

Gliwice, 08.09.2026 r.

prof. dr hab. Aleksandra Kolano-Burian
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Metali Nieżelaznych
44-100 Gliwice, ul. Sowińskiego 5

RECENZJA

pracy doktorskiej

pt.: „Analiza synergii efektów mechano-magnetokalorycznych w stopach Ni-Mn-In oraz opracowanie koncepcji ich zastosowania w układach chłodniczych”

Autor: mgr inż. Kacper Surma

1. Podstawa opracowanej recenzji

Podstawę opracowania recenzji stanowi uchwała nr 472/23/RDND07/2024-2028 Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Wrocławskiej z dnia 14 lipca 2026, przekazana pismem nr 41/07/D07/2026 przez Przewodniczącą Rady Dyscypliny Naukowej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego. Zgodnie z podjętą uchwałą zostałam wyznaczona do pełnienia funkcji recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora panu mgr. inż. Kacprowi Surmie.

Recenzję opracowano zgodnie z wymaganiami art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) oraz Regulaminu nadawania stopni naukowych na Politechnice Wrocławskiej.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Kacpra Surmy, przygotowana na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej, w Katedrze Mechaniki, Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Daniel Lewandowski, a promotorem pomocniczym dr inż. Rafał Mech. Praca dotyczy badania efektów magneto-, elasto- oraz multikalorycznych w stopach Heuslera z układu Ni-Mn-In oraz możliwości wykorzystania tych zjawisk w urządzeniach chłodniczych.

Rozprawa liczy 147 stron. Otwierają ją streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykaz skrótów, pojęć i oznaczeń. Tekst zasadniczy podzielono na część I - teoretyczną (rozdziały 1-3) oraz część II - badania własne (rozdziały 4-10). Całość zamykają bibliografia obejmująca 174 pozycje, spis wykresów oraz spis tabel.

Rozdział 1 (s. 9-10) wprowadza w problematykę pracy. Autor przedstawia ograniczenia klasycznych układów sprężarkowych, omawiając kolejno wady poszczególnych grup czynników chłodniczych, od węglowodorów, przez HCFC i HFC, po HFO, amoniak i dwutlenek węgla, i na tym tle uzasadnia zainteresowanie chłodnictwem opartym na ciele stałym.

Rozdział 2 (s. 11-46) stanowi analizę stanu wiedzy. Podrozdział 2.1 poświęcono termodynamicznemu opisowi efektów kalorycznych: wprowadzono formalizm sił i przemieszczeń uogólnionych, omówiono przemiany pierwszego i drugiego rodzaju, wyprowadzono zależności na izotermiczną zmianę entropii i adiabatyczną zmianę temperatury, a dla przemian pierwszego rodzaju - opis oparty na równaniu Clausiusa-Clapeyrona. Podrozdział 2.2 dotyczy obiegów termodynamicznych stosowanych do opisu układów kalorycznych (Carnota, Braytona z regeneracją, Ericssona, Stirlinga oraz AMR), podrozdział 2.3 - cykli multikalorycznych, w tym cyklu wykorzystującego histerezę materiału, a podrozdział 2.4 - materiałów kalorycznych: stopów Fe-Rh oraz stopów Heuslera.

Rozdział 3 (s. 47-48) zawiera cel i tezę pracy wraz z wykazem pięciu zadań przyjętych do realizacji. Teza pracy została jasno sformułowana i brzmi ona: Oddziaływanie połączonych mechanicznych i magnetycznych pól w stopach z rodziny Ni-Mn-In umożliwi uzyskanie efektów multikalorycznych, które będą konkurencyjne w stosunku do efektów monokalorycznych, co pozwoli na opracowanie nowych koncepcji pracy multikalorycznych maszyn cieplnych. Natomiast rozdział ten nie zawiera zdania zaczynającego się od „*Celem pracy jest...*” i osoba czytająca pracę może sobie sama postawić ten cel na podstawie tezy i listy badań przyjętych do wykonania.

Część II otwiera wprowadzenie (s. 50-51), w którym przedstawiono plan prac badawczych w postaci schematu blokowego.

Rozdział 4 (s. 52-65) przedstawia autorskie stanowisko do topienia indukcyjnego, zbudowane od podstaw ze względu na brak komercyjnej dostępności stopów Ni-Mn-In o pożądanych właściwościach. Opisano jego część technologiczną: układ tygla z atmosferą ochronną i bezkontaktowy pomiar temperatury wsadu oraz część elektroniczną w postaci generatora wysokiej częstotliwości. Uzyskane rozwiązanie pozwala przetapiać do około 200 g metalu w temperaturze do 1600°C, przy kontrolowanym ciśnieniu atmosfery.

Rozdział 5 (s. 66-76) dotyczy wytwarzania masywnych próbek stopów z rodziny Ni-Mn-In. Autor uzasadnia dobór pięciu składów z rodziny $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50-x}\text{In}_x$, a następnie omawia przygotowanie składników ze szczególnym naciskiem na oczyszczanie i odgazowanie manganu, to właśnie zanieczyszczenia w tym pierwiastku odpowiadały za porowatość wcześniejszych wytopów. Dalej przedstawiono dwie metody formowania stopu: krzepnięcie bezpośrednio w tyglu oraz przetop strefowy w ampule kwarcowej. Rozdział zamykają obróbka cieplna: wygrzewanie 72 h w 900 °C z wariantami przesycania i chłodzenia z piecem oraz obróbka elektroerozyjna nadająca próbkom ostateczny kształt.

Rozdział 6 (s. 77-90) przedstawia opis stanowiska badawczego i systemów pomiarowych, które zostały wykorzystane do charakteryzacji wytworzonych stopów. W podrozdziale 6.1 omówiono sondę do pomiaru zmian przenikalności magnetycznej w funkcji temperatury, służącą do szybkiego wyznaczania temperatur przemian magnetostrukturalnych, wraz z jej weryfikacją wobec systemu PPMS. Podrozdział 6.2 dotyczy stanowiska do pomiaru adiabatycznych efektów elasto-, magneto- i multikalorycznych, zbudowanego jako przystawka do maszyny wytrzymałościowej MTS-810 i wyposażonego w komorę z regulacją temperatury

oraz przesuwaną macierz Halbacha, co umożliwia jednocześnie oddziaływanie naprężeń i pola magnetycznego w zgodnej fazie lub w przeciwfazie. Opisano również autorski algorytm wyznaczania ΔT_{ad} oraz pomiar wzorca gadolinowego, porównany z danymi Ames National Laboratory.

Rozdział 7 (s. 91-111) obejmuje wyniki charakterystyki wytworzonych materiałów. W podrozdziale 7.1 przedstawiono wpływ zawartości indu oraz sposobu obróbki cieplnej na charakterystyki termomagnetyczne, na podstawie których do dalszych badań wytypowano stop In15. Podrozdział 7.2 zawiera ocenę jednorodności składu chemicznego metodą EDS oraz obserwacje przemiany martenzytycznej wykonane w mikroskopie konfokalnym. W podrozdziale 7.3 przedstawiono wyniki pomiarów efektów adiabatycznych: elastokalorycznego, magnetokalorycznego i multikalorycznego dla zmian naprężenia 31, 70, 102 i 127 MPa oraz zmiany indukcji pola magnetycznego o 0,9 T, przy oddziaływaniu obu czynników w zgodnej fazie i w przeciwfazie. Podrozdział 7.4 zamyka porównanie uzyskanych charakterystyk z gadolinem, przeprowadzone zarówno według wartości maksimum efektu, jak i według wprowadzonego przez Autora wskaźnika ZCT, definiowanego jako pole pod krzywą $\Delta T(T)$ w zadanym przedziale temperatury.

Rozdział 8 przedstawia opis dotyczący części konstrukcyjnej pracy (s. 112-123). W podrozdziale 8.1 omówiono zbudowany demonstrator chłodziarki magnetokalorycznej pracującej w cyklu AMR, dla którego wykonano dwa regeneratory gadolinowe o jednakowej masie materiału aktywnego i gęstości nasypowej, różniące się morfologią wypełnienia: sferoidalną i płatkową, a następnie porównano osiągi obu rozwiązań dla różnych temperatur otoczenia i objętości przetłaczanej cieczy. Podrozdział 8.2 zawiera koncepcję demonstratora układu multikalorycznego: konstrukcję regeneratora z wkładem prętowym umożliwiającym jednocześnie obciążanie materiału naprężeniami ściskającymi i polem magnetycznym, schemat obiegu cieczy oraz sekwencje pracy dla synfazowego i przeciwfazowego oddziaływania obu pól.

Rozdziały 9 i 10 (s. 124-126) zawierają wnioski i podsumowanie, odniesione do pięciu zadań sformułowanych w rozdziale 3, oraz proponowane kierunki dalszych działań.

Bibliografia jest sporządzona starannie i konsekwentnie, z odsyłaczami zwrotnymi do stron, na których dana pozycja jest cytowana.

Oceniam układ pracy jako logiczny i konsekwentny. Rozprawa prowadzi czytelnika od problemu aplikacyjnego, przez teorię, technologię wytwarzania materiału, budowę aparatury, charakterystykę, aż po konstrukcję urządzenia. Jest to układ właściwy dla rozprawy z dyscypliny inżynieria mechaniczna i odpowiada wymaganiom stawianym pracom doktorskim.

3. Ocena merytoryczna pracy

Tematyka pracy jest aktualna i wpisuje się w szeroki nurt badań nad alternatywnymi technologiami chłodzenia wykorzystującymi odwracalne przemiany zachodzące w ciałach stałych pod wpływem zewnętrznych pól fizycznych. Zakres wykonanych badań jest szeroki. Autor opracował technologię wytwarzania większych ilości stopów Ni-Mn-In, zbudował

własne stanowiska do badań właściwości magnetycznych oraz efektów kalorycznych, przeprowadził systematyczne badania stopu $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$, zbudował demonstrator magnetokalorycznej pompy ciepła wykorzystującej gadolin i cykl AMR, a następnie przedstawił koncepcję aktywnego regeneratora magneto-elastokalorycznego AMER. Schemat badań obejmuje więc drogę od syntezy materiału, aż do zagadnień konstrukcji urządzenia. Za najważniejszą zaletę rozprawy uważam bardzo znaczny zakres samodzielnej pracy eksperymentalnej i konstrukcyjnej. Autor nie ograniczył się do wykorzystania istniejących stanowisk, lecz opracował własną aparaturę oraz technologię wytwarzania materiałów. W podsumowaniu podaje między innymi możliwość przetopu do około 200 g materiału w temperaturze do 1600°C przy niewielkich stratach masy. Moje główne zastrzeżenia dotyczą natomiast nie jakości wykonanych eksperymentów, lecz sposobu interpretacji wyników oraz zakresu wniosków aplikacyjnych, które miejscami wykraczają poza to, co zostało bezpośrednio wykazane w rozprawie.

Charakterystyka badanego materiału

Do zasadniczych badań wybrano stop $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$, poddany odpowiedniej obróbce cieplnej. Wybór ten oparto między innymi na charakterystykach termomagnetycznych oraz ocenie właściwości mechanicznych. Zakres charakterystyki materiałowej oceniam jednak jako nieco zbyt ograniczony w stosunku do znaczenia przemiany magnetostrukturalnej dla analizowanych efektów. W pracy poświęconej efektom związanym bezpośrednio z przemianą austenit-martenzyt oczekiwałabym pełniejszej identyfikacji strukturalnej, na przykład za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej, najlepiej w funkcji temperatury oraz uzupełniających pomiarów DSC. Pozwoliłoby to niezależnie potwierdzić charakter przemian, ich temperatury oraz histerezę. Wyjaśnienia wymaga również jeden z wyników EDS, dla którego suma podanych udziałów Ni, Mn i In wynosi jedynie 97 at.%. Należałoby ustalić, czy jest to rzeczywisty wynik analizy, czy błąd edytorski (Tabela 7.5, miejsce 9).

Dominująca rola efektu elastokalorycznego

Za jedno z najważniejszych wyników rozprawy uważam charakterystyki efektu elastokalorycznego. Autor badał odpowiedź materiału dla zmian naprężenia wynoszących 31, 70, 102 i 127 MPa, zarówno bez pola magnetycznego, jak i w stałym polu o indukcji 0,9 T. Wyniki jednoznacznie wskazują, że to właśnie efekt elastokaloryczny jest dominującym zjawiskiem kalorycznym w badanym stopie. Co istotne, taki wniosek formułuje również sam autor, stwierdzając, że efekt elastokaloryczny osiąga najwyższe wartości praktycznie w całym badanym zakresie temperatur. Dla największej zastosowanej zmiany naprężenia, wynoszącej 127 MPa, maksymalna wartość adiabatycznej zmiany temperatury przekracza 3 K. Jednocześnie charakterystyka tego efektu pozostaje stosunkowo szeroka temperaturowo. Autor sam pokazuje także, że przy 127 MPa odpowiedź elastokaloryczna przewyższa charakterystykę efektu magnetokalorycznego gadolinu w szerokim zakresie temperatur liczonych względem położenia maksimum. W mojej ocenie jest to jeden z najbardziej istotnych rezultatów całej rozprawy i zasługiwał on na znacznie głębszą analizę aplikacyjną.

Wątpliwości dotyczące znaczenia efektu magnetokalorycznego

Na tle odpowiedzi elastokalorycznej efekt magnetokaloryczny badanego stopu jest znacznie słabszy. Badania prowadzono dla zmiany pola magnetycznego $\Delta B = 0,9\text{T}$. Wraz ze wzrostem stałego naprężenia obserwowano spadek obu ekstremów odpowiedzi magnetokalorycznej, a odwrotny efekt magnetokaloryczny praktycznie zanikał już przy naprężeniu około 70 MPa. Jeszcze bardziej interesujący jest fakt, że stałe pole magnetyczne o indukcji 0,9 T podczas pomiarów efektu elastokalorycznego powodowało **zmniejszenie adiabaticznej zmiany temperatury**. Powstaje zatem zasadnicze pytanie dotyczące technologicznego uzasadnienia przyjętej koncepcji AMER. Jeżeli dominującym efektem badanego materiału jest szeroki efekt elastokaloryczny przekraczający 3 K, natomiast odpowiedź magnetokaloryczna jest znacznie słabsza, należałoby wykazać, że dodanie pola magnetycznego zapewnia korzyść wystarczającą do uzasadnienia komplikacji całego urządzenia.

Niedostateczne wykorzystanie literatury dotyczącej chłodzenia elastokalorycznego

W tym miejscu zwraca uwagę pewna niespójność pomiędzy przeglądem literatury a późniejszą analizą aplikacyjną. Autor **zna i cytuje publikacje dotyczące rzeczywistych zastosowań efektu elastokalorycznego w chłodzeniu**. W bibliografii znajduje się między innymi praca Cui i współautorów pt. *Demonstration of high efficiency elastocaloric cooling with large ΔT using Ni-Ti wires* oraz praca Tušek i współautorów *Elastocaloric effect of Ni-Ti wire for application in a cooling device* (pozycje 55 i 56). Publikacje te są jednak wykorzystywane głównie jako źródło parametrów materiałowych zestawionych w tabeli 2.2. W tabeli autor pokazuje między innymi bardzo duże wartości efektów elastokalorycznych dla różnych postaci NiTi, sięgające kilkunastu, kilkudziesięciu, a w niektórych przypadkach nawet około 40 K. Jednocześnie w części teoretycznej autor poprawnie zauważa, że aktywny cykl regeneracyjny analogiczny do AMR może być stosowany także w układach elastokalorycznych. Mimo tego w **dalszej części rozprawy nie przeprowadzono pogłębionej analizy istniejących elastokalorycznych urządzeń chłodniczych ani nie wykorzystano ich jako naturalnego punktu odniesienia dla projektowanego AMER**, co uważam za istotny brak. Własne wyniki autora prowadzą bowiem naturalnie do pytania, czy badany stop nie powinien być rozważany przede wszystkim jako materiał dla **aktywnego regeneratora elastokalorycznego**, zamiast jako materiał wymagający jednoczesnego oddziaływania mechanicznego i magnetycznego, szczególnie że literatura cytowana przez samego autora pokazuje, iż realizacja elastokalorycznego urządzenia chłodniczego nie jest jedynie hipotetyczną możliwością.

Technologiczna zasadność układu AMER

Proponowany przez autora AMER wymaga jednocześnie:

- układu przepływu medium,
- układu obciążania mechanicznego,
- macierzy Halbacha,
- oraz układu mechanicznego odpowiedzialnego za ruch elementów magnetycznych.

Sam schemat koncepcji AMER pokazuje regenerator, macierz Halbacha, siłownik mechanicznie obciążający złoże oraz siłowniki odpowiedzialne za ruch układu magnetycznego. W porównaniu z aktywnym regeneratorem czysto elastokalorycznym oznacza to istotny wzrost złożoności. Dochodzi również koszt silnych magnesów trwałych, ich masa i objętość oraz kwestia stosowania surowców krytycznych w typowych magnesach Nd-Fe-B. Nie oznacza to, że koncepcja AMER jest z definicji nieuzasadniona. Oznacza natomiast, że jej przewaga powinna zostać ilościowo wykazana. W rozprawie zabrakło odpowiedzi na pytanie: Czy korzyść wynikająca z dodatkowego pola magnetycznego przewyższa koszty i straty wynikające z jego zastosowania? Przedstawione wyniki materiałowe tego nie rozstrzygają.

Problem pojęcia synergii

Autor w podsumowaniu stwierdza, że wykazano synergię efektu magnetokalorycznego i elastokalorycznego oraz przewagę efektu multikalorycznego nad działaniem pojedynczego bodźca. Jako podstawę wskazuje przede wszystkim poszerzenie zakresu temperatur, charakter przebiegu $\Delta T(T)$ oraz parametr ZCT. W mojej ocenie przedstawione wyniki przekonująco wykazują sprzężenie obu zjawisk, ale nie wykazują w sposób równie jednoznaczny synergii w znaczeniu ilościowym. Pojęcie synergii wymagałoby określenia wartości odniesienia odpowiadającej niezależnemu działaniu obu bodźców, a następnie wskazania dodatkowego składnika odpowiedzi wynikającego ze sprzężenia. Ze względu na przemianę pierwszego rodzaju, histerezę oraz zależność stanu materiału od historii termomechanicznej prosta zależność

$$\Delta T_{\text{multi}} = \Delta T_{\text{EC}} + \Delta T_{\text{MC}}$$

nie musi być prawidłowym modelem odniesienia.

Tym bardziej jednak należałoby jasno zdefiniować, co autor rozumie przez synergię oraz według jakiego kryterium eksperymentalnego stwierdza jej występowanie. W obecnej postaci praca wykazuje interakcję i sprzężenie efektów, ale stwierdzenie o wykazanej synergii i jednoznacznej przewadze technologicznej uważam za zbyt mocne.

Parametr ZCT

Zastrzeżenia budzi również wykorzystanie parametru ZCT jako jednego z głównych argumentów przemawiających za przewagą efektu multikalorycznego. Całka z charakterystyki:

$$\int \Delta T_{ad}(T) dT$$

może być użytecznym wskaźnikiem opisującym jednocześnie amplitudę i szerokość temperaturową odpowiedzi materiałowej. Nie jest jednak bezpośrednią wielkością energetyczną. Rzeczywista ilość transportowanego ciepła zależy między innymi od pojemności cieplnej, masy materiału, udziału przemiany, przepływu cieczy, wymiany ciepła oraz charakterystyki pełnego cyklu. Dlatego większa wartość ZCT nie oznacza automatycznie większej mocy chłodniczej ani większego COP. Parametr ten należałoby zatem interpretować

jako wskaźnik charakterystyki materiałowej, a nie jako bezpośrednią miarę zdolności chłodniczej.

Ograniczenia aktywnej regeneracji

Autor prawidłowo wskazuje, że dzięki regeneracji można uzyskać różnicę temperatur większą niż pojedyncze ΔT_{ad} . Nie oznacza to jednak, że nawet niewielki efekt kaloryczny można dowolnie „zwiększyć” poprzez zwiększenie liczby cykli. W rzeczywistym regeneratorskim narastaniu gradientu przeciwdziałają przewodzenie ciepła, mieszanie płynu, dyspersja, straty do otoczenia, nieidealna wymiana ciepła oraz skończona sprawność regeneracji. W stanie ustalonym dochodzi do równowagi pomiędzy ciepłem przenoszonym przez cykl a procesami prowadzącymi do wyrównania temperatury.

Jednocześnie częstotliwości pracy nie można zwiększać bez ograniczeń. Zbyt szybka praca prowadzi do niepełnej wymiany ciepła, natomiast zbyt wolna zwiększa znaczenie strat przewodzenia. W przypadku efektów rzędu około 1 K zagadnienia te stają się szczególnie istotne.

Uwagi dotyczące AMER

Autor sam zauważa, że poszczególne fragmenty aktywnego regeneratora pracują przy różnych temperaturach i realizują w praktyce różne cykle, a cały układ można porównać do kaskady cykli Braytona. Powstaje więc pytanie, jak jeden jednorodny stop $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$ miałby zachować optymalną odpowiedź na całej długości AMER po wytworzeniu znaczącego gradientu. Potencjalnym rozwiązaniem jest stopniowanie składu chemicznego lub lokalne strojenie temperatury przemiany. Co ciekawe, autor sam przywołuje w części literaturowej koncepcję dostrajania charakterystyki materiału za pomocą naprężenia tak, aby poszczególne fragmenty regeneratora pracowały blisko maksimum charakterystyki. Nie przeprowadzono jednak analizy pokazującej, jaki zakres temperatur można byłoby w ten sposób pokryć dla rzeczywiście dostępnego zakresu naprężeń.

Rozprawa doktorska kończy się na przedstawieniu idei AMER. Nie uważam braku pełnego demonstratora AMER za wadę dyskwalifikującą rozprawę. Budowa takiego urządzenia wykraczałaby zapewne poza rozsądny zakres pojedynczej pracy doktorskiej. Brakuje jednak etapu pośredniego pomiędzy pomiarami materiałowymi a koncepcją urządzenia: **modelu termodynamicznego lub numerycznego wykorzystującego rzeczywiście zmierzone charakterystyki materiału**. Model taki powinien pozwolić oszacować przede wszystkim:

$$\Delta T_{\text{span}}, \dot{Q}_{\text{cool}}, COP,$$

oraz wpływ częstotliwości, przepływu, strat cieplnych, histerezy i pracy mechanicznej. Szczególnie wartościowe byłoby porównanie:

$$\boxed{AMR_{\text{Gd}} \text{ vs. } AeR_{\text{NiMnIn}} \text{ vs. } AMER_{\text{NiMnIn}}}$$

przy możliwie podobnych warunkach konstrukcyjnych. Bez takiej analizy nie można stwierdzić, że szersza charakterystyka multikaloryczna rzeczywiście przekłada się na lepszą chłodziarkę.

Trwałość mechaniczna

Znaczące ograniczenie aplikacyjne stanowi kruchość badanego stopu. Autor wskazuje, że przekroczenie około 150 MPa prowadziło do pęknięcia próbek wzdłuż granic ziaren już po kilku cyklach. Jednocześnie najlepszą odpowiedź elastokaloryczną uzyskuje się w pobliżu górnej części stosowanego zakresu naprężeń. Dla rzeczywistej maszyny chłodniczej, która musiałaby wykonać miliony lub miliardy cykli, trwałość funkcjonalna i mechaniczna jest więc jednym z podstawowych problemów. Zagadnienie to wymagałoby znacznie bardziej rozbudowanych badań zmęczeniowych.

Niepewność pomiarowa i powtarzalność

Przy efektach kalorycznych rzędu około jednego kelwina bardzo istotne stają się niepewność oraz dynamika pomiaru. Stanowisko pracuje z częstotliwością około 1 Hz, przy czym czas stabilizacji układów wykonawczych wynosi około 100-150 ms. W takich warunkach wynik może być wrażliwy na bezwładność czujnika, przewodzenie ciepła, synchronizację pól oraz sposób wyboru chwili odczytu temperatury. Walidacja za pomocą gadolinu stanowi wartościowy element metodyki, jednak wskazane byłoby również przedstawienie rozrzutu cykl-cykl, powtarzalności dla niezależnych próbek oraz pełniejszej propagacji niepewności.

Ocena głównych wniosków

Wyniki rozprawy pozwalają wiarygodnie stwierdzić, że w stopie $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$ istnieje silne sprzężenie pomiędzy stanem mechanicznym, magnetycznym i strukturalnym oraz że odpowiednia kombinacja bodźców pozwala zmieniać amplitudę, znak oraz zakres temperaturowy efektu kalorycznego. Za szczególnie wartościowy uważam wynik pokazujący silny i szeroki efekt elastokaloryczny.

Nie uważam natomiast za dostatecznie wykazane:

1. istnienia synergii w ścisłym, ilościowym znaczeniu,
2. przewagi technologicznej AMER nad układem czysto elastokalorycznym,
3. bezpośredniego związku pomiędzy ZCT a zdolnością chłodniczą,
4. możliwości osiągnięcia korzystnego zakresu temperatury pracy (temperature span) oraz mocy chłodniczej przez proponowany AMER,
5. ani tego, że dodatkowe pole magnetyczne daje korzyść uzasadniającą złożoność, koszt i straty układu magnetycznego.

Co więcej, literatura cytowana przez samego autora pokazuje istnienie elastokalorycznych rozwiązań chłodniczych, ale nie została wykorzystana jako rzeczywisty benchmark dla proponowanego AMER. Paradoksalnie własne wyniki rozprawy sugerują, że jednym z najbardziej interesujących kierunków dalszego rozwoju badanego Ni-Mn-In może być aktywny regeneratory elastokaloryczny, a niekoniecznie urządzenie multikaloryczne.

Uwagi szczegółowe do pracy

Poniższe uwagi mają charakter dyskusyjny i porządkowy; przedstawiam je w kolejności stron.

- *Podrozdział 5.2.1, s. 68-69.* Oczyszczanie manganu jest jednym z ważniejszych elementów opracowanej technologii, a jego skuteczność wykazano wyłącznie pośrednio: fotografiami materiału w stanie dostarczenia i po przetopie (rys. 5.2), obserwacją ustąpienia pienienia oraz rozbieżnością wskazań obu próżniomierzy. Brakuje analizy porównawczej składu manganu przed i po zabiegu, a więc odpowiedzi na pytanie, w jakim stopniu procedura rzeczywiście oczyszcza materiał. Jeżeli dostępna była wyłącznie mikroanaliza EDS, uzasadnione byłoby przedstawienie choćby wyników dla powierzchni i przełomu płatka w stanie dostarczenia oraz dla przełomu po przetopie, z komentarzem o czułości metody na tlen.
- *Podrozdział 5.1, s. 68, Tabela 5.1.* Numer próbki 23 przypisano jednocześnie do składu $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{35}\text{In}_{15}$ i do składu $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{34.5}\text{In}_{15.5}$. Ponieważ w dalszej części rozprawy próbki identyfikowane są numerami, taka kolizja jest myląca - proszę o korektę.
- *Podrozdział 5.3.4, s. 75 oraz podrozdział 7.3.2, s. 101.* Na s. 75 czytamy, że próbki uformowano w cylindry o średnicy 10 mm i długości 10 mm, natomiast na s. 101: „obciążeniu od 500 N do 12.6 kN, co przy średnicy próbki 13 mm dawało naprężenia od 3.75 do 95 MPa”. Rachunek ze s. 101 jest wewnętrznie zgodny dla średnicy 13 mm, ale sprzeczny z deklarowaną geometrią próbek. Jest to uwaga o znaczeniu merytorycznym: proszę o jednoznaczne wskazanie, jaką średnicę miały próbki użyte w badaniach kalorycznych i dla jakiego pola przekroju obliczono naprężenia 31, 70, 102 i 127 MPa podawane w całym podrozdziale 7.3.
- *Podrozdział 6.1, s. 77.* Autor odsyła do rysunku 6.2a i 6.2b, podczas gdy schemat sondy i fotografię prototypu przedstawiono na rysunku 6.1; rysunek 6.2 to schemat układu kondycjonowania sygnału.
- *Podrozdział 7.1, s. 91-92.* W tekście czytamy, że gwałtowny wzrost przenikalności towarzyszący przemianie „widoczny jest tylko dla próbek zawierających 15 i 15.5% indu”, natomiast Tabela 7.1 podaje temperaturę przemiany magnetostrukturalnej również dla próbki $\text{In}_{14.5}$ (26,7 °C). Zestawienie jest wewnętrznie niespójne z treścią akapitu, tym bardziej że dwa akapity dalej Autor porównuje temperatury przemiany próbek $\text{In}_{14.5}$ i In_{15} .
- *Podrozdział 7.1, s. 92-93, Tabele 7.1 i 7.2.* Temperatury podano niekonsekwentnie: część wartości z dokładnością do 0,01 °C (44,29; 48,61; 33,82), część do 0,1 °C (26,7; 24,5), część do jedności (25; -46). Przy metodzie polegającej na odczycie w połowie wysokości skoku charakterystyki druga cyfra po przecinku nie jest uzasadniona. Proszę o ujednolicenie liczby cyfr znaczących i o podanie niepewności wyznaczenia tych temperatur.
- *Podrozdział 7.1, s. 91-92.* Autor stwierdza, że wraz ze wzrostem zawartości indu zmienia się położenie punktu Curie, natomiast dane z Tabeli 7.1 (44,29; 48,61; 46,00; 33,82 °C) nie układają się monotonicznie. Zależność ta wymaga komentarza - albo wskazania przyczyny niemonotoniczności, albo oszacowania niepewności, w granicach której obserwowane różnice są nieistotne.

- *Podrozdział 7.2, s. 94-95, Tabele 7.4 i 7.5.* W tekście na s. 94 napisano, że odchylenia standardowe nie przekraczają błędu pomiarowego urządzenia, i na tej podstawie uznano próbkę za jednorodną. Dla przekroju wzdłużnego (Tabela 7.5) odchylenie standardowe zawartości indu wynosi jednak 1,03 % at. wobec deklarowanego błędu 0,5 % at. Jest to skutkiem wartości zmierzonej w punkcie 9 - 11,86 % at. wobec 14,44 - 14,85 % at. w pozostałych czterech punktach. Wynik ten albo jest błędem zapisu, albo świadczy o lokalnej niejednorodności i wtedy nie wolno go uśredniać bez komentarza. Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności i o skorygowanie wniosku o jednorodności, ewentualnie o powtórzenie pomiaru w tym punkcie.
- *Podrozdział 7.2, s. 95.* Średni skład zmierzony metodą EDS (50,5 Ni / 34,9 Mn / 14,6 % at. In dla przekroju poprzecznego) odbiega od nominalnego składu Ni₅₀Mn₃₅In₁₅. Ponieważ w rozdziale 2 Autor sam podkreśla wysoką czułość stopów Ni-Mn-In na skład, odchylenie zawartości indu o około 0,4 % at. zasługuje na komentarz, zwłaszcza w zestawieniu z Tabelą 7.1, gdzie różnicy 0,5 % at. indu odpowiada zmiana temperatury przemiany o kilkadziesiąt stopni.
- *Podrozdział 7.3, s. 99.* Wartości naprężeń uzasadniono jako około 25, 50 i 75% wartości maksymalnej wynoszącej 150 MPa, co dawałoby 37,5; 75 i 112,5 MPa, podczas gdy zastosowano 31, 70 i 102 MPa. Proszę o wyjaśnienie rzeczywistego kryterium doboru tych wartości.
- *Podrozdział 7.3, s. 99 oraz podrozdział 7.4, s. 109.* Granicę pękania materiału podano raz jako około 150 MPa (s. 99), raz jako przedział 130 - 150 MPa (s. 109). Brakuje ponadto informacji, na ilu próbkach to stwierdzono i ile cykli wytrzymały próbki przy naprężeniach roboczych. Trwałość zmęczeniowa jest dla materiału elastokalorycznego parametrem krytycznym - proszę o uzupełnienie i ujednolicenie.
- *Rozdział 7, całość.* W żadnym miejscu nie podano liczby powtórzeń pomiarów ani niepewności wyznaczenia ΔT_{ad} . Nie oceniono też stopnia spełnienia warunku adiabatyczności przy częstotliwości pracy 1 Hz, mimo że rozdział 6 wymienia go wśród warunków poprawnej realizacji eksperymentu. Proszę o wskazanie, jak oszacowano błąd wyznaczanych wartości i jaka jest powtarzalność wyników między próbkami tego samego składu.
- *Rozdział 7.* Pomiary właściwości kalorycznych wykonano wyłącznie dla stopu In₁₅, mimo że wytworzono pięć składów. Dla pozostałych ograniczono się do charakterystyk przenikalności. Proszę o wyjaśnienie, czy podjęto próby pomiaru efektów kalorycznych dla składów sąsiednich i czy obserwowane tendencje potwierdziły się jakościowo.
- *Podrozdział 8.1.5 i 8.1.7, s. 116-119, Tabela 8.1.* Obu regeneratom przypisano identyczną porowatość (0,641), co jest konsekwencją przyjętego założenia o jednakowej gęstości nasypowej 60% - warto powiedzieć to wprost, ponieważ w obecnej redakcji wygląda to na wynik pomiaru. Wyniki testów obu regeneratorów przedstawiono natomiast wyłącznie w postaci wykresów (rys. 8.8). Brakuje zestawienia liczbowego uzyskanych różnic temperatury ΔT dla wypełnienia sferoidalnego i płatkowego oraz konkluzji, która

morfologia okazała się korzystniejsza i dlatego. Skoro badanie to było celowo zaprojektowanym porównaniem, powinno zostać domknięte wnioskiem.

- *Podrozdział 8.1, s. 112-120 w zestawieniu z zadaniem 4 ze s. 48.* Wśród zadań przyjętych do realizacji wymieniono „budowę oraz badania demonstratora pompy ciepła, wykorzystującej jedynie efekt magnetokaloryczny, w cyklu pracy AMR”. Sama budowa została udokumentowana, natomiast część badawcza jest wyraźnie uboga: podrozdział 8.1.7 zajmuje niecałą stronę i ogranicza się do stwierdzenia, że różnica temperatur ustala się po pewnym czasie, przy czym pomiary prowadzono bez obciążenia cieplnego. Nie podano mocy chłodniczej, współczynnika wydajności ani wpływu parametrów cyklu (czasu przetłaczania, czasu oddziaływania pola) na osiągi, choć sam Autor pisze na s. 116, że parametry te były sterowalne. Szerszy opis układu odesłano do publikacji [23]. Odesłanie takie jest naturalne w artykule, ale w rozprawie doktorskiej zadanie zapowiedziane jako „budowa oraz badania” powinno zostać w niej samej zamknięte. Proszę o uzupełnienie rozdziału 8.1 o wyniki charakteryzujące cykl pracy demonstratora - choćby o zestawienie ΔT w funkcji parametrów sterowania oraz o oszacowanie mocy chłodniczej.

Uwagi edytorskie i językowe

Szata graficzna rozprawy jest staranna, rysunki i schematy czytelne, a język w większości poprawny. Poniżej zestawiam zauważone uchybienia redakcyjne:

- w całym tekście jako separator dziesiętny stosowana jest kropka (0.9 T, 1.25 MPa, 26.7 °C), podczas gdy w tekście polskim obowiązuje przecinek; w Tabeli 2.3 (s. 40–41) użyto z kolei przecinka, co pogłębia niekonsekwencję;
- s. 14, równanie 2.10 - w pierwszym członie prawej strony zapisano $y1$ zamiast $Y1$;
- s. 37 - jednostki wartości $\Delta S/\Delta p$ oraz $\Delta S/(\mu_0 \Delta H)$ zapisano jako „J/kgKkbar” i „J/kgKT”; taki zapis jest nieczytelny i powinien mieć postać $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot kbar^{-1}$ oraz $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \cdot T^{-1}$;
- s. 50 - wprowadzenie do części II rozpoczyna się od zdania „Niniejszy rozdział pracy doktorskiej poświęcony jest...”, podczas gdy fragment ten nie jest rozdziałem numerowanym, a jego rysunek otrzymał numerację 3.1 (s. 51), przynależną rozdziałowi 3;
- s. 68 - jest: „Znają sposób uzyskiwania manganu”, powinno być: „Znając”;
- s. 69 - jest: „bezwzględnego”, powinno być: „bezwzględny”;
- s. 81 - jest: „temperatura próbki musi istnieć powoli zmieniana”, zdanie wymaga przeredagowania;
- s. 101, rys. 7.10 - prawą oś rzędnych opisano jako „Tmax (K)”, podczas gdy naniesione wartości mieszczą się w zakresie 16-32, a z tekstu wynika, że są to temperatury w stopniach Celsjusza; w podpisie rysunku występuje ponadto błąd „w zewnętrznym polu”;
- s. 105 - jest: „działanie synchroniczne”, powinno być: „synchroniczne”;
- s. 121 - jest: „mają natomiast wydrążone”, powinno być: „natomiast”;

- s. 124, punkt 1 wniosków - straty masy określono jako „poniżej 0.5%”, podczas gdy na s. 70 podano wartość poniżej 2,5‰; wniosek zaniża rzeczywiste, korzystniejsze osiągnięcie i warto go doprecyzować;
- s. 125 - zastosowano zapisy „MuF” i „MuPF”, podczas gdy w wykazie skrótów i w rozdziale 7 obowiązuje „MUF” i „MUPF”;
- w kilku miejscach stosowane są sformułowania potoczne, właściwe raczej tekstowi popularnonaukowemu niż rozprawie doktorskiej: źródła pola magnetycznego jako „pięta Achillesowa” prób komercjalizacji (s. 33), regenerator jako „serce” układu (s. 113).

Pytania do dyskusji podczas obrony

Po lekturze rozprawy nasuwają się pytania, na które nie znalazłam w niej odpowiedzi:

1. Jak autor definiuje ilościowo pojęcie synergii i jaki parametr eksperymentalny dowodzi istnienia synergii, a nie wyłącznie sprzężenia efektów?
2. Skoro własne wyniki wskazują efekt elastokaloryczny jako dominujący i dla 127 MPa daje on ponad $\Delta T = 3$ K w szerokim zakresie temperatur, jaka jest przewaga AMER nad aktywnym regeneratorem czysto elastokalorycznym?
3. Dlaczego cytowane w rozprawie prace dotyczące rzeczywistego chłodzenia elastokalorycznego nie zostały wykorzystane jako punkt odniesienia dla proponowanej konstrukcji AMER?
4. Jaką mierzalną poprawę parametrów urządzenia zapewnia dodanie pola magnetycznego 0,9 T?
5. Jakie jest fizyczne uzasadnienie parametru ZCT jako miary „zdolności chłodzenia”?
6. Jakie wartości zakresu temperatur pracy (temperature span), mocy chłodniczej i COP autor przewiduje dla AMER przy wykorzystaniu zmierzonych charakterystyk Ni-Mn-In?
7. Jak proponowany regenerator ma pracować po utworzeniu gradientu kilkunastu lub kilkudziesięciu kelwinów? Czy jeden skład Ni-Mn-In wystarczy, czy wymagane byłoby stopniowanie składu lub przestrzenne strojenie temperatury przemiany?
8. Jakiej trwałości cyklicznej można oczekiwać przy naprężeniach około 100-127 MPa, jeżeli przy około 150 MPa próbki pękały już po kilku cyklach?
9. Czy po analizie własnych wyników autor nadal uważa efekt multikaloryczny za najbardziej perspektywiczny kierunek wykorzystania badanego stopu, czy też jego efekt elastokaloryczny może być bardziej atrakcyjny technologicznie?

4. Ocena i wniosek końcowy

Rozprawa mgr. inż. Kacpra Surmy zawiera **obszerny i wartościowy materiał eksperymentalny**, obejmujący technologię wytwarzania materiału, konstrukcję własnych

stanowisk badawczych, pomiary efektów kalorycznych oraz budowę demonstratora AMR. Doktorant wykazał zdolność samodzielnego prowadzenia złożonych prac eksperymentalnych i konstrukcyjnych. Uzyskane wyniki dotyczące wpływu pola mechanicznego i magnetycznego na właściwości stopu Ni-Mn-In mają wartość naukową. Zasadnicze zastrzeżenia dotyczą jednak interpretacji wyników oraz wnioskowania o potencjale aplikacyjnym. W szczególności deklarowane wykazanie synergii nie zostało dostatecznie zdefiniowane ilościowo, parametr ZCT nie stanowi bezpośredniej miary zdolności chłodniczej, a przewaga proponowanego AMER nad znacznie prostszym rozwiązaniem elastokalorycznym nie została wykazana. Szczególnie zwraca uwagę, że sam autor cytuje literaturę dotyczącą rzeczywistych urządzeń elastokalorycznych, a jednocześnie nie wykorzystuje jej do krytycznego porównania własnej koncepcji AMER, mimo że własne wyniki wskazują efekt elastokaloryczny jako dominującą odpowiedź badanego stopu. Zastrzeżenia te dotyczą przede wszystkim zakresu interpretacji, a nie wartości wykonanej pracy eksperymentalnej.

Uważam, że Doktorant wykazał się dużą wiedzą teoretyczną, opanowaniem warsztatu eksperymentalnego w zakresie znacznie szerszym niż typowy dla jednej specjalności - od metalurgii i obróbki cieplnej, przez elektronikę pomiarową, po budowę maszyn - oraz umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia pracy naukowej. Uzyskane rezultaty wnoszą wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, w szczególności w zakresie metodyki pomiarów efektów multikalorycznych oraz technologii wytwarzania materiałów kalorycznych. Postawiona teza została udowodniona na poziomie materiału i efektu kalorycznego.

Stwierdzam, że recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska mgr. inż. Kacpra Surmy pt.: „Analiza synergii efektów mechano-magnetokalorycznych w stopach Ni-Mn-In oraz opracowanie koncepcji ich zastosowania w układach chłodniczych” prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej, a jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a zatem spełnia wymagania określone w art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) oraz wpisuje się w Dyscyplinę Naukową „Inżynieria Mechaniczna”.

W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr. inż. Kacpra Surmy do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” Politechniki Wrocławskiej.

prof. dr hab. Aleksandra Kolano-Burian

Podpis jest prawidłowy

Dokument podpisany przez Aleksandra Kolano-Burian

Data: 2026.09.08 12:52:08 CEST

