

Prof. dr hab. inż. Bogdan SAPIŃSKI
Akademia Górniczo-Hutnicza,
Katedra Automatyzacji Procesów
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Kraków. 10.07.2016.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Agaty CZERNUSZEWICZ**

pt.

**”Właściwości magneto-mechano-kaloryczne wybranych materiałów
(Gd, NiMnIn, LaFeCoSi) Wytwarzanie, badanie, zastosowanie,,**

promotor: prof. dr hab. inż. **Jerzy KALETA**

opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Wrocławskiej (PWr) z dnia 13.06.2016.

1. Wstęp

Mgr A. CZERNUSZEWICZ jest współautorką 19 prac, które zostały opublikowane w czasopismach naukowych m. in.: International Journal of Refrigeration, Transactions of FAMENA i Physica Status Solidi oraz recenzowanych materiałach konferencyjnych. Prezentowała wyniki swoich badań na międzynarodowych konferencjach naukowych m. in.: International Conference on Magnetic Refrigeration (THERMAG), Donostia International Conference on Nanoscaled Magnetism and Applications (DICNMA) oraz ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials. Te prace są ściśle związane z problematyką rozprawy.

Była wykonawcą w 2 projektach: „Energy efficiency, optimised resources use and process innovation of home appliances and their domestic integration” („Green Kitchen”), EU FP7 Marie Curie Action oraz „Wykorzystanie nanotechnologii w nowoczesnych materiałach” („NanoMat”).

W latach 2014-2015 realizowała pracę własną finansowaną ze środków projektu Grant Plus, przyznanego przez Urząd Marszałkowski Województwa Dolnośląskiego.

Mgr A. CZERNUSZEWICZ odbyła studia doktoranckie na Wydziale Mechanicznym PWr. W okresie tych studiów prowadziła zajęcia dydaktyczne z przedmiotów Mechanika oraz Technologie Informacyjne. Uczestniczyła aktywnie w pracach i seminariach Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej PWr. Odbyła 2 staże zagraniczne, jeden we Włoszech, w firmie Whirlpool (związany z projektem „Green Kitchen”), drugi w Szwajcarii, na University of Applied Sciences Western Switzerland. W ramach staży przeprowadziła badania, których wybrane wyniki zostały przedstawione w rozprawie.

Praca doktorska mgr A. CZERNUSZEWICZ była częściowo finansowana ze środków statutowych Katedry Mechaniki i Inżynierii Materiałowej PWr.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa jest poświęcona badaniom zjawisk kalorycznych, które są związane z efektami występującymi na skrzyżowaniu trzech pól fizycznych, z jednej strony pola magnetycznego i mechanicznego, z drugiej strony pola termicznego. Przyjęto, że celem rozprawy jest „zbadanie wpływu pola magnetycznego i mechanicznego na efekty termiczne w wybranej grupie materiałów magnetycznych oraz analiza potencjału aplikacyjnego materiałów z tej grupy”.

Rozprawa liczy 190 stron, składa się z 10 rozdziałów, wykazu ważniejszych oznaczeń, wykazu literatury obejmującego 141 pozycji, streszczenia, wykazu rysunków i tabel (w języku angielskim) oraz podziękowań.

Rozprawę podzielono na 3 części. Pierwszą część (rozdziały 1-5) poświęcono analizie aktualnego stanu wiedzy, podstawom fizycznym zjawisk termodynamicznych oraz przeglądowi materiałów kalorycznych i prototypowych urządzeń wykorzystujących te materiały. Rozdziały te mają charakter opisowo oraz przeglądowy. Druga część (rozdziały 6-8) ma charakter raportu z szeroko zakrojonych badań własnych. Przedstawiono wyniki badań nad efektem magnetokalorycznym, magneto-mechano-kalorycznym i wielowarstwowymi łożami magnetycznymi. Część trzecia (rozdziały 9 i 10), to podsumowanie, wnioski wynikające z przeprowadzonych prac i nakreślenie kierunków przyszłych badań. Wymienione części rozprawy poprzedzono wprowadzeniem, w którym uzasadniono potrzebę badań nad nowymi technologiami chłodniczymi, scharakteryzowano efekt kaloryczny, sformułowano tezę i cel pracy oraz przedstawiono krótko treść pracy.

3. Analiza krytyczna

3.1. Uwagi ogólne

Temat rozprawy jest aktualny pod względem naukowym i aplikacyjnym oraz jest uzasadniony względami poznawczymi. Postawione zadanie naukowo-badawcze zostało rozwiązane poprawnie, a zastosowane metody badawcze są właściwe.

Układ pracy nie budzi zastrzeżeń. Użyty język na ogół zrozumiały, aczkolwiek w tekście występują błędy pojęciowe, stylistyczne i redakcyjne. Niektóre z nich zamieszczono w podpunkcie 3.2 recenzji.

Biorąc pod uwagę zakres badań, teza pracy mówiąca wyłącznie o oddziaływaniu pola mechanicznego na materiał magnetokaloryczny, którego skutkiem są efekty termiczne, wydaje się być zawężona. Prawdopodobnie takie sformułowanie tezy wynikało z tego, iż za główny obiekt badań przyjęto stop $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$, którego właściwości termiczne będą modyfikowane przez oddziaływania pola magnetycznego i mechanicznego.

Celem rozprawy było określenie potencjału aplikacyjnego wybranej grupy materiałów na drodze badań wpływu pola magnetycznego i mechanicznego na zmiany temperatury. „Zbadanie”, o którym pisze Autorka na str. 3 jest raczej drogą do tego celu.

Wykonanie zaplanowanych zadań badawczych (str. 16) stanowiło gwarancję realizacji rozprawy. Badania przeprowadzono w 3 etapach.

Etap 1.

Wybór pierwiastka ziem rzadkich – gadolinu jako referencyjnego czynnika ziębniczego (użytego po raz pierwszy 40 lat temu), który posłużył do badań efektu magnetokalorycznego oraz zastosowania w demonstratorze systemu cieplnego jest uzasadniony. Wykazano to w tabeli 5.1, w której porównano opracowane przez różne ośrodki badawcze wybrane prototypy lodówek magnetycznych w aspekcie zastosowanego materiału magnetokalorycznego, źródła pola magnetycznego (magnesy trwałe) gwarantującego indukcję od 1 do 2 T, uzyskiwanych różnic temperatury (do 50 K) oraz mocy chłodniczej przekraczającej 3000 W. Poprawnie przeprowadzono identyfikację właściwości tego materiału oraz eksperymenty, których celem było określenie możliwości chłodniczych układu. Zebrane na tym etapie doświadczenia wykorzystano w etapie 2, którego końcowym efektem było zbudowanie demonstratora działającego w oparciu o efekt magneto-mechano-kaloryczny.

Etap 2.

Podobnie należy ocenić wybór stopu $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34}\text{In}_{16}$ jako czynnika ziębniczego do badań efektu magneto-mechano-kalorycznego, a także przeprowadzenie badań, najpierw przy użyciu

dostępnej aparatury, a następnie na specjalnie zbudowanym stanowisku, na którym ten materiał poddawano oddziaływaniu pola magnetycznego o indukcji (0, 1) T oraz pola mechanicznego 1-osioowego i 3-osioowego. Projekt systemu cieplnego wykorzystującego efekt magneto-mechano-kaloryczny należy uznać za nowatorski.

Etap 3.

Trafny jest także wybór do badań, nazwanych badaniami dodatkowymi, stopów z rodziny LaFeCoSi oraz Gd jako czynnika ziębniczego, które to materiały wykorzystano w wielowarstwowych łożach magnetycznych, poddawanych oddziaływaniu wyłącznie pola magnetycznego w celu oceny możliwości ich zastosowania w systemach cieplnych.

Rozdziały 3-5 mają charakter opisowo oraz przeglądowy i w wystarczającym zakresie wprowadzają w problematykę rozprawy.

Uważam, że najbardziej wartościowymi rozdziałami rozprawy są rozdziały 6, 7 i 8. Na specjalną uwagę zasługują opisane w tych rozdziałach projekty systemów cieplnych oraz wyniki eksperymentów przeprowadzonych na specjalnie zbudowanych stanowiskach.

Nie jest jasno określony udział Autorki w budowie demonstratorów magnetycznych systemu cieplnego wykorzystującego zjawisko magnetokaloryczne oraz w budowie stanowiska do pomiarów magneto-mechano-kalorycznych właściwości materiałów i w tzw. badaniach dodatkowych dotyczących pomiarów przeprowadzonych przy użyciu stopów LaFeCoSi oraz Gd w wielowarstwowych łożach magnetycznych. Biorąc pod uwagę podziękowania, które znajdują się w zakończeniu rozprawy, opisywanym pracom, oprócz oczywistej pomocy ze strony Promotora i Promotora Pomocniczego, towarzyszyła pomoc w zakresie pomiarów magnetycznych, przygotowaniu próbek, analiz numerycznych, budowie aparatury badawczej także i innych pracowników.

Po zapoznaniu się z rozprawą oczekuję od Autorki rozprawy odniesienia się do następujących kwestii.

- Porównanie częstotliwości odbioru i oddawania ciepła badanych materiałów.
- Wyjaśnienie mechanizmu powstawania naprężeń ścinających wywołanych efektem termosprężystym.
- Ile energii należy dostarczyć w każdym z badanych układów, aby uzyskać jednostkowy efekt chłodzenia?
- Czym kierowano się przy wyborze miejsc mocowania termopar w demonstratorze (rys. 6. 41)?
- Jaką rolę odgrywał komputer PC, a jaką mikrokontroler MI 3.8.9 Wobit w układzie

sterowania (str. 103, podpunkt 6.6.4.3)?

- Parametry (specyfikacja techniczna) elementów tworzących system/układ pomiarowy/sterowania w demonstratorach generacji I-III (rozdział 6) oraz w lodówce wykorzystującej efekt magnetoelastokaloryczny (str. 155).
- Uzasadnienie 30% różnicy w zmianach temperatury stopu NiMnIn przy oddziaływaniu polem mechanicznym 1-osiowym i 3-osiowym uwzględniając zarówno zakres jego zmian jak i zmian indukcji pola magnetycznego.
- W jaki sposób kontrolowano równoległość kierunku przesuwu macierzy Halbacha generującej pole magnetyczne z kierunkiem działania siły zewnętrznej wytwarzanej przez maszynę wytrzymałościową? Jaki wpływ na wyniki badań może mieć odstępstwo od tej równoległości?
- Problem zsynchronizowania zjawiska magnetokalorycznego i mechanokalorycznego oraz jego wpływ na możliwość wzmocnienia reakcji materiału.
- Czy zmiana temperatury materiałów wynikająca z oddziaływania osobno pola mechanicznego i magnetycznego zależy od kolejności ich oddziaływania?
- Rozszerzenie komentarza porównującego wyniki otrzymane dla łoża wypełnionego w całości stopami z rodziny LaFeCoSi, z łożem wypełnionym w całości Gd, w szczególności w aspekcie „zbyt dużego rozstępu temperatur”.

3.2. Uwagi szczegółowe

W tekście rozprawy występują błędy redakcyjne i stylistyczne oraz błędy w opisach osi i legendach na rysunkach i podpisach pod rysunkami. Poniżej przedstawiam niektóre z zauważonych błędów.

- używane sformułowania „pole/pole magnetyczne o wartości ... T” jest błędne - dotyczy to całej pracy,
- str. 22; brak powołania na rys. 3.1,
- str. 38; błędne jednostki w podpisie nad tabelą 4.1, podobnie pod rys. 4.5. $\Delta H=5$ T?
- str. 41 błędny zapis i błędne jednostki w podpisie nad tabelą 4.2, $\Delta H=2,5$ T?
- str. 68; strzałki na rys. 6.1. powinny odnosić do biegunów N, S,
- str. 71; błędny opis poziomej rys. 6.6, podobnie pod rys. 6.9.
- str. 77; treść podpunktu 6.4.2 nie odpowiada jego tytułowi,
- str. 86; tytuł podpunktu 6.6.1 powinien brzmieć „Budowa, a nie Konstrukcja demonstratorów technologii”.

- str. 94; zdanie pod rys. 6.35 „Komputer (4)...” jest niezrozumiałe.
- str. 103; treść podpunktu 6.6.4.3 nie odpowiada jego tytułowi.
- str. 155; zdanie „Mikroprocesor jest układem wykonawczym” jest błędne,

4. Osiągnięcia rozprawy

Uważam, że najważniejsze i najbardziej oryginalne osiągnięcia rozprawy stanowią:

- scharakteryzowanie, przetworzenie (do postaci kul) i przeprowadzenie badań strukturalnych, magnetycznych i kalorymetrycznych Gd,
- zbudowanie trzech generacji prototypowego magnetycznego systemu cieplnego wykorzystującego efekt kalorymetryczny, których zbadanie stworzyło podstawy do opracowania urządzenia działającego w oparciu o efekt magneto-mechano-kaloryczny,
- wytworzenie i scharakteryzowanie stopu $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ (wyznaczenie rzeczywistego składu chemicznego, określenie stopu, wyznaczenie temperatury przejścia, maksymalnych naprężeń powodujących zniszczenie, modułu Younga, współczynnika Poissona, zbadanie magnetyzacji, pomiar twardości, pomiary efektu magnetokalorycznego),
- zbudowanie stanowiska do badań efektu magneto-mechano-kalorycznego przy cyklicznym i stałym oddziaływaniu pola magnetycznego i/lub mechanicznego,
- przeprowadzenie szczegółowych bezpośrednich pomiarów krzyżowych efektu magneto-mechano-kalorycznego,
- opracowanie projektu systemu cieplnego wykorzystującego efekt magneto-mechano-kaloryczny, w którym na czynnik zewnętrzny oddziałuje pole magnetyczne i jednoosiowe pole mechaniczne,
- wykonanie badań dwóch łoż wielowarstwowych wypełnionych odpowiednio 15 i 9 stopami LaFeCoSi poddawanych działaniu pola magnetycznego.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr A. CZERNUSZEWICZ jest poświęcona badaniom efektów termicznych indukowanych polem magnetycznym i mechanicznym w wybranych materiałach. Praca reprezentuje dyscyplinę **mechanika**.

Autorka wykazała, że jest możliwa modyfikacja właściwości termicznych stopu $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ polem magnetycznym i mechanicznym oraz, że uzyskiwany dla tego materiału efekt magneto-mechano-kaloryczny może być wykorzystany do budowy magnetycznej maszyny cieplnej. Podczas realizacji pracy Autorka poznała nowoczesne metody badawcze oraz nabyła umiejętności prowadzenia eksperymentów na zbudowanych stanowiskach (demonstratorach) i obsługi niezbędnej do tego celu aparatury. Szeroki zakres badań zaprezentowany w rozprawie, przekraczający możliwości wykonania wszystkich prac samodzielnie, pokazał, że Autorka potrafi współpracować w ramach zespołu badawczego.

Nowatorski charakter pracy, przeprowadzone badania, wnikliwe analizy oraz sposób interpretacji wyników zasługują na pozytywną ocenę, a przedstawione uwagi krytyczne mają znaczenie drugorzędne.

W związku z powyższym, uważam że rozprawa **mgr inż. Agaty CZERNUSZEWICZ**, pt. **Właściwości magneto-mechano-kaloryczne wybranych materiałów (Gd, NiMnIn, LaFeCoSi) Wytwarzanie, badanie, zastosowanie**, spełnia wymogi stawiane rozprawom doktorskim określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym z późniejszymi zmianami i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.