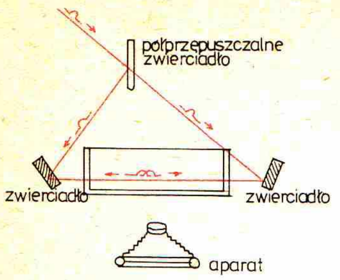


A co się stanie, jeżeli zrobimy zdjęcie kuwety oświetlonej z obu stron, jak na schemacie na rysunku?
Gdzieś na środku kuwety impulsy się spotkają i dalej polecą w swoje strony. W miejscu spotkania się impulsów chwilowa intensywność światła będzie dwa razy większa niż w innych miejscach. Gdy intensywność będzie dwa razy większa, to dwufotonowo wzbudzona fluorescencja będzie cztery razy większa. Na tle świecącej smugi otrzymamy jaśniejszy obszar. Rozmiary tego jaśniejszego obszaru to z grubsza rozmiary naszego świetlnego impulsu.
Każdy następny impuls (ten po 3 ns) zrobi dokładnie to samo. Wszystko to na odpowiednio czułej kliszy aparat fotograficzny pięknie zarejestruje. Spójrzcie więc jeszcze raz na zdjęcie. Rozmiary impulsu (rozjasnienia) — półtora milimetra!
Obliczmy więc, ile czasu trwa błysk, który jest półtoramilimetrowym pociskiem świetlnym. Długość drogi, jaką przebywa światło w cieczy o współczynniku załamania $n = 1{,}5$ wynosi 1,5 mm.

Czas $t = \frac{s}{v}$, gdzie s oznacza drogę, a v prędkość światła w ośrodku

$$v = \frac{c}{n}, \text{ więc } t = \frac{s \cdot n}{c} \qquad t = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-1} \cdot 1{,}5}{3 \cdot 10^{10}} \approx 0{,}7 \cdot 10^{-11} = 7 \cdot 10^{-12}\,\mathrm{s}.$$

Nasz impuls trwa 7 pikosekund!
Żaden oscyloskop nie miał szans, żeby to uczciwie pokazać!

Czym zajmuje się reologia?

Mgr Jacek ŻEBROWSKI

Modele reologiczne

Zanim wyjaśnimy pojęcie zawarte w tytule, zastanówmy się nad modelami mechanicznymi takich ciał, jak guma do żucia, czekolada, ciasto pszenne, farba olejna.
Na pytanie, czy guma do żucia jest ciałem sprężystym, odpowiemy bez wahania nie — rozciągana przecież płynie. Czy zatem jest typową cieczą lepką o bardzo dużym współczynniku lepkości? Nie, wykazuje własność szczątkowej sprężystości, po odjęciu siły rozciągającej w pewnym, choć niewielkim stopniu kurczy się. Z kolei umieszczona w polu sił o wielkości rzędu siły grawitacji zachowuje się jak ciało Hooke'a. Ciało w rodzaju gumy do żucia łączy zatem w sobie różne cechy mechaniczne (sprężystość, lepkość, plastyczność) i trudno byłoby właściwie je zaszeregować według znanych ze szkoły kategorii. W naturze, a także w technologii produkcyjnej (polimery, ich roztwory) spotykamy olbrzymią ilość takich ,,wątpliwych" ciał wymagających klasyfikacji, a przede wszystkim specyficznej metodyki badań ich złożonych właściwości. Funkcję tę spełnia reologia (reo — płynąć, logos — nauka), dyscyplina nauki wyodrębniona z mechaniki w latach trzydziestych XX wieku, stawiająca sobie za cel ustalenie korelacji między własnościami mechanicznymi ciał (podatnością na odkształcania) a ich strukturą wewnętrzna.
Podstawowymi pojęciami, jakimi posługuje się reologia, są odkształcenie, płynięcie i naprężenie. Odkształceniem, jak wiadomo, nazywamy zmianę stanu ciała związaną ze zmianą wzajemnych odległości jego cząstek, przy czym pojęciu *cząstka* przypisujemy w naszych rozważaniach osobliwe znaczenie. Traktujemy ją jako element ciała o objętości dV znikomy wobec rozmiarów ciała a jednocześnie wielki wobec rozmiarów cząsteczki chemicznej. Założenie to pozwala traktować dowolny materiał jako tzw. ośrodek ciągły, lokalnie jednorodny i pomijać w rozważaniach ziarnistość struktury wewnętrznej. Dodajmy dla ścisłości, że płynięciem nazywamy nieodwracalną deformację narastającą w czasie w sposób ciągły. Zdefiniujmy jeszcze potrzebną nam wielkość dynamiczną — naprężenie. Na cząstkę ciała o objętości dV i masie dm mogą działać siły masowe (np. siły grawitacji) oraz siły powierzchniowe (krótkozasięgowe siły oddziaływania cząsteczek otaczających). Jeżeli ΔF jest wypadkową sił powierzchniowych działających na element ΔA powierzchni otaczającej cząstkę dV, to $\lim\limits_{\Delta A \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = p$ nazywamy naprężeniem w danym punkcie. Naprężenie w ciele jest jego dynamiczną reakcją na odkształcenie, a związek tych dwóch wielkości ujęty jest w tzw. równaniu reologicznym. Współczynniki występujące w równaniu reologicznym będące jednocześnie wielkościami, które można wyznaczyć eksperymentalnie, nazywamy parametrami reologicznymi. Dowolnemu równaniu reologicznemu można przyporządkować odpowiednie wyabstrahowane ciało, które nazwiemy modelem.

Rozwiązanie zadania M 176
Działania takie określimy tabelkami

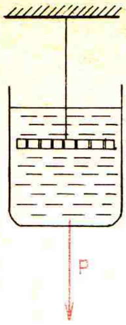
$\bigcirc$	a	b
a	a	a
b	b	b

$\square$	a	b
a	a	a
b	b	a

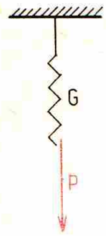
co oznacza np., że $a \bigcirc b = a$, $b \square a = b$.
Działanie $\square$ jest nieprzemienne, gdyż $a = a \square b \neq b \square a = b$.
Mamy również, przy dowolnych $x, y, z \in X$

$$x \square (y \bigcirc z) = x \square y = (x \square y) \bigcirc (x \square z),$$
$$(y \bigcirc z) \square x = y \square x = (y \square x) \bigcirc (z \square x),$$

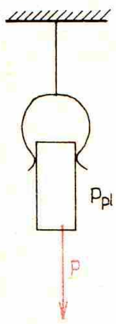
gdyż wynikiem działania $\bigcirc$ jest pierwszy argument.



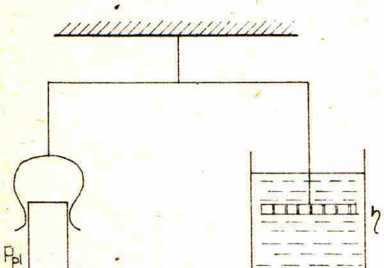
Rys. 1. Tłumik — model reologiczny cieczy doskonale lepkiej



Rys. 2. Sprężyna — model reologiczny ciała doskonale sprężystego



Rys. 3. Suwak — model reologiczny ciała doskonale plastycznego



Rys. 4. Model reologiczny ciała sprężysto-lepko-plastycznego

Poznajmy trzy podstawowe modele reologiczne opisywane najprostszymi równaniami. Dobrą ich ilustracją mogą być schematy (rys. 1, 2, 3) podkreślające w sposób poglądowy podstawowe cechy mechaniczne. Interpretacja pierwszego z nich, tzw. tłumika, w języku reologii nakazuje przesunięcie podziurawionego tłoczka traktować jako odkształcenie e, prędkość jego przesuwania jako prędkość odkształcania $\frac{de}{dt}$, a opór towarzyszący ruchowi jako naprężenie p w ciele. Cechą charakterystyczną tego modelu jest liniowa zależność naprężenia od prędkości odkształcania, co odpowiada następującemu równaniu reologicznemu $p = 2\eta \frac{de}{dt}$, gdzie parametr reologiczny η nazywamy współczynnikiem lepkości. Rysunek 2 ilustruje model ciała doskonale sprężystego opisywanego znanym Wam prawem Hooke'a $p = 2Ge$ (gdzie G jest modułem sztywności). Ostatni schemat (rys. 3) przedstawia ciało doskonale plastyczne, którego cechą jest to, że ulega odkształceniu dopiero przy naprężeniach większych od ustalonego naprężenia granicznego p_{pl}.

Modele ciał o złożonych właściwościach można traktować jako kombinacje tych trzech prostych modeli. Jakie więc cechy mechaniczne może posiadać ciało reprezentowane przez model składający się z szeregowo połączonego elementu sprężystego G z równolegle połączonymi elementami ciała plastycznego i cieczy lepkiej jak na rysunku 4.

Analizując rysunek w konwencji przedstawionej powyżej zauważymy, że dla małych sił odkształcających (a tym samym dla małych naprężeń w ciele) ciało to wykazuje własności sprężyste (tłumik zablokowany przez suwak). Dla naprężeń przekraczających pewną wartość graniczną p_{pl} ciało zaczyna płynąć. Po odjęciu siły zewnętrznej ciało to na pewno nie powróci do pierwotnego stanu, zaobserwujemy jednak częściową redukcję odkształcenia spowodowaną udziałem elementu sprężystego G.

Zauważmy, że cechy, jakie wymieniliśmy w odniesieniu do tego teoretycznego modelu, dostrzegamy właśnie w gumie do żucia. Podobne właściwości jednak możemy wymienić w odniesieniu do wielu innych ciał, dla których mamy już nazwę: sprężysto-lepko-plastyczne. Gumę do żucia spośród innych przedstawicieli tej klasy wyróżnia specyficzna proporcja w udziale elementów sprężystości, plastyczności i lepkości w modelu, co jest określone w wartościach parametrów reologicznych (p_{pl}, η, G).

Posługując się modelem (rys. 4) łatwo można ułożyć równanie reologiczne, którego rozwiązanie przy odpowiednio zadanych warunkach początkowych daje jeszcze więcej informacji, niż sugeruje sam rysunek.

Pełne odkształcenie e ciała jest sumą odkształcenia elementu sprężystego e_1 i odkształcenia tłumika e_2

(1) $$e = e_1 + e_2.$$

Równanie reologiczne dla tłumika połączonego z suwakiem ma postać

(2) $$p = p_{pl} + 2\eta \frac{de_2}{dt},$$

zaś dla elementu sprężystego

(3) $$p = 2Ge_1.$$

Po zróżniczkowaniu (1) względem czasu i wykorzystaniu (2) i (3) otrzymujemy równanie reologiczne

(4) $$\frac{de}{dt} = \frac{1}{2G}\frac{dp}{dt} + \frac{p - p_{pl}}{2\eta} \quad \text{słuszne dla } p \geqslant p_{pl}.$$

Dla naprężeń $p < p_{pl}$, jak powiedzieliśmy wcześniej, wyeliminowany jest element płynięcia i ciało wykazuje własności sprężyste określone równaniem $p = 2Ge$.

Zapytajmy, jak zmienia się w czasie stan naprężeń w ciele zdeformowanym do wartości e_0 i pozostawionym w tym stanie. Dodajmy, że naprężenie w chwili przerwania odkształcania wynosi p_0. Rozwiązanie równania (4) przy warunku początkowym $p(t = 0) = p_0$ oraz $e(t = 0) = e_0$ wygląda następująco

$$p(t) = p_{pl} + (p_0 - p_{pl})e^{-\frac{G}{\eta}t}$$

Widzimy więc, że naprężenie nie znika natychmiast, ale maleje wykładniczo w czasie, i własność tę, którą trudno wyczytać z rysunku, nazywamy relaksacją naprężeń.

Pamiętajmy, że każdy model eksponuje tylko najważniejsze cechy, a nasz jako szczególnie prosty pomija na pewno wiele innych rzeczywistych cech gumy do żucia.

Zaskakującym może wydać się jeden z podstawowych postulatów reologii, mówiący, że każde ciało rzeczywiste posiada wszystkie właściwości reologiczne. Czy zatem woda (łatwo przelewająca się z naczynia do naczynia) wykazuje sprężystość postaci? Owszem, tak, ale własność ta zaznacza się tak słabo, że trudno jest ją stwierdzić eksperymentalnie, a zupełnie jest nieistotna w praktyce. Woda nie jest jednak tak interesującym dla reologów obiektem, jak czekolada, lawa wulkaniczna, gleba czy guma do żucia, które wymagają wieloelementowych, niekiedy nieskończenie wieloelementowych modeli.