

Szczecin, 15.08.2023 r.

prof. dr hab. inż. Katarzyna Gawdzińska  
Politechnika Morska w Szczecinie

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jakuba GRZĘDY

pt.:

„Zastosowanie cienkościennych struktur metalowych, odlewanych metodą precyzyjną do intensyfikacji procesu wymiany energii w akumulatorach ciepła”.

Praca przedstawiona do dyskusji Radzie Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej,  
Politechniki Wrocławskiej.

Promotor: Prof. dr hab. inż. Krzysztof Napłocha

Promotor pomocniczy: dr inż. Anna Dmitruk

### ***Podstawa opracowania:***

*Recenzję opracowano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Wrocławskiej z dnia 5.06.2023 r. W ocenie rozprawy zostały przyjęte kryteria, wynikające z obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. Ust. 65. Poz. 595 z późniejszymi zmianami) stawiane pracom doktorskim.*

Europejski kryzys energetyczny położył bardzo duży nacisk na przejście na tzw. ciepłownictwo przemysłowe. Wiadomym jest, że istnieje ogromny potencjał oszczędności, ponieważ około dwie trzecie całkowitego zużycia energii w procesach przemysłowych przypada na ciepło technologiczne wykorzystywane w produkcji. Szczególnie w obliczu wysokich cen gazu i wymogów politycznych dotyczących dekarbonizacji, dla przedsiębiorstw kluczowe znaczenie ma przejście na energię odnawialną np. solarną i magazynowanie ciepła procesowego. Magazynowanie energii cieplnej odgrywa dla przedsiębiorstw ważną rolę w zapewnieniu opłacalności ekonomicznej przejścia na zrównoważoną produkcję jest też korzystne ze względu na ochronę środowiska naturalnego. W tak zwanym magazynowaniu ciepła jawnego temperatura materiału (ciała stałego lub cieczy), w zależności od systemu, w którym się znajduje, zgodnie z zasadą przekazywania energii – jest podnoszona, w celu magazynowania energii cieplnej. Typowymi materiałami do przechowywania ciepłą są woda, ceramika (beton, piaskowiec, glina-cegła), olej termiczny lub stopione sole. Zatem w

rozpatrywanym przypadku potencjalny okres przechowywania ciepła zależy od zastosowanych materiałów magazynowych. Racjonalne magazynowanie energii cieplnej jest najbardziej pożądaną pod względem ekonomicznym metodą magazynowania energii cieplnej. W systemach magazynowania ciepła utajonego energia cieplna jest magazynowana za pomocą materiału zmiennofazowego. Kiedy te materiały zmieniają fazę (na przykład ze stałej w ciekłą), muszą absorbować energię. Energia ta, która została dodana do materiału, pozostaje w materiale związana jako tzw. energia utajona. Typowe materiały o przemianie fazowej obejmują lód, naftę, kwasy tłuszczowe, alkohole, sole nieorganiczne i metale. Materiały magazynujące ciepło utajone mogą magazynować energię przez długi okres czasu bez większych strat. Rosnące wymagania rynku przetwórczego, motoryzacyjnego, kosmicznego czy też medycznego wymuszają na inżynierach poprawę efektywności realizacji technologii oraz sprawności i niezawodności materiałów służących do magazynowania energii. Do takich tworzyw należą między innymi odlewane struktury porowate wytwarzane metodą precyzyjną. Analizując aktywność złożonych zagadnień technicznych, technologicznych tych materiałów, konieczne jest ustalenie najbardziej odpowiednich ich cech np. kształt, wielkość wpływających na ogólną pracę wyrobu dedukowaną na tworzywa przeznaczone do przepływu ciepła.

Tematyka przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba GRZĘDY jest ze wszech miar aktualna. Celem naukowym było bowiem otrzymanie nowego konstrukcyjnie materiału służącego do intensyfikacji procesu wymiany energii w akumulatorach ciepła

### **Charakterystyka ogólna pracy i jej ocena**

Praca składa się ze 156 stron tekstu, w układ których wchodzi: treść pracy, bibliografia, streszczenia w językach: polskim i angielskim oraz spis ilustracji i tabel wraz ze wskazaniem projektów w ramach, których były realizowane wybrane badania przedstawione w doktoracie.

W bibliografii zamieszczono 159 pozycji literatury. Zakres przytoczonych opracowań jest wystarczający i dobrany prawidłowo. Praca zredagowana jest w sposób klasyczny. Zawiera sześć literaturowo-badawczych rozdziałów nie poprzedzonych wstępem a jedynie streszczeniem pracy. Autor scharakteryzował istnienie skutecznych metod odlewania z uwzględnieniem opisu stopów odlewniczych o dobrych właściwościach cieplnych a przy tym właściwościach mechanicznych jakie musi mieć materiał pracujący w trudnych warunkach cykli cieplnych. Na uwagę zasługuje kompleksowe opisanie (szczególnie w rozdziale 1.2.3) właściwości odlewniczych stopów aluminium. Doktorant scharakteryzował drobiazgowo cechy jakimi powinny odznaczać się stopy odlewnicze i określił potencjalne wady odlewnicze

mogące powstawać podczas operacji odlewania. W rozdziale 1.4 określono bardzo skrupulatnie intensyfikację wymiany ciepła a w rozdziale 1.5 zaprezentowano metody intensyfikacji wymiany ciepła w akumulatorach o złożu zmiennofazowym. Poprzedzone to zostało opisaniem podstawowych zjawisk jakie występują w procesach magazynowania energii cieplnej a także określeniem metod akumulacji ciepła z podziałem na ciepło: jawne, utajone, reakcji i sorpcji. W rozdziale drugim dysertacji sformułowano cel i zakres pracy z uzasadnieniem wyboru tematu. Zakończenie pracy (rozdział szósty- posumowanie i wnioski z podziałem na poznawcze i utylitarne) w sposób zwięzły i logiczny, potwierdza sensowność i celowość postawionej tezę, która stanowiła sens rozprawy tj. „Cienkościenne odlewane struktury przestrzenne wytwarzane metodą odlewania precyzyjnego na bazie modeli traconych wytwarzanych technikami szybkiego prototypowania opartymi na druku 3D z tworzyw sztucznych pozwalają na znaczącą poprawę warunków wymiany ciepła w zmiennofazowych i sorpcyjnych złożach systemów akumulacji ciepła”.

Powyższe sformułowanie, do oceny jego prawdziwości, wymaga realizacji badań i porównywania ich wyników. Autor pracy wykonał takie odlewy (o różnym kształcie i z różnych materiałów) wykorzystując do kształtowania ich modeli techniki przyrostowe oraz przeprowadził szereg eksperymentów, w których wykazał znaczną poprawę wymiany ciepła w złożach systemów akumulacji energii.

W końcowej części pracy mgr inż. Jakub GRZĘDA w sposób logiczny i zwięzły, potwierdza postawioną tezę, która stanowiła motto rozprawy.

## **2. Oryginalne osiągnięcia pracy**

Magister inż. Jakub GRZĘDA w swojej pracy podjął próbę analizy kształtowania odlewów precyzyjnych i oceny ich zastosowania w zakresie zarządzania ciepłem wewnątrz złożów zmiennofazowych i sorpcyjnych. Doktorat opisał zagadnienie doboru materiałów stosowanych na odlewy cienkościenne, uwzględniając ich właściwości w oparciu o obszerny przegląd literatury, gdzie rozpatrywał również zagadnienia związane z akumulacją energii cieplnej.

Oryginalnym osiągnięciem pracy jest zaproponowanie nowatorskiej metody szybkiego prototypowania do wytwarzania elementów metalowych przez zadanie odpowiedniego kształtu modelowi z wybranego tworzywa sztucznego. I właśnie ta możliwość nadania dowolnego kształtu z wykorzystaniem technik przyrostowych modelowi służącemu do wytwarzania odlewów metodą wytapianych modeli jest bardzo dużym atutem niniejszej pracy. Zastosowanie technologii druku 3 D do produkcji modeli wytapianych pozwala bowiem na:

- tańszą alternatywę tworzenia modeli, poprzez brak konieczności wytwarzania formy wtryskowej dla każdego kształtu modelu, co pozwala na wszechstronną produkcję modeli wytapianych i ogranicza ślad węglowy;

- dużą elastyczność produkcji poprzez szybkie dopasowanie kształtu odlewu do intensyfikacji procesu wymiany energii w akumulatorach ciepła;

- dużą swobodę projektowania i szybkiego dopasowania modelu do konkretnego zastosowania.

Dzięki tej technice Autor wytworzył szereg struktur np. o geometrii żebrowej, porowatych w postaci pian, plastra miodu, i przeanalizował ich zastosowanie jako transporterów ciepła wewnątrz źródeł akumulacyjnych, w celu zwiększenia efektywności wykorzystania solarnych i odpadowych źródeł ciepła. Dokonał oceny jakości wyrobów z zastosowaniem badań makroskopowych i mikroskopowych. Błędy struktury, przerwy ciągłości i inne zaobserwowane wady odlewów zostały bogato udokumentowane i zaprezentowane w postaci obrazów.

Przeprowadził interesujące badania wymiany ciepła dla wytworzonych odlewanych struktur cienkościennych w szczególności badania efektywności struktur przestrzennych (struktur w postaci plastra miodu i pian metalowych) w złożu PCM w skali laboratoryjnej, jak również małoskalowych układach zmiennofazowych i w zeolitowych złożach akumulacji ciepła oraz hybrydowych akumulatorach ciepła. Wskazał, że dodatkowym czynnikiem brany pod uwagę przy wyborze najkorzystniejszej geometrii struktur przestrzennych było: pole przekroju poszczególnych struktur, które przekłada się bezpośrednio na masę gotowych wymienników, zużycie materiału i koszt produkcji.

Stwierdził, że odlewnicze stopy aluminium z uwagi na swoje właściwości termiczne wpływają na poprawę wydajność magazynowania (skrócenie czasu ładowania, rozładowania akumulatora) energii cieplnej w zmiennofazowych i sorpcyjnych akumulatorach ciepła. Wykazał, że podeutektyczne i eutektyczne stopy aluminium z krzemem wytwarzane metodą odlewania precyzyjnego charakteryzują się wysoką jakością. Jest to bardzo istotny wniosek, gdyż naprężenia zmęczeniowe wywołane skurczem materiału zmiennofazowego w czasie krzepnięcia mogą stanowić istotne źródło degradacji odlewów szczególnie wyrobów postaci pian metalowych. Tym samym udowodnił, że kształt cienkościennych odlewów pracujących w złożu zmiennofazowym wpływa na efektywność procesu, gdyż odlewy pracując w złożu zmiennofazowym o geometrii plastra miodu wykazują wysoką odporność na naprężenia zmęczeniowe (w odróżnieniu od wspomnianych pian ze stopów aluminium). Natomiast te same

piany stosowane do wzmocnienia przepływu ciepła w głąb złoża sorpcyjnego zwiększają jego wentylację ułatwiając przepływ gorącego powietrza.

Prace eksperymentalne mgr inż. Jakuba GRZĘDY zostały wykorzystane przy opracowaniu systemu akumulacji ciepła w skali przemysłowej na arenie międzynarodowej (realizacja projektu badawczego ASTEP, badania realizowane w ramach tego projektu posłużyły do walidacji modelu numerycznego wykonywanego przez partnerów przemysłowych) co świadczy o umiejętności pracy Doktoranta w zespole. W projekcie tym zastosowano interesujące rozwiązanie a mianowicie wykorzystano eutektyczną mieszkankę soli azotowych jako materiał zmiennofazowy a transporterem ciepła były struktury przestrzenne w postaci plastra miodu wykonane przez Doktoranta z siluminu (AlSi12). Odlewy te powstały zgodnie z technologią wytapianych modeli (modele były wytworzone techniką 3D z polilaktydu).

Bardzo dużo miejsca Magister Grzęda poświęcił dopasowaniu geometrii kształtu elementom transportującym ciepło. Przeprowadził liczne doświadczenia związane z testowaniem tych struktur przestrzennych. Przykładowo stwierdził, że w testach cyklicznej pracy akumulatora dla tego samego układu magazynowania ciepła, struktura o geometrii żebrowej pozwala na zakończenie przemiany fazowej złoża, w czasie krótszym niż ma to miejsce w przypadku struktury żebrowanej wewnętrznie oraz w przypadku struktury heksagonalnej.

Autor swoje innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne zweryfikował badaniami numerycznymi w dziedzinie przepływów ciepła ze szczególnym uwzględnieniem przemian fazowych z wykorzystaniem narzędzi pakietu Ansys. Dało to możliwość symulowania procesów wymiany ciepła i zmiany stanu skupienia w złożach zmiennofazowych. Narzędzie to może stanowić skuteczne wspomaganie projektowania struktur przestrzennych służących do identyfikacji ciepła w oparciu o prawidłowy dobór parametrów obliczeniowych.

Badania te są bardzo innowacyjne i stanowią bogaty zbiór skompensowanej wiedzy związanej ze zjawiskami temperaturowo-fizykochemicznymi w układach wymiany ciepła. Materiał doświadczalny i sposób jego interpretacji w rozprawie doktorskiej mgr inż. Jakuba GRZĘDY oceniam jako dobry.

## **Uwagi i dyskusja**

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłabym:

1. Brak konsekwentnego, ujednoliconego i prawidłowego stosowania określeń: **metalowe** lub metaliczne np. niepoprawnie „metalicznych”, str. 7, 42, 41-42 45, 49, 84, 95. **Właściwości** a nie własności, str.10, 11, 20, 37. Glin zamiast aluminium str.11, 32. Błędy te często występują również w literaturze i nie byłoby to może dużym problemem, gdyby Doktorant nie stosował zamiennie w pracy dwóch określeń do ich charakterystyki;

2. Rażąca jest w doktoracie również pewna niefrasobliwość Doktoranta przy opisie zagadnień np. nie stosuje się słowa temperatury w liczbie mnogiej, ponieważ jest to parametr str. 22, 36, 38-39 ani waga na opis masy, bo waga to narzędzie str.57. Co to znaczy „zakrzepnięciem stopu” str.20? Tańsze alternatywy a nie alternatywa str.11. Przegląd literatury a nie literaturowy str. 9 oraz stosowanie zamiennie formy osobowej lub bezosobowej.

3. Brak jest przytoczonej pozycji literatury przy rysunkach 1.4-1.5, 1.7 a rysunek 1.8 powinien być zaprezentowany w polskiej wersji językowej. Brak konsekwencji przy przytaczaniu pozycji literatury: w tekście przy Tabeli 1.2 [21]-[23] natomiast w podpisie Tabeli już [21-24] inny zapis;

4. Występują drobne błędy redakcyjne np. brak jest słowa „na” cykliczny charakter str.11. A także (str.12) „Im większy stopień przechodzenia (?), tym szybciej tworzą się zarodki krystalizacji.”;

5. Do pełnej analizy obrazów np. jakości wytworzonych odlewów-rysunki 3.23- 3.23, 3.25-3.36, 3.28 brakuje skali powiększenia. A wykres (rys. 4.30) byłby bardziej czytelny, gdyby był taki sam zakres temperatury na poszczególnych obrazach.

Poza przedstawionymi uwagami styl pisania rozprawy nie budzi zastrzeżeń a wskazane uwagi krytyczne nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba GRZĘDY.

W ramach dyskusji na temat niektórych zagadnień przedstawionych w rozprawie proszę Doktoranta o ustosunkowanie się podczas publicznej obrony do następujących problemów:

1. Proszę uzasadnić: skąd nagle wziął się (str.82) stop ZnAl. Ogólnie panuje w pracy pewien chaos w opisie doboru stopów stosowanych na różnego typu struktury przestrzenne. Proszę doktoranta o usystematyzowanie i przedstawienie tego zagadnienia;
2. Przechowywanie ciepła w materiałach zmiennofazowych znajduje się obecnie w fazie badań. Jest to metoda bardzo obiecująca, aczkolwiek droższa w zastosowaniu niż np. wykorzystanie ciepła właściwego materiałów. Czy były prowadzone jakieś badania w

kierunku określenia wyceny tego procesu z zastosowaniem proponowanych struktur porowatych.

### **Wniosek końcowy**

Praca doktorska przedstawiona przez mgra inż. Jakuba GRZĘDĘ reprezentuje bardzo dobry poziom naukowy. Tematyka pracy jest nowoczesna naukowo i atrakcyjna aplikacyjnie. Autor wykorzystał skrupulatnie możliwość współpracy w silnym, zespole jaki stanowią pracownicy Katedry Inżynierii Elementów Lekkich, Odlewnictwa i Automatyki Politechniki Wrocławskiej. Praca zredagowana jest w sposób jasny i skondensowany. Przedstawione rezultaty zawierają elementy nowości w sensie poznawczym i użytecznym. Autor bardzo dobrze opanował technikę pracy badawczej oraz zastosował metody badań adekwatne do jej zakresu.

**Pracę oceniam pozytywnie. Wnoszę o jej wyróżnienie. Stwierdzam bowiem, że recenzowana praca doktorska, pt.: „Zastosowanie cienkościennych struktur metalowych, odlewanych metodą precyzyjną do intensyfikacji procesu wymiany energii w akumulatorach ciepła” wnosi istotny wkład do dyscypliny naukowej „budowa i eksploatacja maszyn” obecnie „inżynieria mechaniczna”, poprzez (między innymi) wytworzenie nowych, atrakcyjnych aplikacyjnie (wymiana ciepła) odlewanych kształtowych, cienkościennych struktur według procedury technologicznej z wykorzystaniem techniki przyrostowej. Zagadnienie to jest obecnie bardzo aktualne w najintensywniej rozwijającej się gałęzi energetyki. Praca zredagowana jest w sposób jasny i skondensowany. Spełnia ona wszystkie wymagania, dotyczące rozpraw doktorskich, wynikające z obowiązującej Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65 poz. 595) . Wnioskuje o dopuszczenie jej do dyskusji na Radzie Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej, Politechniki Wrocławskiej.**

Katarzyna Gawdzińska

