

**Instytut Podstawowych Problemów Techniki  
Polskiej Akademii Nauk**

**ROZPRAWA DOKTORSKA**

**mgr inż. Leszek Frańś**

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

**Promotor:**

**prof. dr hab. inż. Ryszard Pęcherski**

**Promotor pomocniczy:**

**dr inż. Dariusz Jarząbek**

**WARSZAWA 2019**

Chciałbym złożyć serdeczne podziękowania Panu dr inż. Piotrowi Pawłowskiemu za nieocenioną pomoc w trakcie realizowania prac doświadczalnych.

Bardzo dziękuję Panu dr hab. Zdzisławowi Nowakowi za cierpliwość w tłumaczeniu zawłości występujących w równaniach konstytutywnych praw materiałowych.

Szczególnie chciałbym podziękować promotorom, Panu prof. Ryszardowi Pęcherskiemu oraz Panu dr inż. Dariuszowi Jarząbkowi za wprowadzenie w tematykę badania materiałów, cenne wskazówki oraz pomoc i cierpliwość w trakcie tworzenia i redagowania rozprawy.

# Spis treści

1	Wstęp.....	5
1.1	Wprowadzenie.....	5
1.2	Cel, teza i zakres pracy .....	5
1.3	Zawartość pracy .....	7
2	Przegląd literatury dotyczącej tematu rozprawy .....	8
2.1	Charakterystyka materiału magnetoreologicznego.....	8
2.2	Literatura związana z tematyką rozprawy.....	9
2.3	Przegląd modeli stosowanych do opisu lepkoplastycznej deformacji .....	11
2.3.1	Model Johnsona – Cooka .....	12
2.3.2	Model Rusinka – Klepaczko.....	12
2.3.3	Model Zerilliego – Armstronga .....	13
2.3.4	Model Bodnera – Partoma.....	13
3	Deformacja mikrostruktury .....	15
3.1	Ilustracja tworzenia struktury szkieletowej.....	15
3.2	Zachowanie materiału magnetoreologicznego <i>in situ</i> w czasie deformacji w warunkach obciążeń quasi-statycznych.....	16
3.3	Odształcenia pod wpływem obciążeń dynamicznych.....	19
3.4	Wpływ tłumienia drgań w materiale magnetoreologicznym a kierunek wektora pola magnetycznego .....	22
3.5	Zachowanie ferroelementów w trakcie reorganizacji struktury szkieletu.....	26
4	Stanowisko badawcze do badań quasi-statycznych oraz dynamicznych, realizacja i wyniki doświadczalne.....	29
4.1	Opis stanowiska do badań quasi - statycznych.....	29
4.2	Wyniki badań quasi-statycznych.....	33
4.3	Stanowisko do badań dynamicznych.....	36
4.4	Przebieg eksperymentu .....	39
4.5	Wyniki testów dynamicznych .....	44
4.6	Wyznaczenie modułu Kirchhoffa .....	46
5	Adaptacja modelu lepkoplastycznego Perzyny do opisu dynamicznej deformacji.....	48
5.1	Model lepkoplastyczny Perzyny.....	48
5.2	Uogólnienie lepkoplastycznego prawa Perzyny do opisu deformacji w polu magnetycznym.....	50
5.3	Metoda identyfikacji parametrów modelu Perzyny z potęgową funkcją nadwyżki ....	52
5.4	Wyniki identyfikacji parametrów modelu Perzyny z eksponencjalną funkcją nadwyżki	57
5.5	Wyniki identyfikacji parametrów modelu Perzyny z liniową funkcją nadwyżki.....	59
5.6	Weryfikacja Prawa Perzyny o potęgowej funkcji nadwyżki.....	62
6	Podsumowanie pracy.....	64

7	Dyskusja i wnioski końcowe .....	65
8	Literatura .....	67
9	Załączniki .....	73
9.1	Program do obliczeń wyników przy użyciu dzielonego pręta Hopkinsona .....	73
9.2	Program do obliczeń równowagi naprężenia w badanym materiale przy użyciu dzielonego pręta Hopkinsona .....	76
9.2.1	Interfejs graficzny .....	76
9.2.2	Kod oprogramowania.....	76



## **Streszczenie**

Rozprawa doktorska poświęcona jest określeniu zachowania materiału magnetoreologicznego (MR) poddanego dynamicznym obciążeniom. W pracy zawarto mikroskopowe obserwacje deformacji materiału, na podstawie których zidentyfikowano mechanizm postępowania deformacji jako oparty na hierarchicznych, postępujących po sobie fragmentacjach łańcuchów ferroelementów. Badania doświadczalne poświęcono także identyfikacji lepkoplastycznego prawa Perzyny zaadaptowanego do opisu zachowania materiału. Dynamiczne obciążenia dla szerokiego zakresu prędkości odkształceń uzyskano na oryginalnie zbudowanym stanowisku ze specjalnie zmodyfikowanym dzielonym pręcie Hopkinsona. Korzystając również z testów przy prędkościach quasi-statycznych rozszerzono prawo Perzyny o opis lepkoplastycznej deformacji MR w polu magnetycznym. Identyfikację prawa Perzyny dokonano dla potęgowej, eksponencjalnej a także liniowej funkcji nadwyżki. W wyniku porównania zidentyfikowanego równania konstytutywnego z wynikami doświadczalnymi, wykazano, że najlepiej zachowanie materiału magnetoreologicznego oddaje potęgowa postać funkcji nadwyżki.

## **Abstract**

The presented dissertation identifies mechanisms of microstructure displacement and viscoplastic behaviour of a magnetorheological material under dynamic loadings. The description of the material displacement is based on microscopic observation and also on the imitation of the material. The mechanism responsible for rearrangement of ferroelements in the tested materials is based on increasing, in a hierarchic order displacement of their chains. To elaborate the constitutive equation of the observed viscoplastic behaviour, the magnetorheological material is tested at quasi-static and high strain rate. The experiment results presenting behaviour of the MR material under dynamic loadings are obtained using the modified Split Hopkinson Pressure Bar technique. A standard laboratory set-up was complemented by specially designed electromagnetic coil, additionally the transmitted bar was replaced by a pipe in order to increase the transmission of elastic waves. The obtained results are used to formulate the Perzyna material law adopted to materials working in magnetic condition. To describe better the material behaviour, the three excess stress function – a linear, power and exponent formulations are considered. A comparison between fittings provided by these functions shows that use of the power excess stress function is the most suitable formulation applied to the material behaviour of the tested MR material.

# 1 Wstęp

## 1.1 Wprowadzenie

Materiały magnetoreologiczne (MR) są materiałami funkcjonalnymi, które stanowią koloidalną zawiesinę ferroelementów (tlenku lub węgliku żelaza) w płynie (najczęściej oleju mineralnym) będącym ich nośnikiem [Milecki 2010]. Właściwości reologiczne tego typu materiałów zmieniają się pod wpływem pola magnetycznego. Właściwości mechaniczne materiałów magnetoreologicznych są dobrze znane w zakresie procesów quasi-statycznych, [Milecki 2010], [Yongbo et al. 2009]. Jednakże ich zachowanie pod wpływem obciążeń dynamicznych nie jest dokładnie zbadane doświadczalnie, brakuje też adekwatnego opisu konstytutywnego.

## 1.2 Cel, teza i zakres pracy

Celem pracy są badania doświadczalne, analiza oraz opis zachowania materiału MR pod wpływem obciążeń dynamicznych. Zastosowano przy tym teorię lepkoplastyczności Perzyny, [Perzyna 1963, Perzyna 1966], adaptując ją do opisu materiałów MR w zależności od pola magnetycznego. Badania mają na celu opis zachowania materiałów MR w warunkach quasi-statycznych i dynamicznych w procesie ściskania. Aby wykonać te badania zbudowano własne stanowisko badawcze z zaprojektowanym specjalnie dla próbek MR uchwytem [Frąś et al. zgłoszenie patentowe 424702].

Na podstawie studiów literatury oraz własnych badań doświadczalnych można sformułować tezę pracy, która może być przedstawiona w następujący sposób.

Powszechnie stosowany liniowy model Bingham [Bingham 1916] okazuje 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.

Teza ta została w pełni wykazana dzięki przeprowadzeniu własnych badań doświadczalnych, których wyniki posłużyły do identyfikacji nieliniowej funkcji nadwyżki w modelu lepkoplastyczności Perzyny.

Ważnym problemem, który pojawia się przy formułowaniu nowego opisu konstytutywnego deformacji materiału jest identyfikacja nowych mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za przegrupowanie ferroelementów i tworzenie łańcuchów cząstek (warkoczy), które mają wpływ na wyraźne podwyższenie granicy plastyczności [Quoc-Hung and Seung-Bok, 2012], [Yangguang et al. 2013]. Identyfikacja ta wymaga opracowania nowej metodyki obserwacji mikrostruktury materiału magnetoreologicznego pod mikroskopem optycznym. Oryginalne rozwiązania techniczne niezbędne do wykonania tych obserwacji mikroskopowych opisane zostały w zgłoszeniach patentowych [Frąś et al. zgłoszenie patentowe 424702]. Studia wyników obserwacji mikroskopowych prowadzą do spostrzeżenia, że deformacja materiału MR generowana jest przez hierarchiczny, wieloskalowy system pasm ścinania. Udział pasm ścinania w prędkości odkształcenia, [Pęcherski 1998a, 1998b] ma podstawowe znaczenie w teoretycznym opisie zachowania materiału.

Jedną z głównych metod badania zachowania materiałów w zakresie dużych prędkości odkształceń są testy z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona, [Hopkinson 1914], [Kolsky 1949], [Klepaczko 2007]. Istniejące w Laboratorium Zakładu Teorii Ośrodków Ciągłych i Nanostruktur IPPT PAN stanowisko do badań dynamicznych zostało odpowiednio zmodyfikowane, aby zanalizować zachowanie materiałów magnetoreologicznych, których moduł Younga jest dużo mniejszy w porównaniu z badanymi dotychczas materiałami metalicznymi, [Frąś 2015, Frąś, Pęcherski 2018]. W tym celu zastosowano pręty aluminiowe [Wang 2016], zmieniono także długość pocisku, jak również zastosowano jako pręt odbierający zaślepioną aluminiową rurkę [Chen et al. 1999]. W celu wygenerowania pola magnetycznego użyto cewkę elektromagnetyczną. W wyniku testów dynamicznych, uzyskano zależności: wartość granicy plastyczności - prędkość odkształcenia w relacji do pola magnetycznego. Umożliwiło to zidentyfikowanie modelu lepkoplastyczności Perzyny [Perzyna 1963] dla materiałów MR. Badania z udziałem dzielonego pręta Hopkinsona pozwoliły przedstawić zachowanie materiału w zakresie prędkości odkształcenia  $10^2 \text{ s}^{-1}$  -  $10^4 \text{ s}^{-1}$ . Próby dla niższych prędkości odkształcenia, tzw. quasi-statyczne przeprowadzono przy użyciu maszyny wytrzymałościowej firmy MTS.

### 1.3 Zawartość pracy

Rozdział pierwszy przedstawia wprowadzenie do pracy - sformułowanie celu i tezy pracy oraz krótkie przedstawienie problematyki rozprawy doktorskiej.

Rozdział drugi dotyczy opisu cieczy magnetoreologicznej i stosowanych w technice modeli materiałów MR. Przedstawiono również studium literatury oraz przytoczono najbardziej popularne modele lepkoplastyczności wykorzystywane do opisu materiałów wrażliwych na prędkość odkształcenia.

Rozdział trzeci przedstawia doświadczalne badania z zakresu deformacji oraz przebudowy mikrostruktury materiału magnetoreologicznego. Omówiono nowy pomysł i własne rozwiązania konstrukcyjne nowego stanowiska do badań mikrostruktury.

Rozdział czwarty przedstawia ideę własnego stanowiska badawczego z dzielonym prętem Hopkinsona. Zawarto także wyniki eksperymentalne związane z badaniami materiału w zakresie quasi-statycznych oraz dynamicznych obciążeń.

Rozdział piąty ukazuje metodykę oraz wyniki identyfikacji parametrów modelu lepkoplastyczności Perzyny, który dzięki uniwersalności nieliniowej funkcji nadwyżki został przyjęty do sformułowania nowego konstytutywnego opisu deformacji materiału MR.

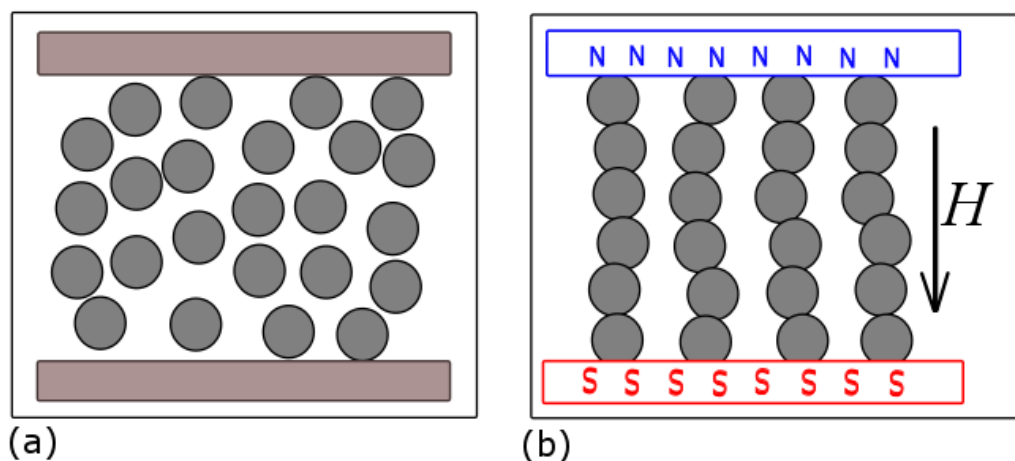
Rozdział szósty jest podsumowaniem pracy, w siódmym rozdziale zawarto dyskusję i wnioski końcowe, a w ósmym zebrano literaturę cytowaną w pracy. Na zakończenie podano załączniki w formie wydruku z programami w języku MATLAB.

## 2 Przegląd literatury dotyczącej tematu rozprawy

### 2.1 Charakterystyka materiału magnetoreologicznego

Materiał magnetoreologiczny jest koloidalną zawiesiną sferoidalnych ferroelementów w cieczy nośnej. Elementy, reagujące na pole magnetyczne - ferroelementy, wykonane są z węgla żelaza. Średnica ich jest mniejsza niż  $5\mu\text{m}$ . Reagujące na pole magnetyczne sferoidalne cząsteczki otoczone są silikonową otoczką, która ma zapobiegać trwałemu agregowaniu się w większe skupiska. Ciecz nośna odpowiada za swobodne przemieszczanie cząstek przy braku wpływu pola magnetycznego. Za ciecz nośną stosowany jest najczęściej olej mineralny lub silikonowy.

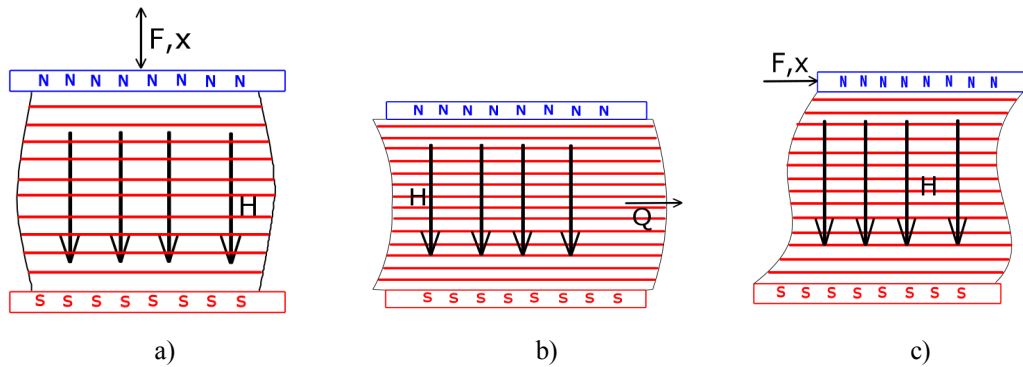
Do badań wykorzystano materiał magnetoreologiczny firmy LORD MRF - 140CG, zawierający 85,44% masowego udziału cząstek reagujących na pole magnetyczne. Aktywne w polu magnetycznym ferroelementy łączą się w układ przestrzenny zbudowany z pojedynczych cząstek, tworząc łańcuchy (spotykana jest też nazwa warkocze) wzdłuż linii działającego pola magnetycznego.



Rys 1: Ciecz magnetoreologiczna, a) w stanie swobodnym, b) w polu magnetycznym.

Rys 1 przedstawia graficzną interpretację, fizycznego zachowania materiału magnetoreologicznego. W stanie swobodnym, bez wpływu pola magnetycznego ferroelementy są losowo rozlokowane w cieczy nośnej. W wyniku działania pola magnetycznego, ferroelementy tworzą przestrzenną strukturę materiału na bazie łańcuchów. Przedstawiony schemat działania pola magnetycznego na zachowanie MR

jest podstawą do wielu zastosowań technicznych. Przykłady idei zastosowań przedstawiono na Rys 2.



Rys 2: Idea wykorzystania cieczy MR, a) schemat swobodnego ściskania lub rozciągania, b) schemat zaworu, c) schemat sprzęgła.

Rys 2 przedstawia schematycznie trzy podstawowe idee wykorzystania materiału magnetoreologicznego w polu magnetycznym o wartości natężenia  $H$  oraz pod wpływem siły zewnętrznej  $F$  [Milecki 2010]. Pierwszy z nich przedstawia zjawiska zachodzące w trakcie swobodnego ściskania bądź rozciągania warstwy materiału magnetoreologicznego (Rys 1). Model zaworowy (Rys 2b) opisuje zachowanie materiału w czasie przepływu  $Q$ . Ostatni schemat, (Rys 2c) przedstawia model sprzęgłowy który ilustruje zachowanie w trakcie przesuwania biegunów pola magnetycznego względem siebie z warstwą materiału magnetoreologicznego między nimi.

## 2.2 Literatura związana z tematyką rozprawy

Opisowi zachowania materiału magnetoreologicznego, jako cieczy poświęcona jest praca [Rosensweig 1985]. Autor przedstawia ruch ferroelementów w cieczy nośnej w obecności pola magnetycznego. Należy także wspomnieć o opisie sił między pojedynczymi cząstkami reagującymi na działanie pola magnetycznego – problematykę tą omawiał [Harpavat 1974]. Autor nie skupił się jednak nad opisem materiału magnetoreologicznego bazującego na cieczy nośnej, lecz na interakcji pomiędzy cząsteczkami w polu magnetycznym. Oddziaływania między elementami struktury materiału magnetoreologicznego, którego deformacja przebiega w polu magnetycznym,

są opisane przy pomocy tensora naprężenia Maxwella oraz tensora naprężenia Cauchy'ego [Tang, Conrad 2000] i [Kang et al. 2008]. Sformułowanie opisu deformacji materiału magnetoreologicznego bazującego na mniej rozbudowanym opisie matematycznym można znaleźć w [Jolly et al. 1996]. Został tam przedstawiony opis deformacji struktury na bazie oddziaływań momentu dipolowego pomiędzy poszczególnymi cząstkami. Badania nad anizotropią materiału magnetoreologicznego przedstawił [Dohmen et al. 2017]. W pracy [Frąś et al. 2018] wykazano, że w zakresie wartości natężenia pola, które są rozważane w pracy wpływ anizotropii jest niewielki. Uzasadnia to przyjęcie założenia, że materiał MR może być opisywany przy pomocy zmodyfikowanego modelu lepkoplastyczności Perzyny w sformułowaniu dla materiału izotropowego.

Materiały magnetoreologiczne są popularnie stosowane w technice jako materiały tłumiące drgania i absorbujące uderzenia. Wyniki związane z badaniem lepkoplastycznego zachowania materiałów w tłumikach drgań przedstawił [Bajkowski, Skalski 2012] oraz [Skalski, Zalewski 2014]. Materiały magnetoreologiczne w konstrukcji absorberów uderzeń wykorzystali [Holnicki-Szulc et al. 2009]. W tej sferze można znaleźć szerokie zastosowania techniczne, od wykorzystania w medycynie jako aktywna część ortopedycznej protezy dla stawu kolanowego [Zite et al. 2006], w fotelach maszyn roboczych [Kolek, Rosół 2007], czy też elementy zawieszenia samochodów [Jastrzębski, Sapiński 2017] lub element budowy pralki automatycznej [Spelta et al. 2009]. Zastosowanie materiału magnetoreologicznego do wygładzania warstwy wierzchniej elementów ceramicznych zaproponował [Dong-Woo et al. 2009]. Opisano też wykorzystanie materiałów magnetoreologicznych jako warstwy zapobiegającej perforacji pancerza przedstawioną w [Olszewska et al. 2013]. W szerszym ujęciu, dyskusję o materiał MR jako materiały wrażliwe na prędkość odkształcenia [Pacek et al. 2016], [Mossakovsky et al. 2017]. Wykorzystuje się także materiały magnetoreologiczne jako składniki do budowy funkcjonalnych kompozytów. Na przykład, omówienie ich zastosowań jako wypełnienia struktur komórkowych, lub również jako dodatków do elastomerów przedstawił w pozycji książkowej [Kaleta 2013].

Dzielony pręt Hopkinsona jest powszechnie stosowanym narzędziem badawczym do testowania materiałów przy dużych prędkościach odkształcenia. Metodę badań materiałów w zakresie dużych prędkości opracowali [Hopkinson 1914] oraz [Kolsky 1949]. Wyczerpujący opis technik badawczych w warunkach dynamicznego obciążenia

materiałów przedstawili [Klepaczko 2007] oraz [Chen, Song 2011] jak również [Janiszewski 2012]. Przytoczone pozycje książkowe omawiają także sposoby badań dynamicznych materiałów niemetalicznych. Wykorzystanie dzielonego pręta Hopkinsona do polimerów przedstawiono w [Siviour, Jordan 2016]. Wyniki związane z badaniem materiałów nazywanych „miękkimi” przedstawił [Chen 2016]. Autor skupił się nad tematyką dyspersji fali sprężystej w miękkich materiałach jak również nad opisem deformacji w trakcie dynamicznych obciążeń. Opis dynamicznych badań teflonu przedstawili [Tasdemirci et al. 2012]. Autorzy wykorzystali do rejestracji propagujących się fal sprężystych w dzielonym pręcie Hopkinsona czujniki piezoelektryczne wraz z tradycyjnymi tensometrami. Doświadczalne prace, związane z testowaniem materiałów w polu magnetycznym w zakresie dużych prędkości odkształcenia przedstawiono w [Wang 2016] oraz [Liao 2013]. Badania elastomerów gumowych z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona, przy użyciu prętów aluminiowych oraz polimerowych przedstawili [Baranowski et al. 2017]. W badaniach dynamicznych, kiedy występuje słaba transmisja sygnału między prętami [Chen et al. 1999] zaproponowali zamianę pełnego aluminiowego pręta odbierającego na zaślepioną od strony testowanego materiału rurkę. Sytuacja taka, ze względu na dyssypacyjne właściwości materiału w trakcie transmisji sygnału, występuje przy badaniu materiałów MR.

Wyznaczenie granicy plastyczności w zakresie quasi-statycznych oraz dynamicznych prędkości odkształcenia umożliwi tworzenie modelu konstytutywnego materiału lepkoplastycznego. W pracach [Jankowiak et al. 2011], [Church et al. 2014] zastosowano symulacje numeryczne procesu dynamicznego zachodzącego w czasie próby z dzielonym prętym Hopkinsona w celu pełnej identyfikacji modelu konstytutywnego materiału. Wykorzystanie technik doświadczalnych do budowy modelu Johnsona-Cooka przedstawił [Jutras 2008].

### **2.3 Przegląd modeli stosowanych do opisu lepkoplastycznej deformacji**

Oprócz omawianego obszernie w pracy modelu Perzyny, któremu poświęcono więcej uwagi w piątym rozdziale, zostaną skrótowo przedstawione inne modele lepkoplastyczności znane w literaturze.



### 2.3.1 Model Johnsona – Cooka

Zależność dla dynamicznej granicy plastyczności można przedstawić, wykorzystując iloczynową postać równania konstytutywnego, wyrażoną przez funkcję odkształcenia, prędkości odkształcenia i temperatury [Johnson, Cook 1983]. Model Johnsona – Cooka opisuje materiał lepkoplastyczny poddany dużym odkształceniom i prędkościom odkształcenia z uwzględnieniem zmian temperatury.

$$1) \quad \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right)$$

Gdzie:

- $A$  - granica plastyczności dla parametrów odniesienia: temperatury  $T_R$  i prędkości odkształcenia  $\dot{\varepsilon}_0$ ,
- $B, n$  - współczynniki umocnienia odkształceniowego
- $C$  - współczynniki umocnienia dynamicznego,
- $T_M$  - temperatura topnienia

W wybranych przypadkach, można przedstawić prawo Johnsona-Cooka, w którym zależność naprężenia plastycznego od prędkości odkształcenia ma charakter potęgowej:

$$2) \quad \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^c \left( 1 - \left( \frac{T - T_R}{T_M - T_R} \right)^m \right)$$

Potęgowa postać modelu Johnsona – Cooka pozwala na alternatywny opis wpływu prędkości odkształcenia.

### 2.3.2 Model Rusinka – Klepaczko

Zmiany w materiałach w wyniku dynamicznych obciążeń wymagają opisu zmian właściwości mechanicznych. Model zaproponowany przez [Rusinek A., Klepaczko J., 2001] można rozłożyć na sumę trzech składników: naprężenia wewnętrznego, naprężenia efektywnego, naprężenia charakterystycznego. Uwzględnienie termicznego osłabienia materiału oraz zależności naprężenia wewnętrznego od odkształcenia, prędkości odkształcenia oraz temperatury jest spowodowane zależnością modułu Younga od

temperatury. Model Rusinka i Klepaczki zawiera naprężenie efektywne uwzględniające sprzężone zależności prędkości deformacji i temperatury:

$$3) \quad \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = \frac{E(T)}{E_0} [\sigma_\mu(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) + \sigma^*(\dot{\bar{\varepsilon}}_p, T)] + \bar{\sigma}_{vs}(\dot{\bar{\varepsilon}}),$$

gdzie:

- $\sigma_\mu$  - naprężenie wewnętrzne
- $\sigma^*$  - naprężenie efektywne
- $\bar{\sigma}_{vs}$  - naprężenie charakterystyczne
- $T$  - temperatura

### 2.3.3 Model Zerilliego – Armstronga

Model konstytutywny, zależny od rodzaju sieci krystalicznej został stworzony przez Zerilliego i Armstronga [Zerilli, Armstrong 1987]. Dla materiału o sieci przestrzennie centrowanej (ang. body centered cubic – bcc) model przybiera postać addytywną:

$$4) \quad \sigma = c_0 + B_0 e^{-(\beta_0 + \beta_1 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})T} + K \varepsilon^n$$

W przypadku materiałów o strukturze sieci krystalicznej płasko centrowanej (ang. face centered cubic – fcc) model przyjmuje postać multiplikatywną:

$$5) \quad \sigma = c_0 + B_0 \varepsilon^n e^{-(\beta_0 + \beta_1 \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})T}$$

Gdzie:

- $c_0, B_0, \beta_0, \beta_1, K, n$  - współczynniki materiałowe
- $\dot{\varepsilon}_0$  – prędkość odkształcenia jako wartość odniesienia

### 2.3.4 Model Bodnera – Partoma

Prawo zaproponowane przez Bodnera - Partoma pozwala na opisanie lepkoplastycznego zachowania materiałów bez odwołania się do powierzchni plastyczności [Bodner, Partom 1972, 1975]:

$$6) \quad \dot{\varepsilon}^{ij} = \frac{3}{2} \dot{p} \frac{\sigma^{ij}}{J(\sigma^{ij})}$$

W modelu materiałowym, Bodnera–Partoma prędkość odkształcenia plastycznego może być wyrażone na dwa sposoby:

$$7) \quad \dot{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{Z}{J(\sigma^{ij})} \right)^{2n} \frac{n+1}{n} \right]$$

lub:

$$8) \quad \dot{p} = \frac{2}{\sqrt{3}} D_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{Z}{J(\sigma^{ij})} \right)^{2n} \right]$$

w obu przypadkach, Z jest funkcją wzmocnienia:

$$9) \quad Z = R + D$$

gdzie R oznacza wzmocnienie izotropowe i wyznaczone jest z zależności:

$$10) \quad R = R_1 [1 - \exp(-m_1 W^I)] + R_0 (-m_1 W^I)$$

a wzmocnienie kinematyczne:

$$11) \quad D = \sqrt{\frac{2}{3}} X \operatorname{sgn}(\sigma)$$

gdzie:

$$12) \quad X = \sqrt{\frac{2}{3}} X_1 \operatorname{sgn}(\sigma) [1 - \exp(-m_1 W^I)]$$

oraz:

$$13) \quad \dot{W}^I = \sigma \dot{\varepsilon}^I$$

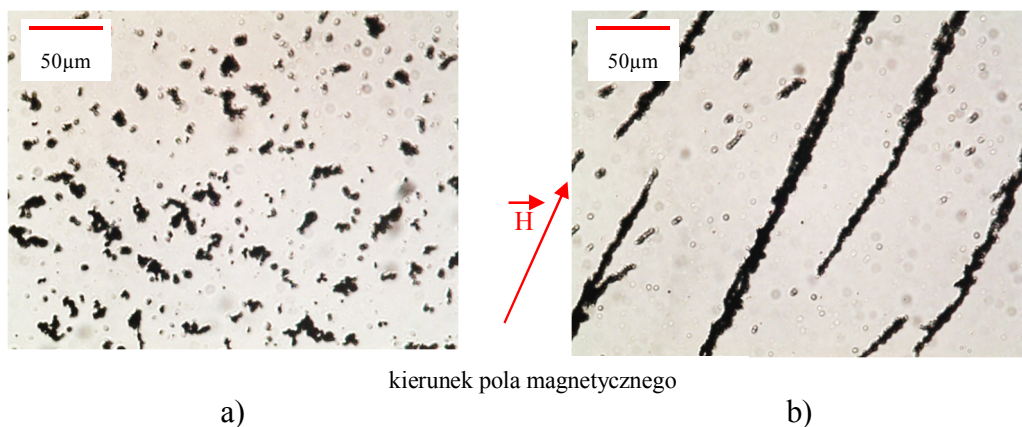
Stałe materiałowe przedstawione we wzorach oznaczają:

- $D_0$  - graniczna wartość prędkości odkształcenia plastycznego,
- $R_0$  - początkowa wartość wzmocnienia izotropowego
- $R_1$  - wartość saturacji R,
- $m_1, m_2$  - prędkość wzmocnienia
- $n$  - parametr lepkości
- $\dot{\varepsilon}^{ij}$  - dewiator tensora prędkości odkształcenia
- $\sigma^{ij}$  - dewiator tensora naprężenia
- $J(\sigma^{ij})$  - drugi niezmiennik dewiatora naprężenia

### 3 Deformacja mikrostruktury

#### 3.1 Ilustracja tworzenia struktury szkieletowej

Do badań wykorzystano materiał magnetoreologiczny firmy LORD o nazwie MRF-140CG. Materiał ten zawiera 84% masowego udziału cząstek. Cząstki te, w wyniku działania pola magnetycznego tworzą strukturę ciała stałego. Polega to na tym, że aktywne magnetycznie ferroelementy łączą się w układ przestrzenny, tworząc z pojedynczych cząsteczek łańcuchy (spotykana jest też nazwa warkocze) wzdłuż linii działającego pola magnetycznego.



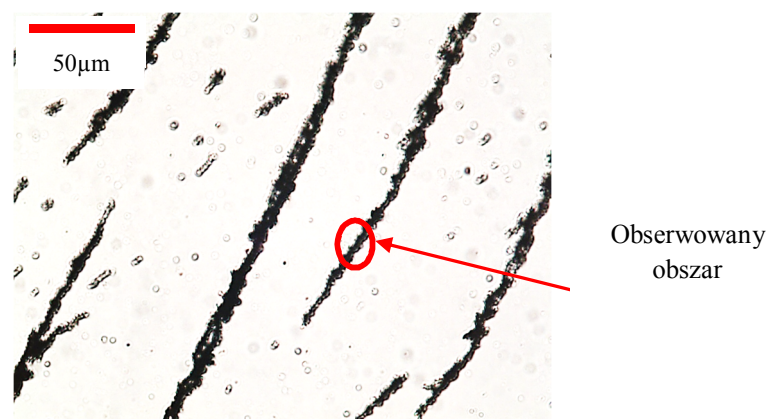
Rys 3: Zdjęcie materiału magnetoreologicznego z mikroskopu optycznego firmy Huwitez, a) materiał w stanie swobodnym b) materiał pod wpływem działania pola magnetycznego.

Rys 3 przedstawia wyniki własnych obserwacji mikroskopowych z zastosowaniem mikroskopu optycznego firmy Huwitez. W celu wykonania zdjęcia, materiał magnetoreologiczny LORD MRF-140 CG został w znacznym stopniu rozcieńczony olejem mineralnym. W wyniku tego uzyskano materiał zawierający większą ilość cieczy nośnej względem ferroelementów co umożliwiło obserwację oraz zdjęcia o lepszej jakości. Rys 3a przedstawia swobodnie rozlokowane ferroelementy bez wpływu pola magnetycznego. W wyniku działania pola magnetycznego, luźno rozlokowane ferroelementy łączą się w zbudowane z łańcuchów (warkoczy) struktury przestrzenne, Rys 3b.

### 3.2 Zachowanie materiału magnetoreologicznego *in situ* w czasie deformacji w warunkach obciążeń quasi-statycznych

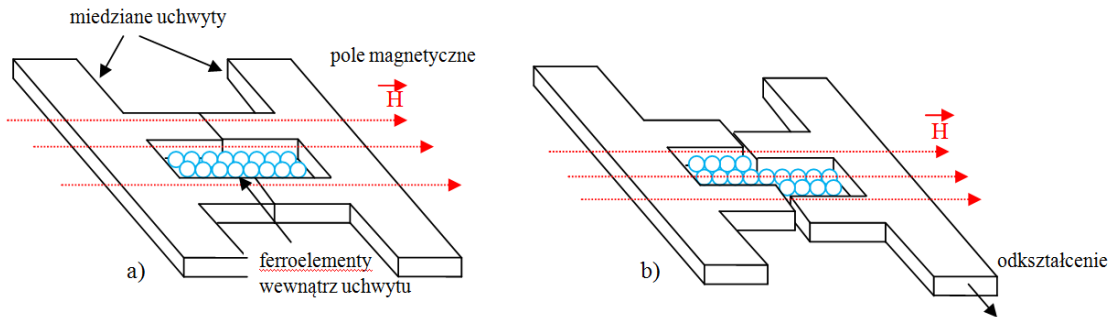
Właściwości fizyczne materiału magnetoreologicznego są zależne od wpływu pola magnetycznego. Jego działanie powoduje migracje pojedynczych cząstek i tworzenie struktur szkieletowych opartych na łańcuchach ferroelementów. Kierunek powstawania łańcuchów cząstek związany jest z kierunkiem „linii” aktywnego pola magnetycznego. Utworzone z pojedynczych cząstek łańcuchy łączą się, tworząc strukturę szkieletową. W procesie tym, można zaobserwować ruch fazy stałej - cząstek, oraz cieczy nośnej, wypychanej przez migrujące ferroelementy. Istotne jest aby zachować stałe pole magnetyczne w trakcie deformacji przy obserwacji mikroskopowej.

Obserwacje związane z deformacją mikrostruktury zostały przeprowadzone na części pojedynczego łańcucha cząstek ferroelementów. Skupiono się na przeprowadzeniu prostego ścinania obszaru zawierającego połączone polem magnetycznym cząstki.



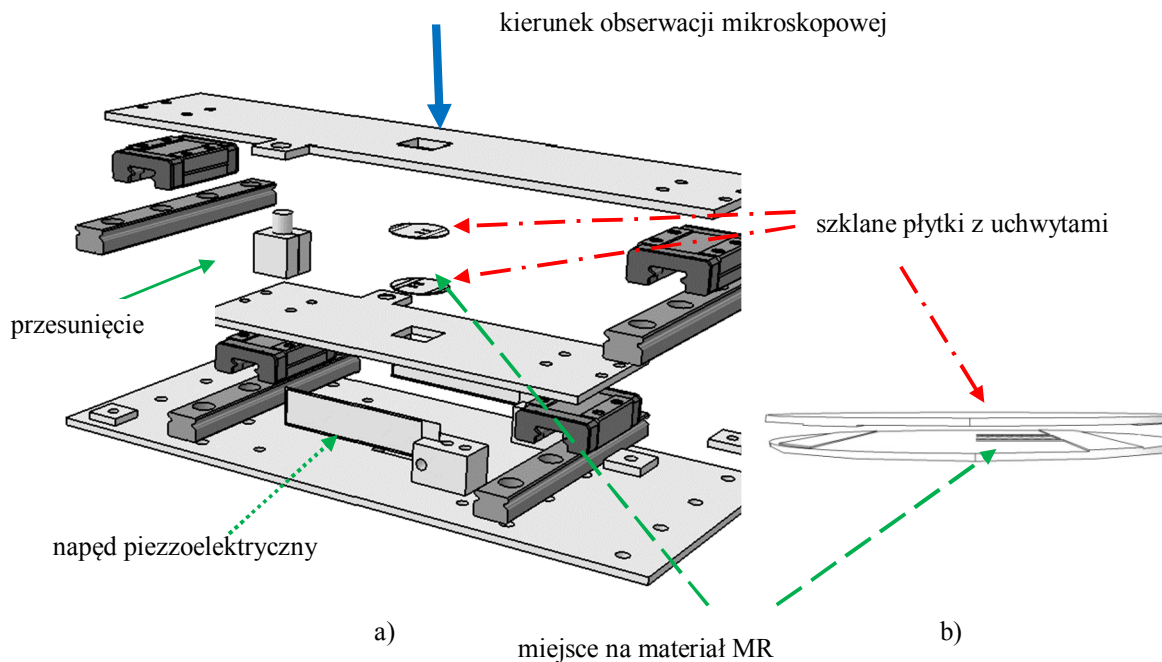
Rys 4: Obszar obserwacji deformowanego łańcucha.

Aby przeprowadzić próbę ścinania ferroelementy zostały umieszczone w specjalnym uchwycie wykonanym z miedzi. Uchwyt został wytrawiony fotolitograficznie z naniesionej magnetroneowo miedzi na podstawowe szkiełko mikroskopowe. Schemat eksperymentu został przedstawiony na Rys 5 [Frąś et al. zgłoszenie patentowe 424702].



Rys 5: Schemat eksperymentu: a) miedziane uchwyty utrzymujące ferroelementy w polu magnetycznym, b) w wyniku ruchu jednego z uchwytów, następuje odkształcenie mikrostruktury.

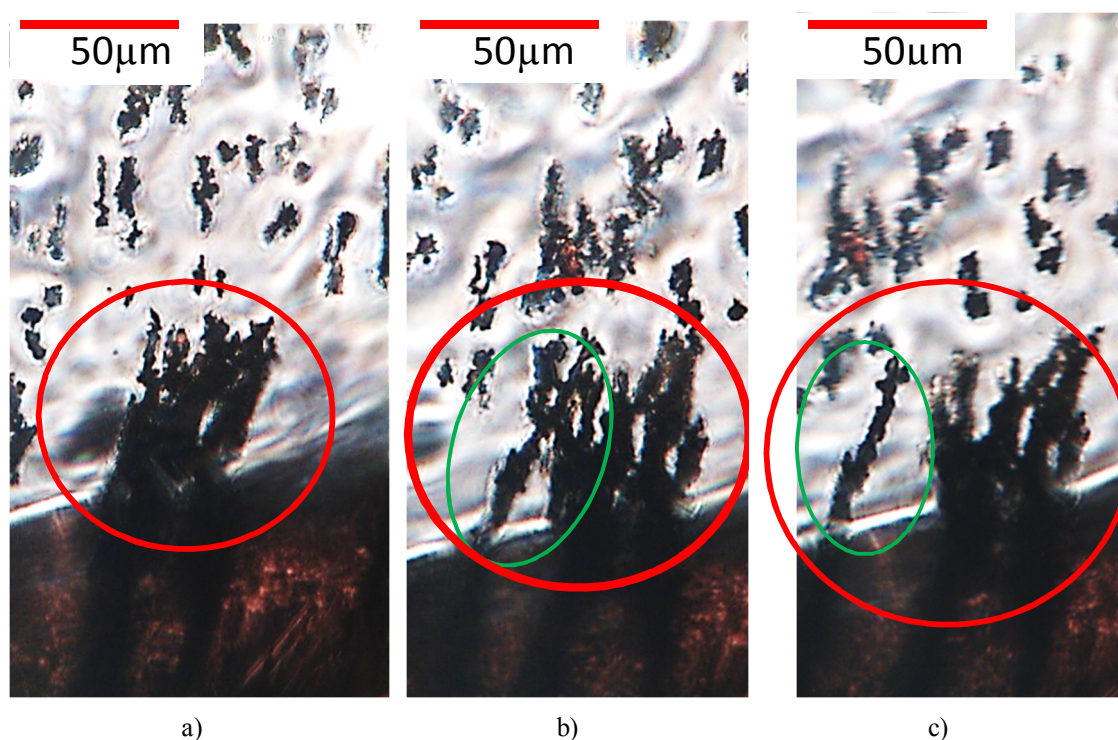
Rys 5a przedstawia stan przed deformacją materiału magnetoreologicznego. W uchwycie wykonanym z miedzi umieszczono materiał magnetoreologiczny. W wyniku działania pola magnetycznego ferroelementy ułożyły się w formie łańcuchów. Przy przesunięciu jednego z uchwytów następuje deformacja struktury. Ferroelementy zostają przegrupowane i następuje ścinanie warkocza, Rys 5b.



Rys 6: Przyrząd do obserwacji deformacji materiału magnetoreologicznego, a) schemat urządzenia, b) układ szklanych płytek z uchwytami.

Wykonanie obserwacji deformacji materiału magnetoreologicznego zostało zrealizowane przy użyciu specjalnie zbudowanego przyrządu bazującego na napędach piezoelektrycznych odpowiedzialnych za przesunięcie odpowiednio wykonanych uchwytów. Na Rys 6a przedstawiono schemat złożeniowy urządzenia odpowiedzialnego

za odkształcanie mikrostruktury w trakcie mikroskopowej deformacji. Konstrukcja bazuje na szkiełkach podstawowych do mikroskopu z miniaturowymi uchwytami Rys 6b, pomiędzy którymi jest rozrywana niewielka ilość materiału magnetoreologicznego. Ma to na celu określenie mechanizmu mikro deformacji struktury skupionych polem magnetycznym ferroelementów. W wyniku testu, zaobserwowano etapy deformacji materiału w polu magnetycznym dla poszczególnych kroków czasowych.



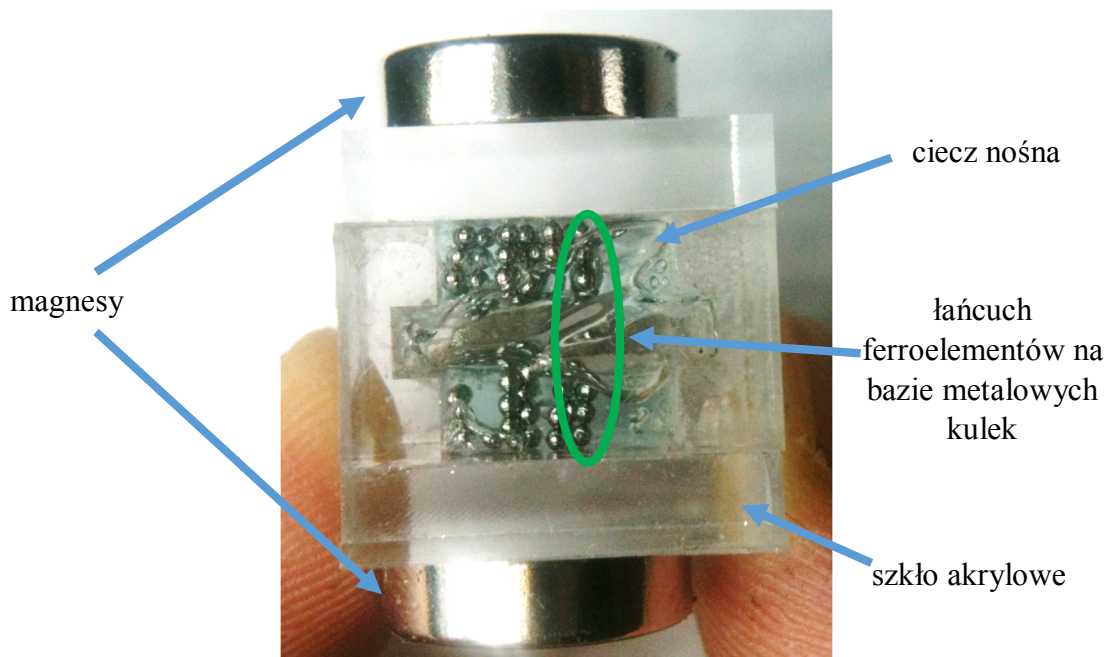
Rys 7: Przebieg deformacji materiału magnetoreologicznego, a) materiał przed odkształceniem, b) odrywanie pojedynczego warkocza, c) pojedynczy warkocz jako samodzielny element.

W wyniku ruchu napędów piezoelektrycznych, miedziane uchwyty spowodowały deformację materiału magnetoreologicznego. Na Rys 7 przedstawiono poszczególne etapy procesu deformacji struktury, złożonej z kilku skupionych razem łańcuchów ferroelementów (Rys 7a). W wyniku ruchu elementu miedzianego następuje rozwarstwienie obserwowanej struktury – separacja pojedynczego warkocza od grupy. W następstwie deformacji struktury pojedynczy łańcuch ferroelementów stanowi już niezależny element w postaci poruszającego się pojedynczego łańcucha (Rys 7c), który przez analogię do poruszającego się mikropasma ścinania chwilowo wnosi swój udział do prędkości deformacji materiału [Pęcherski 1998a, 1998b ].



### 3.3 Odształcenia pod wpływem obciążeń dynamicznych

Obserwacja *in situ* deformacji szkieletu zbudowanego z ferroelementów o średnicy mniejszej niż  $5\mu\text{m}$  podczas dynamicznych obciążeń następuje z wieloma technicznymi trudnościami. W celu określenia mechanizmu deformacji materiału magnetoreologicznego pod wpływem dynamicznych obciążeń, posłużono się imitacją materiału MR w skali makroskopowej z wykorzystaniem metalowych kulek zanurzonych w żelu. Elementami aktywnymi na działanie pola magnetycznego są kulki łożyskowe o średnicy 1 mm. Metal wykorzystywany do produkcji elementów tocznych łożysk bazuje również na bazie węglików żelaza [Dobrzański 2006]. Za ciecz nośną wykorzystano żel na bazie wody, a całość zamknięto w przezroczystym, wykonanym ze szkła akrylowego pojemniku. Do generacji stałego pola magnetycznego wykorzystano magnesy neodymowe. Model materiału przedstawiono na Rys 8.

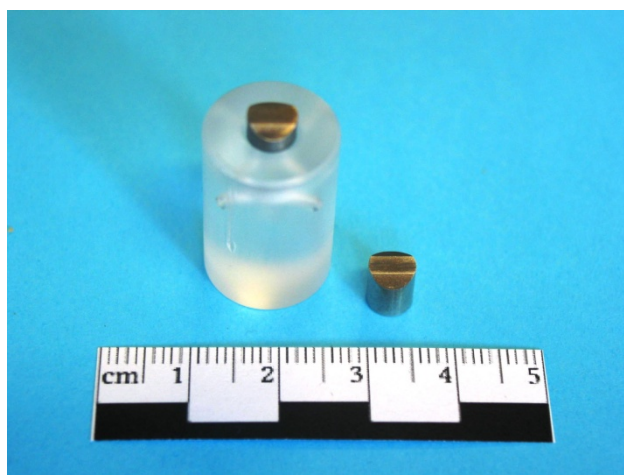


Rys 8: Wykorzystanie metalowych kulek umieszczonych w żelu jako imitacja materiału magnetoreologicznego.

W wyniku działania magnesów neodymowych kulki metalowe utworzyły analogiczną strukturę do omawianego wcześniej przestrzennego układu warkoczy (Rys 3b). Struktura szkieletu materiału magnetoreologicznego utworzona w polu magnetycznym została odtworzona za pomocą imitujących ferroelementy metalowych kulek.

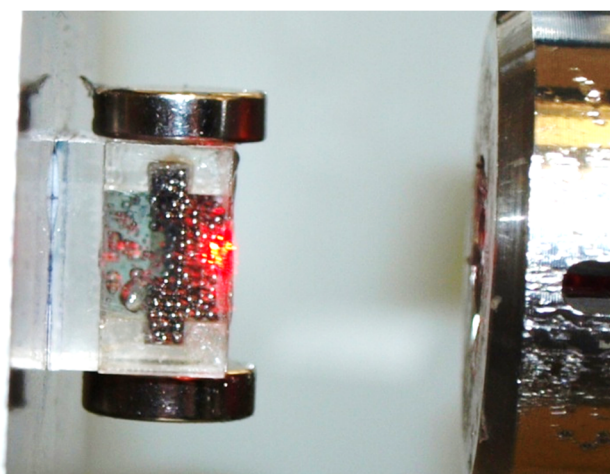


Do wytworzenia deformacji w badanej imitacji materiału magnetoreologicznego strukturze szkieletu wykorzystano działło pneumatyczne ze stalowymi pociskami w obudowie nośnej wykonanej z lekkiego polimeru. Obudowa miała za zadanie wypełnić różnicę średnic pomiędzy pociskiem a lufą wyrzutni, wspomóc jego rozpędzanie przez strumień sprężonego powietrza. Następnie, po opuszczeniu lufy, obudowa pocisku odpada i nie bierze udziału w dalszej części procesu.



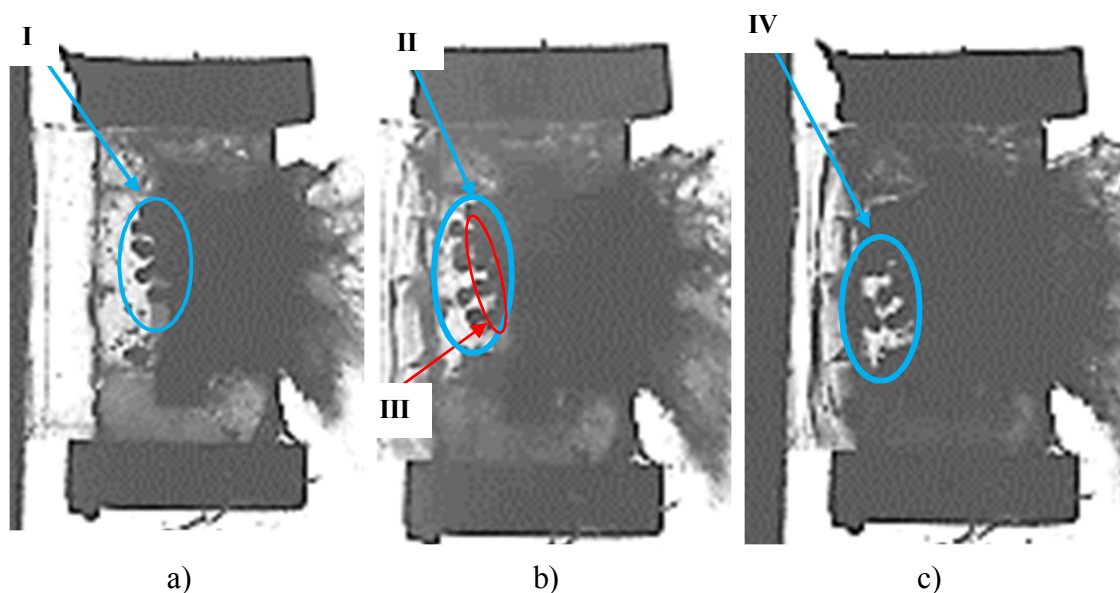
Rys 9: Pocisk użyty do deformacji modelu imitującego materiał magnetoreologiczny.

Pocisk (Rys 9) był wykonany ze stali INOX AISI316 (1.4401) o średnicy 5,7 mm oraz masie 1,1 g. Polimerowa obudowa nie bierze bezpośredniego udziału w eksperymencie, dlatego jej wymiary można pominąć. Do obserwacji deformacji wykorzystano szybką kamerę marki Hyper Vision, która umożliwia obserwację w odcieniach szarości z prędkością  $10^6$  klatek na sekundę.



Rys 10: Model materiału tuż przed pomiarem ( czerwona plama - laser celownika).

Rys 10 przedstawia zamontowany w uchwytach pojemnik z materiałem tuż przed deformacją. Metalowy pocisk z prędkością początkową wynoszącą 107 m/s zdeformował strukturę zbudowaną z metalowych kulek.



Rys 11: Model materiału magnetoreologicznego w trakcie deformacji.

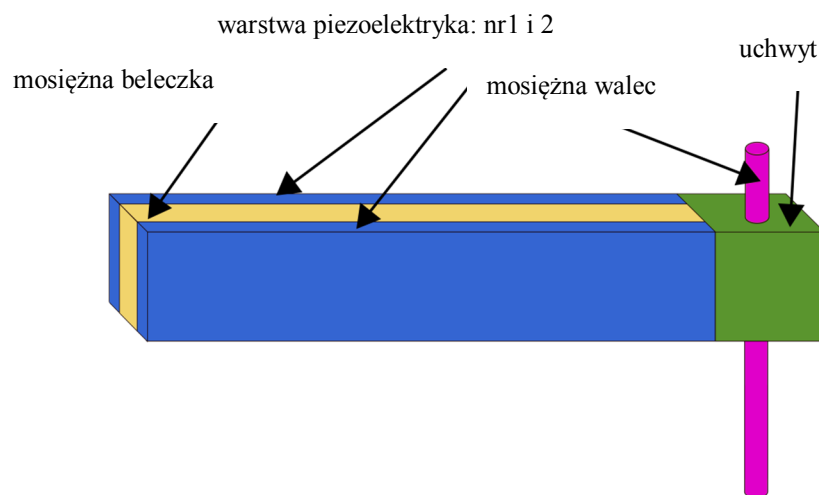
Poszczególne kroki przedstawione na Rys 11 są związane z deformacją łańcuchów utworzonych z metalowych kulek. W wyniku uderzenia pociskiem, cała struktura łańcuchów została przesunięta (Rys 11a I) i rozszczępiona. Następnie poszczególne łańcuchy zaczęły pękać (Rys 11b III), w następnym kroku rozproszenie elementów (Rys 11c IV) było bardzo wyraźne i struktura przedstawiała losowo porzucane elementy. Za zaciemnienie obrazu odpowiedzialny jest żel, pełniący funkcję cieczy nośnej.

Na Rys 11 przedstawiono poszczególne etapy deformacji łańcuchów, mające służyć za wzorzec analogicznego sposobu deformacji materiału magnetoreologicznego. Budowa materiału magnetoreologicznego bazuje na ferroelementach, których siła połączenia zależy od wartości natężenia pola magnetycznego. Struktura połączeń cząstek w łańcuchu z ferroelementów czy też z kulek metalowych bazuje na koncepcji dipola magnetycznego. Bazując na obserwowanym doświadczalnie obrazie struktury szkieletu z kulek, można wnioskować o zmianie konfiguracji części łańcuchów w dynamicznej deformacji szkieletu z ferroelementów.

### 3.4 Wpływ tłumienia drgań w materiale magnetoreologicznym a kierunek wektora pola magnetycznego

Kierunek wektora pola magnetycznego ma wpływ na łączenie się ferroelementów w łańcuchy i tym samym na utworzenie struktury materiału bazującego na ułożeniu łańcuchów. Ciecz magnetoreologiczna będąca pod wpływem pola magnetycznego jest powszechnie używana jako materiał do tłumienia drgań. W celu zbadania wpływu absorpcji drgań w zależności od kierunku ułożenia warkoczy wykonano specjalne stanowisko badawcze.

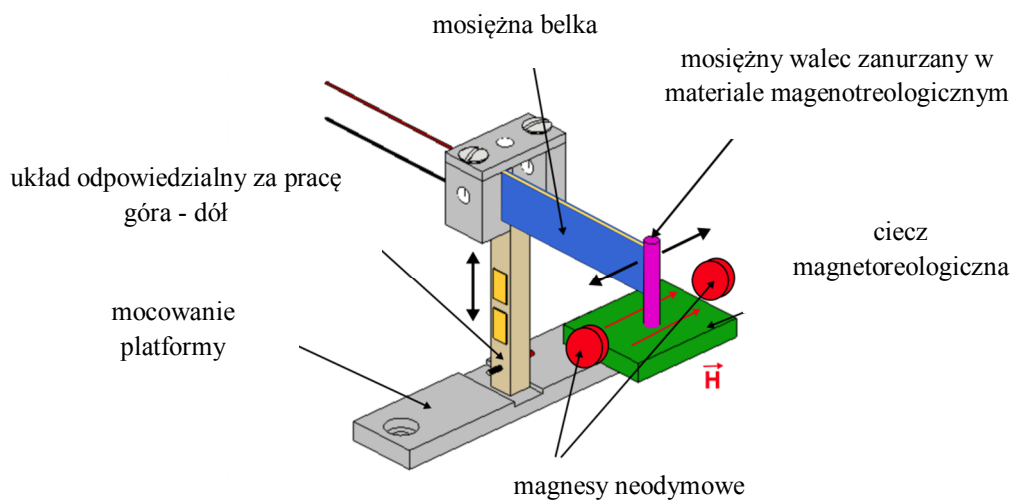
Głównym jego elementem jest mosiężna, cienka beleczka - wraz z dołożonymi warstwami piezoelektryka na jej bokach - zwana bimorfem. Całość została wyprodukowana przez firmę PiezoDrive. Warstwy piezoelektryków - 1 i 2 (Rys 12) odpowiedzialne są za wprowadzanie w drgania ośrodka (warstwa nr 1), w którym bimorf jest zanurzony oraz za pomiar odkształcenia mosiężnej belki (warstwa nr 2). Na końcu belki, zamontowany jest walec, również wykonany z mosiądzu, którego koniec w trakcie eksperymentu zanurzany jest w materiale magnetoreologicznym na określone głębokości.



Rys 12: Układ odpowiedzialny za generację drgań oraz ich pomiar.

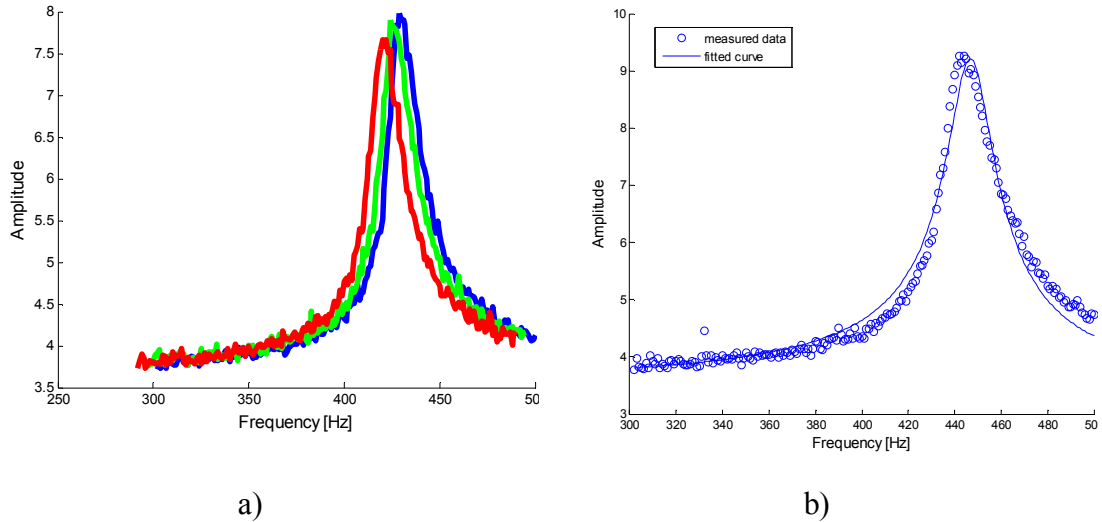
Na Rys 12 przedstawiono element wykonawczy związany z generowaniem wibracji oraz pomiarem odkształcenia. Pierwszy piezoelektryk, w wyniku odpowiedniego sterowania drga - za sprawą przykładanego stałego napięcia w zakresie -150V do 150V. W wyniku sterowania napięciem, następuje odkształcenie

piezoelektryka jak również mosiężnej belki. Powoduje to wywołanie drgań z kontrolowaną częstotliwością. W celu zmierzenia odkształceń, piezoelektryk nr 2 pracuje jako czujnik. Wytworzone drgania generują zmiany napięcia, które są mierzone przy pomocy przetwornika analogowo-cyfrowego umieszczonego na karcie pomiarowej PCI 1711 firmy Advantech. Wprowadzenie w kontrolowane vibracje mosiężnej beleczki powoduje drganie zanurzonego w materiale magnetoreologicznym walca. Cały układ odpowiedzialny za generowanie oraz pomiar drgań został zamocowany na platformie umożliwiającej dokładny pomiar zanurzenia końcówki walca dzięki optycznemu czujnikowi przemieszczenia.



Rys 13: Schemat urządzenia do badania absorpcji drgań.

Rys 13 przedstawia schemat urządzenia przeznaczonego do badania wpływu drgań na zachowanie mikrostruktury. Podstawowym elementem, odpowiedzialnym za pomiar jest układ piezoelektryków wraz z walcem. Pomiar polegał na zmierzeniu częstotliwości rezonansowej dla różnych głębokości zanurzenia końcówki walca w materiale magnetoreologicznym.



Rys 14: Wyniki eksperymentu a) pomiar częstotliwości rezonansowych w zależności od zanurzenia, wyniki dla pola magnetycznego wynoszącego 7,2 kA/m b) wyniki eksperymentu z dopasowaną krzywą w celu określenia współczynników.

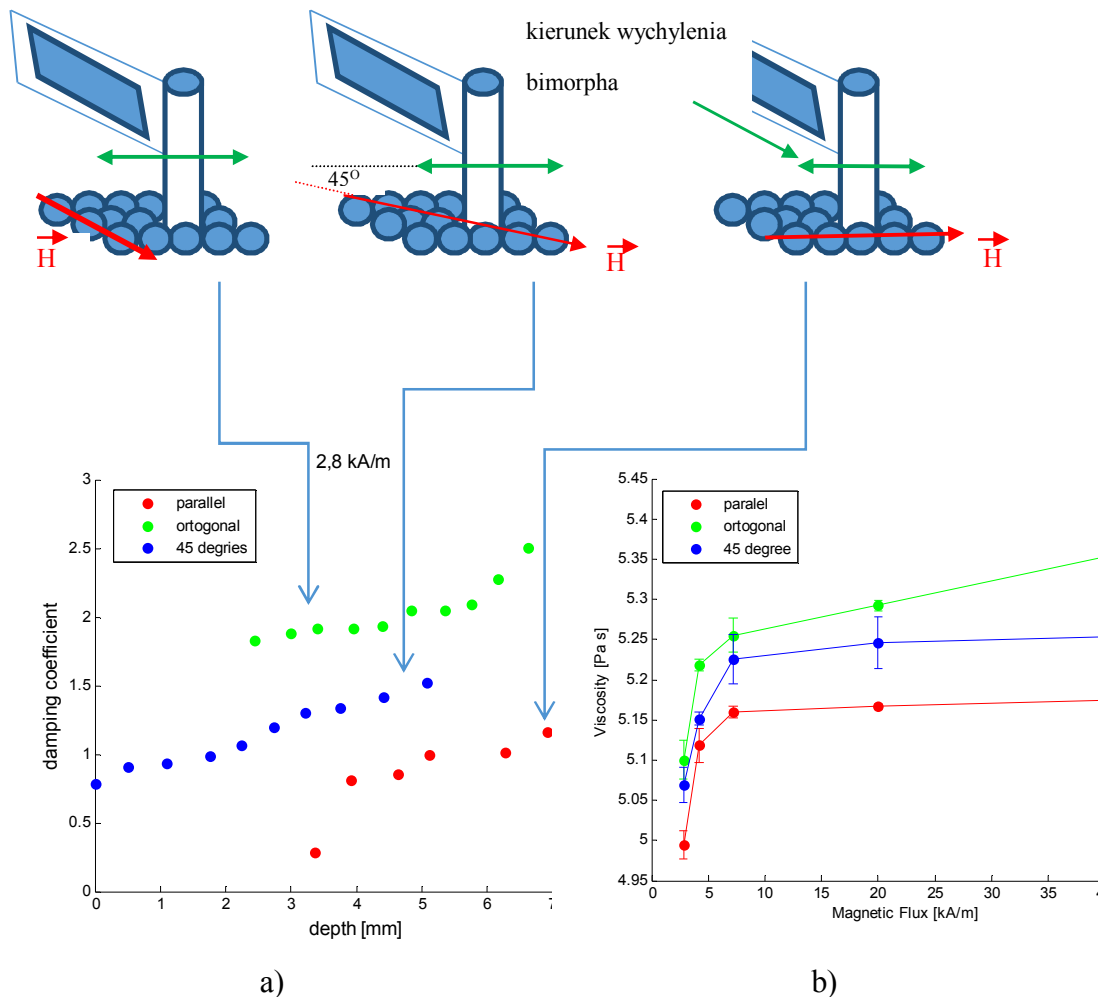
W wyniku eksperymentu, dla określonej głębokości zanurzenia i wartości pola magnetycznego mosiężny walec drga z różnymi częstotliwościami, lecz stałą amplitudą. Ze zmianą częstotliwości co 1 Hz w zakresie od 300 Hz do 500 Hz następuję przejście przez częstotliwość rezonansową, co jest zarejestrowane przez kartę pomiarową. Tworząc serię pomiarów dla różnych głębokości zanurzenia (Rys 14a) wyznaczono współczynnik lepkości w zależności od kierunku i natężenia pola magnetycznego [Frąś et al. 2018].

Bazując na [Heinsch et al. 2014], zależność lepkości względem współczynnika tłumienia można przestawić za pomocą:

$$14) \quad c_f = \left( 2\pi\eta + \frac{4\pi}{\sqrt{2}} r_c \sqrt{2\pi f_r \eta \rho} \right) l_c$$

Równanie (14) prezentuje zależność współczynnika tłumienia  $c_f$  walca zanurzonego w materiale MR w zależności od lepkości ( $\eta$ ), częstotliwości rezonansowej ( $f_r$ ), gęstości ( $\rho$ ), promienia walca ( $r_c$ ) oraz głębokości jego zanurzenia ( $l_c$ ). Rozwiązując równanie (5) względem lepkości ( $\eta$ ) uzyskujemy równanie kwadratowe, gdzie jedno z rozwiązań jest mniejsze od zera i zostaje odrzucone jako pozbawione znaczenia fizycznego.

Pomiary współczynnika lepkości zostały przeprowadzone dla szeregu wartości pól magnetycznych: 2,4, 4,8, 7,2, 20, 40 kA/m oraz w trzech konfiguracjach kierunku pola magnetycznego względem kierunku wychylenia bimorfa - prostopadle, równoległe i pod kątem 45 stopni.



Rys 15: Wyniki eksperymentów a) zależność współczynników tłumienia w zależności od kierunku pola magnetycznego względem kierunku wychylenia, b) zależność lepkości względem pola magnetycznego.

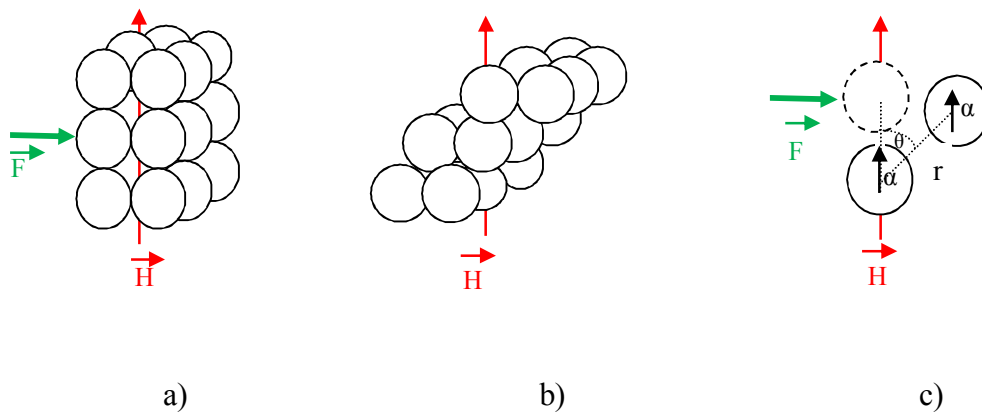
Przeprowadzony eksperyment polegał na określeniu zachowania struktury materiału odpowiedzialnej za tłumienie wibracji w zależności od kierunku i natężenia pola magnetycznego. Wykorzystując dane doświadczalne (tj. współczynniki tłumienia w zależności od zanurzenia walca (Rys 15a), można obliczyć wartości lepkości statycznej (Rys 15 b) wyrażanej jednostką Pa·s. Współczynnik lepkości zmienia się w niewielkim stopniu, około 5% w zależności od kierunku pola magnetycznego. Istotna jednak jest interakcja łańcuchów ferroelementów i ich przeciwdziałanie na drgający walec - współczynnik tłumienia nie uwzględnia wpływu głębokości zanurzenia. Największy

współczynnik tłumienia ( i też współczynnik lepkości) posiadają łańcuchy ułożone pod kątem prostym względem drgającego walca. Najmniejszy zaś, elementy związane z drganiami równoległe względem ułożonych łańcuchów. Wartości pośrednie przyjęły współczynniki dla kąta 45 stopni.

Wyniki doświadczenia, wskazują na niewielki wpływ anizotropii na zachowanie materiału MR umieszczonego w polu magnetycznym o różnych kierunkach wektora natężenia. Umożliwia to przeprowadzanie dalszych badań związanych z deformacją tylko dla jednej orientacji wektora natężenia pola magnetycznego. Uzasadnia to, przynajmniej w przybliżeniu, zastosowanie modelu lepkoplastyczności Perzyny dla materiałów izotropowych do konstytutywnego opisu deformacji materiałów MR.

### 3.5 Zachowanie ferroelementów w trakcie reorganizacji struktury szkieletu

Łańcuch ferroelementów, jako struktura na której bazuje materiał magnetoreologiczny w trakcie odkształcenia ulega reorganizacji. Przegrupowanie pojedynczych ferroelementów wpływa na zmianę całej mikrostruktury, a w konsekwencji na jej deformację. W wyniku działania zewnętrznej siły struktura łańcucha poddana zostaje odkształceniu postaciowemu Rys 7b, a finalnie następuje jej rozerwanie, Rys 7c, co zostało zaobserwowane pod mikroskopem Rys 7.



Rys 16: Schemat deformacji materiału magnetoreologicznego.

Całość można przedstawić graficznie jako mechanizm odpowiedzialny za deformacje. W wyniku działania zewnętrznej siły na łańcuchy ferroelementów, elementy te ulegają zagęszczeniu i pojedynczy sferoidalny ferroelement zostaje wypchnięty z łańcucha. Przesunięcie pojedynczego elementu powoduje rozerwanie struktury. Poprzez takie oddziaływanie struktura zostaje rozszczepiona na mniejsze części. To rozszczepienie na części i przesunięcie spełnia rolę elementarnego nośnika prędkości deformacji w analogii do mikropasm ścinania [Pęcherski 2018a, 2018b]. Matematyczny opis oddziaływania wspomnianych ferroelementów można wyrazić za pomocą równania:

$$15) \quad E_{12} = \frac{|\alpha^2|(1 - 3\cos^2\theta)}{4\pi\mu_1\mu_0r^3}$$

Energia wiązania pomiędzy dwoma ferroelementami wynika z oddziaływania pomiędzy dipolami magnetycznymi. Interakcja między dwoma cząsteczkami wyrażona jest za pomocą iloczynów momentów magnetycznych oraz kąta między nimi (Rys 16c), a następnie podzielona przez odległość oraz współczynniki przenikalności magnetycznej próżni oraz środowiska w którym się znajdują.

Działająca na ferroelementy siła zewnętrzna powoduje wybijanie elementu z łańcucha. Cząsteczka się przemieszcza powodując w konsekwencji zerwanie łańcucha – dla kąta rozwarcia wynoszącego 90 stopni, energia łączenia wynosi zero i powoduje rozerwanie warkocza.

Deformacja warkoczy, zbudowanych z metalowych kuleczek, pracujących jako imitacja materiału magnetoreologicznego (Rys 11) przebiega w analogiczny sposób. Łańcuchy utworzone z metalowych kulek zostają we wstępnej fazie skupione razem. Następnie działająca siła powoduje odchylenie pojedynczego elementu, prowadząc do rozerwania warkocza. Istotna jest obserwacja, iż deformacja rozpoczęła się od oderwania pojedynczej kuleczki i wraz za nią oderwał się cały łańcuch od struktury przestrzennej szkieletu.

Działanie deformacji imitacji materiału dla prędkości uderzenia wynoszącego 107 m/s przebiegła podobnie jak deformacja materiału magnetoreologicznego w trakcie obserwacji mikroskopowych dla procesu zachodzącego przy niższych prędkościach deformacji.

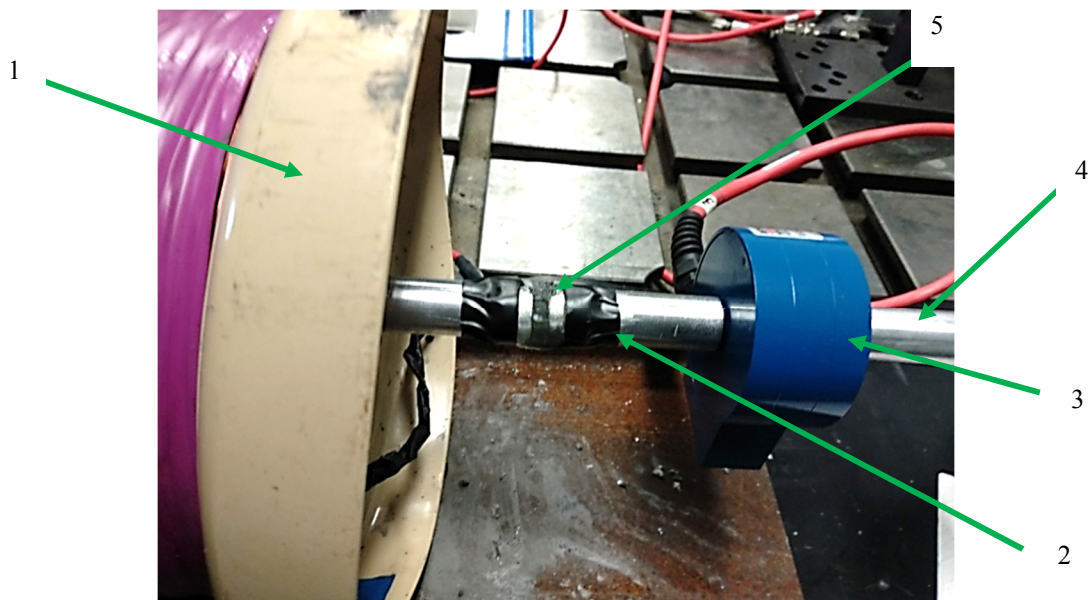


Zastosowane urządzenie (Rys 13) bazuje na pomiarze współczynnika tłumienia w zależności od głębokości zanurzenia walca drgającego w materiale magnetoreologicznym. Osiągane wartości tłumienia, a w konsekwencji współczynnik lepkości jest wielkością skupiającą w sobie kilka czynników wskazujących na zachowanie łańcuchów poddanych zewnętrznemu zaburzeniu. W wyniku wibracji łańcuchy ulegają deformacji, a pojedyncze ferroelementy przegrupowują się. Istotny jest tutaj wpływ energii wiązania ( Równanie 15) między cząsteczkami. Dla wibrującego walca w kierunku ortogonalnym względem pola magnetycznego skupiającego warkocze, wartości tłumienia, a w konsekwencji lepkość osiąga większe wartości niż dla kierunku równoległego. Zmierzone różnice pomiędzy wartościami nie są duże ( mniej niż 5%) wskazując na nieznaczny wpływ anizotropii materiału. Istotne jest spostrzeżenie wynikające z obserwacji, iż materiał deformuje się warstwami, by następnie w uporządkowany, hierarchiczny sposób postępujących po sobie kolejno fragmentacji łańcuchów, zmienić strukturę materiału i spowodować przyrost odkształcenia.

## 4 Stanowisko badawcze do badań quasi-statycznych oraz dynamicznych, realizacja i wyniki doświadczalne

### 4.1 Opis stanowiska do badań quasi - statycznych

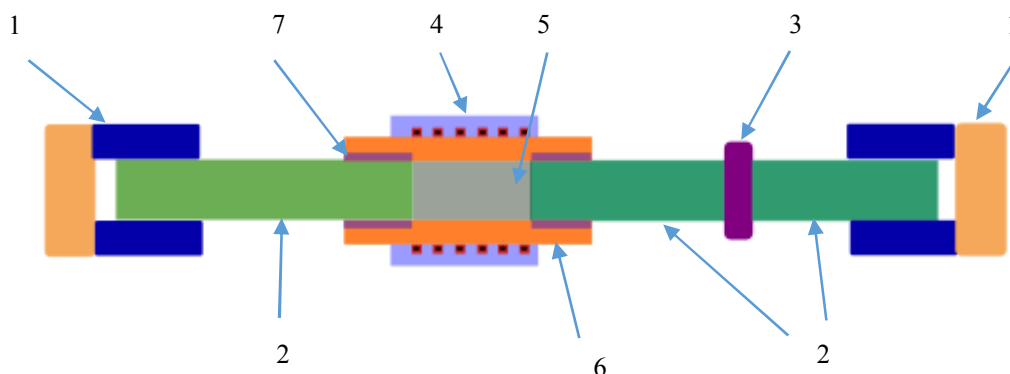
W celu wykonania testów quasi - statycznych wykorzystano maszynę wytrzymałościową firmy MTS. Elementem wykonawczym realizującym ściskanie bądź rozciąganie jest siłownik hydrauliczny. Za pomiar mierzonych wartości związanych z odkształcaniem materiału w teście na ściskanie odpowiedzialny jest siłomierz.



Rys 17: Stanowisko do testowania cieczy MR w warunkach quasi - statycznych. 1) cewka generująca pole magnetyczne, 2) pojemnik na materiał MR, 3) siłomierz, 4) element maszyny wytrzymałościowej (popychacz) odpowiedzialny za ściskanie 5) materiał MR w pojemniku.

Na Rys 17 przedstawiono stanowisko do badań wytrzymałościowych materiału MR w warunkach quasi-statycznych. Materiał magnetoreologiczny (5) jest umieszczony w pojemniku z żelatyny (2), który za pomocą kleju cyjanowego oraz taśmy samoprzylepnej jest mocowany do elementów (popychaczy) maszyny wytrzymałościowej (4). Za określenie wielkości obciążenia odpowiedzialny jest siłomierz (3). Na pojemnik (2) z materiałem (5) nasuwana jest cewka elektromagnetyczna (1). Schemat układu przedstawiono na Rys 18.

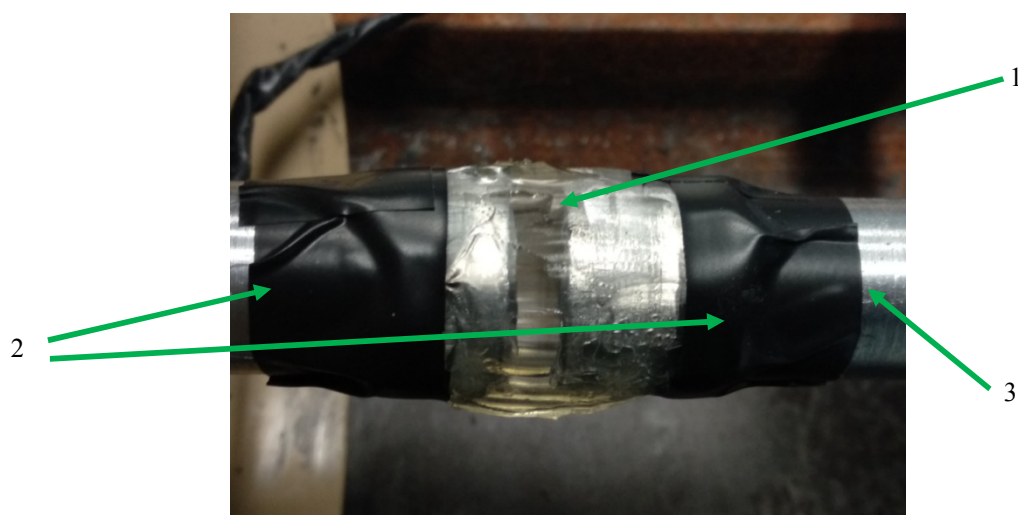
Maszyna do testów wytrzymałościowych MTS bazuje na jednostce centralnej odpowiedzialnej za sterowanie, kontrolowana specjalistycznym oprogramowaniem. Elementami wykonawczymi odpowiedzialnymi za pracę w trybie rozciągania lub ściskania są siłowniki hydrauliczne wraz z czujnikami siły oraz ekstensometrami. Maszyna może pracować w trybie sprzężenia zwrotnego powiązanego z czujnikiem siły lub odkształcenia. W celu wykonania testów prostego ściskania jako element wykonawczy wykorzystano siłownik hydrauliczny 242.01 zdolny pracować z maksymalną siłą 6 kN i wykonać maksymalne przemieszczenie 102mm. Siłownik pracował w sprzężeniu zwrotnym z czujnikiem siły firmy Interface 1500ASK-1500N. Siłomierz bazuje na konstrukcji mostka tensometrycznego, reagującego na odkształcenie 0,08mm, umożliwiającym pomiar siły do 1500N. Całość współpracowała z odpowiednim uchwytem zaciskowym firmy MTS o numerze 661-19F-01.



Rys 18: Schemat układu do badań quasi-statycznych. 1) szczęki maszyny wytrzymałościowej, 2) aluminiowe pręty popychaczy, 3) siłomierz, 4) cewka elektromagnetyczna, 5) materiał magnetoreologiczny, 6) żelatynowy pojemnik, 7) klej cyjanowy.

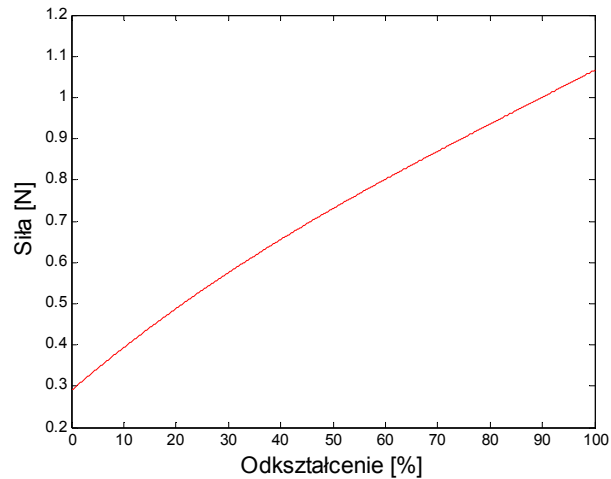
Rys 18 przedstawia schemat stanowiska doświadczalnego, bazującego na maszynie wytrzymałościowej poddanej własnym modyfikacjom by móc badać materiał magnetoreologiczny w polu magnetycznym. Nietypowym elementem jest sam pojemnik na materiał MR jak również cewka generująca pole magnetyczne. W czasie działania pola magnetycznego, sferoidalne cząstki ferroelementów łączą się razem, tworząc strukturę materiału stałego, wypierając płyn - olej będący cieczą nośną. Zadaniem cieczy nośnej jest umożliwienie swobodnego ruchu ferroelementów w trakcie formowania struktury materiału. Ważne jest aby pojemnik, pełniący rolę uchwytu na materiał nie ograniczał deformacji badanego materiału. Kolejną jego cechą powinno być nierozpraszczenie –

nieosłabianie natężenia pola magnetycznego działającego na materiał. Ważną sprawą jest również, aby można było łatwo kontrolować odmierzaną ilość materiału – poprzez przezroczystą strukturę pojemnika. Bazując na powyższych zastrzeżeniach zastosowano pojemnik wykonany z żelatyny spożywczej. Testowanie żelatyny z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona przeprowadził [Salisbury et al. 2009] a obserwacje lepkoplastycznych właściwości żelatyny opisał [Liu et al. 2014]. System wytworzenia formy na próbki polegał na rozpuszczeniu 50 g żelatyny spożywczej w 200 ml gorącej wody i odlaniu odpowiednich form na materiał MR – w postaci tulei o średnicy wewnętrznej 20 mm, zewnętrznej 25 mm i długości tworzącej 30 mm. Długość słupa cieczy, używanego w trakcie testów quasi-statycznych na ściskanie wynosiła 5 mm.



Rys 19: Żelatynowy pojemnik na materiał MR. 1) pojemnik z żelatyny, 2) pręty aluminiowe, 3) system montowania zapobiegający przesunięciu oparty o klej cyjanowym i taśmę klejącą.

Rys 19 przedstawia sposób montażu żelatynowego pojemnika na materiał magnetoreologiczny. Wykonaną tuleję z żelatyny nasuwa się na dwa aluminiowe pręty, tak aby między ich czołowymi płaszczyznami była odległość 5 mm przeznaczona na materiał MR. Całość jest uszczelniana klejem cyjanowym - od wewnątrz oraz taśmą klejącą z zewnątrz aby zapobiec ewentualnemu przesunięciu tulei czy też nieszczelnościom. Przeprowadzono próbę quasi – statycznego ściskania samej opaski żelatynowej – bez materiału magnetoreologicznego w środku. Próbę tę wykonano, aby zbadać zachowanie materiału – formy z żelatyny, jak również aby sprawdzić w jaki sposób pojemnik ogranicza deformację materiału magnetoreologicznego.



Rys 20: Zależność siły od odkształcenia dla opaski z żelatyny wykorzystywanej jako pojemnik o testów materiału MR.

Rys 20 przedstawia wyniki ściskania uchwytu na próbkę - tuleję z żelatyny, używanej jako pojemnik na materiał magnetoreologiczny. Rolą uchwytu jest utrzymanie zadanej, początkowej długości oraz średnicy materiału magnetoreologicznego. Istotne jest również umożliwienie swobodnej deformacji w trakcie działania pola magnetycznego, jak również osłabianie jego natężenia i wpływu badany materiał. W wyniku przeprowadzonej próby quasi-statycznej, z prędkością odkształcenia  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  w temperaturze pokojowej dla odkształcenia wynoszącego 100%, maksymalna siła wyniosła 1 N. Na tle uzyskanych wyników, zasadne jest, aby wpływ pojemnika na deformowany materiał magnetoreologiczny w testach quasi-statycznych, oraz dynamicznych z wykorzystaniem pola magnetycznego można było pominąć.

## 4.2 Wyniki badań quasi-statycznych

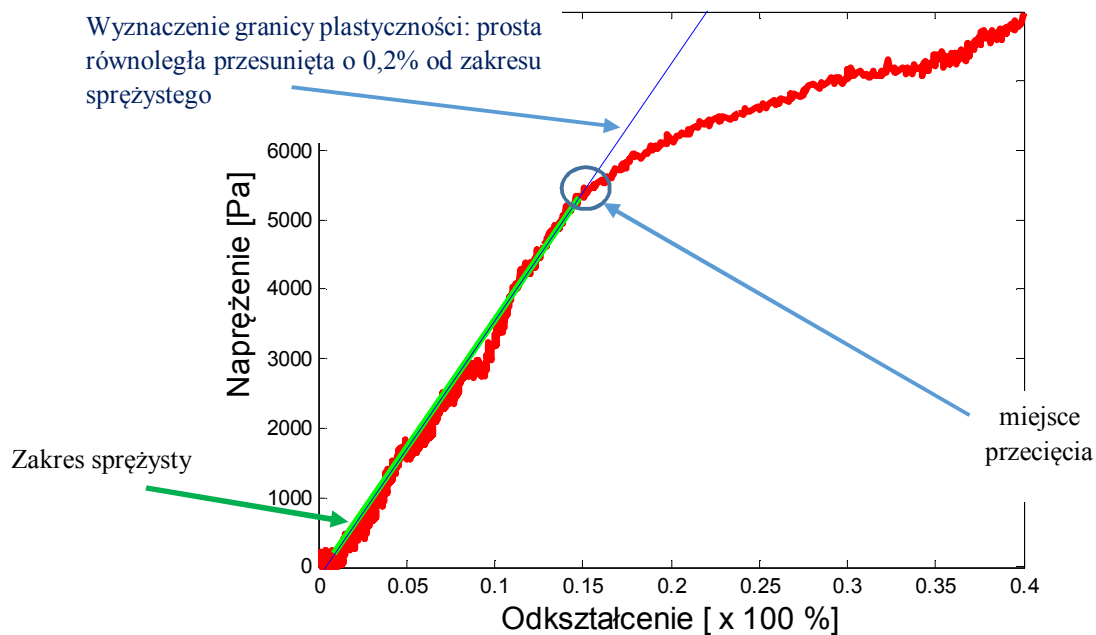
Dla prostego ściskania, przeprowadzono szereg testów dla próbki o długości 5 mm i średnicy 20 mm. Eksperymenty przeprowadzono dla pól magnetycznych 30, 60, 90 i 120 kA/m. Dla każdego z pól magnetycznych przeprowadzono testy z prędkościami odkształcenia wynoszącymi  $\dot{\epsilon} = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $1 \cdot 10^{-2}$ ,  $1 \cdot 10^{-1}$ ,  $1$ ,  $10 \text{ s}^{-1}$ . Bazując na prędkości przesuwania się szczęk maszyny MTS, z prędkością  $v$ , rzeczywistą prędkość odkształcenia można określić:

$$16) \quad \dot{\epsilon} = \frac{v}{L_0},$$

gdzie za  $L_0$  oznacza początkową wartość długości. Dla pomiarów związanych z określeniem odkształcenia wartość naprężenia  $\sigma$  wyrażające się zależnością:

$$17) \quad \sigma = \frac{F}{A_0}$$

gdzie  $F$  oznacza siłę, a  $A_0$  początkowy przekrój poprzeczny próbki.

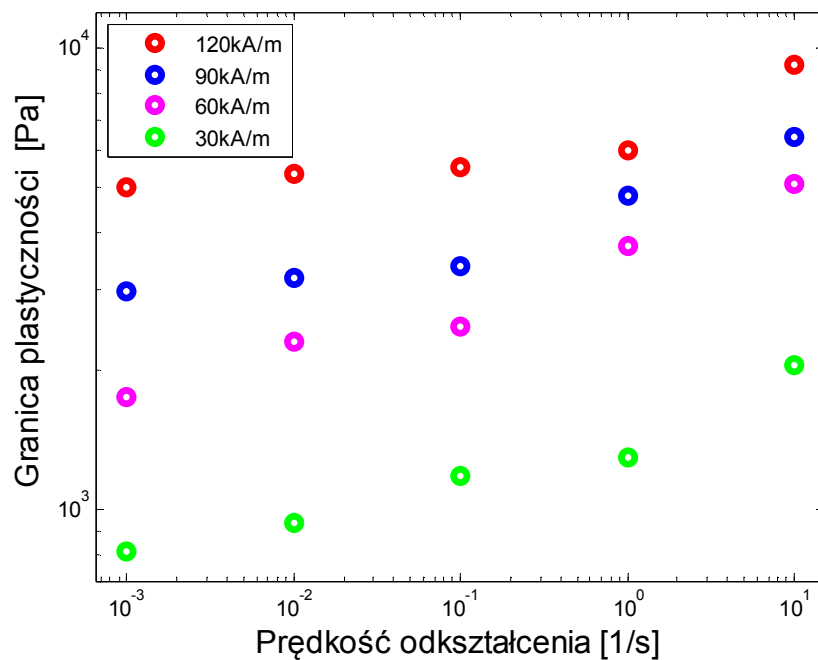


Rys 21: Wynik prostego testu na ściskanie. Wartość pola magnetycznego 120kA/m, wartość prędkości odkształcenia  $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ s}^{-1}$ .

Rys 21 przedstawia wyniki próby ściskania dla próbki materiału magnetoreologicznego. Wysokość walcowej próbki wynosiła 5 mm, średnica początkowa 20 mm w przybliżeniu 1,57 ml objętości użytego materiału. Wartość natężenia pola magnetycznego 120 kA/m, prędkość odkształcenia  $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ s}^{-1}$ . W celu wyznaczenia granicy plastyczności, dopasowano prostą styczną do zakresu statycznego. Na granicę plastyczności wyznaczono punkt przecięcia się wykresu zawierające dane pomiarowe z prostą równoległą, przesuniętą o 0,2% względem zakresu sprężystego.

	Granica plastyczności	Pole magnetyczne			
		30 [kA/m]	60 [kA/m]	90 [kA/m]	120 [kA/m]
prędkość odkształcenia [ $\text{s}^{-1}$ ]	10	2055 [Pa]	5094 [Pa]	6412 [Pa]	9216 [Pa]
	1	1300 [Pa]	3720 [Pa]	4784 [Pa]	6005 [Pa]
	$1 \cdot 10^{-1}$	1178 [Pa]	2490 [Pa]	3360 [Pa]	5512 [Pa]
	$1 \cdot 10^{-2}$	933 [Pa]	2316 [Pa]	3175 [Pa]	5340 [Pa]
	$1 \cdot 10^{-3}$	808 [Pa]	1751 [Pa]	2981 [Pa]	5008 [Pa]

Tabela 1: Granica plastyczności w relacji do natężenia pola magnetycznego oraz prędkości odkształcenia.



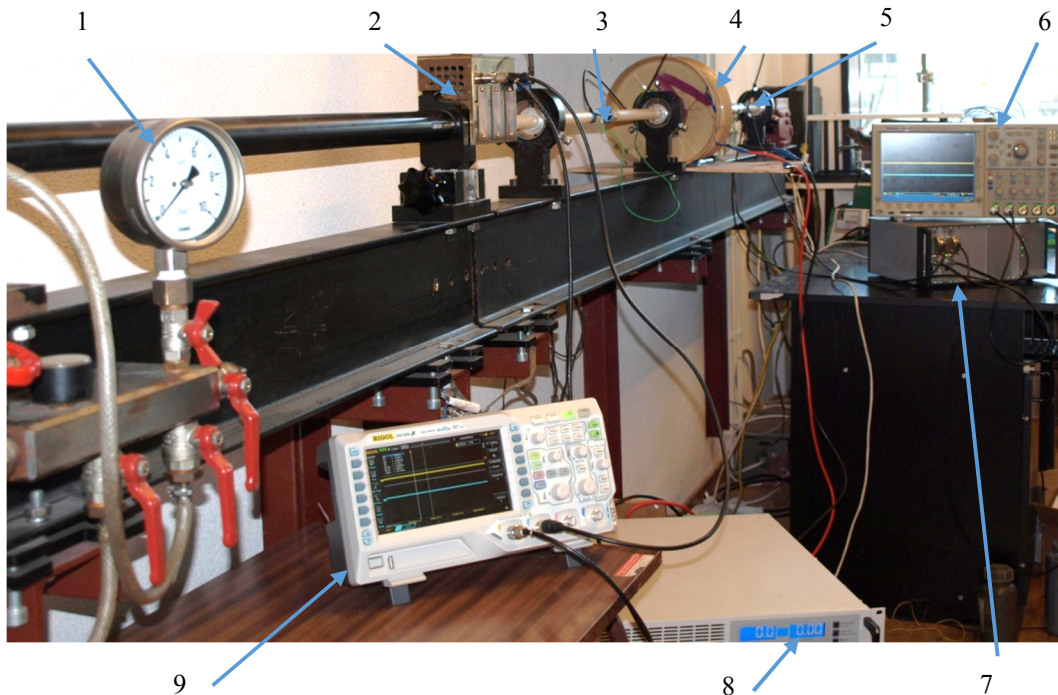
Rys 22: Graficzna prezentacja zmiany wartości granicy plastyczności dla różnych wielkości natężenia pola magnetycznego oraz prędkości odkształcenia dla próby ściskania w warunkach quasi-statycznych.

Na Rys 22 przedstawiono zestawione razem wyniki wartości granicy plastyczności od prędkości odkształcenia. Najmniejsze jej wartości uzyskano dla pola magnetycznego 30 kA/m i prędkości deformacji  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  a największą dla pola 120 kA/m. Wartości granicy plastyczności układają się w jednolite linie trendów wzrostowych dla poszczególnych pól, nie przenikając się nawzajem. Granica plastyczności w materiale magnetoreologicznym, wykazuje tendencję wzrostową wraz ze wzrostem wartości natężenia pola magnetycznego jak również prędkością odkształcenia. Eksperyment quasi-statycznej próby ściskanie wykonano na maszynie hydraulicznej z dużą częstotliwością zapisu pomiaru. Ruch siłownika ściskającego próbkę powodował powstanie charakterystycznych szumów – co można zaobserwować na Rys 21. Krzywa doświadczalna nie jest „gładka” jak w przypadku prób ściskania na maszynie bazującej na serwomechanizmach.



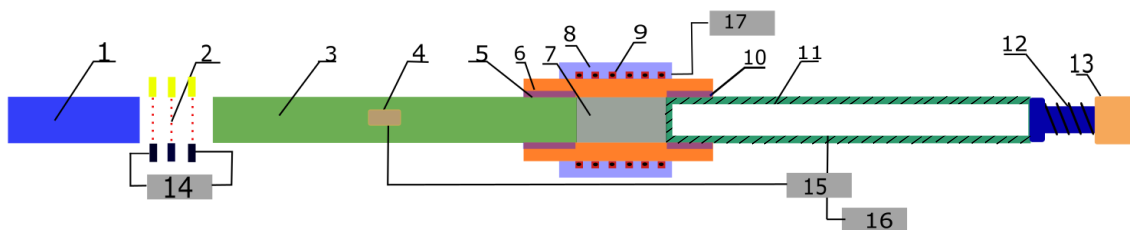
### 4.3 Stanowisko do badań dynamicznych

Dzielony pręt Hopkinsona jako urządzenie do badania materiałów przy dużych prędkościach odkształcenia został zaadoptowany do badania materiałów magnetoreologicznych w polu magnetycznym.



Rys 23: Pręt Hopkinsona wraz z aparaturą elektroniczną do testowania zachowania się materiału MR.

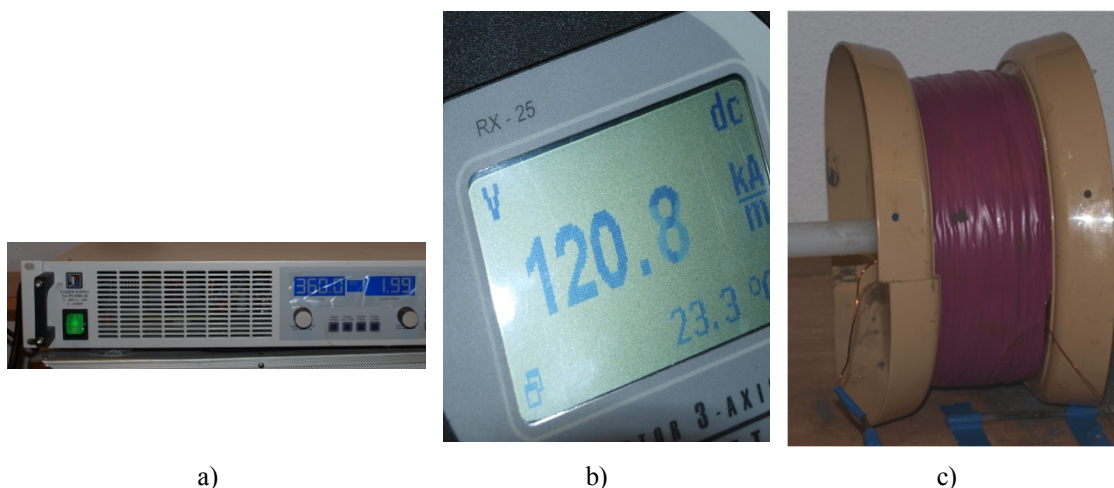
Rys 23 przedstawia stanowisko badawcze wraz z aparaturą. Pozycja 1) manometr do odmierzenia ciśnienia gazu miotającego pocisk, 2) zespół diod do mierzenia prędkości pocisku, 3) pręt transmitujący, 4) cewka elektromagnetyczna, 5) pręt odbierający 6) oscyloskop do wyświetlania sygnałów z tensometrów, 7) wzmacniacz sygnałów, 8) zasilacz dużej mocy, 9) oscyloskop do pomiaru prędkości przelotowej pocisku. Ideowy schemat urządzenia przedstawiono poniżej:



Rys 24: Schemat własnego stanowiska do badania materiału MR

Rozwinięciem Rys 23 jest Rys 24, na którym zamieszczono schemat stanowiska własnej konstrukcji i wykonania. 1) pocisk, 2) zespół foto - diod, 3) pręt transmitujący wykonany z aluminium o długości 1 m, 4) tensometry zamieszczone w środku długości, 5 i 10) uszczelnienia na przecie, 6 i 8) zespół deformowalnego mieszka mocowany na prętach, 9) cewka elektromagnetyczna, 11) pręt odbierający w formie zaślepionej rurki aluminiowej o długości 1 m, średnica zewnętrzna 20 mm, średnica wewnętrzna 18 mm, 12 i 13), hamulec dla pręta wraz z regulacją, 14) oscyloskop do pomiarów prędkości pocisku, 15) wzmacniacz sygnałów tensometrycznych, 16) oscyloskop do pomiarów sygnałów tensometrycznych, 17) zasilacz dużej mocy.

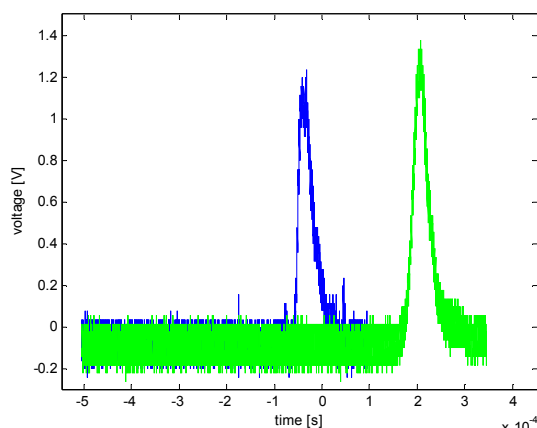
Do zestalenia struktury materiału MR wykorzystano cewkę elektromagnetyczną. Za zasilanie prądem stałym odpowiedzialny był zasilacz dużej mocy, generujący napięcie 360 V przy natężeniu 2 A. Umożliwia to wytworzenie pola magnetycznego o wartości 120 kA/m przy cewce o oporności 180  $\Omega$ .



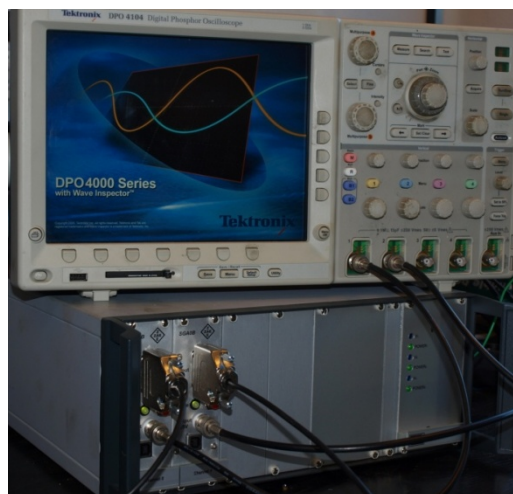
Rys 25: Osprzęt związany z generowaniem i pomiarem pola magnetycznego: a) zasilacz dużej mocy: EA-PS 8369-30, b) Teslametr Rx-25 w trakcie pomiaru, c) cewka elektromagnetyczna.

Materiały MR są materiałami wrażliwe na prędkość odkształcenia jak również o dużym niższym module Younga niż materiały metaliczne. Niezbędne było wykorzystanie prętów aluminiowych o mniejszej impedancji falowej niż pręty stalowe. Ze względu na dużą dyspersyjność materiału MR sygnał rejestrowany na przecie odbierającym miał niską amplitudę. Aby umożliwić lepszą rejestrację sygnałów przez tensometry jako pręt odbierający zastosowano aluminiową rurkę, o średnicy zewnętrznej 20 mm i grubości ścianki 1 mm. Rurkę zaślepiono od strony kontaktu z materiałem. Istotne okazało się też wykorzystanie wzmacniacza sygnałów do pomiarów

tensometrycznych z wbudowanym filtrem dolnoprzepustowym. Umożliwia on wzmocnienie sygnału aż do 2000 V/V przy paśmie przenoszenia 1 MHz i lepszą separację sygnał - szum. Wzmacniacz pracuje wraz z oscyloskopem umożliwiającym prędkość akwizycji 5 GSampli /s.



a)



b)

Rys 26: a) Kalibracja pręta, kolor niebieski pręt transmitujący, kolor zielony pręt odbierający b) zespół do akwizycji danych: oscyloskop Tektronix DPO 4104 oraz wzmacniacz ATA SGA0B.

Rozpoczęcie pracy z dzielonym prętem wymaga obliczenie prędkości fali w prętach oraz obliczenia współczynnika tłumienia fali sprężystej generowanej przez uderzenie pocisku. Prędkość fali w prętach oblicza się w trakcie testu kalibracyjnego. Test kalibracyjny przeprowadza się poprzez uderzenia pociskiem w złączone pręty, bez próbki. Wartość prędkości fali oblicza się na podstawie wzoru:

$$18) \quad C_0 = \frac{x}{t}$$

gdzie  $C_0$  oznacza prędkość fazową,  $x$  - odległość między tensometrami na pręcie transmitującym i odbierającym,  $t$  - czas przejścia ( odległość na osi czasu ) pomiędzy maksymalną wartością amplitud w trakcie strzału kalibracyjnego. Fala sprężysta, wytworzona przez uderzenie pocisku o pręt jest tłumiona, wraz z przemieszczeniem się wzdłuż pręta, współczynnik  $\zeta$  wyznaczany jest z pomiaru amplitudy fali padającej i transmitowanej po przejściu odległości  $x$  między prętami, [Klepaczko 2007].

$$19) \quad \zeta = \frac{1}{C_0} \ln \frac{Ampl_I}{Ampl_T}$$

Wartości uzyskane z równania (18) i (19) posłużą do dalszych obliczeń. Wyznaczenie odkształceń mierzonych w miejscu mocowania tensometrów można przedstawić:

$$20) \quad \begin{aligned} e_I &= kV_I \exp(\zeta x) \\ e_R &= kV_R \exp(\zeta x) \\ e_T &= kV_T \exp(\zeta x) \end{aligned}$$

gdzie  $e_I$  odkształcenie wywołane przez falę wymuszającą,  $e_R$  odkształcenie wywołane przez falę odbitą,  $e_T$  odkształcenie wywołane przez falę transmitowaną,  $k$  - stała tensometru,  $V_{I,R,T}$  - wartości napięć zarejestrowane na mostku tensometrycznym przez oscyloskop w trakcie przejścia fali wymuszającej, odbitej i transmitowanej.

#### 4.4 Przebieg eksperymentu

Badanie materiału magnetoreologicznego – wyprodukowanego przez firmę LORD, o symbolu MRF-140CG przeprowadzono z zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona wyposażonego w cewkę elektromagnetyczną (Rys 25c). Pole magnetyczne, którego wartość natężenia mierzono w geometrycznym środku cewki sondą Teslametru Rx25 przedstawionego na Rys 25b. Pomiar wartości natężenia pola magnetycznego dokonywano przed każdym testem dynamicznego ściskania. Wewnętrzna średnica cewki wynosiła 30 mm a długość tworzącej 70 mm. Eksperymenty wykonano w temperaturze pokojowej, w zakresie natężenia pól magnetycznych wynoszących 30, 60, 90 oraz 120 kA/m. Wpływ zmiany temperatury w wyniku ciepła wydzielanego przez cewkę generującą pole magnetyczne można pominąć ze względu na czas trwania pojedynczej próby dynamicznej.

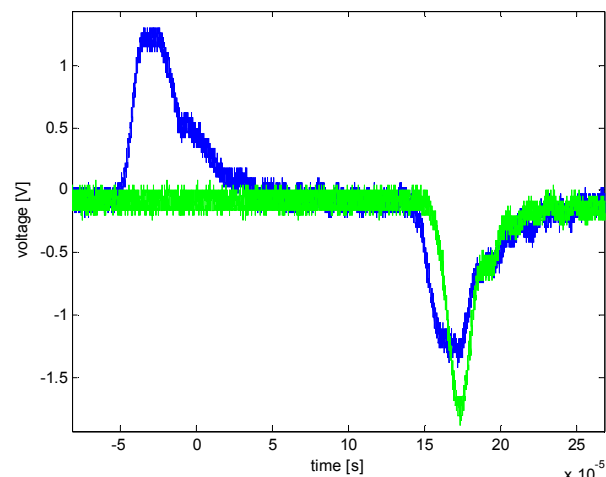
Do testów wykorzystano pręt oraz rurkę wykonane z materiału AL7075. Długość pręta, a także rurki wynosiła 1000 mm, średnica zewnętrzna pręta oraz rurki wynosiła 20 mm, a wewnętrzna średnica rurki miała 18 mm. Pomiar odkształcenia na pręcie mierzono za pomocą tensometrów Vishay 1-ly11-3/120. Tensometry przyklejono na środku pręta

oraz rurki w układzie pełnego mostka tensometrycznego. W celu akwizycji sygnału wzmacniacz sygnałów ATA SGA0B pracował ze wzmocnieniem 400 V/V niezależnie dla każdego układu tensometrów zarówno dla pręta jak i rurki. W celu obniżenia wpływu zanieczyszczenia sygnału przez różnego rodzaju zakłócenia wykorzystano filtr dolnoprzepustowy o częstotliwości pracy 100 kHz.

Do testowania materiału magnetoreologicznego wykorzystano pocisk na ślizgach teflonowych. Długość pocisku wynosił 65 mm, średnica 20 mm a masa 125 g. Powierzchni czołowej pocisku, mającej kontakt z prętem odbierającym, nadano kształt zaoblony. Ma to na celu zapewnienie punktowego uderzenia na styku pocisk - pręt odbierający. Dla prętów odbierającego i transmitującego, płaszczyzny czołowe są prostopadłe do tworzących. Jako próbkę wykorzystano materiał magnetoreologiczny - wyprodukowany przez firmę LORD o symbolu MRF-140CG. Materiał w fazie nieustalonej jest cieczą, z chwilą umiejscowienia w polu magnetycznym, magnetoaktywne cząstki układają się wzdłuż linii działania pola magnetycznego. Próbkę umieszczano w tulei z żelatyny spożywczej. Tuleja, ma za zadanie nadanie początkowego walcowatego kształtu testowanemu materiałowi. Długość tworzącej walca materiału MR wynosiła 2 mm a średnica 20 mm.



a)



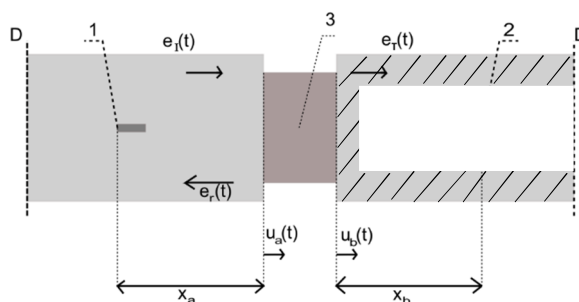
b)

Rys 27: Testowanie materiału magnetoreologicznego, a) sposób montażu próbki, b) przebieg fal w trakcie testu, kolor niebieski pręt transmitujący, kolor zielony pręt odbierający.

Na Rys 27a przedstawiono sposób montażu próbki w trakcie testów dynamicznych. Materiał magnetoreologiczny umieszczono w tulei z żelatyny, która za

pomocą kleju cyjanowego oraz taśmy klejącej została przymocowana do prętów transmitującego oraz odbierającego. Na Rys 27b przedstawiono przebieg fal zarejestrowanych przez oscyloskop. Kolorem niebieskim zaznaczono sygnał zmierzony na pręcie transmitującym, a zielonym na pręcie odbierającym. Prezentowane fale zostały zarejestrowane w trakcie testów dynamicznych.

W przypadku badań dynamicznych, metodyka pomiarów przedstawiona jest poniżej. Przyspieszany przez pneumatyczną wyrzutnię pocisk (Rys 24, 1), osiąga prędkość  $V_0$  która jest mierzona przez układ fotodiod i optotranzystorów (Rys 24, 2, 14). Wytworzona przez pocisk, fala sprężysta w pręcie transmitującym, ma długość  $2L$ , gdzie  $L$  to długość pocisku. Okres takiej fali uderzeniowej można przedstawić  $T = 2L/C_0$ , gdzie  $C_0$  jest prędkością fali w pręcie uderzonym przez pocisk.



Rys 28: a) Schemat pręta Hopkinsona, gdzie 1) i 2) tensometry, 3) badana próbka o długości  $l_0$ , D: średnica pręta,  $e_I(t)$ : odkształcenie w pręcie (1) wywołane przejściem fali sprężystej,  $e_T(t)$ : odkształcenie w pręcie(2) fali sprężystej po przejściu przez próbkę,  $e_R(t)$ : odkształcenie odbite wygenerowane przez powrót fali,  $u_a(t)$  przemieszczenie próbki przy płaszczyźnie czołowej pręta (1),  $u_b(t)$ :przemieszczenie próbki przy płaszczyźnie czołowej pręta (2).

Bazując na układzie do wzmacniania sygnału i oscyloskopie do akwizycji danych mierząc wartości  $e_I(t)$ ,  $e_T(t)$ ,  $e_R(t)$  otrzymujemy równanie opisujące wartość odkształcenia nominalnego badanej próbki. Dla pręta Hopkinsona wykorzystującego jako pręt odbierający rurkę, równanie opisujące relacje  $u_a(t)$  oraz  $u_b(t)$  na płaszczyznach czołowych prętów, przedstawia się następująco [Chen et al. 1999], [Klepaczko 2007], [Janiszewski 2012]:

$$21) \quad u_a(t) = C_0 \int_0^t (e_I(t) - e_R(t)) dt$$

oraz:

$$22) \quad u_b(t) = C_0 \int_0^t (e_T(t)) dt$$

Zależność opisująca wartość związaną z wyrażeniem dla wartości odkształcenia w próbce o długości  $l_0$ :

$$23) \quad \varepsilon_{ns}(t) = \frac{u_a(t) - u_b(t)}{l_0}$$

Korzystając z zależności, opisującej warunek równowagi w próbce:

$$24) \quad \rho C_0^2 (e_I + e_R) A_I = \rho C_0^2 e_T A_T$$

otrzymujemy:

$$25) \quad e_I(t) + e_R(t) = \frac{A_T}{A_I} e_T(t)$$

Gdzie symbol  $A_I$  oznacza pole przekroju pręta transmitującego,  $A_T$  oznacza pole przekroju pręta odbierającego w miejscu umocowania tensometru, za  $\rho$  przyjęto gęstość materiału prętów,  $C_0$  prędkość fali sprężystej w pręcie. Korzystając przedstawionych zależności, można wyznaczyć wartość odkształcenia nominalnego w próbce:

$$26) \quad \varepsilon_{ns}(t) = \frac{C_0}{l_0} \left(1 - \frac{A_I}{A_T}\right) \int_0^t e_I(t) dt + \frac{C_0}{l_0} \left(1 + \frac{A_I}{A_T}\right) \int_0^t e_R(t) dt$$

a także wartość prędkości odkształcenia:

$$27) \quad \dot{\varepsilon}_{ns}(t) = \frac{1}{l_0} \left[ \frac{du_a(t)}{dt} - \frac{du_b(t)}{dt} \right] = \frac{1}{l_0} \frac{d\varepsilon_{ns}(t)}{dt}$$

korzystając z warunku równowagi (25):

$$28) \quad e_I(t) + e_R(t) = \frac{A_T}{A_I} e_T(t)$$

wiedząc, iż wartość naprężenia można przestawić [Klepaczko 2007]:

$$29) \quad \sigma_{nS}(t) = \frac{\rho C_0^2}{2} \left( \frac{D}{D_{S0}} \right)^2 [e_I(t) + e_R(t) + e_T(t)],$$

gdzie symbole  $D$  i  $D_{S0}$  oznaczają wartości średnic pręta oraz próbki i otrzymujemy:

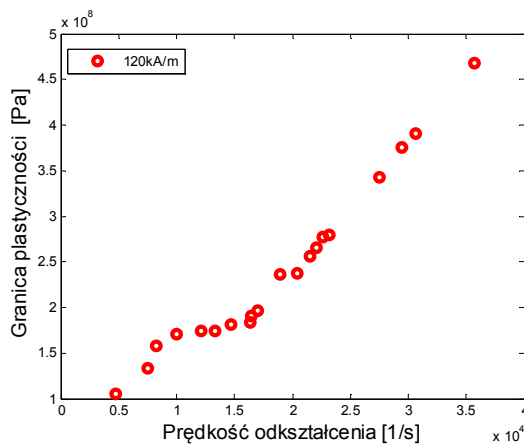
$$30) \quad \sigma_{nS}(t) = \frac{\rho C_0^2}{2} \left( \frac{D}{D_{S0}} \right)^2 \left[ \left( 1 + \frac{A_T}{A_I} \right) e_T(t) \right].$$

Wzory te są podstawą analizy wyników doświadczalnych. Dla serii prób dynamicznych otrzymujemy w końcowym efekcie zależność dynamicznej granicy plastyczności od prędkości odkształcenia. Seria testów dynamicznych została przeprowadzona w zakresie prędkości  $V_0$  pocisku od 6 m/s do 16 m/s zwiększanej z krokiem co ok 0,5 m/s. Stopniowanie prędkości pocisku spowodowało w przybliżeniu równomierne rozłożenie prędkości odkształcenia w zakresie  $\dot{\epsilon} = 10^3 - 10^4 \text{ s}^{-1}$ .

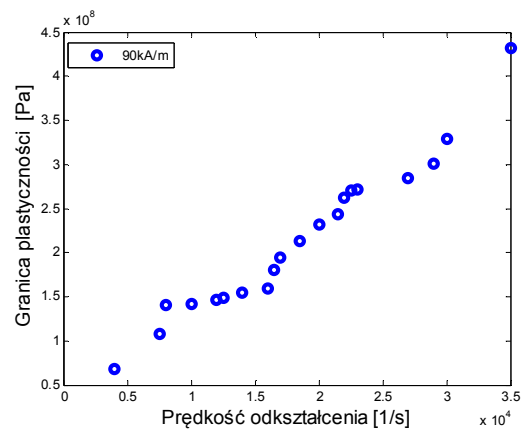


## 4.5 Wyniki testów dynamicznych

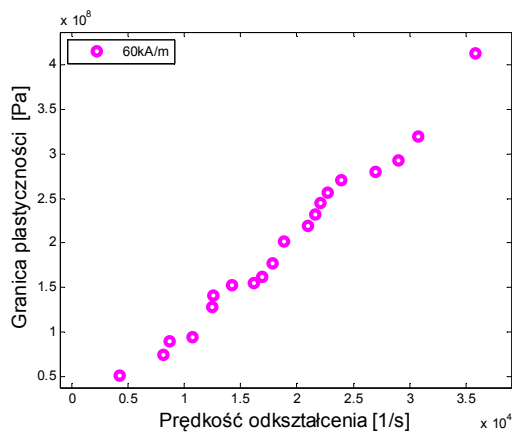
Seria prób dynamicznych dla czterech wartości natężenia pola magnetycznego pozwoliła uzyskać krzywe przedstawiające relację naprężenie - odkształcenie. Na ich podstawie wyznaczono granicę plastyczności, w analogiczny sposób jak dla testów quasi – statycznych, jako przecięcie wykresu z prostą równoległą do zakresu sprężystego i odsuniętą od niego o 0,2%.



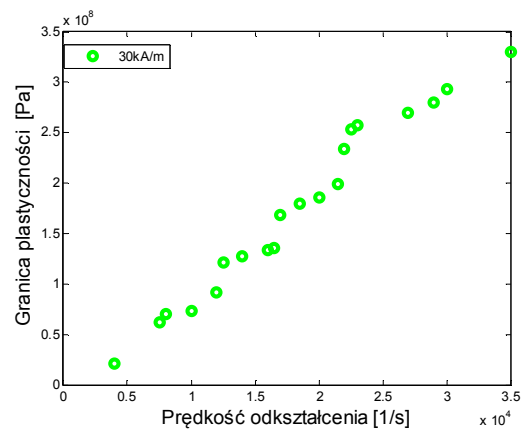
a)



b)



c)



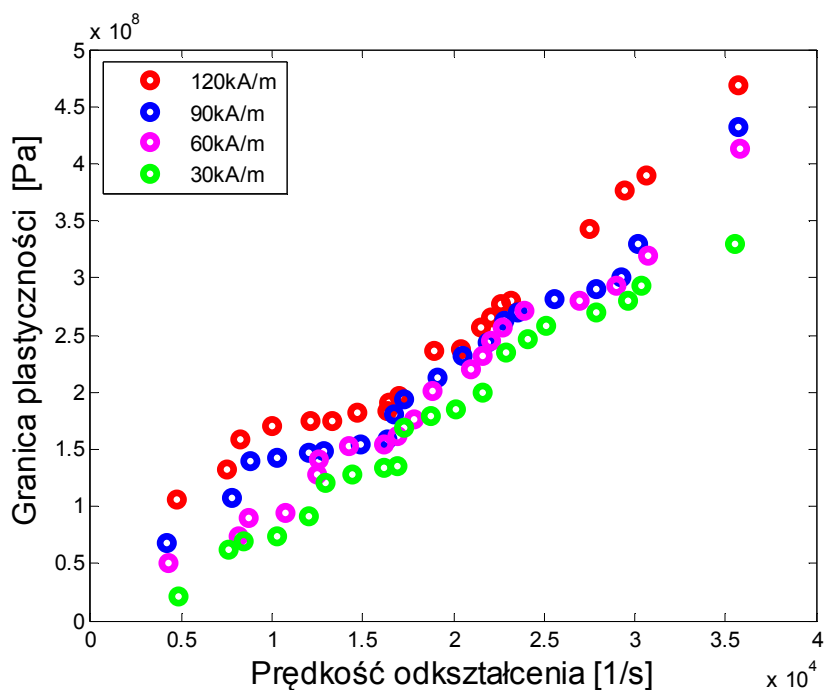
d)

Rys 29: Wyniki pomiarów dla testów dynamicznych: granica plastyczności w zależności prędkości odkształcenia dla pola magnetycznego: a) 120kA/m, b) 90kA/m, c) 60kA/m, d) 30kA/m

Na Rys 29 zostały przedstawione wyniki dla dynamicznej granicy plastyczności w funkcji prędkości odkształcenia. Wyniki są przedstawione w osobno dla każdej zadanej wartości pola magnetycznego. Dla lepszego zobrazowania, wyniki zestawiono również razem na wykresach oraz tabelarycznie.

30 kA/m		60 kA/m		90 kA/m		120 kA/m	
$\dot{\epsilon}$ [1/s]	$\sigma_p$ [MPa]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]	$\sigma_p$ [MPa]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]	$\sigma_p$ [MPa]	$\dot{\epsilon}$ [1/s]	$\sigma_p$ [MPa]
4868	20,550	4262	50,940	4149	68,189	4706	105,808
7584	61,916	8154	73,572	7757	107,990	7531	132,860
8399	70,094	8689	89,283	8840	140,189	8276	158,380
10259	73,142	10748	93,749	10254	142,050	10046	170,664
12000	91,093	12450	127,998	12043	146,750	12097	174,540
12931	121,040	12583	140,880	12814	148,800	13323	174,760
14431	127,340	14228	152,380	14929	154,870	14694	181,400
16181	133,450	16152	154,970	16349	159,170	16317	184,070
16910	135,900	16913	161,170	16696	179,940	16450	190,360
17263	168,290	17825	176,759	17251	194,190	17034	196,010
18763	179,280	18838	201,140	19116	213,250	18938	236,320
20145	185,430	20996	219,425	20473	231,410	20381	237,990
21636	199,080	21578	231,780	21873	243,806	21565	256,100
22869	234,340	22042	244,530	22830	262,010	22065	266,060
24069	246,060	22696	256,120	23585	270,200	22596	277,410
25144	257,750	23961	270,750	25549	282,060	23186	279,850
27843	269,710	27004	280,300	27917	289,530	27489	342,220
29622	280,377	29000	292,568	29285	300,460	29445	375,890
30350	293,490	30774	319,138	30165	329,138	30646	390,090
35513	329,940	35817	413,120	35757	431,990	35709	468,180

Tabela 2: Zestawienie wyników dla testów dynamicznych.



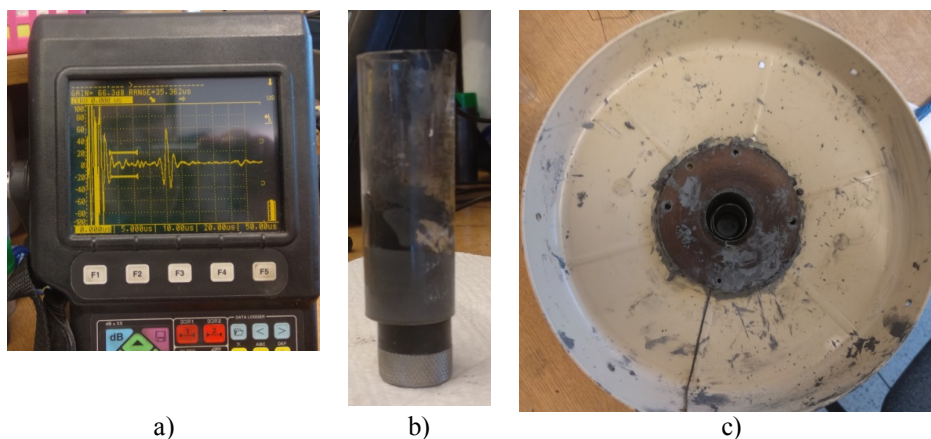
Rys 30: Wyniki dla granicy plastyczności w relacji prędkości odkształcenia w zależności od pola magnetycznego. dla testów dynamicznych.

W wyniku serii prób dynamicznych, ze zmienianą prędkością pocisku oraz dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego uzyskano wartości granicy plastyczności dla materiału magnetoreologicznego. Rezultaty w Tabela 2 oraz na Rys 30

przedstawiają zebrane wyniki granicy plastyczności dla różnych wartości prędkości odkształcenia. Dla prędkości odkształcenia w zakresie  $3000 - 4000 \text{ s}^{-1}$  najniższe wartości granicy plastyczności wykazują wyniki dla natężenia pola magnetycznego  $30 \text{ kA/m}$ . Wartość granicy plastyczności dla  $120 \text{ kA/m}$  jest około 5 razy większa. Dysproporcja różnic granicy plastyczności spada wraz z rosnącą prędkością odkształcenia.

#### 4.6 Wyznaczenie modułu Kirchhoffa

W celu dokładnego opisu charakterystyki materiału magnetoreologicznego wyznaczono również sprężysty moduł ścinania Kirchhoffa. Wielkość ta została wyznaczona za pomocą badań ultradźwiękowych, [Obraz 1983]. Na podstawie serii eksperymentów dla różnych wartości natężenia pola magnetycznego, mierzono prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej w materiale MR, Rys 31.



Rys 31: Wyznaczenie modułu Kirchhoffa, detektor fal ultradźwiękowych EPOCH-3, badany materiał w pojemniku na głowicy ultradźwiękowej, materiał wewnątrz cewki elektromagnetycznej.

Ze zmierzonej wartości prędkości dźwięku  $c$ , można obliczyć moduł sprężystości objętościowej:

$$31) \quad K = \frac{c^2}{\rho_{MR}}$$

Gdzie  $K$  oznacza moduł sprężystości objętościowej, a  $\rho_{MR}$  oznacza gęstość materiału MR wynoszącą  $3740 \text{ kg/m}^3$ . Korzystając z zależności:

$$32) \quad K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$

gdzie  $E$  oznacza moduł Younga, a  $\nu$  współczynnik Poissona oraz ze związku:

$$33) \quad E = 2G(1 + \nu)$$

moduł Kirchhoffa można wyrazić następująco:

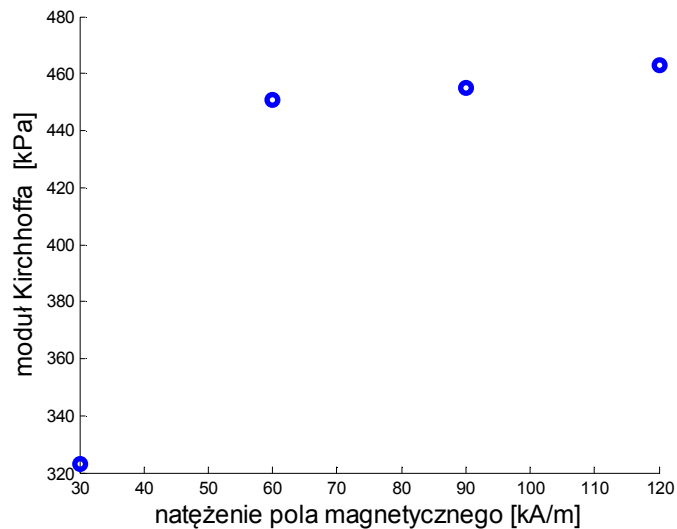
$$34) \quad G = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} K$$

Wartość współczynnika Poissona dla materiałów MR bazujących na węglkach żelaza wyznaczył [Dohmen et al. 2014],  $\nu = 0,4$ . Wielkości modułu Kirchhoffa dla odpowiednich wartości natężenia pola magnetycznego zostały zamieszczone w Tabela 3.

Natężenie pola magnetycznego [kA/m]	Wartość prędkości [m/s]	Moduł Kirchhoffa G [kPa]
30	20,07	323,12
60	23,71	450,74
90	23,83	455,11
120	24,02	462,77

Tabela 3: Wartości modułu Kirchhoffa dla materiału magnetoreologicznego.

A także graficzne przedstawienie zależności w postaci wykresu:



Rys 32: Moduł sprężystości objętościowej w zależności od natężenia pola magnetycznego.

W wyniku zwiększenia natężenia do poziomu 120 kA/m wartość modułu rośnie o 30% w porównaniu z natężeniem pola magnetycznego 30 kA/m. Wartość natężenia pola magnetycznego ma wyraźny wpływ na strukturę połączenia ferroelementów i ich drgań w trakcie przenoszenia podłużnej fali ultradźwiękowej.

## 5 Adaptacja modelu lepkoplastycznego Perzyny do opisu dynamicznej deformacji

### 5.1 Model lepkoplastyczny Perzyny

Prawo Perzyny, opisujące zachowanie materiału czułego na prędkość odkształcenia, można przedstawić w formie jednowymiarowej:

$$35) \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \gamma \langle \Phi[\sigma - f(\varepsilon)] \rangle$$

gdzie:

$\dot{\varepsilon}$  - prędkość odkształcenia

$E$  - moduł Younga

$\gamma$  – współczynnik lepkoplastyczności zdefiniowany przez Perzynę [Perzyna 1963, 1966]

$\kappa = f(\varepsilon)$  quasi-statyczna charakterystyka materiału

Symbolem  $\Phi$  oznaczono funkcję nadwyżki:

$$36) \quad \langle \Phi \rangle = \begin{cases} \Phi, & \text{dla } \sigma > f(\varepsilon) \\ 0, & \text{dla } \sigma \leq f(\varepsilon) \end{cases}$$

Dla materiałów sztywno-lepkoplastycznych z liniową zależnością granicy plastyczności od prędkości odkształcenia otrzymujemy równanie typowe dla modelu Bingham [Bingham 1916]:

$$37) \quad \sigma = f(\varepsilon) + \mu \dot{\varepsilon} ,$$

gdzie  $\mu$  jest znanym w fizyce płynów newtonowskich współczynnikiem lepkości dynamicznej [Pa·s]. Dlatego, aby uniknąć nieporozumień terminologicznych współczynnik  $\gamma$  [s<sup>-1</sup>] w modelu Perzyny został nazwany współczynnikiem lepkoplastyczności.

Dla warunku plastyczności Hubera-Misesa funkcja naprężenia przyjmuje postać:

$$38) \quad f(\sigma_{ij}) = (J_2)^{\frac{1}{2}}$$

$f(\sigma_{ij})$  - funkcja naprężenia

$J_2$  - drugi niezmiennik dewiatora naprężenia  $s_{ij}$

Równanie konstytutywne dla materiału:

$$39) \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G} \dot{s}_{ij} + \gamma \left\langle \Phi \left( \frac{\sqrt{J_2}}{\kappa} - 1 \right) \right\rangle \frac{s_{ij}}{\sqrt{J_2}}$$

oraz:

$$40) \quad \dot{\epsilon}_{ii} = \frac{1}{3K} \dot{\sigma}_{ii}$$

gdzie użyte symbole oznaczają:

K - moduł ściśliwości,

$\dot{\epsilon}_{ij}$  - dewiator tensora prędkości odkształcenia

$\dot{s}_{ij}$  - dewiator tensora prędkości naprężenia

$s_{ij}$  - dewiator tensora naprężenia

$J_2$  - drugi niezmiennik dewiatora naprężenia  $s_{ij}$

G - moduł ścinania

$\gamma$  - współczynnik lepkoplastyczności materiału

$\kappa$  - quasistatyczna granica plastyczności

$\dot{\epsilon}_{ii}$  - prędkość odkształcenia objętościowego

$\dot{\sigma}_{ii}$  - prędkość naprężenia

Dynamiczny warunek plastyczności dla złożonego stanu naprężenia może być obliczony z (39) i przyjmuje postać:

$$41) \quad \sigma_d = \sqrt{J_2}$$

Jak również:

$$42) \quad \sqrt{J_2} = \kappa(W_p) \left[ 1 + \Phi^{-1} \left( \frac{\sqrt{I_2^p}}{\gamma} \right) \right]$$

$W_p$  - jest pracą plastycznego odkształcenia

$I_2^p$  – drugi niezmiennik tensora prędkości odkształcenia lepkoplastycznego:

$$I_2^p = \frac{1}{2} \varepsilon_{kl}^p \varepsilon_{kl}^p$$

równanie (39) dla umocnienia izotropowego oraz dla stanów jednoosiowych można zapisać równoważnie w postaci:

$$43) \quad \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \gamma^* \left\langle \Phi \left[ \frac{\sigma}{\varphi(\varepsilon^p)} - 1 \right] \right\rangle$$

a także:

$$44) \quad \sigma = \varphi(\varepsilon^p) \left[ 1 + \Phi^{-1} \left( \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\gamma^*} \right) \right]$$

gdzie:

$$\varphi(\varepsilon^p) = \sqrt{3} \kappa(W_p)$$

$\gamma^* = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right) \gamma$  i  $\sigma = \varphi(\varepsilon^p)$  określa quasi - statyczną charakterystykę materiału przy prostym rozciąganiu.

## 5.2 Uogólnienie lepkoplastycznego prawa Perzyny do opisu deformacji w polu magnetycznym

Proponuje się rozszerzenie modelu lepkoplastycznego Perzyny dla zagadnień związanych z materiałami zmieniającymi swoje właściwości sprężysto-lepkoplastyczne w polu magnetycznym. Naprężenie graniczne w materiałach magnetoreologicznych, poddanych działaniu pola magnetycznego jest opisywane zazwyczaj przez model Bingham [Bingham 1916]. Model ten opisuje liniowe zmiany naprężenia stycznego w zależności od prędkości odkształcenia postaciowego.

$$45) \quad \sigma = \sigma_{0H}(H) + \mu \dot{\gamma}$$

gdzie:

$\sigma$  - naprężenie

$\sigma_{0H}$  - styczne naprężenie graniczne zależne od pola magnetycznego

$\mu$  - współczynnik lepkości cieczy

$\dot{\gamma}$  - prędkość odkształcenia postaciowego

W nawiązaniu do równania (39), równanie konstytutywne dla materiału reologicznego w polu magnetycznym można przedstawić:

$$46) \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2G(H)} \dot{s}_{ij} + \gamma(H) \left\langle \Phi \left( \frac{\sqrt{J_2}}{\kappa(H)} - 1 \right) \right\rangle \frac{s_{ij}}{\sqrt{J_2}}$$

Współczynniki w równaniu oznaczają:

$2G(H)$  - moduł sprężysty ścinania (Kirchhoffa) zależny od pola magnetycznego

$\gamma(H)$  - współczynnik lepkoplastyczności materiału w polu magnetycznym

$\kappa(H)$  - quasistatyczna granica plastyczności w zależności od pola magnetycznego

Jest to uogólnienie modelu Perzyny dla materiałów magnetoreologicznych. Równanie (46) jest więc równaniem konstytutywnym lepkoplastycznego materiału magnetoreologicznego. Dla stanu jednoosiowego równanie można przedstawić dla różnych form funkcji nadwyżki:

- potęgowa funkcja nadwyżki:

$$47) \quad \dot{\epsilon} = \gamma(H) \left( \frac{\sigma}{\kappa(H)} - 1 \right)^{n(H)}$$

- eksponencjalna funkcja nadwyżki:

$$48) \quad \dot{\epsilon} = \gamma(H) \left( e^{\frac{\sigma}{\kappa(H)}} - 1 \right)$$

- liniowa funkcja nadwyżki:



$$49) \quad \dot{\epsilon} = \gamma(H) \left( \frac{\sigma}{\kappa(H)} - 1 \right)$$

gdzie:

- $\dot{\epsilon}$  - prędkość odkształcenia liniowego
- $\gamma(H)$  - współczynnik lepkoplastyczności zależny od pola magnetycznego
- $\kappa(H)$  - quasistatyczna granica plastyczności zależna od pola magnetycznego
- $n(H)$  - współczynnik wykładnika potęgi
- $\sigma$  - naprężenia normalne

W procesie lepkoplastycznego płynięcia w polu magnetycznym naprężenie normalne  $\sigma$  osiąga poziom dynamicznej granicy plastyczności  $\sigma = \sigma_d$ , którą wyrażono odpowiednio dla potęgowej, eksponencjalnej oraz liniowej funkcji nadwyżki.

Wykorzystując potęgową, liniową jak również eksponencjalną postać funkcji nadwyżki, można zidentyfikować z wykorzystaniem regresji klasycznej [Magiera 2012] brakujące współczynniki występujące w prawie Perzyny.

### 5.3 Metoda identyfikacji parametrów modelu Perzyny z potęgową funkcją nadwyżki

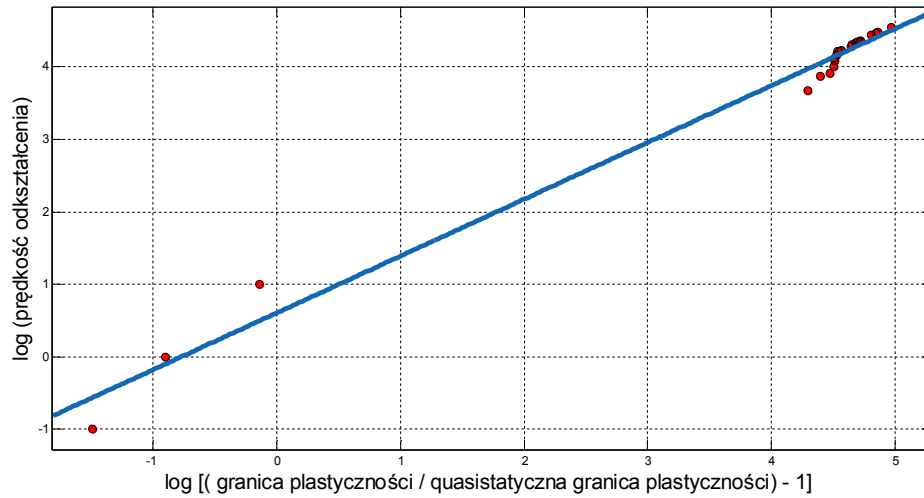
Metoda identyfikacji modelu Perzyny z potęgową funkcją nadwyżki została przedstawiona w [Kłosowski, Mileczek 2014], [Asraff et al. 2017]. Wartości naprężenia oraz prędkości odkształceń można przedstawić po działaniu operacji logarytmowania o podstawie dziesiętnej:

$$50) \quad \log \dot{\epsilon} = n(H) \log \left( \frac{\sigma_d}{\kappa(H)} - 1 \right) + \log \gamma(H)$$

Na podstawie równania (50), uzyskane wyrażenie można przypisać do równania prostej:

$$51) \quad y = ax + b$$

gdzie identyfikacji przy użyciu programu MATLAB zostaną poddane współczynniki odpowiadające wartości  $a$ :  $n(H)$  oraz  $b$ :  $\log \gamma(H)$ , z wykorzystaniem regresji klasycznej.



Rys 33: Dopasowanie prostej metodą regresji liniowej dla wartości pomiarowych uzyskanych w polu magnetycznym 120kA/m

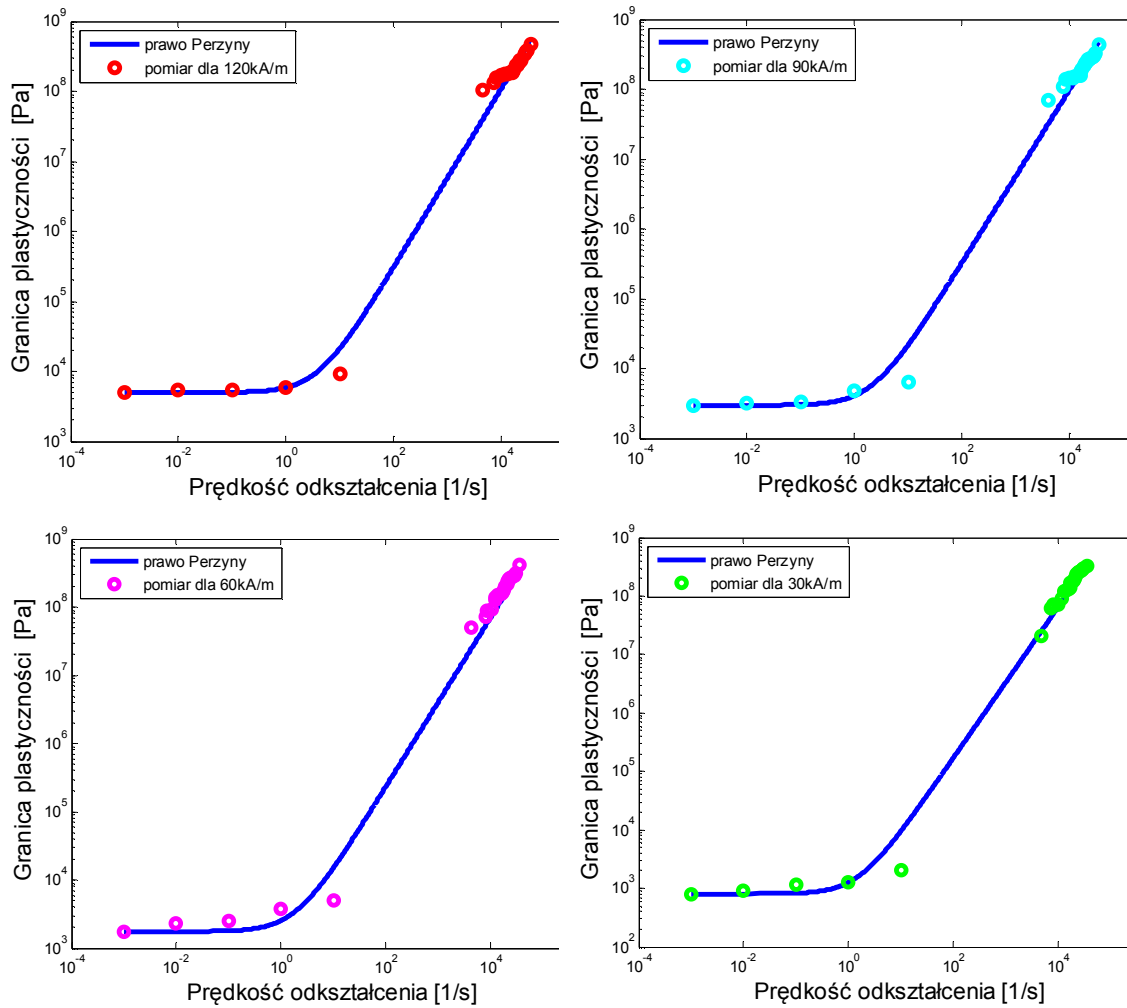
W wyniku operacji logarytmowania wartości granicy plastyczności oraz prędkości odkształcenia wyznaczono równanie opisującą prostą dla szeregu pól magnetycznych:

	30kA/m	60kA/m	90kA/m	120kA/m
$\kappa(H)$ [Pa]	933	2316	3175	5340
$n(H)$	$0,7743 \pm 0.00542$	$0,8071 \pm 0.00412$	$0,8085 \pm 0.00438$	$0,7834 \pm 0.00418$
$\gamma(H)$ [1/s]	$1,6129 \pm 0.04766$	$1,9688 \pm 0.06924$	$2,2793 \pm 0.08282$	$4,0523 \pm 0.0817$
$R^2$	0,9768	0,9875	0,9860	0,9864

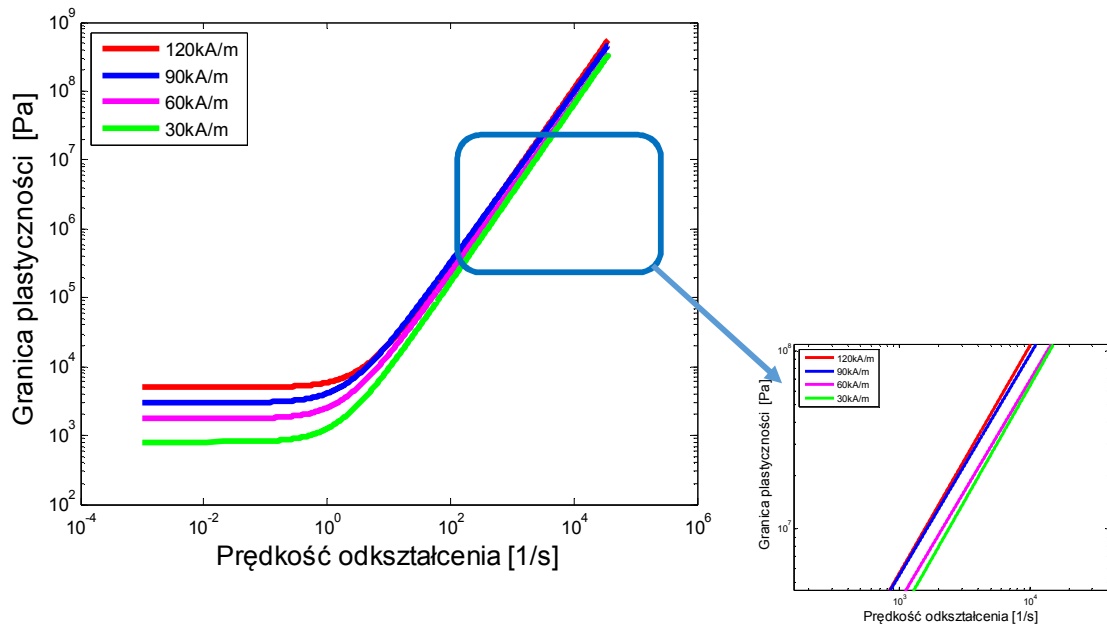
Tabela 4: Wartości współczynników potęgowej postaci prawa Perzyny.

W wyniku wyznaczenia współczynników  $\gamma(H)$  oraz  $n(H)$  można zestawić razem potęgowa postać prawa Perzyny wraz z wynikami doświadczalnymi.

$$52) \quad \sigma_d(H) = \kappa(H) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\gamma(H)} \right)^{\frac{1}{n(H)}} \right)$$



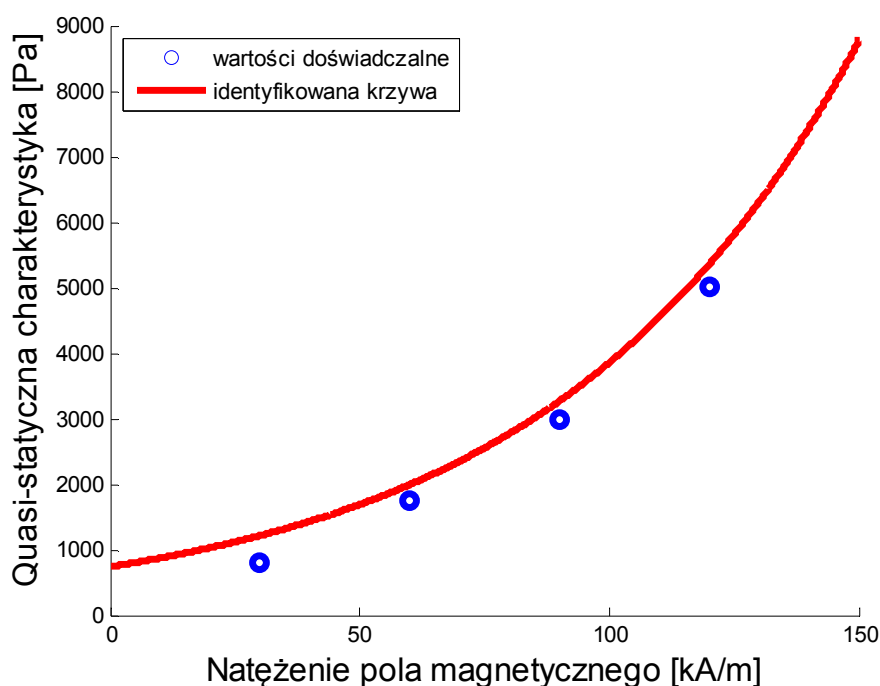
Rys 34: Wyniki dopasowania Prawa Perzyny z potęgową funkcją nadwyżki.



Rys 35: Zestawienie wyników postaci potęgowej funkcji nadwyżki prawa Perzyny.

Wykresy przedstawiające wartości doświadczalne oraz zidentyfikowanego prawa Perzyny z potęgową postacią funkcji nadwyżki zamieszczone na Rys 34 i Rys 35 (bez doświadczalnych punktów pomiarowych). Warto nadmienić, iż dla wyższych prędkości odkształcenia, wartości granicy plastyczności nie nakładają się lecz przebiegają w bliskim otoczeniu.

Dla serii prób quasi-statycznych, wykonano próbę testu ściskania z prędkością  $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$ . Wartość granicy plastyczności z tej próby jest określona jako funkcja natężenia pola magnetycznego  $\kappa(H)$ . Na podstawie testów quasi-statycznych dla pól magnetycznych (30, 60, 90 i 120 kA/m) korzystając z regresji nieliniowej zaproponowano równanie (53) oraz wyznaczono krzywą:



Rys 36: Wartość dopasowania quasi-statycznej charakterystyki.

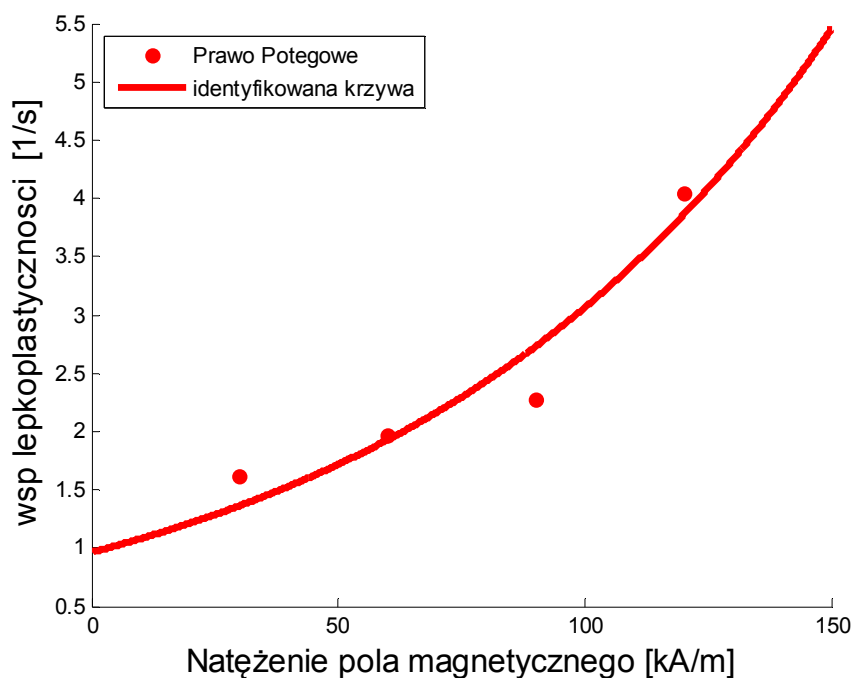
53) 
$$\kappa(H) = ae^{bH}$$

Współczynniki  $a$  oraz  $b$  zebrano w tabeli poniżej:

Współczynnik	Wartość
A	$740,1 \pm 74,1169$
B	$0,01648 \pm 0,0114$
R <sup>2</sup>	0,9811

Tabela 5: Współczynniki dopasowania quasi-statycznej granic plastyczności dla  $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ s}^{-1}$ .

Na podstawie danych z Tabela 4 można przedstawić wartości w formie wykresów oraz korzystając z regresji nieliniowej dopasować równanie opisujące zależność współczynnika lepkoplastyczności.



Rys 37: Zależność współczynnika lepkoplastyczności od pola magnetycznego.

Na podstawie wyników doświadczalnych, korzystając z regresji nieliniowej, proponuje się równanie mające postać:

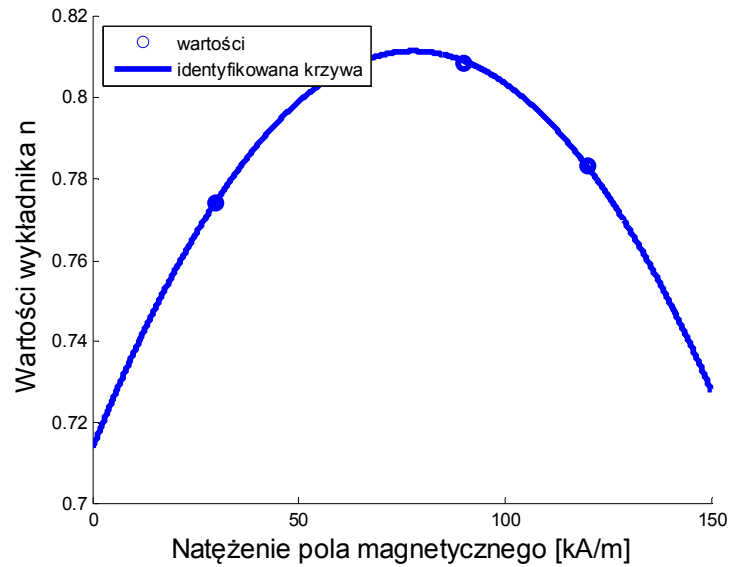
$$54) \quad \gamma = ae^{bH}$$

Powyższe równanie opisuje zależność współczynnika lepkoplastyczności  $\gamma$  w zależności od wartości pola magnetycznego -  $H$ . Współczynniki zebrano w tabeli poniżej:

Współczynnik	Wartość
A	0,9611±0,01116
B	0,01157±0,00114
R <sup>2</sup>	0,9142

Tabela 6: Współczynnik dopasowania współczynnika lepkoplastyczności dla potęgowej postaci prawa Perzyny.

Wartości, opisujące wartość wykładników w potęgowej postaci prawa Perzyny można przedstawić również w zależności:



Rys 38: Współczynniki wykładnika potęgi.

Na podstawie wyników doświadczalnych zaproponowano równanie, opierając się na metodzie regresji nieliniowej, mające postać opisu zależności wykładnika:

$$55) \quad n = aH^2 + bH + c$$

Równanie (55) opisuje zależność współczynnika wykładnika potęgi  $n$  w zależności od wartości pola magnetycznego -  $H$ . Współczynniki zebrano w tabeli poniżej:

Współczynnik	Wartość
A	$-1,608 \cdot 10^{-5} \pm 3,98 \cdot 10^{-6}$
B	$0,002508 \pm 0,0001179$
C	$0,7138 \pm 0,00388$
R <sup>2</sup>	0,9986

Tabela 7: Współczynnik dopasowania wykładnika dla potęgowej postaci prawa Perzyny.

#### 5.4 Wyniki identyfikacji parametrów modelu Perzyny z eksponencjalną funkcją nadwyżki

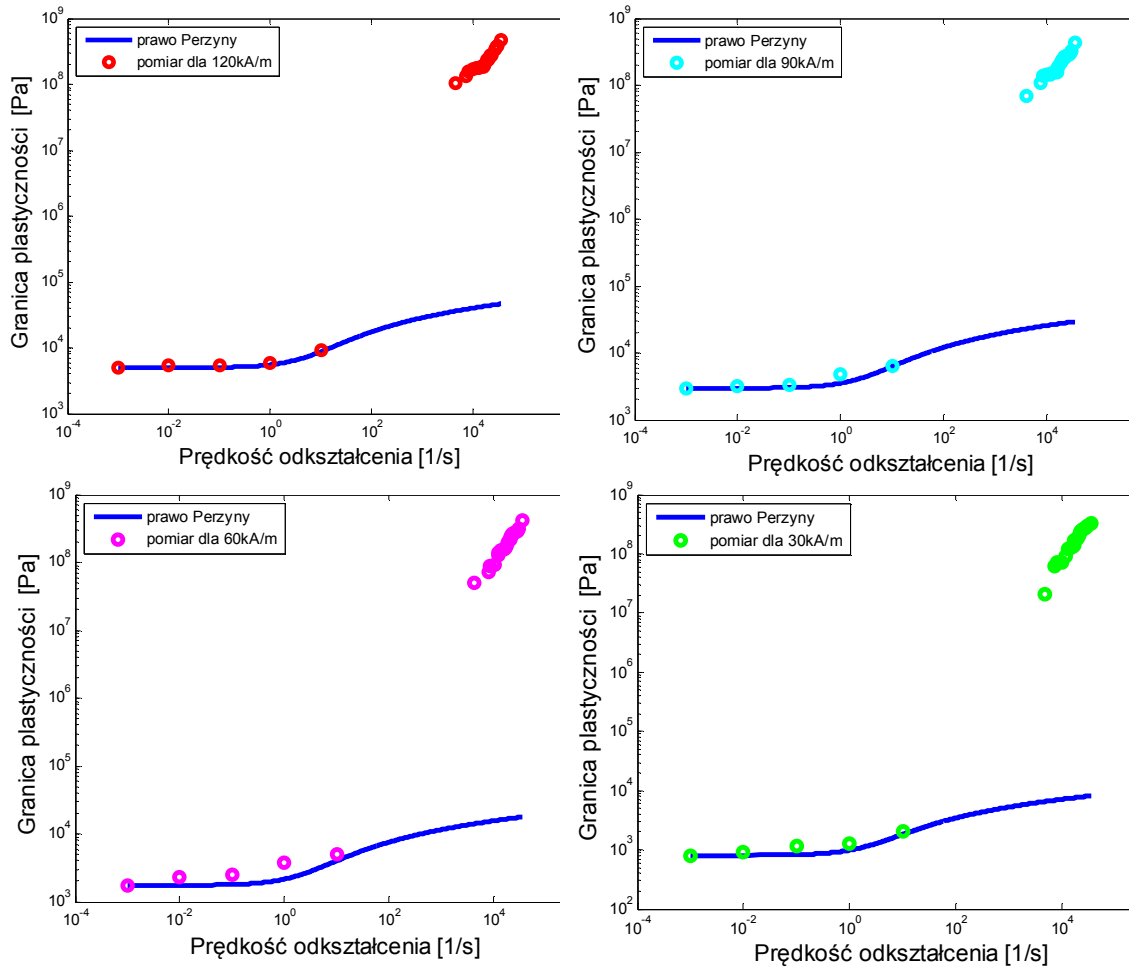
Dla lepkoplastycznego modelu Perzyny z nieliniową funkcją nadwyżki wyrażoną w postaci eksponencjalnej, dopasowanie współczynnika lepkoplastyczności za pomocą regresji nieliniowej przeprowadzono w następujący sposób:

$$56) \quad \dot{\epsilon} = \gamma(H) \left( e^{\frac{\sigma_d}{\alpha(H)} - 1} - 1 \right)$$

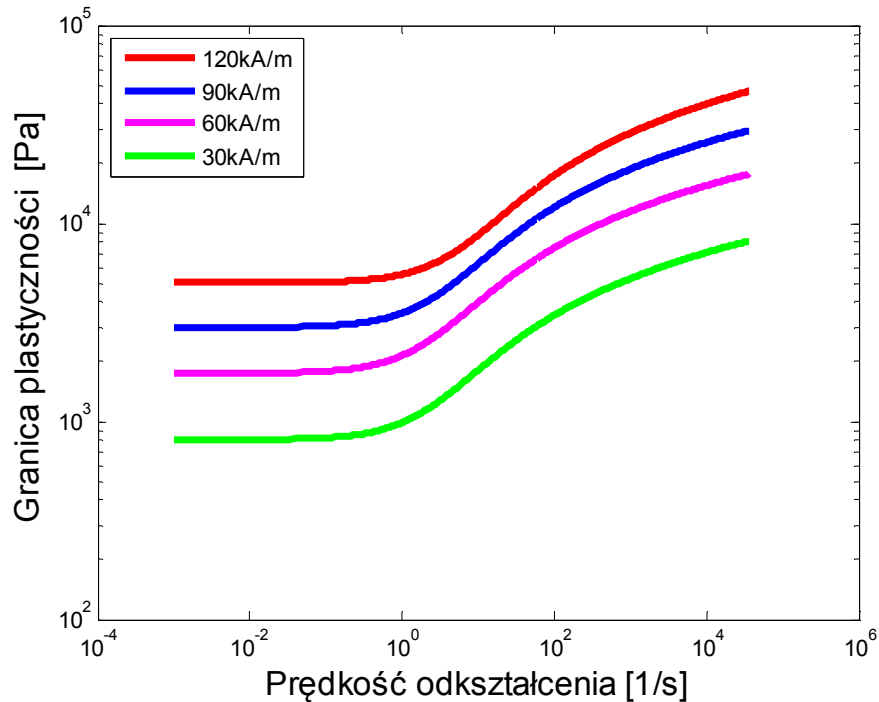
gdzie za funkcję dopasowania wybrano funkcję postaci:

$$57) \quad y = a \cdot (e^x - 1)$$

Wyniki dopasowania wykresów przedstawiono poniżej:



Rys 39: Wyniki dopasowania Prawa Perzyny z eksponencjalną funkcją nadwyżki.



Rys 40: Zestawienie wyników dla postaci eksponencjalnej funkcji nadwyżki prawa Perzyny.

	30kA/m	60kA/m	90kA/m	120kA/m
$\kappa(H)[Pa]$	933	2316	3175	5340
$\gamma(H)[Pa \cdot s]$	$4,141 \pm 0,1194$	$3,954 \pm 0,1827$	$5,137 \pm 0,2488$	$9,343 \pm 0,5429$
$R^2$	0,5768	0,5875	0,5860	0,5864

Tabela 8: Wyniki dopasowania współczynników dla prawa Perzyny z eksponencjalną funkcją nadwyżki.

Wyniki dopasowania współczynnika lepkoplastyczności  $\gamma(H)$  dla postaci eksponencjalnej prawa Perzyny nie są adekwatne dla opisu zachowania materiału. Współczynnik  $R^2$  odpowiedzialny za jakość dopasowania świadczy o bardzo niskiej jakości dopasowania. Eksponencjalna postać funkcji nadwyżki, ze względu na duże odchylenia w identyfikacji, nie wykazuje dobrego dopasowania do opisu zachowania materiału magnetoreologicznego.

## 5.5 Wyniki identyfikacji parametrów modelu Perzyny z liniową funkcją nadwyżki

Model Perzyny można również wyrazić liniową funkcją nadwyżki, dopasowanie współczynnika lepkoplastyczności za pomocą regresji klasycznej przeprowadzono w następujący sposób:

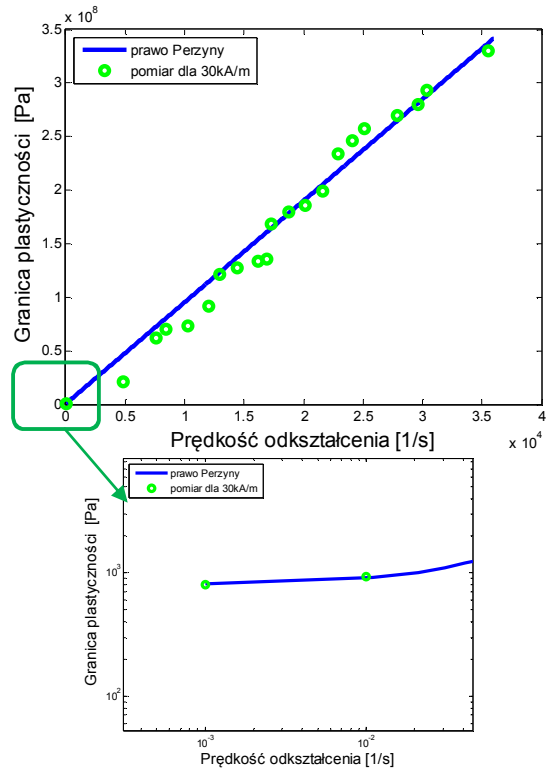
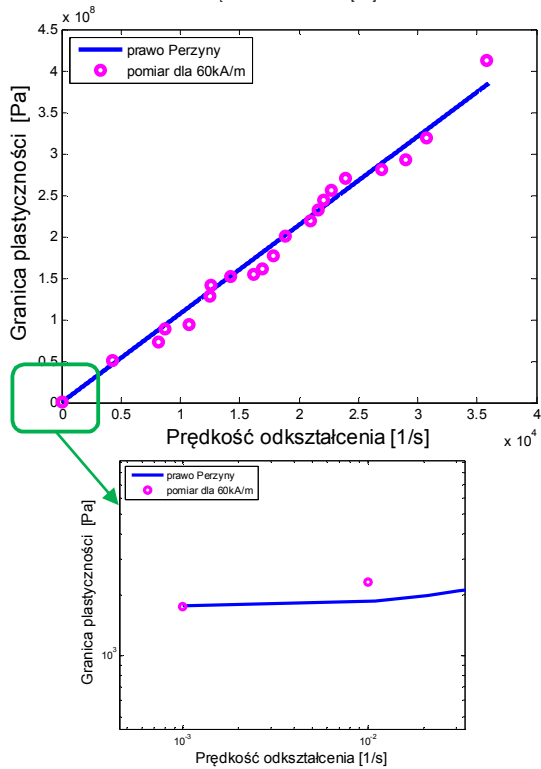
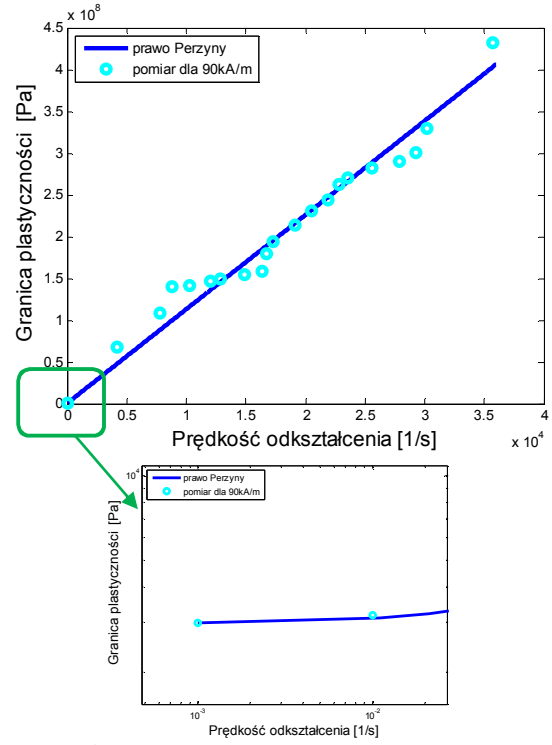
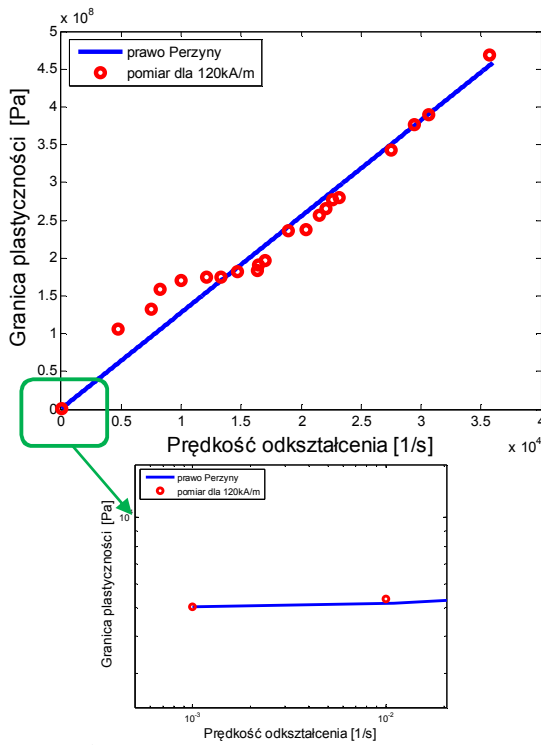


$$58) \quad \dot{\epsilon} = \gamma(H) \left( \frac{\sigma_d}{\kappa(H)} - 1 \right)$$

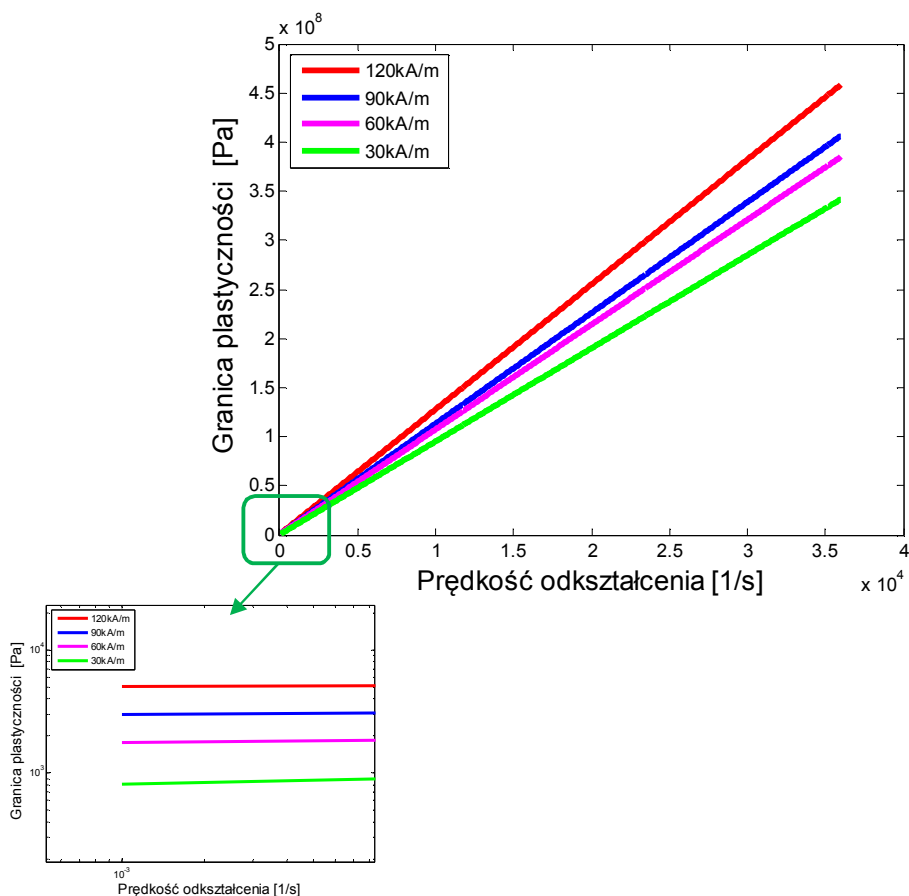
gdzie za funkcję dopasowania wybrano równanie postaci:

$$59) \quad y = a \cdot x$$

oraz w formie wykresów:



Rys 41: Wyniki dopasowania Prawa Perzyny z liniową funkcją nadwyżki do wyników eksperymentalnych.



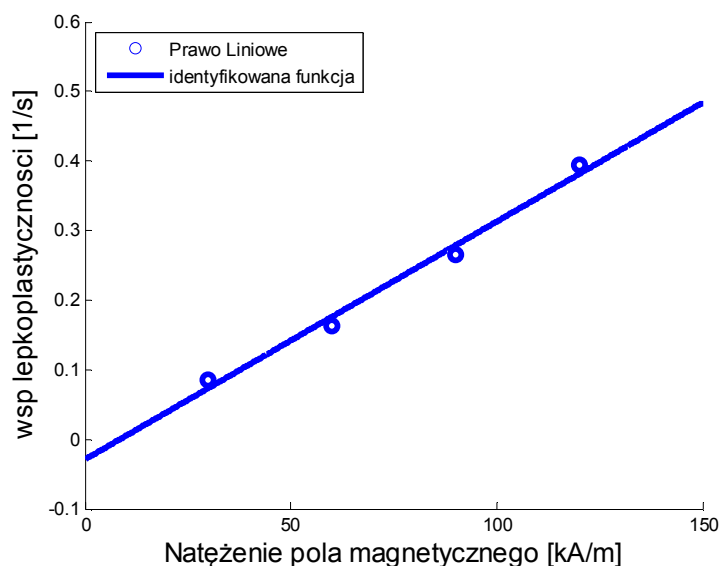
Rys 42: Wyniki dopasowania Prawa Perzyny z liniową funkcją nadwyżki.

	30 kA/m	60 kA/m	90 kA/m	120 kA/m
$\kappa(H)$ [Pa]	933	2316	3175	5340
$\gamma(H)$ [1/s]	$0,08519 \pm 0,0032$	$0,1639 \pm 0,0057$	$0,2644 \pm 0,0097$	$0,3937 \pm 0,0179$
$R^2$	0,9828	0,9885	0,9805	0,9768

Tabela 9: Wyniki dopasowania współczynników dla prawa Perzyny z liniową funkcją nadwyżki.

Wykresy przedstawiające wartości doświadczalne oraz zidentyfikowanego prawa Perzyny z liniową postacią funkcji nadwyżki, zostały przedstawione na Rys 41 oraz Rys 42 – przedstawiający wartości bez punktów pomiarowych dla zależności granicy plastyczności od prędkości odkształcenia.

Na podstawie danych z Tabela 9 można przedstawić wartości w formie wykresów oraz korzystając z regresji klasycznej, dopasować równanie opisujące tę zależność.



Rys 43: Zależność współczynnika lepkości w funkcji natężenia pola magnetycznego.

Na podstawie wyników doświadczalnych zaproponowano liniową aproksymację w oparciu o równanie:

$$60) \quad \gamma = aH + b$$

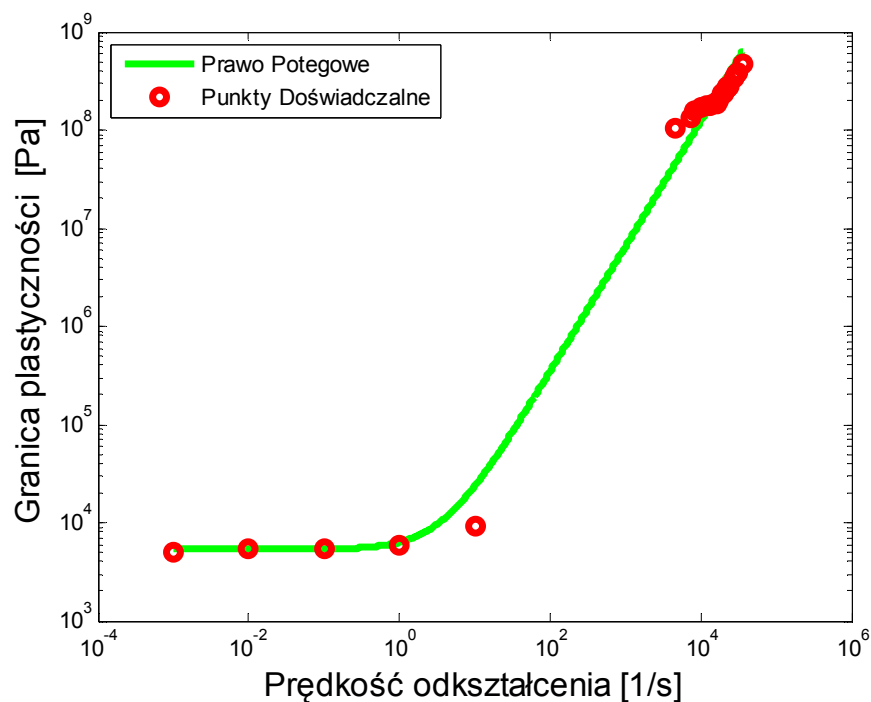
Równanie (59) opisuje zależność współczynnika lepkości  $\gamma$  w funkcji wartości natężenia pola magnetycznego -  $H$ . Współczynniki zebrano w tabeli poniżej:

Współczynnik	Wartość
a	$0,003385 \pm 1,3 \cdot 10^{-5}$
b	$-0,00095 \pm 1,037 \cdot 10^{-7}$
R <sup>2</sup>	0,977

Tabela 10: Współczynniki zidentyfikowane dla liniowej postaci prawa Perzyny.

## 5.6 Weryfikacja Prawa Perzyny o potęgowej funkcji nadwyżki

Na podstawie równań opisujących zależność  $\gamma(H)$ ,  $n(H)$ ,  $\kappa(H)$  (równania 53, 54 oraz 55) wyrażonych w funkcji natężeniem pola magnetycznego, wyznaczono zależność granicy plastyczności od prędkości odkształcenia dla potęgowej postaci funkcji nadwyżki, dla materiału MR w polu magnetycznym o natężeniu 120 kA/m.



Rys 44: Wyniki doświadczalnie wyznaczonej granicy plastyczności, oraz na podstawie zidentyfikowanych współczynników w modelu Perzyny dla pola 120 kA/m.

Na Rys 44 przedstawiono porównanie przewidywanej zależności dla granicy plastyczności potęgowej funkcji nadwyżki od prędkości odkształcenia, w zależności od natężenia pola magnetycznego. Można zauważyć zgodność zidentyfikowanego modelu Perzyny z wynikami doświadczalnymi.

## 6 Podsumowanie pracy

Celem pracy jest analiza lepkoplastycznych właściwości materiałów magnetoreologicznych dla dużych prędkości odkształcenia. Studium literatury z dziedziny badania materiałów z zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona pozwoliło zmodyfikować stanowisko badawcze do testowania materiałów magnetoreologicznych. Na podstawie analizy literatury, wybrano model Perzyny i następnie zaadaptowano go do opisu deformacji materiału w polu magnetycznym.

Ważną częścią pracy są mikroskopowe obserwacje deformacji materiału MR w skali mikro jak również testy imitacji materiału bazującego na metalowych kulkach z użyciem szybkiej kamery. Proces deformacji materiału MR bazuje na oderwaniu pojedynczego łańcucha ferroelementów inicjujących postępujący mechanizm odrywania kolejnych łańcuchów. Zaobserwowana deformacja zachodzi na podstawie powstawania hierarchicznych pasm ścinania obserwowanych również w materiałach metalicznych [Pęcherski 1998a, 1998b].

Wyznaczona granica plastyczności dla materiału MR w quasi-statycznym i dynamicznym procesie odkształcenia posłużyła do wyspecyfikowania prawa Perzyny do opisu lepkoplastycznej deformacji materiału. Identyfikując model materiałowy Perzyny wykorzystano funkcję nadwyżki: potęgową, eksponencjalną oraz liniową. Za najbardziej przydatną do opisu lepkoplastycznej deformacji materiału MR uznano funkcję potęgową.

Wykorzystanie lepkoplastycznego modelu Perzyny zaadaptowanego do pracy w polu magnetycznym pozwala na bardziej adekwatny opis zachowania materiału w wyniku dużych prędkości odkształceń.

## 7 Dyskusja i wnioski końcowe

Przedstawiona praca dotyczy badań doświadczalnych oraz opisu zachowania materiałów magnetoreologicznych. W prezentowanej pracy poruszono aspekt opisu deformacji mikrostruktury materiału magnetoreologicznego jak również sformułowano równanie konstytutywne lepkoplastycznej deformacji.

Obserwacja *insitu* deformacji materiału magnetoreologicznego jak również imitującego go modelu pozwoliła na zidentyfikowanie mechanizmu przyrostu odkształceń mikrostruktury jako rozwijających się hierarchicznie pasm ścinania. Zaproponowany przez [Jolly et al., 1996] oraz [Tang, Conrad, 2000] opis bazujący na oddziaływaniach dipolowych nie obejmuje zagadnień z uwzględnieniem przepływu cieczy nośnej, magnetyzmu szczątkowego ferroelementów czy też ich zbyt dużego nagromadzenia. Interesującym zagadnieniem mogącym połączyć wpływ wymienionych warunków jest symulacja zachowania się materiału magnetoreologicznego. Jednym ze sposobów, jest wykorzystanie metody elementów dyskretnych (DEM – Discrete Element Method). Opis deformacji materiału magnetoreologicznego przy pomocy DEM przedstawił [Lagger et al 2014]. Zastosowanie symulacji numerycznej do opisu deformacji mikrostruktury pod wpływem dynamicznych obciążeń jest obiecującym kierunkiem dla rozwoju badań nad materiałami magnetoreologicznymi. W szczególności, do tworzenia symulacji deformacji materiału MR pomocne mogą okazać się badania z wykorzystaniem tomografii komputerowej.

Lepkoplastyczne zachowanie materiału magnetoreologicznego powszechnie jest opisywane przy użyciu prawa Bingham [Milecki 2010]. Rozwinięcie opisu materiału, o zaadoptowane do pracy w polu magnetycznym prawo Perzyny rozszerza opis deformacji materiału, uwzględniając jego nieliniowe zachowanie. Teza pracy, która zakładała wykazanie, iż powszechnie stosowany model Bingham [Bingham 1916] okazuje się nieadekwatny do opisu zachowania materiałów MR zakresie prędkości odkształcenia większych od  $10^2 \text{ s}^{-1}$  i należy go zastąpić modelem bardziej szczegółowym, została w pełni wykazana dzięki przeprowadzeniu własnych badań doświadczalnych. Ich wyniki posłużyły do identyfikacji nieliniowej funkcji nadwyżki w modelu lepkoplastycznym Perzyny.

Wykorzystanie do badań opisaną w pracy zmodyfikowaną wersję dzielonego Pręta Hopkinsona jest nowością, ze względu na możliwość badania zależnego od pola

magnetycznego materiału. Istotnym jest, iż modyfikacja stanowiska badawczego uwzględniła dyssypacyjne właściwości materiału MR. Testowanie różnych materiałów magnetoreologicznych w zależności od wpływu natężenia pola magnetycznego z użyciem dzielonego Pręta Hopkinsona zostało przeprowadzone dla elastomerów [Liao et al. 2013] czy też plastomerów [Xu et al. 2018] czy też żeli [Yangguang et al. 2013]. Odniesienie względem siebie uzyskanych wyników naprężenia może okazać się trudne, ze względu na różnice w mikrostrukturze badanych materiałów. Analizie można poddać warunki przeprowadzania eksperymentów. W przypadku [Liao et al. 2013] maksymalna użyta prędkość pocisku dochodziła do 30m/s, gdzie dla testowanego materiału LORD MRF - 140CG nie przekroczone 16 m/s. Dla materiału testowanego przez [Xu et al. 2018] osiągnięto prędkość deformacji rzędu  $7900\text{s}^{-1}$  co jest prędkością trudną dla uzyskania w przypadku dzielonego pręta Hopkinsona dla testowanego materiału firmy LORD ( $3500\text{s}^{-1}$ ). Testowanie materiału LORD MRF - 140CG w wyższych prędkościach odkształcenia może mieć uzasadnienie w wykorzystaniu jako warstwa rozpraszająca energię pocisku pistoletowego [Frąs T. et al. 2017]. Rozszerzenie opisu zachowania materiału da dużych prędkości deformacji może okazać się uzasadnieniem dla przeprowadzenia testu uderzenia bezpośredniego ( Direct Impact Test). W przypadku testowania materiałów metalicznych możliwe jest uzyskanie prędkości odkształceń większych niż  $4000\text{s}^{-1}$  [Klepaczko 2007].

## 8 Literatura

1. Abed F., H., Voyiadjis G., Z., Plastic Deformation Modeling of AL-6Xn Stainless Steel at Low and High Strain Rate and Temperature Using a Combination of Bcc and Fcc Mechanisms of Metals., *International Journal of Plasticity*, 21, 1618-1639, 2005.
2. Asraff A., K., George M., V., Jayamani K., Sarath S., Nair Ch., Evaluation of Viscoplastic Parameters of an Austenitic Stainless Steel at High Temperature, *Proceedings of Fatigue, Durability and Fracture Mechanics*, pp 7-28, 2017.
3. Bajkowski J., Skalski P., Analysis of Viscoplastic Properties of a Magnetorheological Fluid in a Damper. *Acta Mechanica*. vol 6 no 3, 5-10, 2012.
4. Baranowski P., Janiszewski J., Małachowski J., Tire Rubber Testing Procedure Over a Wide Range of Strain Rates, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 55, 2 pp-727-739, Warsaw 2017.
5. Bingham E.C., An investigation of the laws of plastic flow, *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 13, 309-353, 1916.
6. Bodner S.R., Partom Y., Dynamic Inelastic Properties of Materials, Part II., Representation of Time-Dependent Characteristics of Metals, *Proc 8th Cong. of the ICAS, Amsterdam*, 28-72, 1972.
7. Bodner S.R., Partom Y., Constitutive Equations for Elastic-Viscoplastic Strain-Hardening Materials, *ASME, J. Appl. Mech.*, 42, 385-389, 1979.
8. Chen W., Zhang B., Forrestal M., J., A Split Hopkinson Bar Technique for Low-impedance Materials, *Experimental Mechanics Vol. 39, No. 2:81:85*, 1999.
9. Chen W.W., Song, B., *Split Hopkinson (Kolsky) Bar Design, Testing and Applications*, Springer New York Dordrecht Heidelberg London 2011.
10. Chen W., W., *Experimental Methods for Characterizing Dynamic Response of Soft Materials*, *Journal of Dynamic Behaviour of Material* 2: 2-14, 2016.
11. Church P., Cornish R., Cullis I., Gould P., Lewtas I., Using the Split Hopkinson Pressure Bar to Validate material Models., *Philos. Trans. A. Math Phys Eng Sci.*, 372(2023), Aug 28, 2014.
12. Dobrzański L., A., *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznastwo*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne PWN-WNT, 2006.



13. Dohmen E., Boisly M., Borin D., Kästner M., Ulbricht V., Gude M., Hufenbach W., Heinrich G., Odenbach S., Advancing Towards Polyurethane-Based Magnetorheological Composites, *Advanced Engineering Materials*, vol 16, No. 10, 2014.
14. Dohmen E., Modler N., Gude M., Anisotropic Characterization of Magnetorheological Material, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 431, 107-109, 2017.
15. Don-Woo K., Jung-Won L., Myeong-Woo Ch., Young-Jae S., Jingwen X., Ki-Ju L., Seing-Young S., Won-Seung Ch., Ultra Precision Polishing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics Using Magnetorheological Fluids and Diamond Abrasives., *Journal of Ceramics Processing Research.*, Vol. 10, No. 3, pp. 290-295, 2009.
16. Fraś L., J., The Perzyna Viscoplastic Model in Dynamic Behaviour of Magnetorheological Fluid under High Strain Rates, *Engineering Transactions*, Vol. 63, No. 2, pp 233-243, 2015.
17. Fraś L., J., Pęcherski R., B., Modified split Hopkinson pressure bar for investigations of dynamic behaviour of magnetorheological materials, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.56, No.1, pp.323-328, 2018.
18. Fraś L., Jarzabek D., Pręgoska A., Przyrząd pomiarowy do mikroskopwej obserwacji i pomiaru deformacji materiałów w czasie rzeczywistym, *Zgłoszenia patentowe 424702*, 2018.
19. Fraś L., J., Dziekoński C., Dera W., Jarzabek D., M., Piezoelectric Bimorph as a High-Sensitivity Viscosity Resonator Sensor to Test the Anisotropy of Magnetorheological Fluid, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 89, No. 10, pp. 105111-1-7, 2018.
20. Fraś T., Fraś L., J., Faderl N., Rubber and Magnetorheological Fluid Applied as Interlayer in Composite Armours Against High – Velocity Loadings., *Diagnostyka* 18(3), 64-68, 2017.
21. Harpavat G. Magnetostatic Forces on a Chain of Spherical Beads in a Nonuniform Magnetic Field., *IEEE* 1974.
22. Heinsch M., Vogluber-Brunnmaier T., Reichel E., K., Dufour I., Jakoby ., Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors., HAL Id: hal-01062267, Submitted on 13 Nov 2014.
23. Holnicki-Szul J., Graczykowski C., Mikułowski G., Mróz A., Pawłowski P.K., Smart technologies for adaptive impact absorption, *Solid State Phenomena (ISSN: 1012-0394) Vol.154*, 187-194, 2009.

24. Hopkinson B., A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of High Explosives or by the Impact of Bullets, *Philos. Trans. R. Soc. (London) A*, 213, pp. 437–456, 1914.
25. Janiszewski J., *Badania materiałów inżynierskich w warunkach obciążenia dynamicznego*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2012.
26. Jankowiak T., Rusinek A., Lodygowski T., Validation of the Klepaczko-Malinowski Model for Friction Correction and recommendations on Split Hopkinson Pressure Bar, *Finite Elements in Analysis and Design* 47, 1191-1208, 2011.
27. Jastrzębski Ł., Sapiński B., Experimental Investigation of an Automotive Magnetorheological Shock Absorber, *Acta Mechanica et Automatica*, vol. 11, no.1, 253 – 259, 2017.
28. Johnson G., R., Cook W., H., A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures., *Proceedings of Seventh International Symposium on Ballistics*, 541-547 The Hague, The Netherlands 1983.
29. Jolly R., M., Carslon D., J., Munoz B., C., A Model of the Behaviour of Magnetorheological Materials., *Smart Materials and Structures* 5 (1996), 607-614.
30. Jutras M., Improvement of the Characterisation Method of the Johnson-Cook Model., *Master Science Thesis*, 2008.
31. Kaleta J., *Materiały magnetyczne SMART Budowa, wytwarzanie, badanie właściwości, zastosowanie*. Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
32. Kang G., T., Hulsen A., M., Toonder, Anderson D., P., Mijer H., E.,H., A Direct Simulation Method for Flows with Suspended Paramagnetic Particles. *Journal of Computational Physics* 227, 441-4458., 2008.
33. Klepaczko J. R., *Introduction to experimental techniques for materials testing at high strain rates*, Institute of Aviation, Warsaw, 2007.
34. Kolsky, H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading *Proc. Phys. Soc. B.* 62: 676-700, 1949.
35. Kołek K., Rosół M., Zastosowanie Tłumika Magnetoreologicznego w Tłumieniu Drgań, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 5, 5-8, 2007.
36. Kłosowski P., Mileczek A., Parameter's Identification of Perzyna and Chaboche Viscoplastic Models for Aluminium Alloy at Temperature of 120 C, *Engineering Transactions* 62, 2, 291-305, 2014.

37. Kłosowski P., Woźnica K., Nieliniowe lepkoplastyczne prawa konstytutywne w wybranych zastosowaniach analizy konstrukcji., Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2017.
38. Lagger H.,G., Bierwisch C., Korvink M., M., Discrete Element Study of Viscous Flow in magnetorheological fluids., *Rheol Acta*, 53, 417-443, 2014.
39. Liao G., Magnetic Field-Induced Compressive Property of Magnetorheological Elastomer under High Strain Rate, American Chemical Society, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52 (25), pp 8445–8453, 2013.
40. Lim A.S., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W.Jr., Development of the Split Hopkinson Pressure Bar Technique for Viscous Fluid characterization, *Polymer Testing* 28: 891-900, 2009.
41. Lim J., Hong J., Chen W., W., Weerasooriya T., Mechanical Response of Pig Skin under Dynamic Tensile Loading, *Journal of Impact Engineering* 38: 130-135, 2011.
42. Lim A.,S., Lopatnikov S.,L., Gillespie J.,W.,Jr., Wagner N.,J., Phenomenological modeling of the response of a dense colloidal suspension under dynamic squeezing flow, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 166, 680-688, 2011.
43. Liu L., Fan Y., Li W., Viscoelastic Shock Wave in Ballistic Gelatin Behind Soft Body Armor, *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials* 34, 199-207, 2014.
44. Milecki A., Ciecze elektro i magnetotrologiczne oraz ich zastosowania w technice. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2010.
45. Mossakovsky P., A., Bragov A., M., Kolotnikov M., E., Antovov F., K., Investigation of the Shear Thickening Fluid Dynamic Properties and its Influence on the impact Resistance of Multilayered Fabric Composite Barrier, 11<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference, 2017.
46. Magiera A., I Pracownia Fizyczna, Wydanie czwarte poprawione i uzupełnione, Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagielloński, 2012.
47. Olszewska K., Polak J., Zielińska D., Struszczyk M., H., Kucińska I., Wierzbicki Ł., Kozłowska J., Leonowicz M., Wiśniewski A., Textile Multilayered Systems with Magnetorheological Fluids for Potential Application in Multi-Threat Protections. Preliminary Stab-Resistance Studies, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 21, 5:112-116, 2013.
48. Pacek D., Żochowski P., Wiśniewski A., Anit-Traums Pads Based on Non-Newtonian materials for Flexible Bulletproof Inserts, 29<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, Edinburg, Scotland, UK, May 9-13, 2016.

49. Perzyna P., The constitutive equations for rate sensitive plastic materials, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. XX, No. 4, 321-332., 1963.
50. Perzyna P., Teoria Lepkoplastyczności. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1966.
51. Pęczerski, R.B., Opis deformacji plastycznej metali z efektami mikropasm ścinania, IPPT PAN, Warszawa, 1998, (a).
52. Pęczerski R.B., Macroscopic Effects of Micro – Shear Banding in plasticity of Metals, Acta Mechanica, 131, 203-224, 1998, (b).
53. Quoc-Hung N., Seung-Bok C., Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms, Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges, 953-978, 2012.
54. Rosensweig R.E., Ferrohydrodynamics, Cambridge University, New York, 1985.
55. Rusinek A., Klepaczko J., R., Shear Testing of Sheet steel at Wide Range of Strain Rates and a Constitutive Relations with Strain-Rate and Temperature Dependence of the Flow Stress., International Journal of Plasticity, 1, 17, 87-115, 2001.
56. Salisbury C., P., Cronin D., S., Mechanical Properties of Ballistic Gelatin at High Deformation Rates, Experiental Mechanics 49: 829-840, 2009.
57. Skalski P., Zalewski R., Viscoplastic Properties of an Magnetorheological Fluid in a Damper, Journal of Theoretical and Applied Mechanics 52, 1061-1070, 2014.
58. Siviour C., R., Jordan J., L., High Strain Rate Mechanics of Polymers: A Review, Journal of Dynamic Behaviour of Material 2: 15-32, 2016.
59. Spelta C., Previdi F., Sacaresi S., M., Fraternal G., Gaudio N., Control of Magnetoreological dampers for vibration reduction in a washing machine, Mechatronics 19, 410-421, 2009.
60. Tang X., Conrad H., An Analytical Model for Magnetorheological Fluids, Journal of Physics. D: Applied Physics 33, 3026-3032, 2000.
61. Tasdemirci A., Turan A., K., Guden M., The Effect of Strain rate on the Mechanical Behaviour of Teflon Foam, Polymer Testing 31: 723-727, 2012.
62. The Leader in Force Measurement – Interface, Model 1500 Standard Low Capacity load Cell.

63. Wang Y., Dynamic behaviour of magnetically responsive shear-stiffening gel under high strain rate, *Composites Science and Technology* 127, 169-176, 2016.
64. Xu J., Wang P., Pang H., Wang Y., Wu J., Xuan S., Gong X., The Dynamic mechanical properties of Magnetorheological Plastomers under High Strain Rate., *Composite Science and Technology* 159, 50-58, 2018.
65. Yangguang X., Xinglong G., Shouhu X., Soft Magnetoreological Polymer Gel with Controllable Rheological Properties, *Smart Material and Structures* 22, 2013.
66. Yongbo Y., Lin L., Guang C., Static Yield Stress of Ferrofluid Based Magnetorheological Fluids, *Rheol Acta* 48, 457-466, 2009.
67. Zerilli F., J., Armstrong J., R., Shear Testing of Sheet Steel at Wide Range of Strain Rates and a Constitutive relation with Strain-Rate and Temperature Dependence of the Flow Stress., *Internal Journal of Plasticity* 1, 17, 87-115, 2001.
68. Zite J., L., Ahmadkanlou F., Neelakantan V., A., Washington G., N., A Magnetorheological Fluid Based Orthopedic Active Knee Brace, *Amart Structures and Materials*, Vol. 6171, 61710H, 2006.

## 9 Załączniki

### 9.1 Program do obliczeń wyników przy użyciu dzielonego pręta Hopkinsona

```
clc;
clear all;
close all;

%%kalibracja%%
%wspolczynnik tlumienia flai elastycznej

dzeta=(1/(2*500))*log(0.52/0.46);
% predkosc na podstawie przejsci fali
%pik 1: 0.0001704
%pik 2: 4.0608e-005

% dlugosc probki [m]:
l_0 = 0.0025;
%srednica probki [m]
d_0 = 0.02;
%promien preta incident [m]
r_I = 0.01;
%promien zewnetrzny preta transmited [m]
r_T_out = 0.01;
%promien wewnetrzny preta transmited [m]
r_T_inner = 0.0095;

%masa pocisku [kg]
m_str=0.1245;
%dlugosc pocisku [m]:
l_str=0.065;
%gestosc materialu pocisku [kg m3]:
rho_str=8000;
%predkosci pocisku
v_0=9.78;
%srednica preta [m]
d_p = 0.02;
% modul younga preta [ Pa]:
E=70e9;
% gestosc materialu preta kg /m3:
rho_bar=2700;
%predkosc fali:
%C_0=sqrt(E/rho_bar);
C_0=1/(0.0001764+3.954e-05);

%gestosc materialu MR:
rho_fluid=3540;
% wzmacnienie na wzmaniaczu
gain=400;
%stała tensometru
k=2.01;

%Klepaczko bilans pędu/amplituda
eps_i4=(v_0/2*C_0)*(rho_str/rho_bar);

b=importdata('tek0004ALL.csv');
t=b(:,1);
a1=b(:,2);
a2=b(:,3);

figure ()
subplot(3,1,1);
plot(t, a1)
hold on;
plot (t, a2, 'g')
xlabel('time [s]')
ylabel(' voltage [V]')
hold off;

%figure()
subplot(3,1,2);
```

```

plot(t, a1)
hold on;
plot(t(42500), a1(42500), 'r.') %incident
plot(t(52500), a1(52500), 'r.') %incident - reflected
plot(t(61700), a1(61700), 'r.') %reflected
plot(t(71700), a1(71700), 'r.') %reflected
hold off;

%figure()
subplot(3,1,3);
plot(t, a2)
hold on;
plot(t(62000), a2(62000), 'r.') %transmitted
plot(t(72000), a2(72000), 'r.') %transmitted
hold off;

inc_wave=a1(44000:54000);
refl_wave=a1(63000:73000);
trans_wave=a2(64000:74000);

test_time =0:1:length(inc_wave)-1;

figure()
plot(test_time,trans_wave*-1, 'b')
hold on;
plot(test_time,refl_wave, 'g')
hold on;
plot(test_time,inc_wave, 'r')
hold off;
legend('transmitted wave', 'reflected wave', 'incident wave')
title('przebieg fal')

trans_wave(1)=0;
refl_wave(1)=0;

% %Incident strain:
epsilon_inc=(inc_wave./gain)*k*exp(dzeta);

%reflected strain:
epsilon_refl=(refl_wave./gain)*k*exp(dzeta);

% transmitted strain
epsilon_trans=(trans_wave./gain)*k*exp(dzeta);

% interwał czasowy
delta_t=t(2)-t(1);

%czas incident wave
for i=1:1:length(inc_wave)
    t_inc(i)=delta_t*i;
end
t_inc(1)=0;

% czas reflected
for i=1:1:length(refl_wave)
    t_refl(i)=delta_t*i;
end
t_refl(1)=0;

% czas transmitted
for i=1:1:length(trans_wave)
    t_trans(i)=delta_t*i;
end
t_trans(1)=0;

%pole powierzchni czolowej
A_inc = pi*(r_I^2);

A_trans =A_inc - pi*(r_T_inner^2);

```

```

A_ratio = A_inc/A_trans;

%%
% strain(1)=0;
% for i=2:1:length(inc_wave)
% strain(i) = (C_0/l_0)*(1-A_ratio)*trapz(t_inc(1:i),epsilon_inc(1:i))-
(C_0/l_0)*(1+A_ratio)*trapz(t_refl(1:i),epsilon_refl(1:i));
% end
%
% stress=strain.*E;
%
% figure()
% plot(t_inc,abs(stress))
%%

%nominal stress
for i=1:1:length(epsilon_trans)
% z trzech
sigma_ns(i)=abs(0.5*rho_bar*((C_0)^2)*((d_p/d_0)^2)*(epsilon_inc(i)+ epsilon_refl(i) +
epsilon_trans(i)));
sigma_ns(i)=abs(0.5*rho_bar*((C_0)^2)*((d_p/d_0)^2)*((1-A_ratio)*epsilon_inc(i)+
(1+A_ratio)*epsilon_refl(i)));
% z jednego
%sigma_ns(i)=abs((2*(C_0)/l_0)*( epsilon_trans(i)));
end

%nominal strain rate
for i=1:1:length(epsilon_refl)
eps_prim_ns(i)=((C_0)/l_0)*(epsilon_inc(i)- epsilon_refl(i) - epsilon_trans(i));
eps_prim_ns(i)=abs(-(2*(C_0)/l_0)*( epsilon_refl(i)));
end
max_strainrate=int16(max(abs(eps_prim_ns)));

% nominal strain reflected
Q_refl(1)=0;
for i=2:1:length(epsilon_refl)
Q_refl(i)=trapz(t_refl(1:i),epsilon_refl(1:i));
end

% nominal strain incident
Q_inc(1)=0;
for i=2:1:length(epsilon_inc)
Q_inc(i)=trapz(t_inc(1:i),epsilon_inc(1:i));
end

% nominal strain transmitted
Q_trans(1)=0;
for i=2:1:length(epsilon_trans)
Q_trans(i)=trapz(t_trans(1:i),epsilon_trans(1:i));
end

%nominal strain

for i=1:1:length(epsilon_inc)
%z trzech wspł
epsilon_ns(i)=(C_0/l_0)*(Q_inc(i)-Q_refl(i)-Q_trans(i));
% z jednego
epsilon_ns(i)=abs(-(2*C_0/l_0)*(Q_refl(i)));

end

figure()
subplot(2,1,1);
plot(abs(epsilon_ns),abs(eps_prim_ns));
title('Nominal strain rate - strain relation');
xlabel('nominal strain [%]')
ylabel('Strain Rate [1/s]')

subplot(2,1,2);
plot(epsilon_ns,sigma_ns)
title('Nominal stress-strain relation');
xlabel('nominal strain [%]')
ylabel('Nominal Stress [Pa]')

```



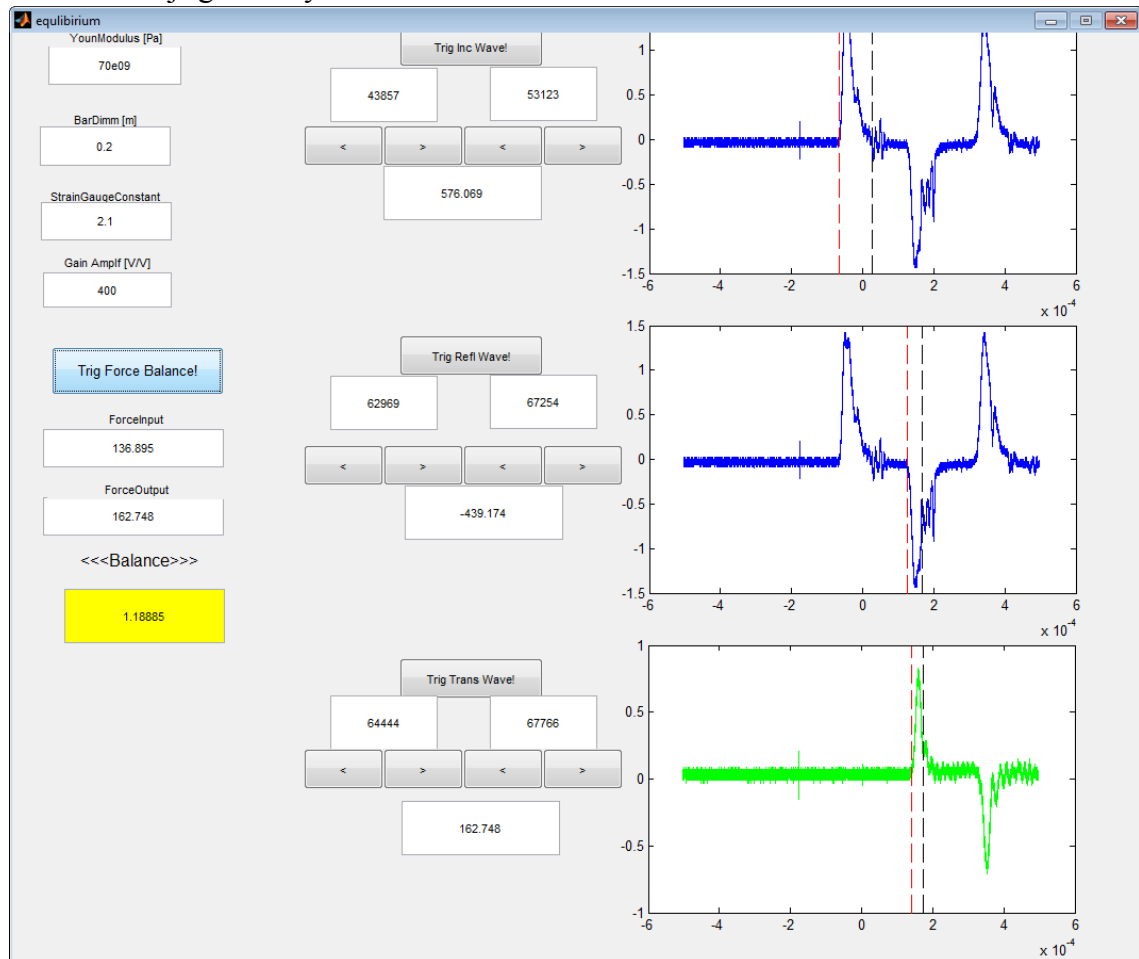
```

figure()
x_data=abs(epsilon_ns)';
y_data=abs(sigma_ns)';
[m, S1] = fit(x_data, y_data, 'poly5')
%wspolczynniki funkcji opisujacej odkształcenie
plot(m);
xlabel('nominal strain [%]')
ylabel('Nominal Stress [Pa]')

```

## 9.2 Program do obliczeń równowagi naprężenia w badanym materiale przy użyciu dzielonego pręta Hopkinsona

### 9.2.1 Interfejs graficzny



### 9.2.2 Kod oprogramowania

```

function varargout = equilibrium(varargin)
% EQUILIBRIUM MATLAB code for equilibrium.fig
% EQUILIBRIUM, by itself, creates a new EQUILIBRIUM or raises the existing
% singleton*.
%
% H = EQUILIBRIUM returns the handle to a new EQUILIBRIUM or the handle to
% the existing singleton*.
%
% EQUILIBRIUM('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
% function named CALLBACK in EQUILIBRIUM.M with the given input arguments.
%

```

```

%   EQUILIBRIUM('Property','Value',...) creates a new EQUILIBRIUM or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before equilibrium_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to equilibrium_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help equilibrium

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-Jan-2019 16:11:21

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @equilibrium_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @equilibrium_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

%% wybor pliku do otwarcia

%[filename, pathname] = ...
%   uigetfile({'*.txt'},'File Selector');
%ol=importdata('wzw_57kA_96890_441Hz.txt');
%ol=importdata(filename);
%ol=ol.data;
%x_data=ol(:,1)';
%y_data=ol(:,2)';
%rysowanie danych pomiarowych
%figure;
%scatter(x_data,y_data);
%hold on;
%%

% --- Executes just before equilibrium is made visible.
function equilibrium_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to equilibrium (see VARARGIN)

% Choose default command line output for equilibrium
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes equilibrium wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = equilibrium_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

```

```

function IncStart_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of IncStart as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of IncStart as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function IncStart_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function IncEnd_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of IncEnd as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of IncEnd as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function IncEnd_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in IncStartLeft.
function IncStartLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStartLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.IncStart, 'String'));
IncStartValue_1=x-1;
set(handles.IncStart, 'String', IncStartValue_1);

% --- Executes on button press in IncStartRight.
function IncStartRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStartRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.IncStart, 'String'));
IncStartValue_1=x+1;
set(handles.IncStart, 'String', IncStartValue_1);

% --- Executes on button press in IncEndLeft.
function IncEndLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncEndLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
y=str2double(get(handles.IncEnd, 'String'));

```

```

IncEndValue_1=y-1;
set(handles.IncEnd, 'String', IncEndValue_1);

% --- Executes on button press in IncEndRight.
function IncEndRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncEndRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
y=str2double(get(handles.IncEnd, 'String'));
IncEndValue_1=y+1;
set(handles.IncEnd, 'String', IncEndValue_1);

% --- Executes on button press in TrigIncWave.
function TrigIncWave_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TrigIncWave (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes1);
b=importdata('tek0001ALL.csv');
t=b(:,1);
a1=b(:,2);
plot(t,a1);
hold on;
x1=t(str2double(get(handles.IncStart, 'String')));
y1=get(gca,'ylim');
plot([x1 x1],y1, '--r');
hold on;
x1a=t(str2double(get(handles.IncEnd, 'String')));
plot([x1a x1a],y1, '--k');
hold off;

delta_t=t(2)-t(1);

IncStartVal=str2double(get(handles.IncStart, 'String'));
IncEndVal=str2double(get(handles.IncEnd, 'String'));
IncIntegralTime=t(IncStartVal:IncEndVal);

    for i=1:1:length(IncIntegralTime)
        IncIntegralTime(i)=i*delta_t;
    end

IncIntegralTime(1)=0;

IncIntegralValue=a1(IncStartVal:IncEndVal);

E=str2double(get(handles.YoungModulus, 'String'));
A_0=pi*((str2double(get(handles.BarDimm, 'String')))/2)^2;
IncIntegral=cumtrapz(IncIntegralTime,IncIntegralValue);

k=str2double(get(handles.StrainGaugesConstant, 'String'));
Gain=str2double(get(handles.GainAmplf, 'String'));

IncIntegralFinal = (k*A_0*E*IncIntegral(length(IncIntegral)))/Gain;

set(handles.IncIntegral, 'String', IncIntegralFinal );

function IncStartValue_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStartValue (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of IncStartValue as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of IncStartValue as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function IncStartValue_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncStartValue (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function IncIntegral_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of IncIntegral as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of IncIntegral as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function IncIntegral_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to IncIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% function IncIntegral = Integral(IncIntegralTime,IncIntegralValue);
%         IncIntegral = cumtrapz(IncIntegralTime, IncIntegralValue);

function YoungModulus_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to YoungModulus (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of YoungModulus as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of YoungModulus as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function YoungModulus_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to YoungModulus (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function BarDimm_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to BarDimm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of BarDimm as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of BarDimm as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function BarDimm_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to BarDimm (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function StrainGaugesConstant_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to StrainGaugesConstant (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of StrainGaugesConstant as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of StrainGaugesConstant as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function StrainGaugesConstant_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to StrainGaugesConstant (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function GainAmplf_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to GainAmplf (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of GainAmplf as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of GainAmplf as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function GainAmplf_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to GainAmplf (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in TrigReflWave.
function TrigReflWave_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TrigReflWave (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes2);
b=importdata('tek0001ALL.csv');
t=b(:,1);
a1=b(:,2);
plot(t,a1);
hold on;
x1=t(str2double(get(handles.ReflStart, 'String')));
y1=get(gca,'ylim');
plot([x1 x1],y1, '--r');
hold on;
x1a=t(str2double(get(handles.ReflEnd, 'String')));
plot([x1a x1a],y1, '--k');
hold off;

delta_t=t(2)-t(1);

ReflStartVal=str2double(get(handles.ReflStart, 'String'));

```

```

ReflEndVal=str2double(get(handles.ReflEnd, 'String'));
ReflIntegralTime=t(ReflStartVal:ReflEndVal);

    for i=1:1:length(ReflIntegralTime)
        ReflIntegralTime(i)=i*delta_t;
    end

ReflIntegralTime(1)=0;

ReflIntegralValue=a1(ReflStartVal:ReflEndVal);

E=str2double(get(handles.YoungModulus, 'String'));
A_0=pi*((str2double(get(handles.BarDimm, 'String')))/2)^2;

ReflIntegral=cumtrapz(ReflIntegralTime,ReflIntegralValue);
k=str2double(get(handles.StrainGaugesConstant, 'String'));
Gain=str2double(get(handles.GainAmplf, 'String'));

ReflIntegralFinal =(k*A_0*E*ReflIntegral(length(ReflIntegral)))/Gain;

set(handles.ReflIntegral, 'String', ReflIntegralFinal );

% --- Executes on button press in TrigTransWave.
function TrigTransWave_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TrigTransWave (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
axes(handles.axes3);
b=importdata('tek0001ALL.csv');
t=b(:,1);
a2=b(:,3).*(-1);    % żeby zgadzała sie kierunke fal!!!
plot(t,a2,'g');
hold on;
x1=t(str2double(get(handles.TransStart, 'String')));
y1=get(gca,'ylim');
plot([x1 x1],y1, '--r');
hold on;
x1a=t(str2double(get(handles.TransEnd, 'String')));
plot([x1a x1a],y1, '--k');
hold off;

delta_t=t(2)-t(1);

TransStartVal=str2double(get(handles.TransStart, 'String'));
TransEndVal=str2double(get(handles.TransEnd, 'String'));
TransIntegralTime=t(TransStartVal:TransEndVal);

    for i=1:1:length(TransIntegralTime)
        TransIntegralTime(i)=i*delta_t;
    end

TransIntegralTime(1)=0;

TransIntegralValue=a2(TransStartVal:TransEndVal);

E=str2double(get(handles.YoungModulus, 'String'));
A_0=pi*((str2double(get(handles.BarDimm, 'String')))/2)^2;

TransIntegral=cumtrapz(TransIntegralTime,TransIntegralValue);
k=str2double(get(handles.StrainGaugesConstant, 'String'));
Gain=str2double(get(handles.GainAmplf, 'String'));

TransIntegralFinal =(k*A_0*E*TransIntegral(length(TransIntegral)))/Gain;

set(handles.TransIntegral, 'String', TransIntegralFinal );

function ReflStart_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

```

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ReflStart as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ReflStart as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ReflStart_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ReflEnd_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ReflEnd as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ReflEnd as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ReflEnd_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in ReflStartLeft.
function ReflStartLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflStartLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.ReflStart, 'String'));
ReflStartValue_1=x-1;
set(handles.ReflStart, 'String', ReflStartValue_1);

% --- Executes on button press in ReflStartRight.
function ReflStartRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflStartRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.ReflStart, 'String'));
ReflStartValue_1=x+1;
set(handles.ReflStart, 'String', ReflStartValue_1);

% --- Executes on button press in ReflEndLeft.
function ReflEndLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflEndLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.ReflEnd, 'String'));
ReflEndValue_1=x-1;
set(handles.ReflEnd, 'String', ReflEndValue_1);

% --- Executes on button press in ReflEndRight.
function ReflEndRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflEndRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.ReflEnd, 'String'));

```



```

ReflEndValue_1=x+1;
set(handles.ReflEnd, 'String', ReflEndValue_1);

function ReflIntegral_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ReflIntegral as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ReflIntegral as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ReflIntegral_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ReflIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ForceInput_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ForceInput (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ForceInput as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ForceInput as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ForceInput_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ForceInput (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in ForceBalance.
function ForceBalance_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ForceBalance (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.IncIntegral, 'String'));
y=str2double(get(handles.ReflIntegral, 'String'));
ForceInput=x+y;
set(handles.ForceInput, 'String', ForceInput );

ForceOutput=str2double(get(handles.TransIntegral, 'String'));
set(handles.ForceOutput, 'String', ForceOutput );
Balance=ForceOutput/ForceInput;
set(handles.Balance, 'String', Balance );

function TransStart_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TransStart as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TransStart as a double

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TransStart_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransStart (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function TransEnd_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TransEnd as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TransEnd as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TransEnd_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransEnd (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in TransStartLeft.
function TransStartLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransStartLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.TransStart, 'String'));
TransStartValue_1=x-1;
set(handles.TransStart, 'String', TransStartValue_1);

% --- Executes on button press in TransStartRight.
function TransStartRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransStartRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.TransStart, 'String'));
TransStartValue_1=x+1;
set(handles.TransStart, 'String', TransStartValue_1);

% --- Executes on button press in TransEndLeft.
function TransEndLeft_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransEndLeft (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.TransEnd, 'String'));
TransEndValue_1=x-1;
set(handles.TransEnd, 'String', TransEndValue_1);

% --- Executes on button press in TransEndRight.
function TransEndRight_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransEndRight (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
x=str2double(get(handles.TransEnd, 'String'));
TransEndValue_1=x+1;

```

```

set(handles.TransEnd, 'String', TransEndValue_1);

function TransIntegral_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of TransIntegral as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of TransIntegral as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function TransIntegral_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to TransIntegral (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function ForceOutput_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ForceOutput (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of ForceOutput as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of ForceOutput as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function ForceOutput_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to ForceOutput (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Balance_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Balance (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Balance as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Balance as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Balance_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Balance (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%        See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit20_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to edit20 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit20 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit20 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit20_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit20 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit21_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit21 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit21 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit21 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit21_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit21 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function Wave_speed_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Wave_speed (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of Wave_speed as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of Wave_speed as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function Wave_speed_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to Wave_speed (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit23_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit23 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit23 as text

```

```

%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit23 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit23_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit23 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```