

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Leszka FRAŚ**

**pt.**

**Określenie dynamicznych właściwości materiałów magnetoreologicznych:  
badania doświadczalne i opis konstytutywny lepkoplastycznej deformacji**

wykonana na wniosek Rady Naukowej  
Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN  
z dnia 28 marca 2019 roku

### **1. Treść i zakres rozprawy**

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Leszka FRAŚ ma charakter pracy empirycznej. Podjęto w niej problematykę lepkoplastyczności wybranego materiału magnetoreologicznego (MR), poddanego zarówno oddziaływaniom pola elektromagnetycznego, jak i dynamicznego obciążenia mechanicznego. W mojej ocenie poruszona w rozprawie problematyka jest bardzo aktualna, w szczególności w świetle dużego wzrostu nowych zastosowań materiałów magnetoreologicznych obserwowanego na przestrzeni ostatnich dwóch dekad. Współcześnie ciecze, żele lub elastomery magnetoreologiczne stosowane są powszechnie w półaktywnych amortyzatorach i tłumikach, sprzęgłach czy zaworach. Pojawiają się także wzmianki o próbach zastosowania cieczy magnetoreologicznych w systemach pochłaniających energię udaru, np. w absorberach energii mechanicznej podwozi samolotów czy w warstwowych osłonach balistycznych. Rozprawa Pana mgr inż. Leszka FRAŚ bardzo dobrze wpisuje się zatem we współczesne trendy rozwojowe materiałów magnetoreologicznych. Wychodzi ona także naprzeciw zapotrzebowaniu na wyniki badań doświadczalnych, które obrazują mechanizmy rządzące lepkoplastyczną deformacją cieczy magnetoreologicznych w warunkach udarowego obciążenia, a także dostarczają cennych danych do jej konstytutywnego opisu.

Treści zawarte w rozprawie stosunkowo szeroko ujmują problematykę określoną w temacie pracy, chociaż nie ma to bezpośredniego przełożenia na objętość rozprawy.

Szerokie ujęcie tematu znajduje głównie wyraz w różnorodności i liczbie wykonanych badań doświadczalnych, których wyniki pozwoliły Doktorantowi na osiągnięcie celu pracy i udowodnienie postawionej w niej tezy. Rozprawa składa się z 9 rozdziałów, przy czym zasadnicze treści zostały zawarte w rozdziałach od 1 do 7, natomiast pozostałe rozdziały to wykaz publikacji (68 pozycji literaturowych) oraz załącznik zawierający opracowane przez Doktoranta kody komputerowe do analizy danych doświadczalnych otrzymanych za pomocą techniki dzielonego pręta Hopkinsona. Praca zajmuje 88 stron, a z wyłączeniem załącznika – 72 strony.

W rozdziale pierwszym Autor, po bardzo krótkim wprowadzeniu, przedstawił główny cel naukowy pracy, sformułował tezę oraz uzasadnił celowość i potrzebę badań dynamicznych cieczy magnetoreologicznych. Jako cel główny pracy Autor wymienił „... badania doświadczalne, analiza i opis zachowania się materiałów magnetoreologicznych pod wpływem obciążeń dynamicznych”, zaś sformułowana teza przedstawia się następująco: „Powszechnie stosowany liniowy model Bingham okazał się nieadekwatny do opisu zachowania materiałów MR w zakresie dużych prędkości odkształcenia, większych od  $10^2 \text{ s}^{-1}$  i wymaga zastąpienia go nowym modelem nieliniowym”.

Z kolei w rozdziale drugim Doktorant dokonał przeglądu literaturowego obejmującego wiedzę z zakresu właściwości fizycznych materiałów magnetoreologicznych i ich zastosowania w technice, a ponadto opracował przegląd najczęściej stosowanych związków konstytutywnych opisujących lepkoplastyczność materiałów konstrukcyjnych w warunkach deformacji zachodzącej z dużymi szybkościami odkształcenia.

W rozdziale trzecim Autor przedstawił opis własnych badań doświadczalnych mających na celu określenie mechanizmu deformacji i przebudowy mikrostruktury materiału magnetoreologicznego pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego oraz zewnętrznego obciążenia mechanicznego quasi-statycznego i dynamicznego. W rozdziale tym zawarto także opis dwóch oryginalnych metodyk badawczych. Pierwsza z nich pozwala na obserwację procesu powolnego ścinania usieciowionej cieczy magnetoreologicznej za pomocą mikroskopu optycznego, a druga na obserwację za pomocą kamery szybkiej dynamicznej deformacji modelowego materiału magnetoreologicznego składającego się z 1 mm kulek łożyskowych. Ponadto, w rozdziale tym przedstawiono wyniki badań dotyczących właściwości tłumiących badanej cieczy magnetoreologicznej w zależności od kierunku wektora pola magnetycznego.

Rozdział czwarty został poświęcony głównie badaniom mechanicznym wytypowanej cieczy magnetoreologicznej w warunkach testu dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB) dla

różnych wartości natężenia pola magnetycznego. Autor przedstawił w tym rozdziale istotę wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów za pomocą techniki Hopkinsona oraz opis metodyki i modernizacji stanowiska SHPB umożliwiającego wykonywanie testów cieczy MR. W rozdziale zawarto również wyniki quasi-statycznych badań wytrzymałościowych. Wyniki te stanowiły dane referencyjne do oceny lepkoplastyczności cieczy MR w warunkach dynamicznego odkształcenia. Natomiast opis badań doświadczalnych oraz wyznaczenie wartości modułu Kirchhoffa w funkcji natężenia pola magnetycznego to zagadnienia, które zamykają rozdział czwarty.

Z kolei w rozdziale piątym Autor omówił metodykę oraz wyniki identyfikacji parametrów (stałych) materiałowych cieczy MR modelu lepkoplastyczności Perzyny, który to model został wytypowany przez Autora jako związek konstytutywny dobrze opisujący deformację materiału MR.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie pracy, a siódmy zawiera krótką dyskusję, wnioski końcowe oraz zestawienie najważniejszych osiągnięć pracy.

## **2. Ocena merytoryczna rozprawy**

Jak już wspomniano uprzednio, tematyka pracy jest aktualna z punktu widzenia poznawczego oraz użytecznego. Jest ona także ważna dla wielu gałęzi przemysłu maszynowego, w tym przemysłu lotniczego, transportowego, zbrojeniowego czy kosmicznego, w którym materiały MR znajdują coraz szersze zastosowanie. Z tego względu uważam, że treści zawarte w rozprawie mają duże znaczenie i wnoszą istotny wkład w poszerzenie wiedzy o materiałach MR.

Mocną stroną pracy, obok wyboru tematyki pracy, są walory poznawcze zarówno w zakresie zastosowanych technik badawczych, często nowatorskich i unikatowych, jak i otrzymanych wyników badań doświadczalnych. W sumie Doktorant wykorzystał 7 różnych technik eksperymentalnych do wyznaczenia parametrów opisujących lepkoplastyczność cieczy MR firmy LORD o oznaczeniu MRF-140 CG. W 5 przypadkach badań, ich przeprowadzenie wymagało wcześniejszego zaprojektowania i wykonania nowych układów badawczych lub dokonania znaczących modyfikacji istniejących stanowisk w celu dostosowania posiadanej aparatury badawczej do testów cieczy MR. Dwa oryginalne rozwiązania oprzyrządowania pomiarowego wykorzystane w pracy były przedmiotem dwóch zgłoszeń patentowych. Osiągnięcia te świadczą o wysokich umiejętnościach praktycznych i szerokiej teoretycznej wiedzy technicznej Doktoranta.

Doktorant opracował także oryginalne metodyki badań, zgodnie z którymi przeprowadzono eksperymenty dotychczas niewykonywane w naszym kraju. Nawet w zagranicznych ośrodkach naukowych można znaleźć tylko nieliczne przykłady badań opublikowanych w ogólnie dostępnej literaturze. Przykładem takiego eksperymentu są testy dynamiczne z wykorzystaniem techniki dzielonego pręta Hopkinsona. Jest to technika powszechnie stosowana w badaniu właściwości mechanicznych materiałów inżynierskich w warunkach udarowego obciążenia. W Polsce, niestety, technika ta jest stosunkowo mało znana i tylko kilka krajowych ośrodków badawczych posiada stanowiska metody Hopkinsona, za pomocą których dokonuje się charakterystyki mechanicznej materiałów konstrukcyjnych. Dlatego uważam, że jednym z ważnych osiągnięć Doktoranta jest opracowanie układu badawczego techniki Hopkinsona umożliwiającego testy cieczy MR w różnych warunkach natężenia pola magnetycznego.

Jako badacz często wykorzystujący technikę Hopkinsona chciałbym zwrócić uwagę na szczególną złożoność problematyki badania dynamicznego cieczy MR, zaliczanych do tzw. materiałów o małej impedancji mechanicznej. Złożoność ta wynika głównie z faktu, że w przypadku tego typu materiałów bardzo trudno jest spełnić wymagania metodyczne techniki Hopkinsona, do których zalicza się m.in. zachowanie stanu równowagowego naprężenia w próbce podczas jej dynamicznej deformacji oraz stałej szybkości odkształcenia. Słowa uznania należą się więc Doktorantowi, który mimo złożoności samej techniki Hopkinsona oraz trudności technicznych i metodycznych wynikających ze specyficznych właściwości fizyko-mechanicznych badanej cieczy MR przeprowadził serię testów dynamicznych dla różnych poziomów natężenia pola magnetycznego, otrzymując oryginalne dane eksperymentalne.

Za wartościowe uznaję także wyniki badań doświadczalnych ujawniające mechanizm deformacji struktury łańcuchów ferroelementów w wyniku quasi-statycznego ścinania. Badania te zostały wykonane za pomocą nowatorskiego oprzyrządowania opracowanego przez Doktoranta i umożliwiającego obserwację procesu ścinania cieczy MR za pomocą mikroskopu optycznego.

Oryginalne z poznawczego punktu widzenia są także obserwacje wykonane na tzw. „żelowej imitacji” cieczy MR, w której zastosowano 1 mm kulki łożyskowe jako elementy aktywne na działanie pola magnetycznego. Dzięki takiemu podejściu i zastosowaniu kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych możliwa była analiza procesu deformacji i rozpadu struktury łańcuchów kulek pod wpływem uderzenia pocisku z prędkością 107 m/s.

Bardzo cenne i ważne dla opisu lepkoplastyczności badanej cieczy są także wyniki testów wykonane za pomocą nowo opracowanego stanowiska do badania absorpcji drgań cieczy MR. Doktorant, jak wnioskuję na podstawie publikacji, jest współtwórcą tego stanowiska, za pomocą którego dokonał cennego spostrzeżenia, że kierunek wektora pola magnetycznego dla przyjętych w pracy poziomów jego natężenia ma bardzo mały wpływ (mniejszy niż 5%) na anizotropię cieczy MR.

Za dobrą stronę pracy uznaję również treści związane z rozszerzeniem związku konstytutywnego Perzyny na opis lepkoplastyczności cieczy MR w polu magnetycznym. Podkreślenia wymaga fakt, że Doktorant na podstawie wyników różnych eksperymentów konsekwentnie dowodzi zasadności zastosowania modelu konstytutywnego Perzyny i wykazuje, że zachowanie materiału magnetoreologicznego najlepiej opisuje potęgowa postać funkcji nadwyżki.

Rozprawa Pana mgr inż. Leszka FRAŚ, oprócz wielu zalet, ma, niestety, także słabsze strony oraz pewne braki i nieścisłości, które wymagają szerszego omówienia.

Generalnie za najslabszą stronę rozprawy uważam zdawkowość opisu: zarówno dotyczącego przeglądu literaturowego oraz metodyki badań, jak i obejmującego prezentację otrzymanych wyników, ich analizę i interpretację.

W zasadzie Doktorant zawarł w swojej pracy wszystkie ważne dla rozprawy kwestie, ale skrótowość ich opisu rodzi – po pierwsze – niedosyt, a pod drugie – powoduje niekiedy powstawanie niejasności i nieścisłości, a niekiedy nawet wątpliwości. Przykładem tego może być ta część pracy, w której zostały zaprezentowane badania i wyniki testów dynamicznych otrzymanych za pomocą techniki Hopkinsona. O ile opis metodyki badania jest wystarczający na tyle, aby uznać, że sam eksperyment został prawidłowo przygotowany, tj. Doktorant właściwie dobrał materiał prętów i ich wymiary, zakres prędkości uderzenia pręta wymuszającego oraz wymiary próbki cieczy MR, o tyle prezentację wyników testów SHPB Doktorant ograniczył jedynie do przedstawienia końcowych rezultatów zestawionych na rys. 29, bez zamieszczania w pracy krzywych  $\sigma$ - $\epsilon$  będących podstawą do opracowania tegoż rysunku. Uważam taki zabieg za niewłaściwy, gdyż w przypadku pracy promocyjnej, a taką jest rozprawa doktorska, wskazane pozostaje udokumentowanie w pełni toku przeprowadzonych badań i analiz świadczących o poprawności sposobu rozwiązania problemu naukowego, poprawności zastosowanych technik badawczych oraz o wiedzy i umiejętnościach Doktoranta. Podobne podejście, niestety, zastosowano w przypadku quasi-statycznych badań wytrzymałościowych bez prezentacji krzywych naprężenie-odkształcenie w funkcji natężenia pola magnetycznego.

Zdawkowość opisu znajduje niekiedy swój wyraz także w niewystarczającym uzasadnieniu przyjętych założeń czy dokonanych wyborów. Za przykład może tu posłużyć problem wyboru wymiarów próbki cieczy MR zastosowanej w badaniach dynamicznych. Zagadnienie to jest kluczowe ze względu na poprawność metodyczną techniki Hopkinsona i wynikającą z tej poprawności wiarygodność otrzymanych danych doświadczalnych. Dlatego, zanim przystąpi się do wyznaczenia charakterystyk mechanicznych badanego materiału, wykonuje się serię testów z próbkami o różnych wymiarach i bada się, dla której z przyjętych geometrii próbek osiąga się zadowalający równowagowy stan naprężenia w próbce podczas jej dynamicznej deformacji. Doktorant nie przedstawił w swojej rozprawie wyników takich analiz, jednak domyślam się, że takie rozważania najprawdopodobniej przeprowadził. Świadczy o tym poprawność wyboru wymiarów próbki (długość jedynie 2 mm). Stwierdzenie to opieram na własnych doświadczeniach w badaniu materiałów charakteryzujących się także małą impedancją mechaniczną. Ponadto należy założyć, że zamieszczony w załączniku rozprawy program komputerowy do oceny stanu równowagowego naprężenia w próbce posłużył Doktorantowi prawdopodobnie do wykonania analiz, na podstawie których dokonał wyboru geometrii próbki. Brak opisu tych analiz odbija się jednak negatywnie na merytorycznej stronie rozprawy, której treść zmusza niekiedy czytelnika do snucia domysłów, a nie do pełnego zapoznania się z przebiegiem danego badania, otrzymanymi wynikami i wpływającymi z nich wnioskami.

Skrótowe i niewyczerpujące omówienie niektórych wyników badań, niekiedy bez podjęcia próby ich dogłębnej interpretacji, stanowi znaczący mankament recenzowanej rozprawy. Przykładem takiego uchybienia jest brak komentarza i niepodjęcie przez Doktoranta próby wyjaśnienia zjawisk fizycznych odpowiedzialnych za wysoką wrażliwość badanej cieczy MR na szybkość odkształcenia.

Duży niedosyt rodzi także skromny przegląd literaturowy, w którym wprawdzie wskazano pozycje literaturowe związane ściśle z problematyką pracy, ale ograniczono się niekiedy tylko do jednozdaniowego zasygnalizowania problemów w nich podejmowanych. Niekorzystnie na ocenę przeglądu literaturowego wpływa także brak omówienia modeli konstytutywnych dedykowanych cieczom MR. Wprawdzie w pracy można znaleźć wzmianki o modelu Bingham'a oraz o modelach konstytutywnych typowo stosowanych do opisu reakcji mechanicznej materiałów konstrukcyjnych (np. model Johnsona-Cooka), jednakże brak jest prezentacji innych modeli stosowanych do opisu konstytutywnego cieczy MR, np. model Crossa czy Cassona.

Struktura rozprawy zasadniczo spełnia wymagania pracy doktorskiej. Niefortunne, moim zdaniem, jest jednak usytuowanie niektórych rozdziałów lub podrozdziałów w strukturze pracy. Wydaje się, że podrozdział 4.6 dotyczący wyznaczenia modułu Kirchhoffa nie powinien wchodzić w skład rozdziału obejmującego problematykę badań wytrzymałościowych w warunkach quasi-statycznego i dynamicznego obciążenia. Niefortunnie opracowane i nazwane wydają się również rozdziały 6 – *Podsumowanie pracy* i 7 – *Dyskusja i wnioski końcowe*. W mojej ocenie najpierw powinna zostać przeprowadzona dyskusja nad otrzymanymi wynikami i wypływającymi z nich wnioskami, a dopiero później powinno nastąpić podsumowanie pracy ze wskazaniem najważniejszych osiągnięć naukowych. Ponadto, zarówno forma, jak i treści zawarte w tych rozdziałach pozostawiają wiele do życzenia.

W warstwie językowej, terminologicznej i edytorskiej rozprawa spełnia podstawowe wymagania. Niestety w pracy dostrzegłem błędy językowe oraz błędy i usterki edytorskie. W kilku przypadkach doszło do powtórzeń treści (np. na str. 19 o imitacji ferroelementów czy na str. 37 i 39 o długości i średnicy pręta odbierającego).

W rozprawie Doktorant stosunkowo często stosuje nadmierne skróty myślowe, które niekiedy pozbawiają opis dokładności właściwej dla tekstów technicznych. Na przykład na str. 39, ostatnie zdanie, użyto sformułowania: „*Tensometry przyklejono na środku pręta ...*”, podczas gdy bardziej właściwie ta część zdania powinna brzmieć: „*Tensometry przyklejono w połowie długości pręta*”. Za niepoprawny uważam także przyjęty przez Doktoranta sposób przywoływania rysunków polegający na tym, że w pierwszej kolejności prezentowany jest sam rysunek, a dopiero w akapicie pod rysunkiem następuje do niego odwołanie. W publikacjach technicznych autorzy zazwyczaj postępują w odmienny sposób. Kontrowersyjny wydaje się także format skrótu określającego rysunek z dwukropkiem po cyfrze oznaczającej numer rysunku. Z takim formatem oznaczenia rysunku spotykam się po raz pierwszy.

### **3. Kwestie do dyskusji**

Niektóre zagadnienia w recenzowanej pracy zostały, moim zdaniem, pominięte lub wydają się niejasne, budzą kontrowersje i wymagają wyjaśnienia. Poniżej zestawilem uwagi, do których Doktorant powinien się ustosunkować.

1. Jak już uprzednio wspomniałem, brak jest w rozprawie próby wyjaśnienia dotyczącego wysokiej wrażliwości badanej cieczy MR na szybkość odkształcenia.

- Czym zatem należy tłumaczyć wzrost naprężenia lepkoplastycznego płynięcia w warunkach dynamicznego odkształcenia?
2. Krzywe naprężenie-odkształcenie otrzymane na podstawie testu Hopkinsona są zazwyczaj zniekształcone przez różnego typu zaburzenia falowe. Szczególnie zniekształcenia te są wyraźne dla początkowego etapu deformacji próbki, tj. małych odkształceń. W związku z tym pojawia się problem dokładności wyznaczenia granicy plastyczności na podstawie dynamicznych krzywych ściskania. Czy zatem taki problem miał miejsce w przypadku badania cieczy MR, a jeśli tak, czy stosowano jakieś dodatkowe zabiegi mające na celu eliminację tych zniekształceń?
  3. W tabeli 2 podano wartości granicy plastyczności w funkcji prędkości odkształcenia oraz natężenia pola magnetycznego. Granicę plastyczności wyrażono w MPa z dokładnością do trzech miejsc po przecinku. Skąd potrzeba i zasadność podawania wartości granicy plastyczności z taką wysoką dokładnością?
  4. W tabeli 2 oraz na rys. 30 podano wartości prędkości odkształcenia rzędu  $10^4 \text{ s}^{-1}$ , podczas gdy w komentarzu do zawartych tam danych stwierdzono, że osiągnięty poziom prędkości odkształcenia jest rzędu  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Czy wartości zawarte w tabeli i rysunku są efektem błędu edytorskiego?
  5. Eksperyment przedstawiony w podrozdziale 3.2 przeprowadzono za pomocą specjalnie opracowanego stanowiska, którego rozwiązanie konstrukcyjne zostało dobrze opisane. Niestety, w tym opisie zabrakło informacji o sposobie generacji pola magnetycznego, a także wzmianki o wartości natężenia pola magnetycznego przyjętego w przeprowadzonym doświadczeniu.
  6. Na rys. 44 przedstawiono wykres świadczący o zgodności modelu Perzyny z potęgową funkcją nadwyżki z danymi doświadczalnymi dla natężenia pola magnetycznego 120 kA/m. Taki sam wykres został przedstawiony na rys. 34 we wcześniejszym podrozdziale. Na czym zatem polega zasadność takiego sposobu weryfikacji modelu konstytutywnego?
  7. W rozprawie zaprezentowano bardzo wiele różnych wyników badań doświadczalnych. W przypadku niektórych testów można zorientować się, na jak licznej próbie danych bazują wyniki badań (np. badania dynamiczne – tabela 2). Niestety, w wielu innych przypadkach takich informacji brak. Jaką zatem przyjmowano liczbę prób dla danych warunków eksperymentu (tzw. liczba powtórzeń) i jaką stosowano metodę obliczenia wartości parametru reprezentującego daną próbę badawczą?



#### 4. Wniosek końcowy

Pan mgr inż. Leszek FRAŚ jest Autorem rozprawy doktorskiej wnoszącej wkład w poszerzenie wiedzy o mechanizmach rządzących lepkoplastycznością materiałów magnetoreologicznych oraz rozwój metod badawczych materiałów magnetoreologicznych. Stwierdzenie to odnosi się w szczególności do badań dynamicznych w warunkach testu Hopkinsona. Pan mgr inż. Leszek FRAŚ jest najprawdopodobniej pierwszym badaczem w Polsce, który poprawnie przygotował i przeprowadził stosunkowo złożone testy cieczy MR w warunkach deformacji zachodzącej z szybkościami odkształcenia osiągającymi poziom  $3,5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ .

**Mając zatem na uwadze osiągnięcia Doktoranta wykazane w rozprawie, mimo zgłoszonych uwag i stwierdzonych błędów uważam, że rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku i wnioskuję o jej dopuszczenie do obrony publicznej.**

*Łukasz Jemioła*