

Rzeszów, 10.07.2023 r.

Dr hab. inż. Marek Mróz, profesor uczelni
Politechnika Rzeszowska
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Kierownik Katedry Odlewnictwa i Spawalnictwa
al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Jakuba Grzędy**

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

Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę budowa i eksploatacja maszyn (inżynieria mechaniczna), a podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej prof. dr. hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego z dnia 5 czerwca 2023 roku, znak pisma W10/D/47/2023.

1. WPROWADZENIE – AKTUALNOŚĆ I TRAFNOŚĆ DOBORU TEMATU

Gospodarka energetyczna stanowi jeden z najważniejszych obszarów rozwoju ludzkości i dlatego zagadnienia dotyczące przemysłu energetycznego są zawsze aktualne. Są one celem badań licznych ośrodków naukowych w kraju i za granicą. W literaturze technicznej można spotkać opracowania dotyczące poprawy efektywności istniejących systemów energetycznych, nowych technologii wytwarzania energii czy tworzenia inteligentnych sieci energetycznych. Ważnym kierunkiem badawczym są również odnawialne źródła energii, nie tylko z uwagi na wyczerpywanie się zasobów tradycyjnych źródeł energii jak węgiel, ropa naftowa, ale również ze względu na aspekt ekologiczny, czyli dużą emisyjność CO₂. Jednak pełne wykorzystanie tych źródeł, zwłaszcza energii słonecznej jest utrudnione z uwagi na dostępność czasową w ciągu doby oraz wpływ warunków atmosferycznych. Rozwiązaniem tych problemów jest akumulacja ciepła w specjalnych systemach magazynowania energii cieplnej. Obok poprawy efektywności energetycznej i działań integracji odnawialnych źródeł energii z istniejącymi systemami energetycznymi, stanowi to podstawowy kierunek badań w obszarze gospodarki energetycznej.

Z urządzeń do magazynowania energii, w sposób bezpośredni lub pośredni, większość ludzi już korzysta. Przykładem jest choćby samochód osobowy czy inny środek transportu, którego nieodzownym elementem jest akumulator wodny, zaliczany do akumulatorów stałofazowych. W budowie akumulatorów stałofazowych, które były przedmiotem licznych badań naukowych w ostatnim dwudziestoleciu XX wieku, oprócz wody próbowano wykorzystać inne czynniki robocze, takie jak gaz (powietrze), skały, piasek, beton, czy też żeliwo. Badania te dotyczyły opracowania innowacyjnych rozwiązań akumulatorów nisko- i wysokotemperaturowych (do temperatury 700 °C).

Problemy związane z utrzymaniem ciśnienia, charakterystyką cieplną złoża (czynnika roboczego) przyczyniły się między innymi do rozwoju drugiego rodzaju akumulatorów tzw. akumulatorów zmiennofazowych. W akumulatorach tych do magazynowania energii wykorzystuje się ciepło przemiany fazowej czynnika roboczego o odpowiednich właściwości termofizycznych. W literaturze można spotkać szereg badań dotyczących akumulatorów zmiennofazowych. Ich wspólnym mianownikiem jest uzyskanie wysokiej gęstości akumulacji energii. Cele jakie stawiają sobie badacze tego zagadnienia dotyczą opracowania matematycznych modeli procesu wymiany ciepła, doboru materiału zmiennofazowego (z ang. Phase Change Materials – PCM) z uwagi na niską wartość współczynnika przewodzenia ciepła, czy wysoką wartość entalpii przemiany fazowej. Czynniki te decydują o efektywności działania akumulatora, czyli o wartości uzyskiwanych strumieni ciepła. Wiąże się to również z eksploatacją takiego akumulatora, ponieważ decyduje to o jego czasie naładowania i rozładowania.

Recenzowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Grzędy wpisuje się w przedstawiony powyżej nurt badawczy, ponieważ dotyczy poprawy efektywności pracy akumulatorów/wymienników ciepła poprzez wprowadzenie rozwiązań konstrukcyjnych intensyfikujących proces wymiany ciepła pomiędzy medium grzewczym a zmiennofazowym materiałem PCM. W pracy przedstawiono oryginalne rozwiązania konstrukcyjne elementów metalowych opartych na strukturach przestrzennych, zwiększające powierzchnię kontaktu między medium grzewczym a złożem zmiennofazowym, a tym samym intensyfikujące proces wymiany ciepła. Wymiernym efektem tego rozwiązania jest skrócenie czasu naładowania i rozładowania akumulatora.

Z tego względu uważam, że podjęta przez Pana mgr. inż. Jakuba Grzędę tematyka jest trafna, zarówno z uwagi na jej aktualność, jak i z utilitarnego punktu widzenia.

2. FORMALNA OCENA UKŁADU I ZAWARTOŚCI PRACY

Recenzowana rozprawa doktorska ma 156 stron druku dwustronnego i jest napisana w tradycyjnym układzie z podziałem na część teoretyczną (31 stron) i badawczą (97 stron). Resztę stanowią spisy symboli, treści, rysunków, tabel i literatury. Uważam, że taki podział pracy jest prawidłowy. W skład części

teoretycznej wchodzi jeden rozdział zatytułowany „Przegląd literatury” składający się z czterech podrozdziałów. Strona merytoryczna tego rozdziału zostanie omówiona w dalszej części recenzji.

Następnie przedstawiono cel i tezę rozprawy doktorskiej. Do tych kwestii również odniosę się w dalszej części recenzji, ponieważ uważam, że wymagają one bardziej szczegółowego omówienia.

Zasadniczą część pracy stanowią badania własne opisane w 3 dużych rozdziałach.

Pracę kończy podsumowanie oraz 10 wniosków poznawczych i 7 wniosków użytecznych. Myślę, że Autor, skoro na końcu pracy przedstawia wnioski użyteczne, powinien określić również cele użyteczne.

W pracy przytoczono 159 pozycji literatury, z czego około 20 pozycji jest z przed 2000 roku. Większość cytowanej literatury jest publikowana po 2010 roku. W rozprawie cytowane są również strony internetowe (cztery pozycje). Uważam, że dobór literatury jest poprawny i adekwatny do zaprezentowanego przeglądu i co ważne do tematyki badań własnych.

Praca zawiera 126 rysunków ponumerowanych według rozdziałów oraz 11 tabel. Ogólnie jakość prezentowanych rysunków i zdjęć jest zadawalająca, chociaż w pracy można znaleźć rysunki o słabej rozdzielczości lub zbyt małych rozmiarach aby można było je analizować.

Po przeczytaniu pracy stwierdzam, że pod względem stylu pisania i zgodności z zasadami pisowni języka polskiego praca jest poprawna. Zwracam na to uwagę, gdyż w ostatnich czasach często zdarzają się prace, które pod tym względem nie spełniają tych standardów. Oczywiście znalazłem błędy stylistyczne, czy interpunkcyjne, ale ogólnie styl przekazywania wiedzy przez Autora jest rzetelny i zrozumiały.

3. MERYTORYCZNA OCENA PRACY

Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Grzędy podzielona jest na część teoretyczną i badawczą. Część teoretyczną stanowi obszerny przegląd literatury, w którym Autor scharakteryzował zagadnienia dotyczące odlewnictwa metali nieżelaznych, w tym stopy odlewnicze i metody ich odlewania. W drugiej części przeglądu literatury przedstawiono zagadnienia dotyczące akumulacji ciepła i procesu wymiany ciepła. Ostatni rozdział części teoretycznej dotyczy metod intensyfikacji wymiany ciepła w akumulatorach o złożu zmiennofazowym. Uważam, że ten rozdział powinien być zatytułowany „Analiza stanu zagadnienia”. W rozdziale tym Autor przedstawił obszerną analizę literatury (poz. literatury od 68 do 131), dotyczącą poprawy efektywności akumulatorów poprzez domieszkowanie materiału zmiennofazowego napełniaczami o wysokiej przewodności cieplnej, enkapsulację materiału zmiennofazowego, czyli zamknięcie materiału PCM w kapsułkach wykonanych z materiału o dobrej przewodności cieplnej. W analizie tej zostały przytoczone publikacje prezentujące wyniki badań dotyczących zastosowania w akumulatorach więcej niż jednego materiału zmiennofazowego, tzw. kaskada

materiałów PCM. Najwięcej miejsca w tym rozdziale Autor poświęcił zagadnieniu zastosowania przestrzennych wymienników ciepła wewnątrz złoża zmiennofazowego.

Biorąc pod uwagę tematykę rozprawy doktorskiej uważam, że część teoretyczna jest adekwatna do części badawczej. Sądzę jednak, że na zakończenie przeglądu literatury Autor powinien przedstawić ogólne wnioski, które stanowiłyby podstawę do sformułowania tezy pracy. Tymczasem w trakcie dalszej lektury rozprawy pojawia się cel pracy, a dopiero po nim teza pracy. Myślę, że powinno być odwrotnie. Autor na podstawie przeglądu literatury powinien sformułować tezę pracy, w której zakłada, że poprzez wykonanie określonych działań uzyska konkretne efekty. Tymczasem w tezie rozprawy użyte jest słowo „pozwalają”, co jest stwierdzeniem a nie założeniem. Sugerowałbym Autorowi użycie słowa „pozwolą” i teza powinna brzmieć: *„Cienkościenne odlewane struktury przestrzenne wytwarzane metodą odlewnia precyzyjnego na bazie modeli traconych wytwarzanych technikami szybkiego prototypowania opartymi na druku 3D z tworzyw sztucznych pozwolą na znaczącą poprawę warunków wymiany ciepła w zmiennofazowych i sorpcyjnych złożach systemów akumulacji ciepła”*. Dopiero teraz powinny być przedstawione cele dla udowodnienia tezy pracy. Niemniej jednak uważam, że przedstawiony w rozprawie cel jest sformułowany poprawnie i w tym względzie nie mam uwag.

Mając na uwadze warunki jakie stawiane są rozprawom doktorskim, które zostały określone w art.187 ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, uważam, że mgr inż. Jakub Grzęda w tej części rozprawy wykazał, że posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn (inżynieria mechaniczna) i tym samym rozprawa doktorska spełnia pierwszy z trzech warunków zapisanych w przytoczonej ustawie.

Zasadniczą część rozprawy, czyli badania własne otwiera rozdział *„Materiały, metody i zakres badawczy”*. W rozdziale tym dokładnie przedstawiono techniki wytwarzania metalowych struktur cienkościennych, scharakteryzowano materiały pod kątem ich doboru na wymienniki ciepła oraz przedstawiono złoża akumulacyjne. Opisano także proces doboru parametrów odlewania. Ważną częścią tego rozdziału, w aspekcie podjętej przez Autora tematyki, jest analiza mikrostruktury odlewów precyzyjnych. Efektem końcowym tego rozdziału jest opracowanie i wykonanie cienkościennych odlewanych struktur metalowych.

Po opracowaniu i wykonaniu cienkościennych struktur metalowych, zgodnie z przyjętymi standardami prowadzenia badań naukowych, w dalszej części rozprawy Autor przedstawia wyniki badań dotyczących ich wpływu na proces wymiany ciepła w akumulatorach zmiennofazowych. Badania te realizowane są w złożu PCM w skali laboratoryjnej, w aspekcie zastosowania cienkościennej struktury typu plaster miodu oraz w złożu zeolitowym. Interesującą częścią tego rozdziału są wyniki badań dotyczące hybrydowego akumulatora ciepła, w którym wykorzystano jednocześnie kilka metod magazynowania ciepła o różnych charakterystykach. Podczas lektury tego rozdziału zwraca uwagę dokładność i rzetelność opisu wykorzystywanych stanowisk badawczych prezentowanych na rysunkach 4.10, 4.19 i 4.20, 4.26 oraz 4.32 do 4.34.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają osiągnięcie założonego celu i udowodnienie tezy pracy, ponieważ opracowane przez Autora cienkościenne struktury metalowe intensyfikują proces wymiany ciepła w zmiennofazowych akumulatorach ciepła.

W ostatnim piątym rozdziale rozprawy doktorskiej przedstawione zostały wyniki badań dotyczących modelowania numerycznego procesu wymiany ciepła i chociaż wyniki tych badań mogą budzić wątpliwości, zwłaszcza w aspekcie przyjętych uproszczeń i warunków brzegowych nieuwzględniających wpływ grawitacji oraz lepkości w materiale PCM, uważam, że z naukowego punktu widzenia są bardzo ważne. Autor powinien kontynuować te badania.

Stwierdzam, że mgr inż. Jakub Grzęda wykonał solidny plan badawczy korzystając z trafnie dobranego zestawu narzędzi i metod badawczych. Jego rozprawa pod względem układu i komplementarności treści spełnia wszystkie wymagania stawiane tego typu pracom naukowym.

Podsumowując tą część recenzji stwierdzam, że szeroki plan badawczy, różnorodność zastosowanych narzędzi i metod badawczych, rzetelność prowadzonych badań dowodzą, że mgr inż. Jakub Grzęda wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, spełniając tym samym kolejny warunek stawiany rozprawom doktorskim w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*.

4. UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Lektura rozprawy mgr inż. Jakuba Grzędy była podstawą do sformułowania następujących uwag szczegółowych:

- Str.13, uwaga dotycząca nazewnictwa: skurcz skrępowany, zapewne Autor ma na myśli skurcz hamowany.
- Praca zawiera spis symboli, ale wyjaśnienie ich pod wzorami, w których są umieszczone, np. na stronie 27 wzór 1.4, itd. ułatwiłoby czytelnikowi lekturę rozprawy.
- W końcowej części analizy stanu zagadnienia Autor nie przedstawił jednoznacznie argumentów przemawiających za podjęciem tematyki rozprawy doktorskiej. Nie znajduje tu krytycznej analizy, z której wynikałaby teza pracy. Pod tezą pracy jest co prawda uzasadnienie, ale zbyt krótkie i lakoniczne.
- W pracy używane są nazwy: „metalowe struktury cienkościenne”, „inserty do intensyfikacji wymiany ciepła”, „cienkościenne wymienniki ciepła”, „struktury przestrzenne”. Należałoby to ujednoczyć.
- Str. 44, 8 wiersz od dołu, w którym podana jest grubość warstwy 0,2 mm podczas druku 3D. Pytanie: Czy były testowane inne wartości grubości?
- Str. 45, 8 wiersz od góry, w którym opisywana jest masa odlewnicza. Pytanie: Jaka to była masa (gipsowa?) i dlaczego wybrano taką masę?

- Str. 55, 2 wiersz od dołu, w którym podano grubość warstwy jak parametr wydruku 3D. Na stronie 44 podano grubość 0,2 mm, a na stronie 55 podano grubość 0,25 mm. Która wartość jest prawdziwa?
- Str. 62 i 63, na których przedstawiono analizę przyczyn występowania porowatości skurczowej w odlewach. Czy Autor mógłby dokładniej sprecyzować, co było główną przyczyną tych wad, czy zbyt wysokie przegrzanie stopu, czy zbyt duży zakres temperatur likwidus-solidus, czy może zbyt wysoka temperatura zalewania?
- Strona 66, 5 wiersz od góry, w którym podano wartości współczynnika R. Różnice w wartościach tego współczynnika w przypadku 2, 3 i 4 wariantu są na trzecim miejscu po przecinku. Jaki ma to wpływ na proporcje wody i ilość suchego składnika? Proszę to wyjaśnić.
- Str. 69, pierwszy akapit od góry, dotyczący III serii odlewów. Nie jest jednoznacznie napisane czy układ wlewowy był poprawny, czy nie? Proszę to wyjaśnić.
- Str. 71 i 72, na których przedstawiono rys.3.3. Rysunek ten powinien być na jednej stronie.
- Str. 72, tabela 3.4., w której przedstawiono skład chemiczny stopu AlSi7. Przytoczona norma dotyczy stopu AlSi7Mg0.3, potwierdza to zawartość magnezu w stopie (0,25-0,45% Mg). W związku z tym w całej pracy należałoby użyć nazwy stop AlSi7Mg0.3 zamiast AlSi7.
- Str. 73, 4 wiersz od góry, dotyczący kryształów krzemu. Czy ten stop był modyfikowany, np. sodem lub strontem? Czy też rozdrobnienie kryształów krzemu w eutektyce było efektem dużej szybkości chłodzenia?
- Str. 74, 1 akapit od góry, dotyczący chemicznej analizy liniowej. Oczywiście mowa o rentgenowskiej mikroanalizie składu chemicznego, w której określono zawartości pierwiastków w fazach międzymetalicznych. Zapis faz nie jest poprawny. Liczby w tych zapisach powinny być w indeksie dolnym.
- Str. 75, 6 wiersz od góry. Co oznacza stwierdzenie, że „Mikrostruktura w dolnej części odlewu nie budzi zastrzeżeń, jest jednorodna, zaś kryształy krzemu są rozdrobnione co przedstawiono na rys. 3.38”. Proszę to wyjaśnić.
- Str.76, 9 wiersz od dołu, dotyczący efektu obróbki cieplnej stopu AlSi7 w postaci rozdrobnienia eutektyki i fazy α . Czy to nie jest efekt modyfikacji? A jeżeli już czy nie ma to związku z szybkością chłodzenia? Proszę wyjaśnić.
- Str. 81, 2 wiersz od góry, w którym przedstawiono wzór fazy zawierającej żelazo. Jest tam błąd w zapisie tej fazy.
- Str. 85, rys.4.3 dotyczący pęknięć zmęczeniowych. Czy Autor próbował na podstawie analizy mikrostruktury ustalić przyczynę pęknięcia piany metalicznej?
- Brak pełnego opisu niektórych pozycji literatury, np. poz. 30 czy poz. 152.

Chciałbym zaznaczyć, że wymienione powyżej uwagi szczegółowe nie wpływają w istotny sposób na wartość naukową rozprawy doktorskiej, a przytoczone zostały jedynie z myślą o poprawności przyszłej działalności publikacyjnej Pana mgr. inż. Jakuba Grzędy.

5. PODSUMOWANIE

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska świadczy o predyspozycjach mgr inż. Jakuba Grzędy do prowadzenia badań naukowych, zarówno w aspekcie doboru narzędzi i metod badawczych, jak również analizy wyników badań i formułowania wniosków. Osiągnięcie celu rozprawy jakim była intensyfikacja procesu wymiany ciepła poprzez zastosowanie cienkościennych struktur metalowych w zmiennofazowych i sorpcyjnych złożach akumulatorów ciepła ma wysoki potencjał aplikacyjny. Jest to szczególnie ważne, ponieważ rozprawa doktorska spełnia trzeci warunek wynikający z ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, dotyczący stwierdzenia czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Biorąc to wszystko pod uwagę stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawie doktorskiej wynikające z przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, w zakresie stopni i tytułów nadawanych w szkolnictwie wyższym i nauce, a zwłaszcza nadawania stopnia doktora i wnioskuje o dopuszczenie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jakuba Grzędy, reprezentującej dyscyplinę budowa i eksploatacja maszyn (inżynieria mechaniczna), do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej.


.....