

15 KWI 2021
Gliwice,

Recenzja pracy doktorskiej Łukasza OMENA p.t.:

Badanie dyfuzji ciepła w strukturach zmiennofazowych metodą oscylacji temperatury

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo z dnia 23 grudnia 2020 r Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, P. Prof. dr hab. inż. Jerzego Małachowskiego, poprzedzone uchwałą Rady tej dyscypliny w dniu 16 grudnia 2020 r. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Andrzej J. Panas.

1. TEMATYKA ROZPRAWY I JEJ OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA

Pan mgr inż. Łukasz Omen przedmiotem swej rozprawy doktorskiej uczynił zagadnienia związane z wyznaczaniem dyfuzyjności cieplnej w strukturach zmiennofazowych. Doktorant oprócz wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej badanej struktury, przeanalizował także kwestie dotyczące pojemności cieplnej właściwej (badanie DSC) oraz gęstości struktury. Badał również właściwości obu materiałów tworzących strukturę.

Do wyboru tej tematyki badań skłoniło Autora coraz powszechniejsze stosowanie tego typu struktur w praktyce oraz konieczność ich analizy obliczeniowej, przy jednoczesnych wątpliwościach i brakach jeśli chodzi o parametry cieplne. Biorąc pod uwagę również stopień złożoności i trudności towarzyszące pomiarom dyfuzyjności cieplnej standardowymi metodami oraz oczekiwany dzisiaj poziom wiarygodności rezultatów, oczywistym stało się próba podjęta przez Doktoranta opracowania ulepszonych metod pomiarowych wyznaczanie dyfuzyjności cieplnej w strukturach zmiennofazowych. Jednocześnie zrealizowane w pracy pomiary zostały wsparte nowoczesnymi metodami obliczeniowymi (komputerowymi). Podsumowując stwierdzam, że recenzowana praca bezspornie podejmuje tematykę ważną technicznie, stanowi istotne wyzwanie badawcze i niewątpliwie może stanowić przedmiot pracy doktorskiej. Temat rozprawy oddaje jej zasadnicze treści.

Rozprawa została formalnie podzielona przez Autora na cztery rozdziały, które są poprzedzone *Spisem ważniejszych oznaczeń* i *Wprowadzeniem*. Pracę kończy *Podsumowanie* oraz spis *Literatury*. Rozdział *Wprowadzenie* zawiera oczywiście różnego rodzaju informacje wstępne.

W rozdziale pierwszym Doktorant przytacza, za literaturą przedmiotu, podstawowe zależności wiążące dyfuzyjność cieplną z rozkładem temperatury w wybranych sytuacjach. Omawia także równanie różniczkowe przepływu ciepła (w tym równanie Fouriera) wraz z odpowiednim warunkiem początkowym i warunkami brzegowymi. Rozważa również różne rozwiązywania tych równań stanowiące istotę metod pomiarowych i dokonuje obszernego przeglądu literatury przedmiotu. W ten sposób Doktorant udowodnił, że ma aktualną wiedzę w dziedzinie pomiarów dyfuzyjności cieplnej i zna związaną z tym literaturę.

W tym rozdziale sformułowana została też teza rozprawy i jej cel. Osobiście uważam, że teza pracy podana na str. 48 jest trochę sztuczna i chyba niepotrzebna. Cel pracy jest bardzo klarowny i jego realizacja jest automatycznym udowodnieniem tezy, która przecież wcale nie musi być wysłowiona.

Rozdział drugi p.t. *Wykorzystanie metody wymuszeń oscylacyjnych do pomiaru dyfuzyjności cieplnej* jest dla mnie pewną zagadką. Nie bardzo wiem jaki jest jego cel. Jeśli jest poświęcony testowaniu metody pomiarowej i stanowiska, to nie doczytałem się jaki jest wynik tych testów. W rozdziale nie tylko nie znalazłem wartości dyfuzyjności cieplnej, ale nawet wartości współczynników użytych do aproksymacyjnych (2.26) i nie bardzo wiadomo czy rezultaty tych testów są zadowalające, czy nie.

Rozdział trzeci prezentuje stosowaną ostatecznie metodykę pomiarów, procedury obróbki otrzymanych wyników pomiarów i ostateczne rezultaty. Z tego punktu widzenia jest to najistotniejsza część rozprawy. Pragnę też docenić to, że Doktorant wyznaczył nie tylko dyfuzyjność cieplną wytypowanej do badań struktury zmiennofazowej, ale analizował również oba tworzącą ją materiały – papier i stearyna. Rozważył także główne czynniki wpływające na niepewność wykonanych pomiarów.

Analizując te elementy rozprawy stwierdzam, że wybór struktur i ich przygotowanie do badań były właściwe. Nie wnoszę też istotniejszych zastrzeżeń merytorycznych do samych badań. O kilku zastrzeżeniach mniejszej wagi, wspominam w dalszych częściach recenzji.

Rozdział czwarty zatytułowany *Modelowanie numeryczne procesu badań dyfuzyjności struktur zmiennofazowych* ma charakter uzupełnień badania głównego, opisanego w rozdziale trzecim. Budując stosowne modele matematyczne i używając komercyjnego pakietu Comsol Multiphysics, Doktorant stara się określić niepewność wyników, otrzymanych w rozdziale trzecim, spowodowaną wybranymi czynnikami, takimi jak błąd lokalizacji termoelementu, zjawiskiem histerezy, itd.

W czasie lektury tego rozdziału natknąłem się na kilka miejsc, w których zrodziły się u mnie wątpliwości. Piszę o nich w dalszych częściach recenzji, natomiast oceniając ogólnie rozdział czwarty muszę zauważyć, że wbrew tytułowi rozdziału, Doktorant nie *modelował numerycznie procesu badań dyfuzyjności...* a co najwyżej *modelował numerycznie proces dyfuzji...*

Ostatni rozdział merytoryczny – nienumerowany, a zatytułowany *Posumowania* – jest raczej lapidarny, w szczególności jeśli go porównać do rozdziału pierwszego. Uzasadnienie podjęcia badań zajęło Doktorantowi ok. 45 stron, natomiast wnioski z tych badań i ewentualne plany dalszych dociekań niecałą stroną. Główny wniosek jaki Doktorant zawarł w *Podsumowaniu* to stwierdzenie, że udowodnił tezę, trochę oczywistą od początku.

2. STOSOWANY APARAT BADAWCZY

Jak już wspomniałem w poprzednim punkcie recenzji, istotą pracy doktorskiej Pana Omena są badania związane z wyznaczaniem dyfuzyjności cieplnej w strukturach zmiennofazowych. Badania te Doktorant prowadził dwutorowo, t.j. drogą pomiarów na stanowisku laboratoryjnym oraz budując modele matematyczne i prowadząc odpowiadające im symulacje komputerowe. Doceńm kompleksowość badań podjętych przez Doktoranta, jednocześnie ich metodykę uznaję generalnie za właściwą.

Nie mam też zastrzeżeń jeśli chodzi o wybór struktur i ich przygotowanie do badań. Budując stanowisko pomiarowe Doktorant użył właściwej i nowoczesnej aparatury pomiarowej. Za prawidłową uważam też obróbkę matematyczną rezultatów pomiarów.

Za odpowiedni uważam także wybór pakietu Comsol Multiphysics jako narzędzia do przeprowadzenia analiz numerycznych. Software ten pozwala na uwzględnienie różnych, ważnych aspektów analizowanych procesów (dwu- i trójwymiarowe pole temperatury, przewodzenie ciepła ze zmianą fazy, histereza, itd.). Natomiast, o ile za właściwe uważam samo narzędzie obliczeniowe, o tyle opis jego użycia podany w rozdziale czwartym rodzi u mnie parę pytań, które sformułowałem w punkcie 4 recenzji.

3. WALORY NAUKOWE PRACY

W moim głębokim przekonaniu, praca doktorska Pana mgr inż. Łukasza Omena wnosi wartościowy, poznawczy wkład do analiz procesów przepływu ciepła w strukturach zmiennofazowych. Do najwartościowszych elementów naukowych rozprawy zaliczam:

1. Podjęcie badań nad tym ważnym, trudnym i nie w pełni rozpoznanym zagadnieniem przepływu ciepła w strukturach zmiennofazowych.
2. Opracowanie metodyki pomiarów dyfuzyjności cieplnej w strukturach zmiennofazowych zmodyfikowaną metodą wymuszeń oscylacyjnych.
3. Zbudowanie stanowiska pomiarowego i przeprowadzenie pomiarów dyfuzyjności cieplnej struktury papier-stearyna w zakresie zmienności temperatury obejmującym zjawiska topnienia/krzepnięcia stearyny.
4. Prowadzenie badań nad histerezą analizowanych procesów.

4. UWAGI O CHARAKTERZE KRYTYCZNYM I POLEMICZNYM

Przy wszystkich swoich zaletach, dysertacja Pana mgra inż. Łukasza Omena skłania także do uwag o charakterze krytycznym, czy polemicznym. Poniżej zestawiam ważniejsze zastrzeżenia oraz wątpliwości merytoryczne (różnej rangi), jakie nasunęły mi się podczas lektury pracy:

1. Postać równania (1.3) na str. 14 nie spełnia kryteriów poprawnych działań matematycznych. Gradient temperatury ∇T jest wektorem i aby działanie po prawej stronie równania (1.3) było możliwe, gradient musi być mnożony przez cały tensor λ , a nie przez jedną składową λ_{ij} tego tensora. Ostateczny rezultat po lewej stronie równania również jest

- wektorem (ma trzy składowe) i powinno to być zaznaczone albo tłustą czcionką, albo strzałką na symbole.
2. Stwierdzenie na str. 14, że w przypadku problemu przewodzenia ciepła, opisanego równaniem Laplace'a, wyznaczenie rozkładu temperatury w rozpatrywanym ośrodku jest możliwe bez konieczności jawnego wprowadzania do modelu matematycznego jakichkolwiek współczynników termofizycznych, nie jest prawdziwe. Te właściwości mogą się przecież pojawić w warunkach brzegowych (w warunku konwekcyjnym).
 3. Na str. 20 Doktorat ponownie, odnosząc się do całego tensora przewodności λ we wzorze (1.19), używa tylko jednej składowej λ_{ij} .
 4. Wzór na λ_{eff} w pierwszym wierszu Tabeli 1.1. jest błędny.
 5. Definicja „fazy” na str. 28 jest bardzo nieprecyzyjna. Przecież powietrze atmosferyczne jest jedną z faz i wcale nie ma „jednakowych właściwości w każdym punkcie”.
 6. Definicja przemiany fazowej pierwszego rodzaju jest błędna. Objętość właściwa v w tej przemianie jest akurat ciągła, natomiast nieciągłe są funkcje termodynamiczne, takie jak entalpia właściwa h , potencjał właściwy Gibbsa g , itp.
 7. Równanie (2.1) na str. 51 nie jest równaniem Fouriera. To jest równanie przewodzenia w pręcie, analogiczne do równania przewodzenia w żebrze.
 8. Doktorant użył w swych pomiarach z wymuszeniem dwustronnym „dwóch identycznych próbek”. W jaki sposób sprawdzano, poza wymiarami geometrycznymi, że próbki są identyczne?
 9. Doktorant niezbyt precyzyjnie opisał w jaki sposób zapewniono jednokierunkowość przepływu ciepła. W jaki sposób i czym izolowano stanowisko pomiarowe?
 10. Czy Doktorant zaobserwował wpływ liczby cykli grzania/chłodzenia na przebieg i parametry zjawiska histerezy?
 11. Pole stężenia będące rozwiązaniem równanie (4.2) zależy przede wszystkim od współczynnika dyfuzji D . Z informacji na str. 103 wynika, że Doktorant przyjął $D' = 0$, tzn. założył brak dyfuzji. Nie bardzo więc rozumiem w jaki sposób określił rozkład stężenia na potrzeby definicji źródeł (4.3) oraz (4.5). W jaki sposób powstał wykres 4.23?
 12. Użycie zależności kryterialnych na liczbę Nusselta Nu w symulacjach w rozdziale czwartym może wprowadzać błąd w wartościach współczynnika wnikania nawet rzędu 30%. Jak to wpłynie na rezultaty pomiarów?
 13. Czym kierowano się przyjmując wartość oporu styku w analizie na str. 106?

5. UKŁAD PRACY, JEZYK I KWESTIE EDYTORSKIE

Szata graficzna rozprawy i układ pracy są poprawne, choć proporcje objętości poszczególnych części mogłyby być bardziej zrównoważone. Odnosi się to przede wszystkim do *Rozdziału pierwszego* i *Podsumowania*. Język oraz sformułowania techniczne użyte w pracy są zasadniczo prawidłowe i tylko w paru miejscach wymagałyby niewielkich korekt. Poniższa lista zawiera ważniejsze drobne uchybienia edytorskie, dostrzeżonych przeze mnie podczas lektury pracy. Uwagi te mają absolutnie drugorzędne znaczenie z punktu widzenia rozprawy doktorskiej, ale mogą być pomocne w czasie przygotowywania ewentualnych publikacji naukowych:

- Pewnego rodzaju standardem w tekstach technicznych jest objaśnianie znaczenia zmiennych zaraz pod równaniem, jak zmienne pojawiają się pierwszy raz. Doktorant nie jest pod tym względem konsekwentny i w bardzo wielu przypadkach brak jest takich objaśnień. Bywa także, że symbolu nie ma również w *Spisie ważniejszych oznaczeń*. Utrudnia to znacząco lekturę pracy.

- Stwierdzenie na str. 13, że równanie Fouriera-Kirchhoffa (1.1) jest „równaniem wiążącym wymienione wcześniej właściwości cieplnofizyczne...” jest stwierdzeniem raczej niezgrabnym. Rola tego równania wcale nie polega na powiązaniu właściwości cieplnofizycznych c_p , λ i ρ ze sobą, a jedynie na powiązaniu bilansu energii z prawem Fouriera, co po rozwiązaniu równania daje informację o polu temperatury. Rozwiązanie równania wymaga jednak znajomości wszystkich trzech właściwości, które nie są niczym powiązane.
- Używane przez Autora określenie „wielkość infinitezymalna” jest „kalką” z języka Angielskiego i raczej powinna być zastąpiona „rodzimym” określeniem „wielkość różniczkowa”.
- Niektóre pozycje spisu Literatury są źle sformatowane.

6. WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując moją ocenę rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Omena pragnę stwierdzić, że recenzowana praca zawiera kilka nowych, wartościowych rezultatów i wnosi poznawczy wkład do analiz procesów cieplnych zachodzących w strukturach zmiennofazowych. W szczególności, wykorzystując wymuszenie oscylacyjne, Autor zaproponował odpowiednią metodykę badań i dokonał pomiaru dyfuzyjności cieplnej układu papier-stearyna. Działania te są istotne z punktu widzenia projektowania i eksploatacji urządzeń i procesów cieplnych. Autor udowodnił, że posiada odpowiednie umiejętności pozwalające na budowanie stanowisk pomiarowych, jak i prowadzenia samych pomiarów i obróbki rezultatów. Doktorant zademonstrował też zadowalającą wiedzę i umiejętności w zakresie prowadzenia symulacji komputerowych z wykorzystaniem komercyjnych pakietów inżynierskich.

Układ logiczny rozprawy oraz gros argumentacji są poprawne, natomiast strona redakcyjna pracy wymaga korekt w kilku miejscach. Moje uwagi o charakterze krytycznym i polemicznym, choć wymagają od Doktorant odniesienia się do nich w czasie publicznej obrony, to jednak nie podważają głównego celu ani rezultatów pracy. Autor wykazał się wystarczającymi umiejętnościami samodzielnego formułowania problemów naukowych i ich rozwiązywania. Uważam więc, że przedstawiona przez Pana mgr inż. Łukasza Omena praca doktorska pt. **Badanie dyfuzji ciepła w strukturach zmiennofazowych metodą oscylacji temperatury**, spełnia warunki stawiane w Art. 13 ustawy z dn. 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2003 r. nr 65 2 poz. 595, Dz. U. z 2005 r. nr 164, poz. 1365, Dz. U. z 2011 nr 84, poz. 455) rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do publicznej obrony. Doktorant może ubiegać się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie **Inżynieria mechaniczna**.

