzia oraz zawartość rozprawy

Przedmiotem dysertacji jest opis struktury, właściwości strukturalnych i mechanicznych pianek korundowych oraz procesu przepływu w takich piankach lepkiej cieczy (ciekłego metalu). Kompozyty ceramiczno-metaliczne w postaci pianek o szkieletcie ceramicznym i wypełnieniu metalicznym należą do grupy względnie nowych materiałów, których specyficzne właściwości wynikają z połączenia cech ceramiki takich jak niskie zużycie podczas tarcia, odporność na temperaturę, wysoka sztywność i metali, w tym odporność na pękanie, dobre przewodzenie. Opracowanie technologii opłaczalnej i dającej wysoką jakość wyrobów tego typu materiałów nie jest jednak opanowane i pozostaje przedmiotem badań. Prezentowana rozprawa wpisuje się w kierunek badań poznawczych, które mogą wspomóc projektowanie i wytwarzanie wspomnianych kompozytów.

Celem pracy jest numeryczna analiza deformacji i zniszczenia pianek korundowych powstających w trakcie procesu infiltracji ciekłym metalem.

Główna teza pracy brzmi, że kluczową rolę w uszkodzeniu pianek infiltrowanych metalem mają lokalne (mikroskopowe) naprężenia rozciągające.

W celu realizacji celu i udowodnienia postawionej tezy Autor pracy wykorzystał podstawowe modele mechaniki ośrodków ciągłych i kilka narzędzi symulacyjnych. Szkielet w ujęciu kontynuualno-mikroskopowym opisany został uogólnionym prawem Hooke'a w zakresie sprężystym oraz równaniami określającymi tzw. powierzchnię Burzyńskiego, stwarzające prawo płynięcia plastycznego i kontynuualne prawo uszkodzenia w zakresie niesprężystym. Modelowanie przepływu ciekłego metalu zakładało proces izotermiczny, nieściśliwość, stały współczynnik lepkości i istnienie efektu napięcia powierzchniowego na kontakcie ciecz-gaz oraz możliwość różnego kąta zwilżenia na linii kontaktu ciecz-gaz-ciało stałe.

Narzędzia symulacyjne stanowiły:

- A) do utworzenia i analizy geometrii (mikrostruktury) na bazie danych z tomografii komputerowej lub rozważanych struktur periodycznych zaproponowano własne kody, środowisko ANSYS Design Modeler oraz funkcje dostępne w środowisku Matlab,
- B) do obliczeń stanu mechanicznego (w tym analizy naprężeń i odkształceń) szkieletu wykorzystano komercyjne oprogramowanie ABAQUS (z zaimplementowaną metodą elementów skończonych),
- C) do obliczeń infiltracji cieczy zastosowano oprogramowanie ANSYS/FLUENT.

Dane do tworzenia geometrii rzeczywistych pianek pochodziły ze skanów wykonanych metoda mikrotomografii komputerowej. Dane eksperymentalne do porównań makroskopowych własności pianek z wynikami symulacji uzyskano z pomiarów ściskania próbek na maszynie wytrzymałościowej oraz z rezonansowej metody drganiowej.

2. Ocena rozprawy

Rozprawa mgr inż. Marcina Nowaka dotyczy nowoczesnych materiałów kompozytowych o szkielecie ceramicznym i wypełnieniu metalicznym. Optymalne projektowanie struktury, kompozycji i technologii wytwarzania takich materiałów wymaga stosowania zaawansowanych narzędzi symulacyjnych. Przedstawiona do oceny rozprawa dobrze wpisuje się w powyższy kierunek badań i wykorzystuje aktualnie dostępne metody badań takich materiałów.

Praca zawiera jasno sformułowany cel i tezę główną oraz klarownie przedstawioną metodologię postępowania. Wyniki symulacji zostały zilustrowane na licznych wykresach, obrazach struktury, rozkładach 2D lub widokach 3D. Na uwagę zasługuje wysoka jakość rysunków i wzorów oraz dbałość o przejrzystość tekstu. W rozprawie umieszczono liczne (ok. 80 pozycji) i adekwatne referencje do literatury co dowodzi, że jej Autor ma dobre rozeznanie stanu problemu. W poszczególnych częściach pracy zamieszczono nawiązania do innych jej fragmentów, zapewniając wewnętrzną spójność rozprawy.

Autor pracy wykazał się dobrą znajomością opisu materiałów w ujęciu mechaniki ośrodków ciągłych, zarówno w odniesieniu do ciała stałego jak i cieczy oraz umiejętnością przejścia od skali mikro- do makro-kontynuualnej. Umiejętnie wyeksploatował dostępne dane eksperymentalne z mikrotomografii komputerowej i rezonansowej metody drganiowej. Skutecznie opanował posługiwanie się przydatnymi narzędziami symulacyjnymi (Matlab, ABAQUS, ANSYS). Na uwagę zasługuje także kompleksowe ujęcie problemu, w którym badania modelowo-symulacyjne wykorzystują dane eksperymentalne.

Do najważniejszych rezultatów uzyskanych w pracy można zaliczyć:

- 1) opracowanie procedur i skryptów do tworzenia modelowych struktur i analizy parametrów geometrycznych tych struktur, a także struktur rzeczywistych uzyskanych z mikrotomografii komputerowej,
- 2) opracowanie mikrokontynualnego modelu mechanicznego pianki korundowej w zakresie niesprężystym obejmującego proces rozwijania uszkodzeń,
- 3) wykonanie symulacji numerycznych procesu deformacji pianek pod obciążeniem zewnętrznym i analiza koncentracji oraz rodzaju naprężeń w materiale szkieletu,
- 4) realizacja symulacji przepływu cieczy (ciekłego metalu) przez piankę i wyznaczenie naprężeń indukowanych przepływem w szkielecie piankowym.

Pomimo uzyskania wartościowych wyników i powyżej stwierdzonych walorów pracy jej Autor nie ustrzegł się pewnych błędów lub niedomówień, które wymagają wyjaśnienia. Spośród ważniejszych należy wymienić następujące:

1. W literaturze istnieją liczne modele określające makroskopowe właściwości mechaniczne materiałów porowatych w zależności od właściwości składników oraz udziału faz, także w odniesieniu do pianek. W pracy wspomniano kilka z nich (komórki Kelvina, Gibsona-Ashby, komórki oparte na modelach krystalograficznych, modele losowe), a jako referencyjny przyjęto model Gibsona-Ashby. Brakuje uzasadnienia dlaczego wspomniany model przyjęto jako referencyjny.
2. Sformułowanie w p. 3.5, że "...Przepuszczalność dla pianek ... określana jest za pomocą dwóch równań przepływu: Darcy i Forchheimera..." nie jest ścisła bowiem wystarczy i należy zastosować jedno z tych równań, adekwatne do rozpatrywanej intensywności przepływu.
3. Na końcu punktu 4.2 stwierdza się iż "...w przypadku promieni okienek ich rozkład można wyznaczyć przy użyciu metody porozymetrii rtęciowej". Należy zwrócić uwagę, że porozymetria rtęciowa w klasycznej wersji interpretuje strukturę porów jako wiązkę niepołączonych kapilar o stałej średnicy (p. Wardlaw, N. C., McKellar, M., Mercury porosimetry and the interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models. Powder technology, 29, no. 1 (1981), pp. 127-143). Taki model powoduje, że w interpretacji wciskania rtęci w materiał o różnych wymiarach porów połączonych ze sobą przypisuje się objętość większych porów udziałowi porów mniejszych. Można się spodziewać zatem, że w rozważanych piankach porozymetria rtęciowa będzie przeszacowywać udział okienek (mniejszych porów).
4. Pojęcie komórka używane jest niejednoznacznie, raz jako pora (patrz p. 5.1) a innym razem jako element powtarzalny struktury materiału (patrz p. 3.3 str. 21. lub p. 5.3.1).
5. Ze względu na specyficzny, silnie zmienny przebieg wyników testów ściskania (p. np. rys. 5.4-5.6) nie jest oczywiste jak wyznaczać wytrzymałość materiału. W pracy nie podano jak postępowano celem wyznaczenia wytrzymałości (np. na rys. 5.9).
6. Na rys. (6.16)-(5.18) występuje jako wielkość niezależna parametr e_s / r_c^m . Nie jest jasne co ten parametr oznacza.
7. Po wzorze (5.5) występują objaśnienia wielkości, które w tym wzorze nie występują (k_c i k_t).

8. Dla opisu niesprężystych odkształceń korundu, który jest ewidentnie materiałem kruchym zastosowano prawo plastycznego płynięcia (p. 5.3.4, wzór (5.9)), które jest adekwatne dla materiałów ciągliwych. Potrzebna byłaby dyskusja lub powołanie się na odpowiednią literaturę, uzasadniające przyjęcie takiego modelu.

9. W akapicie po rys. 5.25 stwierdza się, że "Stosując model periodyczny wykonanych zostało najwięcej symulacji procesu ściskania. Głównym tego powodem był mały czas obliczeniowy w porównaniu do pozostałych dwóch modeli". Jakkolwiek argument czasu obliczeniowego jest ważny to nie powinien mieć decydującego znaczenia przy wyborze zakresu rozwijanych problemów, zwłaszcza w przypadku badań podstawowych.

10. Wyniki pokazane na rys. 5.27 wymagają komentarza w zakresie kiedy stosunek współczynnika Poissona materiału porowatego i litego ma dla różnych struktur zdecydowanie inny przebieg. Osiąga nawet wartość większą niż 2. Czy oznacza to iż współczynnik Poissona materiału porowatego osiąga wartość większą od 0.5 (wątpliwość ta powstała wobec braku danych na temat współczynnika Poissona litego korundu)?

11. Zastanawia fakt, że wyniki symulacji wytrzymałości pianki o tej samej porowatości (np. 90%) dla struktury periodycznej są niższe niż dla struktury losowej (p. tabela 5.9 i rys. 5.31). W pracy nie wyjaśnia się powyższego faktu jakkolwiek nie jest on oczywisty bowiem uporządkowana struktura komórkowa wydaje się być bardziej sztywna niż struktura losowa.

12. W punkcie 5.4 opisuje się wyniki symulacji przepływu płynu w materiale pianki celem wyznaczenia przepuszczalności pianki. Z uwagi na fakt, że opis przepływu dotyczy poziomu mikroskopowego (przepływu w przestrzeni porowej) zaś prawo Darcy, w którym występuje przepuszczalność, jest prawem makroskopowym konieczne jest zastosowanie jakiejś procedury uśredniania aby wyznaczyć średnią prędkość i gradient średniego ciśnienia. W pracy nie podano detali jak zrealizowano uśrednianie, pisze się natomiast o "pomiarze", który został wykorzystany ale jest to pojęcie mylące w tym przypadku.

13. W badaniu infiltracji pianki ciekłym metalem (Rozdział 6) problem symulacji podzielono na dwa etapy: wyznaczenie ciśnienia cieczy potrzebnego do infiltracji pianki i wyznaczenie stanu naprężenia szkieletu pianki pod wpływem przepływu. W drugim z etapów przyjęto, że problem może być przybliżony stanem wynikającym ze statycznego ściskaniu pianki. Warto jednak zwrócić uwagę na fakt, że podczas przepływu cieczy przez materiał porowaty siły oddziaływania pomiędzy cieczą i szkieletem powodują, że rozkład naprężeń makroskopowych (średnich) w szkielecie jest niejednorodny. W sytuacji obowiązywania prawa Darcy jest to rozkład liniowy - minimalne naprężenie średnie w szkielecie występuje na dopływie do próbki a maksymalne na wypływie z próbki (odwrotnie niż rozkład ciśnienia porowego). W statycznym ściskaniu próbki zaś, tzn. w przyjętym przybliżeniu, rozkład makroskopowego naprężenia w szkielecie jest jednorodny na wysokości. Warto oszacować konsekwencje przyjętego uproszczenia.

14. W nasycaniu materiałów porowatych obserwuje się tzw. efekt palcowy polegający na pojawianiu się podczas infiltracji preferencyjnych ścieżek przepływu i w rezultacie zamkniętych obszarów niewypełnionych cieczą. Autor pracy nie wspomina czy taki efekt został zaobserwowany w przeprowadzonych symulacjach.

15. Wyniki badań eksperymentalnych właściwości mechanicznych uzyskano na podstawie metody rezonansowej, dla której zwykle robi się założenie o izotropii materiału. Z kolei symulacje dotyczą głównie modeli komórkowych, które przewidują anizotropowe właściwości pianki. Można zapytać na ile zasadne jest w takiej sytuacji porównywanie uzyskanych wyników?

16. W pracy brakuje szerszej dyskusji weryfikacji stosowanych procedur obliczeniowych (np. poprzez porównanie wyników symulacji dla przypadku szczególnego z istniejącym rozwiązaniem analitycznym lub przewidywaniem innych programów) i walidacji przyjętych modeli przez porównanie przewidywań z wynikami badań eksperymentalnych.

Można także znaleźć pewne niedociągnięcia edytorskie, np. niewyjaśnione oznaczenia ρ_p , ρ_s w punkcie 3.5, lub brak odniesienia do rys. 5.6.

3. Wnioski końcowe

Tematyka opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Nowaka jest ważna z punktu widzenia projektowania materiałów kompozytowych i rozwijania technologii ich wytwarzania, a zatem jest istotna ze względów praktycznych. Praca napisana jest językiem zwięzłym, zawiera liczne i dobrej jakości ilustracje wyników. Autor wykazał się umiejętnością zastosowania podstawowych modeli matematycznych mechaniki (ciał stałych i cieczy) oraz zaawansowanych narzędzi symulacyjnych rozwiązywania zagadnień deformacji materiału porowatego i przepływu cieczy w takim materiale. Na uwagę zasługują uzyskane wyniki obejmujące modelowanie i opis struktury pianki oraz symulacje stanu naprężenia pod obciążeniem zewnętrznym i w rezultacie przepływu ciekłego metalu.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Marcina Nowaka spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytule naukowym stawianym rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

