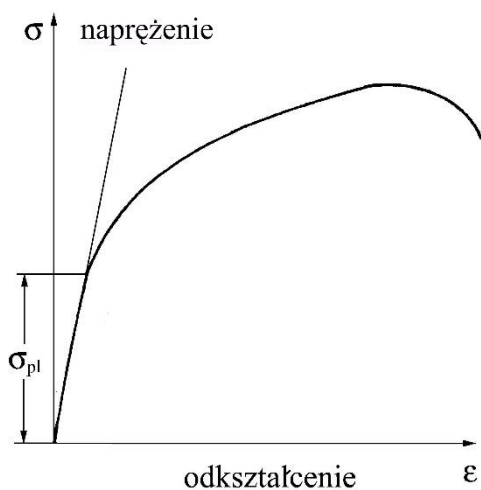
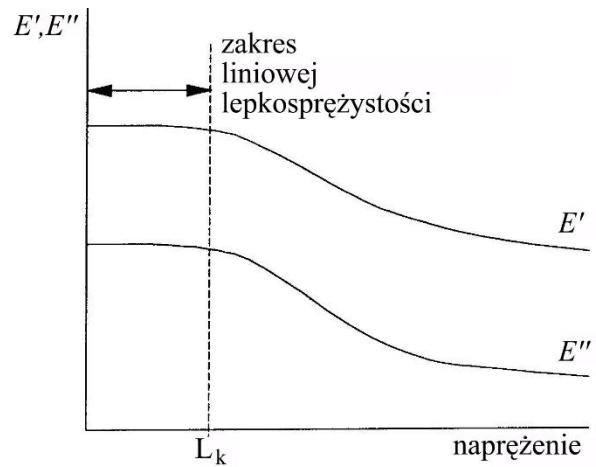


Metody bezpośredniego pomiaru sinusoidalnych zmian naprężenia i odkształcenia

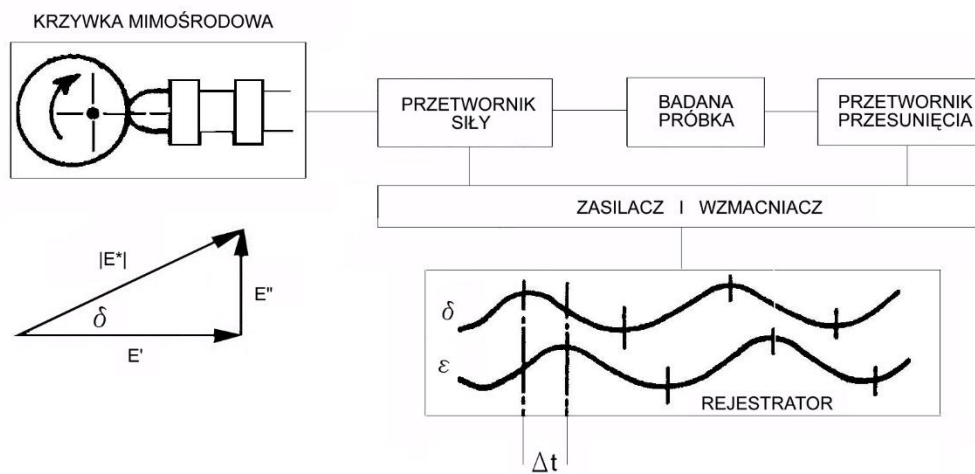
Gdy materiały lepkosprężyste ulegają odkształceniu, część energii zostaje zachowana jako energia potencjalna, a część zostaje rozproszona w postaci ciepła. Dlatego wówczas, gdy materiał liniowo lepkosprężysty poddawany jest okresowo zmiennemu naprężeniu, również odkształcenie zmienia się okresowo, ale z przesunięciem fazowym w stosunku do naprężenia. Zakres liniowej lepkosprężystości jest różny dla różnych artykułów, przy czym uzależniony jest również od stanu termodynamicznego badanego materiału.

Wynikiem takiego zachowania jest zależny od czasu moduł zespolony $E^*(\omega)$, który można podzielić na część zgodną w fazie lub składową rzeczywistą, związaną z zachowaniem energii, oraz na część niezgodną w fazie lub składową urojoną, związaną ze stratami energii.





Zakres liniowej lepkości sprężystości definiowany parametrem wartości krytycznej σ_{pl} lub L_k



Schemat blokowy urządzenia służącego do mechanicznych wymuszeń sinusoidalnych o niskich częstotliwościach

Źródło: Rao (1984)

$$\delta = \omega \cdot \Delta t$$

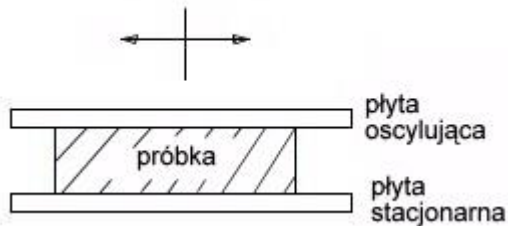
gdzie:

ω – częstotliwość kątowna,

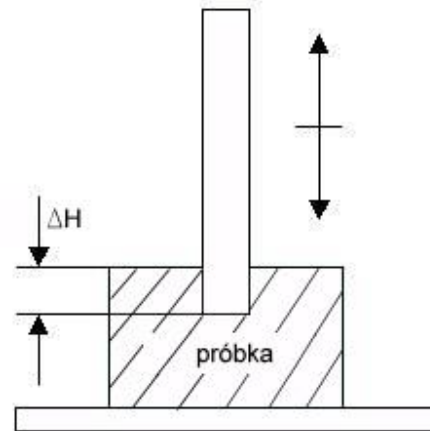
Δt – przedział czasowy pomiędzy wartościami szczytowymi krzywych naprężenia i odkształcenia.

W zakresie bardzo małych odkształceń coraz częściej stosowana jest metoda oscylacyjna, polegająca na poddawaniu badanego lepkosprężystego materiału sinusoidalnie zmiennym naprężeniom ścinającym lub ściskającym, wg schematu przedstawionego na rys.

a)



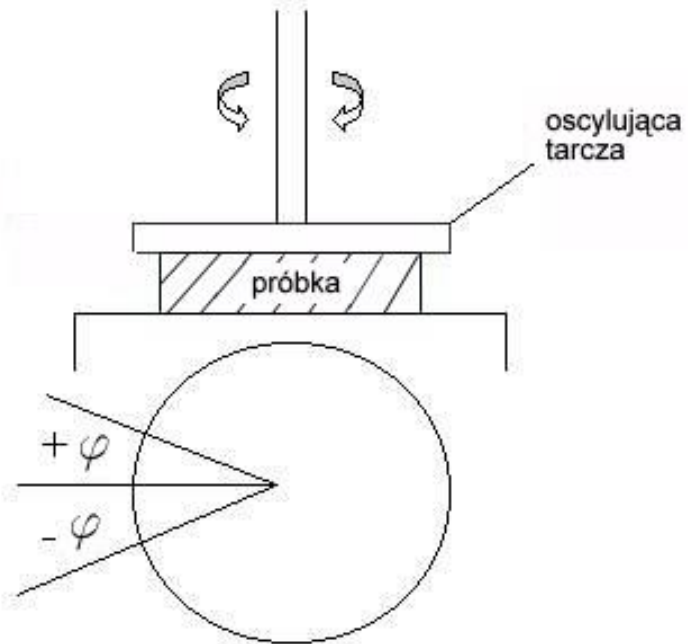
b)



Wymuszenie dynamicznych naprężeń ścinających (a) i ściskających (b)

ΔH – amplituda odkształcenia

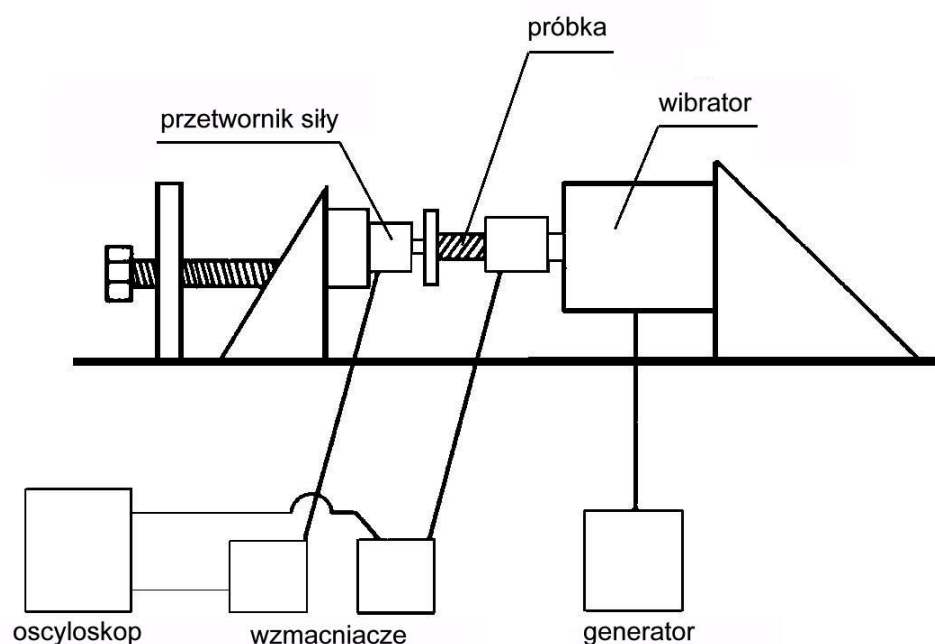
Metodę wymuszania sinusoidalnie zmiennych naprężeń skręcających ilustruje schemat na rys.



. Zasada wymuszeń oscylujących naprężeń skręcających

Rysunek poniżej przedstawia przykład stanowiska do testów bezpośredniego pomiaru odkształcenia i naprężenia. Wymagana sinusoidalnie zmienna siła, działająca jednoosiowo, dostarczana jest przez elektrodynamiczny wibrator napędzany przez generator fal sinusoidalnych. Próbka umieszczona jest pomiędzy wibratorem a dynamicznym przetwornikiem siły. Sygnały rejestratora częstotliwości i przetwornika siły są wzmacniane i przesłane do oscyloskopu, dając obraz elipsy Lissajus.

Wyniki badań oscylacyjnych dla określonej częstotliwości muszą być uzyskane w trakcie co najmniej jednego całkowitego cyklu sinusoidy, natomiast większa liczba cykli potrzebna jest do określenia wartości równowagi.



Schemat blokowy urządzenia do bezpośredniego pomiaru odkształcenia i naprężenia wykorzystującego wibrator elektromagnetyczny do generowania sinusoidalnych odkształceń

Źródło: Rao (1984)

Autor tej pracy, analizując parametry stosowane dla testów w zakresie niskiej częstotliwości ($\omega=0,01 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$), podaje obliczony ze wzoru

$$\frac{2\pi}{\omega} \cdot 60 = 10,46 \text{ [min]}$$

czas potrzebny na wykonanie pełnego cyklu.

Trzy cykle wymagają więc 31,5 minuty do otrzymania pary wartości E' i E'' . Przyjmuje się więc dolną granicę częstotliwości badań dynamicznych $\omega = 0,01 \text{ [rad}\cdot\text{s}^{-1}]$. Wzrost częstotliwości oscylacji powoduje spadek modułu lepkości zespolonej η^* , zmniejszenie kąta przesunięcia fazowego δ i wzrost modułu akumulacji energii E' , przy stosunkowo stałym poziomie modułu straty energii E

Szybkość przemieszczania się sondy podczas cyklu ściskania przy maksymalnej wartości osiągniętej w $\frac{1}{4}$ okresu:

$$V_m = H_0 \cdot K \cdot \frac{\pi}{T}$$

Większość podstawowych metod oceny tekstury żywności stałej to testy deformacji różniące się geometrią narzędzi i odkształcanej próbki. Niezależnie od stosowanego oprzyrządowania testy – ze względu na budowę urządzeń – przeprowadzane są przy stałej prędkości odkształcenia.

Spośród najnowszych metod, ukierunkowanych na testowanie materiałów w warunkach dynamicznych, duże nadzieje rokuje metoda polegająca na wymuszaniu na badanym materiale cyklicznych obciążeń sinusoidalnych.

Testy dynamiczne, zwłaszcza imitujące proces żucia, pozwolą na opisanie istotnej części całościowego profilu tekstury wysoko skorelowanej z oceną sensoryczną.

W testach bezpośredniego pomiaru naprężenia i odkształcenia materiały lepkosprężyste podlegają sinusoidalnym zmiennym odkształceniom, co pozwala na otrzymanie zależności naprężenia (siły) w funkcji czasu lub odkształcenia.

Jeżeli materiał jest poddawany sinusoidalnie zmiennemu odkształceniu ε , to:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin \omega \cdot t$$

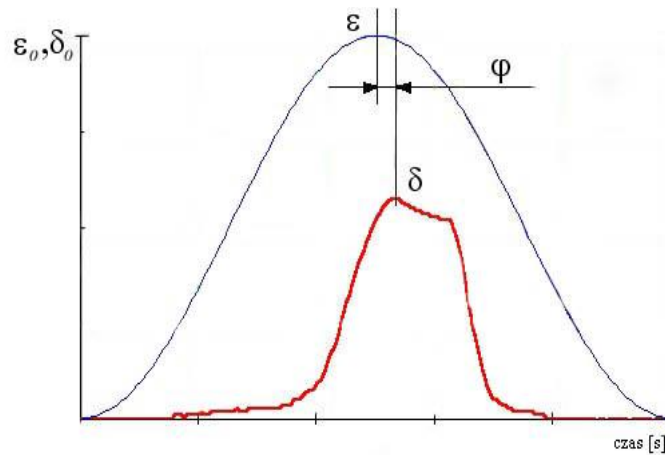
gdzie:

ε_0 – amplituda odkształcenia,

ω – częstotliwość oscylacji.

Gdy materiały lepkosprężyste ulegają odkształceniu, część energii zostaje zachowana jako energia potencjalna, a część – rozproszona w postaci ciepła. Dlatego jeżeli materiał lepkosprężysty (którego zależności pomiędzy naprężeniem, odkształceniem i ich pochodnymi względem czasu można opisać liniowymi równaniami różniczkowymi) poddawany jest okresowo zmiennemu odkształceniu ε , to również naprężenie σ zmienia się okresowo, ale z przesunięciem fazowym φ w stosunku do odkształcenia ($0 < \varphi < \pi/2$) –

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega \cdot t + \varphi)$$



Przebieg harmonicznego wymuszenia dynamicznego i przesuniętej w fazie odpowiedzi materiału

Wynikiem takiego zachowania jest zależny od czasu moduł zespolony E^* , który można podzielić na część zgodną w fazie lub składową rzeczywistą, związaną z zachowaniem energii, oraz na część niezgodną w fazie lub składową urojoną, związaną ze stratami energii.

Zespolony moduł sprężystości E^* zdefiniowany jest jako:

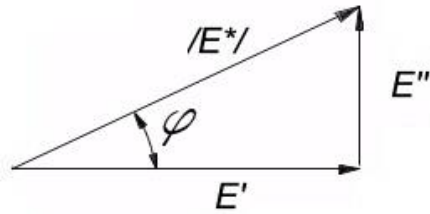
$$E^* = E' + iE''$$

Składowe zespolonego modułu to:

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \varphi$$

oraz

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \varphi$$



Moduł zespolony E^* i jego składowe E' i E''

Równanie (opisujące zmiany naprężeń w czasie, można przedstawić w postaci:

$$\sigma = E' \varepsilon + \frac{E''}{\omega} \dot{\varepsilon}$$

W podobny sposób wprowadzamy pojęcie lepkości zespolonej – jako różnicy pomiędzy częściami rzeczywistą i urojoną:

$$\eta^* = \eta' - i\eta''$$

$$\eta^* = \frac{E''}{\omega}$$

Składową rzeczywistą lepkości zespolonej jest to lepkość dynamiczna:

$$\eta' = \frac{E'}{\omega}$$

Składową urojoną natomiast wyraża zależność:

$$\eta'' = \frac{E'}{\omega}$$

Z równań tych wynika, że :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E''}{E'}$$

Składowa rzeczywista zespolonego modułu nazywana jest także modułem akumulacji energii E' , natomiast składowa urojona E'' jest tzw. modułem straty energii.

Można więc zapisać:

$$\sigma = E' \varepsilon + \eta' \dot{\varepsilon}$$

doskonale opisującej zachowanie materiału, ponieważ człon $E' \varepsilon$ ilustruje zachowania sprężyste, a człon $\eta' \dot{\varepsilon}$ przedstawia lepłą naturę badanego materiału.

Ferguson i Kembłowski podstawiając wartości naprężenia i odkształcenia wyprowadzili dla prostego modelu Maxwella zależność pomiędzy kątem przesunięcia fazowego a czasem relaksacji:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{1}{T_r \cdot \omega}$$

Stąd:

$$T_r = \frac{1}{\omega \cdot \operatorname{tg}\varphi}$$

Równanie to umożliwia wyznaczenie czasu relaksacji T_r na podstawie wyznaczonych doświadczalnie wartości E' i E'' .

Zachowanie się materiałów w trakcie odkształcania zależy od natury odkształcanych elementów, a także od przebiegu zmian naprężenia i geometrii próbki. Szybkość odkształcenia i zachowania lepkie osiągają maksimum przy odkształceniach bliskich zeru, natomiast są równe zeru przy odkształceniach maksymalnych. Zatem przesunięcie fazowe między wartością samego odkształcenia i jego prędkością wynosi 90° . W związku z tym siły wewnętrzne mogą mieć charakter:

- sprężysty, jeżeli są związane z wartością odkształceń,
- lepki, jeśli są związane z prędkością odkształceń.

Każda z tych składowych siły wewnętrznej pozostaje w fazie z warunkującym ją procesem. Różnica faz między tymi okresowymi siłami składowymi również wynosi 90° .

W ciele doskonale sprężystym naprężenie jest zawsze związane z odkształceniem i jest z nim zgodne w fazie. W materiale lepkim naprężenie jest zgodne w fazie z prędkością odkształcenia. W przypadku ogólnym naprężenie wypadkowe, wywołane obciążeniem sinusoidalnym, jest przesunięte w fazie względem okresowo zmiennego odkształcenia o pewien kąt φ , który na ogół zależy od częstości zmian. Składowa sprężysta odkształcenia zjawia się natychmiast, przy czym jej energia nie ulega rozproszeniu.

Warto podkreślić wniosek wyciągnięty z porównania wartości składowych zespolonego modułu sprężystości – jeżeli wartość składowej rzeczywistej E' jest znacznie większa od wartości składowej urojonej E'' , to materiał będzie zachowywał się jak typowe ciało stałe, a odkształcenie będzie miało charakter sprężysty. Natomiast jeśli E'' jest znacznie większe od E' , to nastąpi rozproszenie energii użytej do odkształcenia badanego materiału, co jest typowym zachowaniem ciał lepkich.

Pojęcie sprężystości związane jest ze zdolnością materiału do powrotu do stanu pierwotnego. W ujęciu mechaniczno-strukturalnym jest to zdolność do powrotu do pierwotnego kształtu po odkształceniu. Mimo że łatwo jest rozróżnić substancje bardzo sprężyste od niesprężystych czy plastycznych, większość artykułów żywnościowych charakteryzuje się sprężystością pośrednią, co oznacza, że są one sprężyste do pewnego stopnia. Określanie stopnia sprężystości pojęciami ilościowymi nie jest łatwe z powodów zarówno terminologicznych, jak i metodologicznych. W badaniach artykułów żywnościowych właściwości sprężyste są definiowane w różny sposób. W metodzie TPA (*Texture Profile Analysis*) „sprężystość” definiowana jest jako ‘całkowite odkształcenie próbki w drugim ugryzieniu’ i wyrażana jest w jednostkach długości (Bourne 1968). „Stopień sprężystości” został zdefiniowany jako ‘stosunek między cofającym się i całkowitym odkształceniem.

Bardzo trudno jest dokładnie określić odkształcenie cofające się. Dotyczy to artykułów lepkosprężystych, które charakteryzuje opóźniony powrót do pierwotnego kształtu, co wprowadza dodatkowo element czasu. Sposobem na ominięcie trudności w określaniu cofającej się deformacji i zredukowanie błędu opóźnionego odkształcenia jest zdefiniowanie stopnia sprężystości jako ‘stosunku pracy cofania (odzyskiwania kształtu) do pracy całkowitej.

$$\text{stopień sprężystości} = \text{praca odtworzona} \cdot 100 \cdot \text{praca całkowita}^{-1}$$

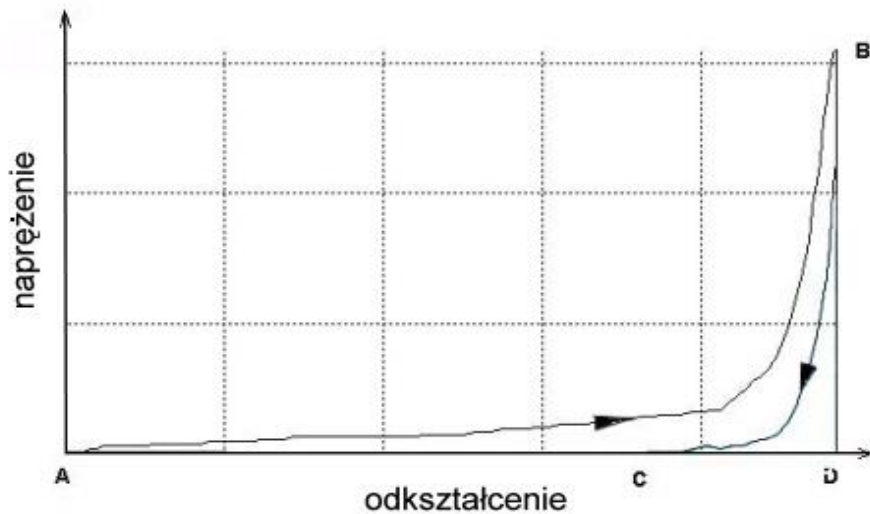
Pracę całkowitą i pracę odtworzenia oblicza się jako pola powierzchni pod krzywymi nacisku i rozprężania, przy czym ich jednostkami są:

$$\text{jednostka pracy} \cdot \text{jednostka objętości materiału}^{-1} \text{ [J} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$$

Jak wyżej wspomniano, większość artykułów żywnościowych nie jest ani całkowicie sprężysta, ani całkowicie lepka, w związku z czym ich stopień

sprężystości może być zależny od naprężenia. Już sama zależność może być traktowana jako charakterystyka struktury żywności, bowiem odzwierciedla zmiany strukturalne spowodowane odkształceniem.

Jeszcze do niedawna określanie stopnia sprężystości, wg definicji (3.34), było trudne, ponieważ pomiar powierzchni był niewygodny, wymagał gromadzenia i przetwarzania ogromnych ilości danych.



Schemat ilustrujący stosunek pracy odtworzenia (pole CBDC) do pracy całkowitej (pole pod krzywą zawarte pomiędzy punktami ABDA)