Wybrane doświadczenia pokazowe z reologii i magnetoreologii

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Łódzki

Streszczenie

Prezentacja dotyczyła doświadczeń pokazowych z reologii i magnetoreologii, możliwych do wykonania przy użyciu prostych i łatwo dostępnych środków, takich jak przedmioty codziennego użytku i zabawki. W serii zaprezentowanych pokazów przedstawiono: histerezę sprężystą, płynięcie materiału i relaksację naprężeń, zależność charakteru odkształcenia od szybkości przykładania naprężeń, niektóre właściwości proszków, efekty Fano i Weissenberga oraz fizyczne podstawy zachowania się materiałów magnetoreologicznych oraz ich najważniejsze właściwości.

Wstęp

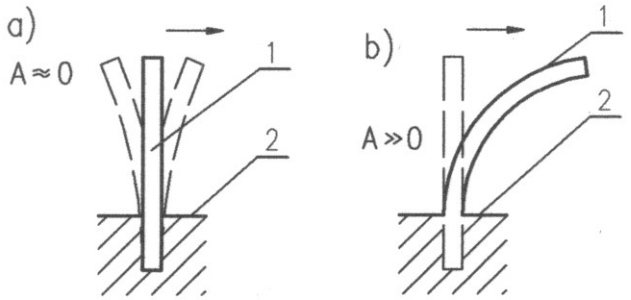
Reologia zajmuje się badaniem właściwości materiałów, których zachowanie wykracza poza teorię sprężystości. Zachowanie to obejmuje wiele interesujących zjawisk. Należą do nich m.in.: opóźnienie powrotu materiału do stanu początkowego po ustąpieniu naprężeń, czyli histereza sprężysta, wzrost wydłużenia ciała przy stałym naprężeniu, nazywany inaczej płynięciem, czy paradoksalne na pozór zachowania się cieczy, których lepkość zależy od ich prędkości ruchu (tzw. cieczy nieniutonowskich). Przedmiotem zainteresowań magnetoreologii jest z kolei wpływ zewnętrznego pola magnetycznego na właściwości reologiczne materiałów. Wpływ ten jest szczególnie wyraźny w przypadku materiałów złożonych z cząstek ferromagnetycznych lub superparamagnetycznych, zdyspergowanych (rozproszonych) w ośrodkach ciekłych albo łatwo ulegających odkształceniom, takich jak elastomery, np. kauczuk silikonowy. Reprezentatywne doświadczenia pokazowe z reologii magnetoreologii zostały szczegółowo opisane w artykule, który ukazał się kilka lat temu w „Postępach Fizyki" [1]. W niniejszym wystąpieniu zostaną pokazane charakterystyczne efekty badane w reologii i magnetoreologii, ale w tym celu zostaną wykorzystane bardzo proste środki techniczne, takie jak przedmioty codziennego użytku i niektóre zabawki.

1. Leniwa linijka

Jeden koniec plastikowej linijki długości 30 cm lub większej mocujemy w szczękach imadła w taki sposób, żeby linijka była ustawiona pionowo, (rys. 1). Górny koniec zamocowanej linijki odchylamy od pionu o kilka milimetrów i puszczamy. Zauważamy, że swobodna część linijki wykonuje pewną liczbę drgań wokół pionowego położenia równowagi i wraca do stanu początkowego, (rys. 1 a). Zaobserwowane drgania są harmoniczne, ponieważ dla małych wychyleń wartość siły sprężystości, spełniającej rolę siły kierującej jest wprost proporcjonalna do wychylenia końca linijki. Takie zachowanie się linijki jest opisywane przez teorię sprężystości.

W drugiej części doświadczenia odchylamy górny koniec linijki o kilka centymetrów i obserwujemy jego zachowanie, (rys. 1 b). W tym przypadku koniec ten powoli wraca do położenia równowagi. Dzieje się tak dlatego, że została przekroczona granica sprężystości materiału linijki. Występuje wtedy efekt nazywany histerezą sprężystą i polegający na opóźnionym powrocie odkształconego ciała do stanu początkowego. Jeżeli powtórzymy to ostatnie doświadczenie jeszcze bardziej odchylając górny koniec linijki, to stwierdzimy, że jego powrót będzie jeszcze wolniejszy i może trwać nawet kilka minut. Poza tym, linijka nie wróci dokładnie do położenia pionowego i pozostanie trwale wygięta. Gdyby trwałe wygięcie nie nastąpiło, to należy powtó-

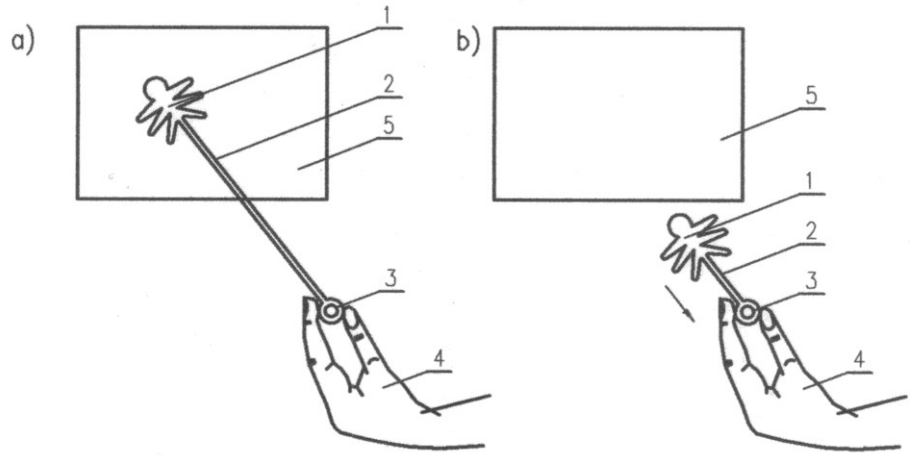
rzyć doświadczenie jeszcze bardziej odchylając linijkę. Efekty opisane w drugiej części doświadczenia są właśnie jednym z przedmiotów badań reologii.



Rys. 1. Układ do badania histerezy sprężystej.
1 – linijka, 2 – szczęki imadła, A – amplituda odchylenia linijki.

2. Powracający ptaszek

Do doświadczenia wykorzystamy tanią i okresowo łatwą do kupienia nawet w kioskach zabawkę. Składa się ona z płaskiej figurki w kształcie ptaszka lub innego zwierzątka, np. pająka, połączonej długą taśmą z uchwytem w kształcie pierścienia, (rys. 2 a). Cała zabawka wykonana jest ze sprężystego, nieco lepkiego materiału podobnego do gumy. Taśmę można bardzo łatwo rozciągnąć, zwiększając kilkakrotnie jej długość i nie powodując zerwania. Doświadczenie wykonujemy w pobliżu jakiejś gładkiej powierzchni, np. szyby lustra, czy ścianki mebla. Palcami jednej ręki przytrzymujemy uchwyt i wykonujemy zamach, zarzucając w ten sposób zabawkę na gładką powierzchnię. Zauważymy, że figurka przyklei się do powierzchni, a taśma pozostaje przy tym rozciągnięta. Trzymamy nadal przez kilkadziesiąt sekund lub dłużej palcami za uchwyt. Po pewnym czasie zauważymy, że figurka nagle odklei się od powierzchni i przyciągana przez kurczącą się taśmę szybko powróci w kierunku naszej dłoni. W tym przypadku, podobnie jak w poprzednim doświadczeniu również występuje opóźniony zanik naprężeń, czyli histereza sprężysta. Siły sprężystości rozciągniętej taśmy pokonują słabnące z czasem siły przylegania figurki do powierzchni. W wyniku tego figurka powraca w kierunku dłoni.



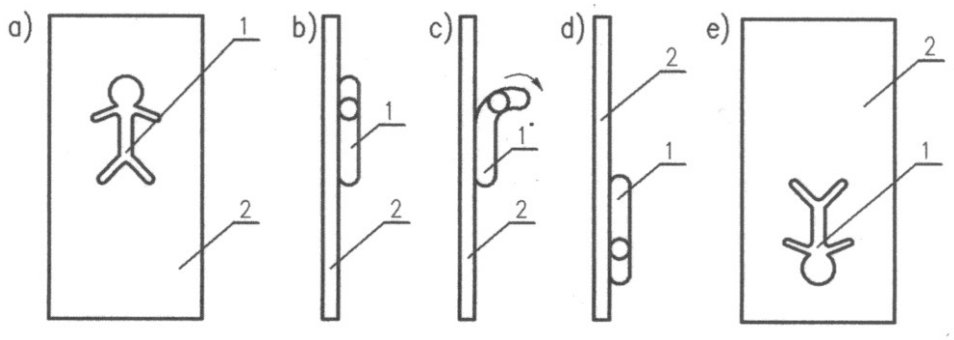
Rys. 2. Pokaz histerezy sprężystej za pomocą powracającego ptaszka.
1 – figurka ptaszka, 2 – sprężysta taśma, 3 – uchwyt, 4 – dłoń, 5 – gładka powierzchnia.

Figurki nie należy rzucać w kierunku innej osoby, ani chropowatej, lub zapylonej powierzchni, np. ściany pomalowanej farbą klejową albo emulsyjną. Spowoduje to bowiem trwałe przyklejenie się figurki i nie powróci ona do rzucającego, a nawet trudno będzie ją oderwać. Gdyby się to zdarzyło, wówczas figurkę należy bardzo ostrożnie oderwać palcami. Ponadto, po rzucie figurki na ścianę lub zakurzoną powierzchnię przyklejają się do niej cząstki pyłu, zmniejszające przyczepność w następnych doświadczeniach. Żeby przywrócić początkowe właściwości figurki, wystarczy ją umyć chłodną wodą z mydłem. Warto dodać, że materiał, z którego wykonano użytą w tym doświadczeniu zabawkę nazywany jest przez reologów materiałem lepkosprężystym. Nazwę tę uzasadnia fakt wykazywania przez niego zarówno właściwości lepkich – kiedy przykleja się do gładkiej powierzchni, jak i właściwości sprężystych – dzięki którym ulega oderwaniu od tej powierzchni i powraca do stanu początkowego.

3. Schodzący człowiek

W tym doświadczeniu, podobnie jak w poprzednim, zostanie wykorzystana łatwo dostępna i tania zabawka wykonana z materiału lepkosprężystego, (rys. 3). Ma ona postać figurki człowieka lub pająka. Zabawkę tę rzucamy z rozłożonymi kończynami i głową zwróconą ku górze na gładką, pionową powierzchnię, najlepiej na szybę, lustro, albo ścianę mebla. Rzucona zabawka przykleja się do tej powierzchni, (rys. 3 a, b). Po pewnym czasie, którego długość zależy, m.in. od chropowatości powierzchni i prędkości rzutu, następuje odklejenie górnej części zabawki. Zachodzi to w wyniku omówionej wcześniej histerezy sprężystej i działaniu ciężaru figurki, który zastępuje siłę sprężystości taśmy, odgrywającą istotną rolę w zabawce wykorzystanej w poprzednim doświadczeniu.

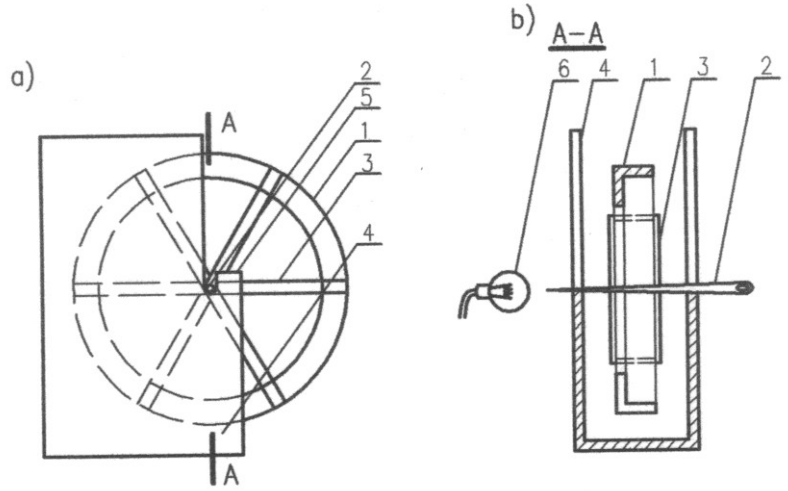
Ciężar powoduje ugięcie odklejonej części zabawki ku dołowi i dalsze jej odrywanie, aż do momentu kiedy część ta ponownie dotknie pionowej powierzchni. Po tym dotknięciu rozpoczyna się znowu przyklejanie figurki do powierzchni. W wyniku tego, figurka będzie znowu przyklejona, ale w pozycji głową na dół, (rys. 3 c, d). Dalej opisane procesy powtarzają się, przy czym figurce na przemian ulegają odklejeniu raz nogi, a raz głowa. Końcowy efekt jest taki, że figurka schodzi po pionowej powierzchni, wykonując przy tym widowiskowe przewroty. Do wykorzystywanej w tym doświadczeniu zabawki odnoszą się te same uwagi techniczne, co do zabawki w użytej w poprzednim doświadczeniu.



Rys. 3. Pokaz histerezy sprężystej za pomocą figurki schodzącego człowieka.
1 – figurka człowieka, 2 – pionowa, gładka powierzchnia.

4. Silnik cieplny

Do zbudowania tego silnika będą potrzebne: blaszana zakrętka od słoika typu twist-off, kilkanaście krótkich gumek aptekarskich, duża igła, prostokątny kawałek cienkiej blachy i lampa z mocno grzejącą żarówką. Budowa silnika przedstawiona jest na rys. 4. W celu jego zmontowania z zakrętki wycinamy środkową część, tak żeby uzyskać pierścień. W środku tego pierścienia umieszczamy igłę, stanowiącą oś i nakładamy na nią gumki aptekarskie, tak żeby w połowie swojej długości opierały się na pierścieniu i były silnie naprężone. Gumki należy rozmieścić symetrycznie na pierścieniu, otrzymując w ten sposób koło ze szprychami utworzonymi z gumek. Kawałek blachy wyginamy, nadając mu kształt wspornika o wydłużonych ramionach, które pozwolą na umieszczenie między nimi wcześniej wykonanego koła i zasłonięcie połowy jego powierzchni. Z jednej strony wspornika, w pobliżu jego obu pionowych krawędzi wykonujemy wycięcie, pozwalające na umieszczenie w nim osi koła.



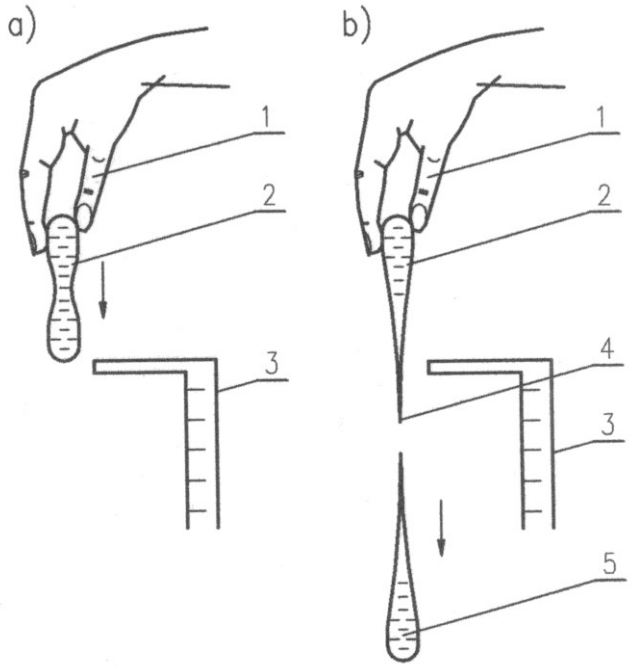
Rys. 4. Budowa silnika cieplnego; a) widok z boku, b) przekrój płaszczyzną osiową. 1 – pierścień, 2 – igła, 3 – gumka aptekarska, 4 – wspornik, 5 – wycięcie we wsporniku, 6 – żarówka.

Kładziemy oś na tym wycięciu i obracając palcami koło sprawdzamy, czy jest ono wyważone, tzn. czy zatrzymuje się w dowolnym położeniu. Gdyby tak nie było, to wyważamy koło przesuwając nieco w odpowiednia stronę miejsce oparcia niektórych gumek na pierścieniu. Ustawiamy wspornik na stole i oświetlamy wystającą z jego ramion część koła silnie grzejącą lampą. Okazuje się, że po pewnym czasie koło zostaje wprawione w ruch obrotowy. Przyczyną tego ruchu jest ciągła zmiana położenia środka masy koła w wyniku efektu nazywanego przez reologów termiczną relaksacją naprężeń. Relaksacja ta polega na tym, że silnie naprężony, sprężysty materiał po ogrzaniu kurczy się. W naszym silniku materiałem tym są gumki aptekarskie po stronie koła, wystającej z ramiom wspornika. Przez to środek masy koła przesuwa się w stronę osłoniętą ramionami wspornika. Ogrzane gumki w wyniku obrotu koła wchodzą między ramiona wspornika i ulegają ochłodzeniu, ponieważ nie są tam ogrzewane. Ochłodzone gumki ponownie się wydłużają. Następowanie po sobie opisanych procesów zapewnia ciągły obrót koła.

5. Płynąca plastelina

W tym oraz w kilku kolejnych doświadczeniach użyjemy dostępnej w sklepach z zabawkami plasteliny, występującej pod handlowymi nazwami magiczna plastelina lub trikolina. Kawałkowi tej plasteliny nadajemy przez ugniatanie kształt zbliżony do hantli o długości ok. 4 cm i średnicach grubszych części w granicach 1 – 2 cm oraz średnicy przewężenia ok. 5 mm, (rys. 5 a). Tak uformowaną plastelinę chwytamy palcami za górny koniec grubszej części i trzymamy nieruchomo albo zawieszamy pionowo obok ustawionego znacznika, wskazującego położenie dolnego końca grubszej części. Obserwując położenie dolnego końca plasteliny zauważamy, że powoli przesuwa się on w dół. Jednocześnie środkowa część plasteliny ulega przewężeniu. Proces ten nazywany jest płynięciem albo pełzaniem materiału i polega na zwiększaniu się jego wydłużenia pod wpływem działania stałego naprężenia. W naszym przypadku naprężenie to jest spowodowane przez ciężar dolnej części plastelinowej hantli, (rys. 5 b).

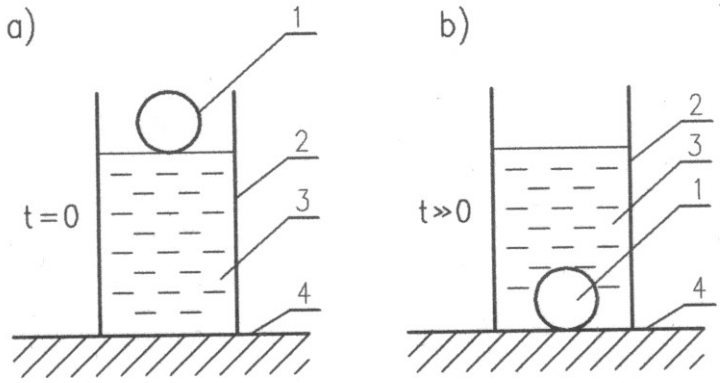
Z mikroskopowego punktu widzenia płynięcie jest wynikiem zmian w strukturze materiału poddanego naprężeniom przez odpowiednio długi czas [2]. W pewnym momencie wytrzymałość na rozerwanie przewężonej części jest tak mała, że ulega ona zerwaniu pod ciężarem samej tylko, dolnej części plasteliny. Szybkość płynięcia zależy od wielu czynników, m.in. od rodzaju materiału, wartości i sposobu przyłożenia do niego naprężenia. Zjawisko płynięcia ma ważne znaczenie praktyczne i zostało poddane dokładnym badaniom. Wykazały one płynięcie m.in. różnych budowli lub ich części, np. miedzianych dachów pokrywających stare kościoły. Zauważenie efektu płynięcia w przypadku materiałów budowlanych, czy konstrukcyjnych wymaga często bardzo czułych przyrządów i długotrwałych obserwacji. Użyta przez nas plastelina jest niezwykle podatna na płynięcie i możemy je stwierdzić gołym okiem już po kilkudziesięciu sekundach [3, 4].



Rys. 5. Badanie płynięcia plasteliny; a) sytuacja początkowa b) sytuacja końcowa.
1 – dłoń, 2 – górna część plasteliny, 3 – wskaźnik, 4 – przewężenie,
5 – oderwana część plasteliny.

6. Wędrująca kulka

Magiczną plastelinę używaną w doświadczeniu piątym wciskamy do niewielkiego, przezroczystego i otwartego od góry naczynia, zwracając przy tym uwagę, żeby nie było w niej pęcherzyków powietrza, (rys. 6 a). Wysokość i średnica naczynia powinny wynosić kilka cm. Na środku górnej powierzchni plasteliny kładziemy stalową albo ołowianą kulkę o średnicy ok. 1,5 cm. Pozostawiamy naczynie z kulką w spokoju. Co kilka godzin obserwujemy położenie kulki. Zauważamy, że kulka coraz bardziej zagłębia się w plastelinę, która z kolei przechodzi do przestrzeni nad powierzchnią kulki. Po upływie dostatecznie długiego czasu, który zależy od: ciężaru kulki, rodzaju użytej plasteliny, rozmiarów kulki i naczynia oraz temperatury otoczenia, zauważymy, że kulka osiągnie dno naczynia Przestrzeń nad kulką będzie całkowicie wypełniona plasteliną, (rys. 6 b). Doświadczenie to wykazuje płynięcie materiału i relaksację naprężeń.



Rys. 6. Zestaw do badania płynięcia plasteliny i relaksacji naprężeń; a) sytuacja początkowa, b) sytuacja końcowa.
1 – kulka stalowa, 2 – przezroczyste naczynie, 3 – plastelina, 4 – podstawa.

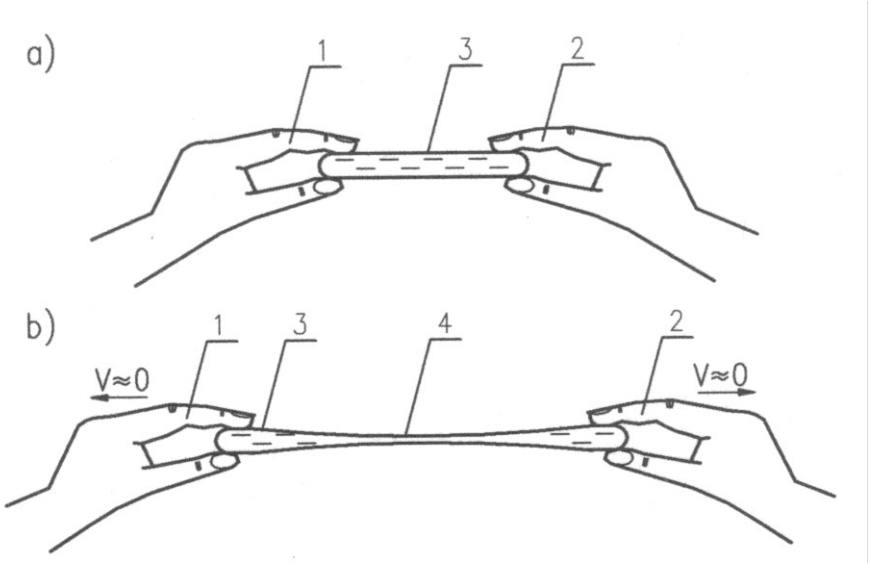
7. Skacząca plastelina

Pokazujemy, że kawałkowi magicznej plasteliny używanej w doświadczeniu piątym można łatwo nadać dowolny kształt, co jest rzeczą dość oczywistą – bowiem plastelina, jak sam nazwa wskazuje, jest ciałem plastycznym. Następnie, z tej plasteliny formujemy kulkę i szybko rzucamy nią o twardą powierzchnię, np. podłogę albo ścianę. Ze zdziwieniem zauważamy, że plastelina odbija się od tych powierzchni, podobnie jak sprężysta kauczukowa piłeczka. Magiczna plastelina jest ciałem, które może wykazywać zarówno właściwości plastyczne, jak i sprężyste. Zależy to od szybkości przyłożenia do niej naprężeń. Kiedy naprężenia przykładane są powoli, jak to ma miejsce w przypadku ugniatania, to wówczas plastelina wykazuje właściwości plastyczne. Gdy zaś naprężenia zostaną przyłożone szybko, co ma miejsce podczas zderzenia plasteliny, wtedy wykazuje ona właściwości sprężyste. Magiczną plastelinę można nazwać krótko ciałem plastyczno-sprężystym.

8. Rozciągliwa plastelina

Z magicznej plasteliny używanej w doświadczeniu piątym, formujemy walec o średnicy ok. 1 cm i długości kilku cm, (rys. 7 a). Oba końce walca chwytamy palcami prawej oraz lewej dłoni i ustawiamy walec w pozycji poziomej. Następnie powoli oddalamy od siebie dłonie wzdłuż jednej prostej, powodując przez to osiowe rozciąganie walca. Czujemy, że plastelina prawie nie sta-

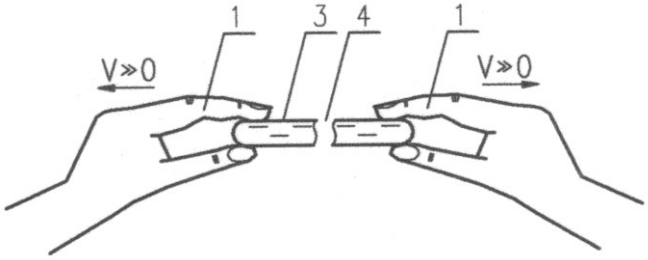
wia przy tym oporu oraz zauważamy, iż w środkowej części ulega ona przewężeniu, (rys. 7 b). Długość plastelinowego walca można zwiększyć nawet do kilkudziesięciu cm, aż w jego środkowej części utworzy się cienka nić, która w końcu ulegnie zerwaniu. Doświadczenie to pokazuje, że przykładając powoli naprężenie do ciała plastyczno-sprężystego można spowodować bardzo duże odkształcenie bez jego zniszczenia. Fakt ten ma ważne znaczenie w produkcji wielu wyrobów, szczególnie z tworzyw sztucznych metodą obróbki plastycznej [5].



Rys. 7. Powolne rozciąganie plasteliny; a) przygotowanie walca, b) stan końcowy.
1 – lewa dłoń, 2 – prawa dłoń, 3 – walec z plasteliny, 4 – przewężenie, v – prędkość rozciągania.

9. Nierozciągliwa plastelina

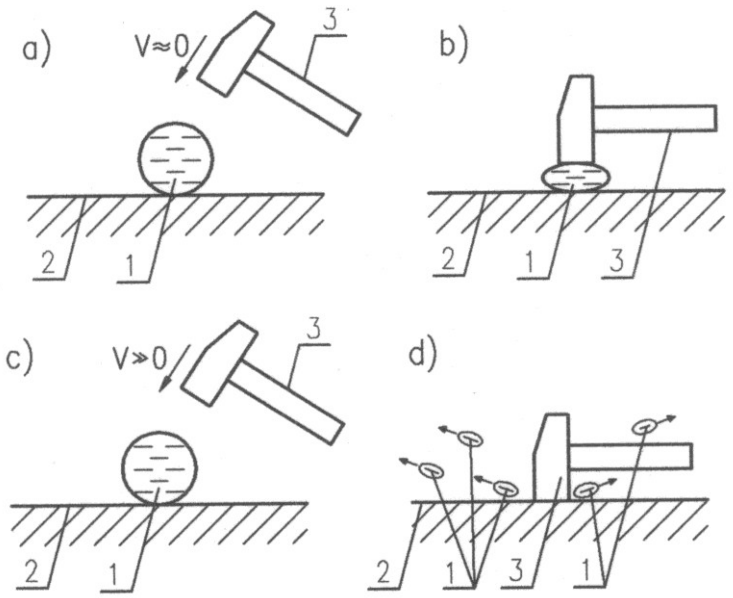
Przygotowujemy walec z magicznej plasteliny, w taki sam sposób, jak w doświadczeniu ósmym i tak samo chwytamy jego końce palcami. Po skoncentrowaniu uwagi, jak najszybciej oddalmy dłonie od siebie, chcąc gwałtownie rozciągnąć walec. Okazuje się, że w tym przypadku czujemy bardzo duży opór plasteliny, a walec ku zdziwieniu prawie wcale nie daje się wydłużyć, lecz pęka w połowie długości niczym przecięty nożem, (rys. 8). Również z tego doświadczenia wynika wniosek, że charakter odkształcenia ciała plastyczno-sprężystego zależy od szybkości przykładania naprężeń. Pryz dużej szybkości ciało to staje się kruche [3, 4].



Rys. 8. Rezultat szybkiego rozciągania plasteliny.
1 – lewa dłoń, 2 – prawa dłoń, 3 – połowa plastelinowego walca,
4 –miejsce przerwania, v – prędkość rozciągania.

10. Rozprysk plasteliny

Doświadczenie to w jeszcze bardziej spektakularny sposób pokazuje, jak szybkość wywierania naprężeń wpływa na właściwości ciała plastyczno-sprężystego. Z magicznej plasteliny używanej w doświadczeniu piątym formujemy kulkę o średnicy ok. 1,5 cm i układamy ją na twardej, masywnej podstawie, np. na ciężkiej, stalowej płycie, kowadle albo betonowej posadzce. Bierzemy młotek o masie co najmniej 0,5 kg i powoli uderzamy nim w kulkę, (rys. 9 a). Okazuje się, że w tej sytuacji kulka zachowuje się, jak ciało plastyczne i po opadnięciu na nią młotka ulega spłaszczeniu, (rys. 9 b). Następnie, ze spłaszczonej plasteliny ponownie formujemy kulkę i układamy ją na płycie, tak samo jak poprzednio. Znów uderzamy w kulkę młotkiem, ale tym razem staramy się nadać jemu, jak największą prędkość, (rys. 9 c). Okazuje się, że w tym przypadku plastelinowa kulka zachowuje się, jakby była wykonana z kruchego materiału w rodzaju szkła albo porcelany i po uderzeniu rozpryskuje się we wszystkich kierunkach na kawałki, (rys. 9 d).



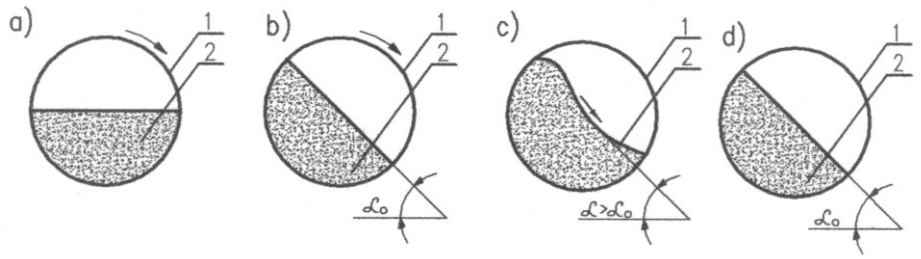
Rys. 9. Sposób wykazania plastycznych i kruchych właściwości plasteliny; a) powolne uderzenie w kulkę, b) skutek powolnego uderzenia, c) szybkie uderzenie w kulkę, d) skutek szybkiego uderzenia.
1 – kulka plastelinowa, 2 – twarda i masywna płyta, 3 – młotek, v – prędkość ruchu młotka.

11. Piaskowe lawiny

Do tych doświadczeń użyjemy okrągłego, przezroczystego pudełka i suchego piasku. Dobrze nadają się w tym celu plastikowe, przezroczyste pudełka z nakładaną pokrywką, w których sprzedawane są niektóre cukierki. Takie pudełko wypełniamy w przybliżeniu do połowy objętości suchym piaskiem i zamykamy pokrywką. Gdyby pokrywka nie była szczelnie dopasowana i piasek wysypywał się z pudełka, to oklejamy jego cylindryczną powierzchnię kawałkiem przezroczystej taśmy klejącej. Zamiast pudełka można też użyć dwóch szalek Pertiego, dostępnych w pracowni chemicznej lub biologicznej. Jeżeli korzystamy z szalek, to jedną z nich należy cał-

kowicie wypełnić piaskiem, przyłożyć do niej równo wewnętrzną stroną drugą szalkę i obie szalki skleić przezroczystą taśmą klejącą, owiniętą wokół ich bocznej powierzchni.

Przygotowane w opisany sposób pudełko chwytamy palcami, ustawiamy w płaszczyźnie pionowej i lekko nim potrząsamy, żeby górna powierzchnia piasku przyjęła położenie poziome, (rys. 10 a). Powoli obracamy pudełko w płaszczyźnie pionowej wokół jego podłużnej osi. Widzimy, że górna powierzchnia piasku jest płaska i ustawia się ukośnie, a jej kąt nachylenia do poziomu wzrasta, aż do pewnej wartości granicznej α_0, nazywanej maksymalnym kątem stabilności, (rys. 10 b). Przy dalszym obracaniu pudełka powierzchnia przestaje być płaska i rozpoczyna się zsuwanie ziarenek piasku, (rys. 10 c). Zachodzi to jednak tylko w warstwie przypowierzchniowej, która zachowuje się jak bardzo lepka ciecz. Ziarenka położone głębiej pozostają w spoczynku i piasek w tej części wykazuje właściwości podobne, jak ciało stałe. Ruch ziarenek piasku ustanie, gdy kąt nachylenia jego górnej powierzchni ponownie zmaleje do α_0, nazywanej teraz kątem odpowiedzi, (rys. 10 d). Obserwowane w tym doświadczeniu efekty mają istotne znaczenie dla zrozumienia mechaniki gruntów, składowania kruszyw na hałdach lub pryzmach i tworzenia się lawin.



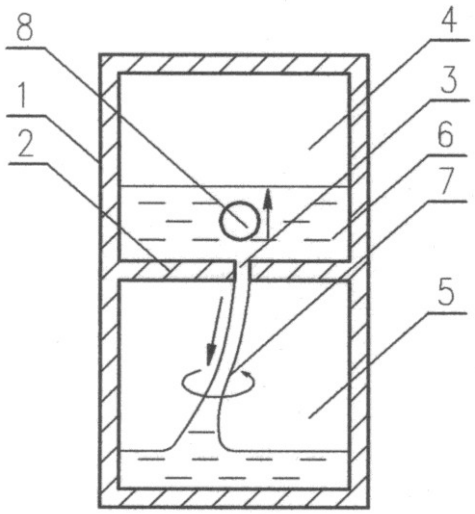
Rys. 10. Badanie właściwości materiałów sypkich; a) sytuacja początkowa, b) osiągnięcie równowagi granicznej, c) tworzenie się lawinki, d) ponowny stan równowagi. 1 – przezroczyste, okrągłe pudełko 2 – suchy piasek, α_0 – maksymalny kąt stabilności, α – chwilowy kąt nachylenia powierzchni piasku do poziomu.

12. Niezwykła klepsydra

To doświadczenie w najprostszej wersji można wykonać przelewając sztuczny lub naturalny miód albo niespolimeryzowaną żywicę epoksydową z lekko nachylonego słoika do większego naczynia. Obserwuje się wówczas, że strumień tych cieczy ulega przewężeniu w miarę opadania i wykonuje ruch wirowy po powierzchni bocznej stożka. W pobliżu dna naczynia, do którego wpływa strumień, ponownie ulega on poszerzeniu. Zaobserwowane, niezwykłe zachowanie się strumienia jest charakterystyczne dla cieczy tzw. nienetonowskich i nazywane efektem Fano. Ogólnie mówiąc, efekt ten wynika stąd, że w przypadku cieczy nienetonowskich współczynnik lepkości nie jest wielkością stałą, lecz zależy od prędkości ich ruchu.

Do badania efektu Fano można też użyć zabawki nazywanej klepsydrą żelową [6]. Składa się ona z cylindrycznego, przezroczystego i zamkniętego naczynia podzielonego w połowie długości poprzeczną przegrodą na dwie komory. W środku przegrody znajduje się niewielki, kołowy otwór. Jedna z komór jest częściowo wypełniona zabarwionym żelem, stanowiącym ciecz nienewtonowską. Po ustawieniu klepsydry w ten sposób, żeby komora wypełniona żelem znalazła się u góry, żel zaczyn przepływać przez otwór w przegrodzie do komory dolnej. Tworzy się przy tym poprzednio opisana struga. Przepływ odbywa się powoli, ponieważ jest hamowany przez ciśnienie powietrza w komorach klepsydry.

Wzrost ilości żelu w dolnej komorze powoduje zwiększenie ciśnienia, znajdującego się w niej powietrza. Z kolei ubytek żelu w górnej komorze, skutkuje zmniejszeniem ciśnienia zawartego tu powietrza. W pewnym momencie, z dolnej komory wychodzi przez otwór w przegrodzie bąbel powietrza, który przeciska się przez żel ku górze. Objętość bąbla wzrasta w miarę zbliżania się do powierzchni swobodnej żelu w górnej komorze. Kiedy bąbel przekroczy tę powierzchnię, znacznie wzrasta ciśnienie w powietrza w górnej komorze. Skutkuje to gwałtownym wzrostem szybkości i średnicy przepływającego strumienia żelu. Opisane tworzenie się bąbli powietrza i wzrost szybkości przepływu żelu powtarzają się w przypadkowych odstępach czasu. Z tego powodu, klepsydra żelowa nie nadaje się jako czasomierz. Jej nazwa ma raczej charakter umowny i została nadana przez analogię wyglądu do klasycznej klepsydry piaskowej.



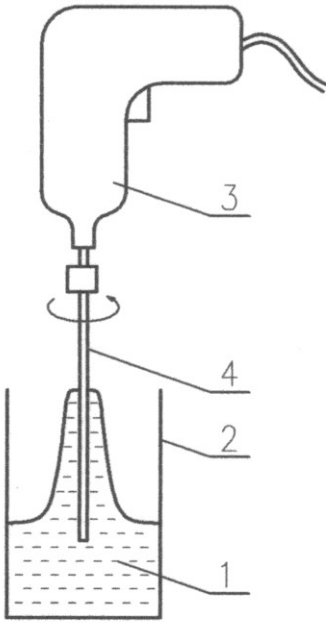
Rys. 11. Budowa klepsydry żelowej.
1 – cylindryczne, przezroczyste naczynie, 2 – przegroda, 3 – otwór w przegrodzie,
4 – komora górna, 5 – komora dolna, 6 – żel w komorze górnej, 7 – spływający strumień żelu,
8 – bąbel powietrza.

13. Alpinistyczna ciecz

W tym doświadczeniu wykorzystamy również ciecz nienewtonowską, którą może być miód naturalny lub sztuczny, albo niespolimeryzowana żywica epoksydowa. Ciecz tę umieszczamy w naczyniu, najlepiej cylindrycznym i wkładamy do niej prosty pręt o przekroju okrągłym, zamocowany w uchwycie wiertarki z napędem elektrycznym. Po włączeniu wiertarki i wprawieniu pręta w ruch obrotowy zauważamy, że ciecz również się obraca, ale jej zachowanie jest paradoksalne. Ciecz zamiast być odrzucana na zewnątrz naczynia przez siłę odśrodkową, tak jak dzieje się to w przypadku typowych cieczy, zaczyna wspinać się na pęt.

Zaobserwowane zachowanie się cieczy nienewtonowskiej nazywane jest efektem Weissenberga. Efekt ten tłumaczy się również zależnością współczynnika lepkości cieczy od prędkości jej ruchu i pojawieniem się w wyniku tego dodatkowych sił stycznych, powodujących wspinanie się cieczy po pręcie. Jeżeli mamy wiertarkę z regulowaną prędkością obrotów, to zmieniając tę prędkość możemy zbadać jej wpływ na wielkość efektu Weissenberga. Warto dodać, że efekt Weis-

senberga można również zaobserwować podczas mieszania ciasta, które owija się wokół okrągłego pręta używanej do tego celu łyżki i wspina po tym pręcie.



Rys. 12. Układ do badania efektu Weissenberga.
1 – ciecz nienewtonowska, 2 – naczynie, 3 – wiertarka z napędem elektrycznym, 4 – pręt.

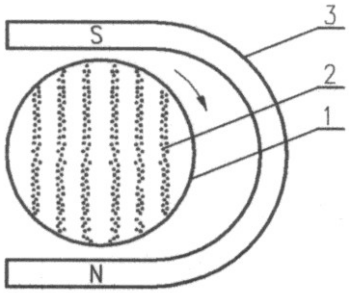
14. Magnetyczny jeż

To doświadczenie pozwoli nam wyjaśnić podstawową przyczynę występowania efektów magnetoreologicznych [7]. Do jego przeprowadzenia wykorzystamy okrągłe, przezroczyste pudełko używane w doświadczeniu jedenastym z materiałami sypkimi. Pudełko opróżniamy ze znajdującego się w nim piasku i nasypujemy do niego opiłków żelaznych, wypełniając nimi ok. 0,3 objętości pudełka. Rozmiary ziaren opiłków powinny wynosić kilka dziesiątych części milimetra. Opiłki takie możemy uzyskać przez spiłowanie pilnikiem o odpowiednio rzadko rozmieszczonych ostrzach, tzw. zdzierakiem, kawałów miękkiej blachy stalowej lub grubych gwoździ. Gotowe opiłki żelazne można też znaleźć w szkolnej pracowni chemicznej, lub kupić w firmach zajmujących się sprzedażą odczynników chemicznych. Po wsypaniu opiłków do pudełka zmykamy w sposób opisany we wspomnianym doświadczeniu. Obracając powoli pudełko w płaszczyźnie pionowej obserwujemy te same efekty, które zachodziły w przypadku umieszczenia w nim piasku.

Następnie, do pudełka ustawionego w płaszczyźnie pionowej zbliżamy od dołu magnes w kształcie dysku, najlepiej neodymowy, lub umieszczamy pudełko między biegunami magnesu podkowiastego. Widzimy, że w tym przypadku opiłki ulegają uporządkowaniu wzdłuż linii pola magnetycznego. Jeżeli użyjemy magnesu w kształcie dysku, to utworzą się linie rozbieżne, przypominające igły jeża, a po zastosowaniu magnesu podkowiastego linie prawie równoległe do siebie. Tworzenie się linii jest spowodowane indukowaniem w każdym z opiłków przez zewnętrzne pole magnetyczne różnoimiennych biegunów, które następnie przyciągają się wzajemnie, powodując uporządkowanie opiłków w łańcuchy i grupowanie się tych ostatnich w kolumny.

Gdybyśmy chcieli obrócić pudełko w płaszczyźnie pionowej wokół jego podłużnej osi, to poczujemy przy tym znacznie większy opór, niż podczas obracania pudełka z piaskiem. Oprócz

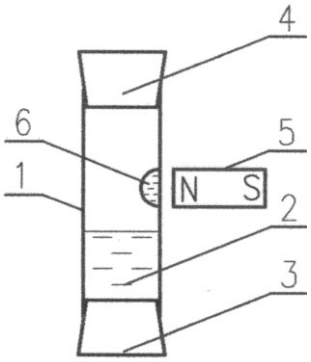
tego, opiłki będą zachowywały swój stan uporządkowania wzdłuż linii pola magnetycznego. Efekt ten, nazywany wmrożeniem opiłków w pole, jest podstawą występowania różnego rodzaju właściwości magnetoreologicznych, zarówno ciałach o strukturze kompozytowej, jak i w zawiesinach złożonych z cząstek ferromagnetycznych, rozproszonych w lepkich cieczach [8].



Rys. 13. Układ do wyjaśnienia fizycznych podstaw efektów magnetoreologicznych.
1 – przezroczyste, okrągłe pudełko, 2 – uporządkowane opiłki żelazne,
3 – magnes podkowiasty, N, S – bieguny magnesu.

15. Pełzająca ciecz

Celem tego doświadczenia jest pokazanie jednej z właściwości zawiesin magnetoreologicznych, polegającej na jej przemieszczaniu i utrzymywaniu w zadanym położeniu przez zewnętrzne pole magnetyczne. Do przeprowadzenia doświadczenia sporządzamy zawiesinę złożoną z opiłków żelaznych, takich samych jak zastosowane w poprzednim doświadczeniu, rozproszonych w bardzo lepiej cieczy nienewtonowskiej w postaci sztucznego miodu albo w niespolimeryzowanej żywicy epoksydowej. Udział objętościowy opiłków w zawiesinie powinien wynosić ok. 0,35. Odmierzoną objętość opiłków wsypujemy do odpowiedniej ilości cieczy i staranie mieszamy ze sobą oba składniki. Kilka cm^3 otrzymanej zawiesiny umieszczamy w rurce szklanej o średnicy ok. 1,5 cm i długości kilkunastu cm.



Rys. 14. Kierowanie ruchem zawiesiny magnetoreologicznej za pomocą magnesu.
1 – zawiesina magnetoreologiczne, 2 – rurka szklana, 3, 4 – korki, 5 –magnes,
6 – część zawiesiny utrzymywana przez pole.

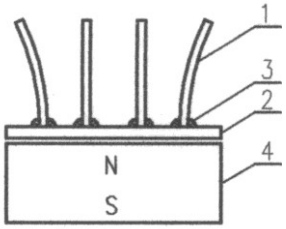
Zamykamy rurkę z obu stron korkami, ustawiamy w pozycji pionowej i odczekujemy do czasu aż zawiesina spłynie w dół. Po tym do bocznej powierzchni rurki, w miejscu gdzie znajduje się zawiesina, zbliżamy magnes i przesuwamy go powoli ku górze zatrzymując w tej pozycji.

Stwierdzamy, że pewna ilość zawiesiny przesunęła się za magnesem i jest utrzymywana w pobliżu jego końca. Zaobserwowane zachowanie się zawiesiny jest spowodowane oddziaływaniem na zawarte w niej opiłki żelaza pola magnetycznego wytwarzanego przez magnes. Pole to wciąga opiłki w obszar o większej wartości indukcji magnetycznej. Dzięki znacznym siłom lepkości, wraz z cząstkami przemieszcza się również ciecz. Ta własność zawiesin magnetoreologicznych pozwala na ich szerokie zastosowanie m.in. jako podatnych i nie ulegających zniszczeniu uszczelek, rdzeni magnetycznych i elementów pośredniczących w płynnie włączanych sprzęgłach, stosowanych m.in. w ekskluzywnych samochodach.

16. Magnetyczne włosy

Ostatnie doświadczenie pozwoli na pokazanie, jak zachowują się kompozyty magnetoreologiczne, złożone z opiłków ferromagnetycznych, rozproszonych w elastycznym materiale po umieszczeniu ich w polu magnetycznym. W doświadczeniu zastosujemy elastyczne włókna kompozytu wytworzone w następujący sposób. Opiłki żelazne, takie same, jak używane w dwóch poprzednich doświadczeniach, mieszamy starannie z bezbarwnym silikonem stosowanym jako masa klejąco-uszczelniająca w budownictwie i hydraulice. Silikon taki, pakowany w niewielkie tubki, można kupić w sklepach z artykułami chemicznymi lub budowlanymi. Stosunek objętości opiłków do objętości silikonu powinien wynosić ok. 0,35. Otrzymaną mieszaninę umieszczamy w strzykawce jednorazowego użytku bez igły. Uważamy przy tym, żeby w strzykawce nie było pęcherzyków powietrza. Naciskając tłok strzykawki wytłaczamy włókna na gładką, poziomą powierzchnię posmarowana uprzedni olejem, układając je obok siebie. Pozostawiamy włókna na kilka godzin w temperaturze pokojowej. Po tym czasie silikon ulegnie polimeryzacji i otrzymamy elastyczne, ferromagnetyczne włókna, które ostrożnie odrywamy od powierzchni, co ułatwia posmarowanie powierzchni olejem.

Przycinamy kilkanaście kawałów o długości ok. 5 cm tych włókien nożyczkami lub nożem. Przyklejamy jedne końce przyciętych kawałków w równych odstępach do nieferromagnetycznej płytki, używając do tego celu silikonu. Gdy silikon spolimeryzuje się i trwale połączy włókna z płytką, umieszczamy ją nad magnesem trwałym. Zaobserwujemy wówczas, że włókna ustawią się wzdłuż linii pola magnetycznego, wytwarzanego przez magnes. Dotykając włókien i próbując wychylić je z zajmowanych pozycji stwierdzimy, że stały się one sztywne i stawiają temu opór. Wykryliśmy w ten sposób interesującą właściwość kompozytów magnetoreologicznych, polegającą na znacznym wzroście ich modułu sztywności po umieszczeniu w polu magnetycznym. Właściwość ta ma szereg ważnych zastosowań praktycznych, m.in. w sterowanych tłumikach drgań.



Rys. 15. Ustawienie się włókien kompozytu magnetoreologicznego w polu magnesu.
1 – włókno kompozytu, 2 – płytka nieferromagnetyczna, 3 – silikon, 4 – magnes.

Podsumowanie

Reologia i magnetoreologia są szybko rozwijającymi się dziedzinami badawczymi z pogranicza fizyki stosowanej i nauk technicznych. Badają one zachowanie się wielu nowoczesnych oraz mających ważne i różnorodne znaczenie praktyczne materiałów. Doświadczenia pokazowe z tych dziedzin są rzadko wykonywane nie tylko w szkołach, ale nawet podczas wykładów w wyższych uczelniach. Opisane w niniejszym opracowaniu eksperymenty można przeprowadzić przy niewielkim nakładzie pracy na przygotowanie i wykorzystaniu łatwo dostępnych oraz bardzo tanich środków. Doświadczenia te pozwalają zapoznać w atrakcyjny sposób z podstawowymi właściwościami materiałów reologicznych i magnetoreologicznych. Dlatego, warto zapoznać z tymi doświadczeniami studentów i uczniów, co pozwoli im lepiej poznać i zrozumieć działanie wielu współczesnych urządzeń ułatwiających nam życie.

Literatura

[1]. S. Bednarek: Podstawowe doświadczenia pokazowe z reologii i magnetoreologii, „Postępy Fizyki, Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego”, Tom 53, Zeszyt 1, s. 33, 2002 r.
[2]. A. K. Wróblewski, J. A. Zakrzewski: Wstęp do fizyki, Tom 2, część 1, PWN, Warszawa 1989.
[3]. J. Gluza, W. Kobza: Mechanika i reologia techniczna, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1991.
[4]. E. Kearsley: Rheology, in: Encyclopedia of Applied Physics, Tom 16, red. G. I. Trigg, VCH Publishers, New York 1996.
[5]. J. Kopko, T. Czekaj, P. Huczkowski, J. Polaczek: Podstawy przetwórstwa tworzyw sztucznych, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1984.
[6]. S. Bednarek: Dokąd zmierza fizyka zabawek? „Postępy Fizyki, Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego”, Tom 55, Zeszyt 1, s. 31, 2004 r.
[7]. J. M. Ginder: Rheology controlled by magnetic fields, in: Encyclopedia of Applied Physics, Tom 16, red. G. I. Trigg, VCH Publishers, New York 1996.
[8]. E. Blums, A. Cebers, M. M. Maiorow: Magnetic Fluids, Walter de Gruter, Berlin 1997.
[9]. M. I. Szliomis: Magnitnyje źidkosti, “Uspiechy Fiziczieskich Nauk”, Tom 112, Zeszyt 4, s. 427, 1974.