

Dr hab. Piotr Pawlik, Prof. PCz

Katedra Fizyki
Wydział Inżynierii Produkcji
i Technologii Materiałów
Politechnika Częstochowska

Al. Armii Krajowej 19
42-200 Częstochowa
tel.: (34) 325-01-09; tel./fax: (34) 325-07-95
e-mail: pawlik.piotr@wip.pcz.pl

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgra inż. Aleksandra Gardockiego zatytułowanej: „Magnesy trwałe o osnowie termoplastycznej wytwarzane metodą wtrysku”

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. inż. Jarosława Mizery oraz uchwały Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej

1. Tematyka pracy i jej cel

Praca doktorska przedłożona przez pana mgr inż. Aleksandra Gardockiego zawiera oryginalne wyniki badań magnesów wielobiegunowych uzyskiwanych ze stopów Nd-Fe-B, Sm-Co oraz tlenków Sr-Fe-O w osnowie polimeru termoplastycznego PA12.

Recenzowana rozprawa doktorska jest pracą wyjątkowo interesującą z punktu widzenia zastosowania przemysłowego i dotyczy niezmiernie ważnej tematyki z zakresu wytwarzania magnesów wielobiegunowych w osnowie termoplastycznej wytwarzanych metodą wtryskową. Główne zagadnienia zawarte w rozprawie związane są z określeniem korelacji pomiędzy parametrami mieszanki magnes/polimer oraz geometrią formy wtryskowej a właściwościami końcowego produktu.

Przedstawiona do recenzji praca doktorska posiada raczej klasyczny układ treści i liczy 104 strony. Składa się ona ze streszczeń w języku polskim i angielskim, wykazu oznaczeń i skrótów, spisu treści oraz pięciu rozdziałów tj: opisu technologii wytwarzania magnesów o osnowie termoplastycznej, celu pracy, oraz wyników badań orientowalności napełniacza magnetycznego i jej wpływu na właściwości użytkowe magnesów, badań

odporności termo-oksydacyjnej mieszanek magnetycznych i ich dyskusji co zostało zakończone wnioskami oraz spisem cytowanej literatury. W pierwszej części rozprawy, która zajmuje ok. 1/3 całości, Autor w sposób jasny i przejrzysty opisał technologię wytwarzania magnesów o osnowie polimerowej. W części tej Autor przedstawił wiele informacji na temat sposobów produkcji oraz zastosowań magnesów wielobiegunowych o osnowie polimerowej, wytwarzanych metodą wtryskową oraz zalety ich zastosowania w porównaniu z magnesami spiekany. Moim zdaniem ta część pracy budzi zaciekawienie czytelnika co do zawartości dalszych części pracy. Treści zawarte w tym rozdziale są właściwie dobrane i spójne z resztą rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 2. Cel pracy, Autor wskazuje, że nie istnieją w literaturze wytyczne oraz kryteria projektowania magnesów o osnowie termoplastycznej. Dlatego też najogólniej biorąc celem pracy jest próba stworzenia właśnie takich kryteriów, pozwalających na określenie parametrów procesu wytwarzania wielobiegunowych magnesów metodą wtryskową. Autor w tej części doskonale określił problem badawczy, związany z trudnościami z jakimi spotykał się w procesie technologicznym wytwarzania magnesów metodą wtryskową. Jego cele naukowe są adresowane w kierunku ich realnego rozwiązania. W rozdziale 2 Autor wyszczególnił jako cele użytkowe: (i) polepszenie właściwości użytkowych magnesów wielobiegunowych w przypadku drobnych struktur oraz trudnych do zorientowania materiałów magnetycznych dla poszerzenia ich możliwości aplikacyjnych; (ii) identyfikacja niekorzystnych reakcji między proszkiem magnetycznym a osnową polimerową oraz w trakcie wielokrotnego przetapiania; (iii) przeanalizowanie sposobów spowolnienia tych reakcji podczas przetwórstwa.

Celem naukowych pracy było wypracowanie wytycznych i kryteriów projektowania wielobiegunowych, anizotropowych magnesów o osnowie termoplastycznej o możliwie wysokich użytkowych właściwościach magnetycznych przy zastosowaniu różnych proszków magnetycznych dodawanych do osnowy polimerowej.

Podsumowując tą część pracy można stwierdzić, że jasno został określony problem badawczy i ściśle wyznaczono cele pracy, słowem kwintesencja konkretności. Postawiony problem badawczy w moim przekonaniu zawiera istotny pierwiastek nowości.

2. Wyniki badań oraz wnioski

Doktorant w zależności od celu badawczego jaki chciał osiągnąć, przygotował różne stanowiska badawcze. Należy w tym miejscu nadmienić, że wytworzenie tak zróżnicowanych

elementów form oraz układów orientujących magnetycznie materiał badawczy jest niewątpliwie bardzo kosztowne i jednocześnie wymagające od osoby podejmującej ten temat gruntownej wiedzy oraz umiejętności technicznych z wielu dziedzin.

W rozdziale 3. Badanie orientowalności napełniacza magnetycznego i jej wpływu na właściwości użytkowe magnesów, Doktorant przedstawił badania próbek płaskich orientowanych tylko w jednym kierunku i wytworzonych z zastosowaniem różnych napełniaczy magnetycznych. Na podstawie badania wartości remanencji od przyłożonego pola w gnieździe formy bez dodatkowego domagnesowania oraz po domagnesowaniu, Autor określił orientowalność cząstek w osnowie polimerowej. Tu w mojej ocenie Autor nazbyt powierzchownie objaśnił stosowaną do tego celu procedurę wyznaczania tego parametru. Przykładowo we wzorze (1) na str. 40 Doktorant używa parametru ψ – stopień namagnesowania, nie podając jak ten stopień jest określony i w jakich jednostkach. Na stronie 41 Autor natomiast pisze: „...skrajnie odmierne zachowanie można dostrzec porównując materiały SrFeO z SmCo, gdzie próbki SrFeO, pomimo znacznie niższych właściwości samego napełniacza, mają w niższych polach magnetycznych w gnieździe wyższe właściwości”. Moim zdaniem to stwierdzenie jest nazbyt daleko idące. Rzeczywiście próbki te mają wyższą remanencję, ale nic nie wiemy na temat koercji czy $(BH)_{max}$, które to parametry również determinują możliwości aplikacyjne danego magnesu. W rozdziale 3.1 brak jest pogłębionej dyskusji dlaczego orientowalność oraz remanencja tak istotnie się różnią dla próbek zawierających różne wypełniacze magnetyczne – z czego to wynika. Należy jednak podkreślić, że informacje zawarte w tym rozdziale są bardzo istotne z punktu widzenia praktycznego projektowania magnesów wytwarzanych metodą wtryskową.

W rozdziale 3.2 Autor przedstawił badania wpływu składu mieszanki magnetycznej na orientowalność próbek. Zawarł tam również informacje dotyczące wpływu rozmiarów geometrycznych (grubości) wytwarzanych elementów na wartość mierzonej remanencji. Podobnie jak w części 3.1. niezbyt wyczerpująco wyjaśniono pojęcie orientowalności. Enigmatyczne są również w moim odczuciu wzory pod rysunkiem 3.4. Ponadto na stronie 43 pojawia się „...co schematycznie przedstawiono we wzorze $\delta(H,\varphi)$ ” – nie bardzo wiem co Autor ma na myśli. Pod koniec tej strony pojawia się stwierdzenie Doktoranta: „...im więcej cząstek napełniacza jest w formowanym magnecie tym bardziej utrudnione jest ich obracanie się, ponieważ cząstki się wzajemnie blokują”. Nie mam pewności czy to na pewno jedyny powód tego zjawiska. Myślę że oddziaływanie między cząstkami magnetycznymi także może odgrywać jakąś rolę. Jednakże generalnie wnioski związane z ekonomiczną stroną produkcji magnesów są jak najbardziej poprawne. W przypadku próbek o różnych grubościach

Doktorant na str. 46 pisze: „...im większa jest grubość formowanego magnesu tym lepsza orientowalność napełniacza, przy czym efekt ten jest bardziej wyraźny przy wyższej zawartości napełniacza, gdzie efekt wzajemnego blokowania jest bardziej istotny.” Myślę, że tutaj równie istotna jest temperatura, lepkość ciekłego polimeru lub raczej zestawu wtryskanego do formy czy szybkość krystalizacji polimeru. Jak rozumiem, rozkład ciśnienia oraz gęstość materiału w formach jest podobna dla próbek o różnych grubościach. W takim wypadku wpływ blokowania się cząstek stałby się mniej istotny, gdyż mamy bardzo małe ziarna proszku magnetycznego w stosunku do rozmiarów formy. Moje wywody na ten temat są oczywiście dyskusyjne – z całą pewnością znacznie większą wiedzę na ten temat może posiadać praktyk, który na co dzień pracujący z tego typu magnesami. Czytając rozprawę doktorską odniosłem wrażenie, że w wypadku mgr inż. Aleksandra Gardockiego z kimś takim mam do czynienia.

Bardzo istotnym z punktu widzenia realizacji celów użytkowych oraz celu naukowego pracy w moim przekonaniu jest rozdział 3.3. Wpływ orientowalności na właściwości wielobiegunowych magnesów. Doktorant bardzo dobrze zaprojektował i przeprowadził eksperyment, posłużył się również symulacjami komputerowymi rozkładu pól magnetycznych wewnątrz próbek o różnych szerokościach biegunów w wielobiegunowych magnesach. Autor wykazał, że w przypadku wypełniacza Sm-Co stosowanego do wytwarzania magnesów wielobiegunowych, bieguny magnetyczne nie mogą być węższe niż 5mm. Ponadto wykazał istotny wpływ zawartości wypełniacza na wartości rozkładów namagnesowania próbki. Jedynym niedociągnięciem moim zdaniem w tym rozdziale jest brak jednoznacznej odpowiedzi na pytanie dlaczego zawartość wypełniacza wpływa na wartości mierzonych remanencji.

Na szczególną uwagę zasługuje fragment odnoszący się do wyjaśnienia wpływu zmian remanencji wraz z grubością próbek wielobiegunowych.

Na stronie 53 Doktorant przedstawił bardzo ciekawe wyniki zależności gęstości strumienia magnetycznego od składu mieszanki i szerokości biegunów magnesów o małej grubości. W jednym przypadku zastosował środek poprawiający płynięcie (jaki?), co w istotny sposób zmieniło właściwości uzyskanych magnesów wielobiegunowych. Zestawienia przedstawione na rysunkach od 3.16 do 3.20 wydają się niezwykle przydatne dla wytwórców magnesów wielobiegunowych. Istotny jest szczególnie wniosek (str. 54), że większy wpływ dodatku obserwuje się dla małych szerokości biegunów oraz dla małych grubości formowanych magnesów. Równie istotne jest stwierdzenie na str. 55, że grubość magnesu ma pozytywny wpływ na proces orientacji cząstek napełniacza, ponieważ

zwiększa się czas krystalizacji osnowy, w konsekwencji wydłuża czas orientowania się cząstek proszku w osnowie.

W rozdziale 3.4 Autor zajął się problemem magnesowania wstępnego, które miało na celu zwiększenie orientowalności cząstek napełniacza w słabych polach magnetycznych. Doktorant w prawidłowy sposób zidentyfikował problem badawczy i właściwie zaprojektował eksperyment – chyba najdroższy ze wszystkich dotychczas stosowanych. W eksperymencie stopiona mieszanka przed jej wtrysnięciem do formy została wystawiona na działanie silnego i jednorodnego pola magnetycznego, co miało na celu namagnesowanie cząstek. Autor przeprowadził dodatkowo symulacje komputerowe mające na celu określenie pól magnetycznych wewnątrz dysz usytuowanych wewnątrz cewki magnesowania wstępnego. Badania te pozwoliły na zaprojektowanie odpowiedniego kształtu dyszy stosowanej w dalszej części pracy. Uzyskane wyniki badań świadczą o tym, że magnetyzacja wstępna umożliwia wytworzenie wielobiegunowych magnesów na bazie trudno orientowalnych proszków Sm-Co z zastosowaniem segmentów magnesów spiekanych stosowanych do wytwarzania biegunów magnetycznych co jest nowością pracy.

Rozdział 3.5 Symulacje magnetyczne w moim przekonaniu jest bardzo istotny ze względu to o czym pisał Autor, tzn. że: „...umożliwiają konstruktorowi określonego układu magnetycznego zapewnienie wartości pola magnetycznego w gnieździe formy ze spodziewanym stopniem zorientowania i namagnesowania wybranej mieszanki magnetycznej w danym polu magnetycznym.” Wiedza uzyskana w wyniku przeprowadzonych symulacji w istocie pozwala rozstrzygnąć, czy w określonym przypadku uzasadnione jest zastosowanie magnetyzacji wstępnej. W rozdziale tym brakuje mi jedynie głębszego opisu metody stosowanej symulacji. Wygląda to raczej jak taka czarna skrzynka do której wrzucono parametry wstępne a ona „wyrzuciła” wynik.

Równie interesujący jest rozdział 4. Badanie odporności termo-oksydacyjnej mieszanek magnetycznych. Na wstępie tego rozdziału Doktorant zaznaczył, że „zmiany lepkości mieszanki mogą wpłynąć na zmianę orientacji co oznacza, że dla realizacji celu pracy niezbędna jest identyfikacja tych reakcji, zarówno pod względem przyczyny jak i skutków”. Autor badał wpływ różnych czynników na zachodzące reakcje w szczególności dla proszków Nd-Fe-B i Sm-Co, które z powodu swojego składu chemicznego wykazują dużą reaktywność z tlenem. Autor w tym celu badał właściwości mechaniczne materiałów o różnym składzie po różnych cyklach przetworstwa. Badania wstępne wskazały istotny wpływ liczby przetworzeń na wartości odkształcenia. W tej części pracy Autor przeprowadził badania wpływu zastosowania środków zapobiegawczych skutkom utleniania na właściwości

mechaniczne oraz mikrostrukturę magnesów. W tym celu zastosował: (i) przetwórstwo w atmosferze gazowej; (ii) pokrycie cząstek różnymi powłokami ochronnymi oraz (iii) zastosował stabilizatory oraz dezaktywatory metalu. W mojej ocenie Doktorant dobrze przygotował materiał do badań. Uzyskane wyniki wyczerpująco udowadniają istnienie pozytywnego wpływu atmosfery obojętnej podczas przetwórstwa na właściwości mechaniczne produktu. Obecność tlenu przyczynia się do obniżenia właściwości mechanicznych podczas procesu wyłaczania. Ponadto w przypadku próbek wytwarzanych a atmosferze obojętnej Autor obserwował znacznie lepszą adhezję pomiędzy ziarnami proszku i polimerem. Istotne znaczenie mają również zmiany właściwości fizycznych zastosowanego polimeru, co zostało wykazane w jasny sposób przez Autora. Doktorant wykazał również obecność zmian właściwości magnetycznych próbek (w szczególności koercji) wraz ze zwiększeniem ilości cykli przetwarzania.

W rozdziale 4.2 mgr inż. A. Gardocki opisał badania powłok ochronnych na powierzchni proszków, w celu określenia odporności na temperaturę proszków pokrytych warstwą ochronną. Doktorant zbadał adhezję powłoki stosując próbę rozciągania. Ponadto określił odporność na obciążenia ścinające podczas przetwórstwa, metodą wiskozymetrii rotacyjnej. Badania wiskozymetrii rotacyjnej wskazują na różnice w lepkości podczas próby prowadzonej w temperaturze 220°C, co może świadczyć o ograniczeniu sieciowania polimeru stanowiącego osnowę magnezu, co jest skutkiem reakcji z jonami metali tworzącymi proszek.

W pracy znalazło się wiele interesujących treści do których można zaliczyć wiele nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystanych w celu wytwarzania wielobiegunowych magnesów o jak najbardziej optymalnych właściwościach magnetycznych. Wnioski końcowe pracy są w pełni oryginalne i zostały przedstawione we właściwy sposób, to znaczy jasno, jednoznacznie i przekonująco.

Podsumowując, praca doktorska mgra inż. Aleksandra Gardockiego zawiera wiele ciekawych i przydatnych informacji, które uzyskał w wyniku przemyślanego planu badań oraz dogłębnej wiedzy w zakresie projektowania magnesów oraz konstrukcji urządzeń służących do ich wytwarzania. Dane te mogą być niezmiernie istotne dla wytwórców magnesów oraz projektantów urządzeń elektromagnetycznych wykorzystujących magnesy wielobiegunowe. Na podkreślenie zasługuje przejrzystość i konsekwencja w pisaniu i przedstawianiu przez Doktoranta zagadnień w pracy.

Należy stwierdzić, że mgr inż. Aleksander Gardocki osiągnął zamierzone cele i wykazał dojrzałość, dociekliwość i kompetencję przy ich realizacji. Pragnę podkreślić właściwy układ pracy i jej przejrzystość.

3. Uwagi do pracy

Mimo wysokiej oceny pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Gardockiego, co starałem się podkreślić w dotychczas napisanej części recenzji, pojawiły się w pracy pewne niedociągnięcia oraz błędy. Jednakże uwagi, które przedstawię nie umniejszają walorów poznawczych ani merytorycznych pracy.

Pierwsza uwaga, która jest pewnym niedociągnięciem pracy jest ograniczony przegląd piśmiennictwa. Choć rozdział 1 jest niezwykle ciekawy brakuje odniesień do literatury innej niż autora pracy. W rozdziale literatura znalazło się tylko 20 pozycji, z których 17 to prace autorstwa lub współautorstwa Doktoranta. Niewątpliwie, dorobek Doktoranta jest w tej dziedzinie bogaty, ale w przypadku materiałów magnetycznie twardych jeszcze nadal wiele się dzieje nie tylko na świecie ale również w Polsce.

Poza tą uwagą pozostałe dotyczą jedynie niedociągnięć powstałych zapewne na etapie korekty, lub też pozostawionych w wyniku niedopatrzeń. Na str. 19 linia pierwsza jest „pokrywki magnesu”, lub w trzeciej linii od końca „magnesów polimerowych”. W tym ostatnim przypadku (także na str. 32) lepiej chyba byłoby użyć pojęcia „magnesy o osnowie polimerowej”, jak to robił Autor w innych miejscach pracy.

Na str. 38 pierwsza część podrozdziału 3.1 jest powtórzeniem treści, które znalazły się na str. 37 rozdziału 3.

Na str. 49 linia druga od końca jest „Na rysunku 3.13...” a chyba powinno być „Na rysunku 3.14”.

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Mimo pewnych moich uwag, z których część, ma charakter dyskusyjny i które w żaden sposób nie umniejszają istoty treści zawartych w rozprawie doktorskiej mgr inż. Aleksandra Gardockiego, pragnę podkreślić wysoki poziom naukowy pracy. Należy zauważyć, że Autor pracy podjął aktualny temat badawczy oraz wykazał się dobrą orientacją w przedmiocie badań, a także dużym stopniem samodzielności naukowej i inwencji

badawczej. Praca doktorska jest dowodem na to, że mgr inż. A. Gardocki potrafi zaplanować i zrealizować badania naukowe przy wykorzystaniu dobrze dobranych metod badawczych. Praca ta przedstawia odpowiedni poziom naukowy i zawiera szereg nowych wartościowych rezultatów. Rozprawa doktorska stanowi oryginalny wkład do inżynierii materiałowej materiałów magnetycznie twardych. Stwierdzam przy tym, że cel pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Gardockiego został w pełni osiągnięty, a do jego realizacji użyto właściwych metod badań doświadczalnych, co zostało udokumentowane i wyrażone poprawnie sformułowanymi wnioskami.

Należy podkreślić, że część wyników prezentowanych w recenzowanej pracy doktorskiej została już opublikowana przez pana mgr inż. Aleksandra Gardockiego, który jest współautorem publikacji wydrukowanych *Kunststofftechnik WAK*, *Polymer Engineering and Science* oraz *Zeitschrift GAK Gummi Fasern Kunststoffe*. Wyniki te były również prezentowane na wielu międzynarodowych konferencjach naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Aleksandra Gardockiego zatytułowana: „Magnesy trwale o osnowie termoplastycznej wytwarzane metodą wtrysku” w pełni spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 z dnia 16 kwietnia 2003 r., poz. 595 z późn. zmianami), a w szczególności stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w zakresie dyscypliny naukowej „Inżynieria materiałowa”, a także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, wobec czego wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Aleksandra Gardockiego do publicznej dyskusji nad Jego rozprawą doktorską przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej.

Częstochowa, 10 styczeń 2020 r.

Piotr Pawlik

