

Warszawa, 13.01.2020 r.

Dr. hab. Łukasz Kilański (prof. IF PAN)  
Instytut Fizyki PAN  
al. Lotników 32/46  
02-668 Warszawa

## RECENZJA

### **Rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Gardockiego pt. „Magnesy trwale o osnowie termoplastycznej wytwarzane metodą wtrysku”**

Opracowania na zlecenia Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej na podstawie uchwały z dnia 22 lutego 2019 r. (pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej z dnia 07.11.2019 r.)

Rozprawa doktorska mgr A. Gardockiego pt. „Magnesy trwale o osnowie termoplastycznej wytwarzane metodą wtrysku” wykonana na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Marcina Leonowicza jest pracą oryginalną, która znajduje miejsce wśród aktualnych tematów poruszanych przez inżynierię materiałową. Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska podejmuje szeroko zakrojony program badań kilku wybranych rodzajów magnesów trwałych wytwarzanych w osłonie polimerowej. Praca została wykonana w oparciu o wyniki prac prowadzonych przez doktoranta w trakcie pracy w Instytucie Technologii Tworzyw Sztucznych w Erlangen, w firmie Evitron oraz w Zakładzie Materiałów Konstrukcyjnych i Funkcjonalnych Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Praca doktorska obejmuje tematykę wytwarzania oraz charakteryzacji wybranych właściwości magnetycznych magnesów trwałych otrzymanych metodą wtrysku z wykorzystaniem kilku wybranych typów proszków magnetycznych umieszczonych w osnowie poliamidowej oraz z zastosowaniem orientowania ziaren proszków zewnętrznym polem magnetycznym.

W ramach pracy doktorskiej mgr A. Gardocki przeprowadził systematyczne badania wpływu wartości natężenia pola magnetycznego oraz jego rozkładu przestrzennego w formie wtryskowej na właściwości otrzymanych w ww. formie magnesów trwałych. W szczególności Doktorant skupił się na pokazaniu wpływu i możliwości orientowania cząstek magnetycznych podczas wtryskiwania materiału do formy na końcowe parametry pracy magnesów trwałych, w szczególności na ich remanencję. Doktorant podjął także ważny problem badań wpływu procesów tzw. wstępnego magnesowania proszków poprzedzającego właściwe orientowanie polem magnetycznym na ich wynikowe właściwości magnetyczne. Doktorant pokazał również wpływ osnowy polimerowej oraz atmosfery, w której prowadzony był proces wtrysku na właściwości badanych magnesów trwałych. Uważam, iż przedstawiona



mi do recenzji rozprawa stanowi istotny wkład w rozwój zarówno tej dziedziny wiedzy, jak również konkretne zastosowania technologiczne oraz opisuje twórczy i oryginalny wkład Doktoranta w poszerzenie wiedzy dotyczącej wytwarzania metodą wtrysku orientowanych polem magnetycznym magnesów trwałych w osnowie polimerowej. Doktorant zastosował trafne podejście do metodyki badań oraz wskazał szereg istotnych właściwości badanych materiałów. Doktorant w trakcie wykonywania pracy opanował szereg metod charakteryzacji materiałów oraz wykonał szereg precyzyjnych pomiarów magnetometrycznych, co wskazuje na jego dojrzałość, jako specjalisty w dziedzinie badań właściwości magnetycznych materiałów oraz stanowi solidną podstawę do dalszego rozwoju naukowego Doktoranta już po uzyskaniu tytułu doktora nauk technicznych.

Rozprawa doktorska mgr. A. Gardockiego składa się z pięciu rozdziałów i ma klasyczny układ redakcyjny. Doktorant w rozdziale pierwszym, który należy chyba traktować, jako rozdział literaturowy, omawia technologię magnesów trwałych w osnowie termoplastycznej. Następnie w rozdziale drugim przedstawia na trzech stronach cel pracy. Rozdziały trzeci i czwarty zawierają oryginalne wyniki pracy badawczej Doktoranta. W rozdziale trzecim zebrane są wyniki badań orientowalności wybranych napełniaczy magnetycznych oraz jej wpływu na właściwości użytkowe otrzymanych magnesów trwałych. Rozdział czwarty z kolei opisuje badania odporności termo-oksydacyjnej mieszanek magnetycznych. Rozprawę doktorską kończy rozdział piąty, w którym Doktorant zawarł podsumowanie oraz sformułował szereg wniosków. Tak obrany układ pracy uważam za poprawny.

Wykaz oznaczeń zawarty w rozprawie, z pewną nonszalancją nienależną naukom ścisłym, podaje oznaczenia  $H$  oraz  $B_{\text{mod}}$  (brak pochylenia symboli), jako „pole magnetyczne...”. Nie ma takiej wielkości fizycznej jak pole magnetyczne, jest za to (poza wieloma innymi wielkościami) jego natężenie bądź indukcja. Doktorant popełnia też omyłki zapominając w wykazie oznaczeń o umieszczeniu liter w indeksach dolnych (Mn, HF?) oraz o pochylaniu tych symboli (może to prowadzić do pewnych trudności w odbiorze pracy, – ale jest to uwaga jedynie o wymiarze redakcyjnym). Oznaczenie Mn sugeruje mangan, co jest sprzeczne z ogólnymi zasadami terminologii oznaczeń. Pewien niepokój o czytelność pracy wzbudziło we mnie również umieszczenie oznaczeń związków chemicznych proszków magnetycznych w wersji skróconej.

Rozdział pierwszy pracy doktorskiej stanowi wprowadzenie do aktualnie używanych technologii produkcji magnesów trwałych. Doktorant w przekonujący sposób prowadzi wywód mający przekonać czytelnika, iż spośród wielu metod umożliwiających produkcję magnesów trwałych metoda wtryskowa jest obecnie uważana za najlepszą z szeregu powodów, których nie będę przytaczał. Niestety już w tym momencie lektury rozprawy doktorskiej można mieć pewne wątpliwości odnośnie tez stawianych przez Doktoranta. Mgr inż. A. Gardocki wymienia w tym miejscu szereg możliwych metod seryjnej produkcji magnesów trwałych oraz kończy wywód stwierdzeniem, z którym z oczywistych względów należy się zgodzić, iż jedynie metoda wtryskowa umożliwia wytwarzanie magnesów trwałych mających skomplikowane kształty. Doktorant sformułowane tezy powinien poprzeć odpowiednie stwierdzenia odnośnikami do literatury bądź opracowań statystycznych. Niestety



w całym rozdziale 1 brak jest odnośników do ścisłych danych zawartych czy to w opracowaniach statystycznych czy też literaturowych odnośnie trendów w produkcji tego typu elementów. Podstawowe pytanie, które się tutaj nasuwa odnosi się do danych ilościowych odnośnie tego, czy producenci istotnie stosują magnesy trwałe o skomplikowanych kształtach wytwarzane metodą wtryskową, czy też wybierają magnesy bądź matryce magnesów trwałych wytwarzane innymi metodami. Brakuje mi też w tym rozdziale chociażby ogólnikowych informacji odnośnie kosztów, szybkości i powtarzalności produkcji magnesów trwałych wytwarzanych metodą wtrysku (w szczególności porównania tych danych z pozostałymi metodami, które wymienia Doktorant). Takie dane, choćby bardzo ogólnikowe, pozwoliłyby czytelnikowi rozprawy na ocenę aktualnego statusu tego typu produktów. Proszę, zatem Doktoranta o uzupełnienie tych informacji w trakcie publicznej obrony pracy.

Następnie w rozdziale pierwszym rozprawy Doktorant przechodzi do opisu zalet magnesów trwałych wytwarzanych metodą wtrysku. Jest to poprawny wywód, niestety ponownie nie poparty odniesieniami do danych zewnętrznych (literaturowych bądź tych zawartych w Internecie). Moje wątpliwości budzi stwierdzenie zawarte na str. 7-8 odnoszące się do tego, iż anizotropowe magnesy trwałe wytwarzane metodami innymi aniżeli metoda wtrysku nie mogą mieć bardziej skomplikowanego rozkładu linii pola magnetycznego wewnątrz magnesu. Uważam, iż nie jest to zdanie prawdziwe i nie widzę powodu (oprócz oczywistych przyczyn technicznych, praktycznych i ekonomicznych), dla których nie można wykonać magnesu odlanego w kształcie wymuszającym odchylenie od liniowości rozkładu pola magnetycznego w jego wnętrzu. Fakt, iż aktualnie takich magnesów się nie wytwarza metodami innymi aniżeli metoda wtryskowa nie stanowi podstawy do stwierdzenia, iż nie jest to możliwe. Proszę o komentarz Doktoranta w powyższej sprawie w trakcie obrony.

Następnie Doktorant w rozdziale 1.2 przechodzi do dość wartkiego opisu kilku wybranych przykładów zastosowań magnesów trwałych w różnych urządzeniach współcześnie szeroko stosowanych. Rozdział jest napisany poprawnie i ilustrowany szeregiem rysunków. Moją jedyną wątpliwość budzi brak odniesień do literatury w przypadku części rysunków (1.1-1.4, 1.9-1.10, 1.12-1.21) co sugeruje, iż jest to oryginalna twórczość Doktoranta. Czy tak jest w istocie? Jest to uwaga marginalna, ale proszę o komentarz Doktoranta w trakcie obrony pracy. Doktorant w podrozdziale 1.3 opisuje sposób produkcji wielobiegunowych magnesów trwałych orientowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne. Jest to bardzo ważna część pracy, która w sposób zwarty oraz uporządkowany wprowadza czytelnika w tematykę. Z obowiązku Recenzenta muszę zwrócić uwagę na kilka niespójności, które w tym podrozdziale dostrzegłem. Na stronie 17 Doktorant stwierdza, iż pole magnetyczne magnesuje częściowo cząstki proszku magnetycznego, zaś cząstki te reorientują się przestrzennie zgodnie z kierunkiem linii pola magnetycznego w gnieździe. Sformułowanie to jest częściowo niezgodnie z prawdą. Po pierwsze Doktorant nie podaje informacji czy cząstki proszku magnetycznego przed procesem są namagnesowane czy też poddaje się je procesowi rozmagnesowania. Zewnętrzne pole magnetyczne cząstek, które są anizotropowe będzie wpływało na kierunki wektora namagnesowania każdej z cząstek proszku, zaś silna



anizotropia (bez wnikania w typ anizotropii magnetycznej, która będzie dominowała) cząstek proszku będzie prowadziła do reorientacji cząstek (tutaj również dokonałem dużego skrótu myślowego opisując ten proces) do kierunku łatwego magnesowania. Proszę o komentarz odnośnie tego, co Doktorant rozumie przez „częściowe magnesowanie” cząstek proszku magnetycznego. Doktorant w rozdziale pierwszym pokazuje bardzo ciekawe wyniki symulacji rozkładu pola magnetycznego wytwarzanego przez cewki w formie wtryskowej oraz opisuje w poprawny sposób ten typ procesów produkcji magnesów trwałych.

Drugi rozdział pracy mgr. inż. A. Gardockiego opisuje cel pracy. Doktorant wskazuje w tym miejscu, iż brak jest danych literaturowych wskazujących wytyczne oraz kryteria istotne w trakcie projektowania magnesów trwałych w osnowie termoplastycznej. Następnie Doktorant w przekonujący sposób wskazuje szereg kryteriów, które należy uwzględnić w trakcie ich projektowania, co dodatkowo ilustruje schematem. Następnie Doktorant definiuje szczegółowo kilka celów szczegółowych pracy:

- (i) opracowanie kryteriów technologicznych umożliwiających wytworzenie wielobiegunowych, anizotropowych magnesów trwałych o osnowie termoplastycznej, które będą cechowały wysokie właściwości użytkowe,
- (ii) identyfikacja negatywnego wpływu przetwórstwa wtryskowego powodującego reakcje chemiczne zachodzące między proszkiem magnetycznym a osnową termoplastyczną.

W trakcie opisu celów pracy Doktorant wskazuje na metodykę, która będzie prowadziła do realizacji założonych celów. Rozdział kończy wytypowanie ogólnego celu pracy, którym jest opracowanie wytycznych i kryteriów projektowania produkcji wielobiegunowych anizotropowych magnesów trwałych o osnowie termoplastycznej. Cel pracy jest w mojej opinii bardzo istotnym problemem, który wymaga wyjaśnienia. Jest to problem aktualny i podjęcie tych badań przez Doktoranta uważam za w pełni uzasadnione.

Rozdział trzeci pracy otwiera część rozprawy doktorskiej zawierającej oryginalne wyniki pracy Doktoranta. Rozdział ten rozpoczyna bardzo istotny i poprawnie napisany podrozdział motywujący oraz opisujący materiał doświadczalny, który został wybrany do badań. Doktorant opisuje w poprawny sposób różne typy proszków magnetycznych oraz możliwości ich wykorzystania. Dokonuje również świadomego wyboru kilku proszków magnetycznych oraz parametrów wypełniaczy, których będzie używał w trakcie systematycznych badań materiałowych. Jedną z niewielu uwag krytycznych, która dotyczy tego fragmentu rozprawy jest brak podpisu definiującego symbole użyte w Tabeli 3.1 – taka informacja jest konieczna celem prawidłowego zrozumienia treści tabeli przez czytelnika rozprawy (części oznaczeń użytych w tabeli 3.1 nie ma też w wykazie oznaczeń).

Następnie Doktorant przechodzi w podrozdziale 3.1 do właściwych badań orientowalności magnesów trwałych. W tym celu wykonał bardzo ciekawe i istotne procesy z wykorzystaniem stałego pola magnetycznego obecnego w formie wtryskowej oraz dodatkowego magnesowania próbek wykonanego po pierwszej serii pomiarów ich pola koercji. Wyniki zamieszczone w tym rozdziale wskazują jednoznacznie na to, iż stopień zorientowania próbek otrzymanych w przypadku proszków anizotropowych jest znacznie wyższy (dla niższych wartości natężenia/indukcji – tutaj mamy kolejny błąd – czy  $H$ , czyli zwyczajowo natężenie



pola magnetycznego w układzie SI może być wyrażane w militeslach, czy też może Doktorant stosuje mieszaną konwencję SI/CGS oraz co ma do tego strumień gęstości pola magnetycznego wyrażany w rozdziale 4 w militeslach?) aniżeli ma to miejsce w przypadku proszku izotropowego. Wyniki tutaj zebrane mają bardzo duże znaczenie technologiczne. Brak jest natomiast porównania z literaturą opisanych przez Autora wielkości – takie porównanie bądź stwierdzenie, że Doktorant zmierzył to po raz pierwszy na Świecie miałyby duże znaczenie dla podkreślenia wagi uzyskiwanych rezultatów naukowych. W tym miejscu należy niestety skrytykować absolutny brak wzmianki na temat wartości niepewności pomiaru/wyznaczenia wielkości, które opisuje Doktorant. Błąd ten jest powielany w całej rozprawie Doktorskiej. Rozdział trzeci zawiera również dużą ilość drobnych błędów redakcyjnych (np. Rys. 3.6, część czcionek tekstu jest odmienna), których nie będę wymieniał, ale stanowią one zauważalne tło w trakcie lektury rozprawy. Doktorant wykazał się w trakcie pracy umiejętnością syntezy i analizy otrzymanych danych doświadczalnych, co bardzo dobrze świadczy o jego umiejętnościach. Wnioski, które Doktorant stawia, jak również podsumowania kolejnych podrozdziałów rozdziału trzeciego są trafne i zrozumiałe.

Badania zmierzające do polepszenia właściwości magnesów wielobiegunowych Doktorant kontynuuje w rozdziale 3.2. Doktorant pokazuje szereg bardzo interesujących wyników badań wpływu składu mieszanki magnetycznej na właściwości otrzymanych magnesów. W szczególności bardzo ważne jest pokazanie możliwości orientowania materiałów, w przypadku, których należy użyć pola magnetycznego o znacznym natężeniu. Prace doświadczalne Doktorant ilustruje symulacjami magnetycznymi, które w mojej ocenie stanowią jedynie tło dla bardzo istotnej i dobrze udokumentowanej części doświadczalnej. Spodziewałbym się raczej odwrócenia układu rozprawy i pokazania rozkładów pola magnetycznego w projektach form wtryskowych przed realizacją projektów i badaniami właściwości magnetycznych. Nie ulega jednak wątpliwości, iż Doktorant opanował również szereg umiejętności związanych z wykorzystaniem gotowych pakietów oprogramowania umożliwiającego prowadzenie złożonych obliczeń modelujących zjawiska magnetyczne w ciałach stałych. Doktorant pokazał również we wnioskach do podrozdziału 3.5, iż symulacje magnetyczne, które wykonał mogą być bardzo cennym źródłem informacji prowadzących do optymalizacji szeregu parametrów konstruowanych magnesów wielobiegunowych a także urządzeń do magnetyzacji wstępnej jak i samej formy wtryskowej.

Rozdział 4 rozprawy doktorskiej zawiera oryginalne wyniki pracy Doktoranta. Rozdział ten jest poświęcony badaniom wpływu atmosfery oraz powłoki ochronnej użytych w trakcie wytwarzania magnesów wielobiegunowych na właściwości proszków magnetycznych. Doktorant pokazuje wpływ wielokrotnego przetwórstwa materiału na wynikowe właściwości strukturalne magnesu dla szeregu zmiennych parametrów produkcji tj. skład mieszanki wypełniającej czy też typ atmosfery, w której prowadzony był proces. Rozdział ten kończy analiza procesu utleniania materiału źródłowego w wysokich temperaturach. W szczególności Doktorant pokazuje wpływ obecności polimeru na utlenianie materiału oraz wskazuje sposób na opracowanie metody ochrony wytwarzanych magnesów trwałych poprzez nakładanie powłok. Rozdział ten zawiera bardzo ciekawe wyniki badań szeregu różnych właściwości

strukturalnych i optycznych materiałów. Lekturę rozdziału nieco utrudnia skrótowy opis bardzo szerokiego wachlarza technik pomiarowych, który zawiera ten rozdział. Moja ocena tego rozdziału, mimo szeregu uchybień natury redakcyjnej jest wysoka.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. A. Gardockiego jest ściśle związana z badaniami stosowanymi. Należy jednak podkreślić, iż większość wyników badań zebranych w rozprawie powinna być traktowana również, jako wartościowe wyniki naukowe. Podsumowując, moja całościowa i końcowa ocena recenzowanej rozprawy doktorskiej to ocena dobra. Wszystkie uwagi ogólne jak i szczegółowe mają głównie na celu zwrócenie uwagi Doktoranta na niedociągnięcia i niedoskonałości recenzowanej rozprawy, nie mają jednak wpływu na moją końcową pozytywną ocenę. W związku z powyższymi jednoznacznie stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr. A. Gardockiego spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim przez aktualnie obowiązujące przepisy prawa, o których mowa w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Składam, zatem wniosek do Rady Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. A. Gardockiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



.....  
(dr hab. Łukasz Kilański)