

11 Dynamické namáhání viskoelastických látek

Dynamické testy se provádí na rotačních reometrech, které jsme popsali v Kapitole 5. Narozdíl od statického módu se viskoelastické funkce měří v dynamickém režimu, kdy se deska (kužel) pootáčí o určitý úhel se střídavým smyslem otáčení. Deformaci pak vyjádříme jako periodickou funkci času t :

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (11.1)$$

$$\text{nebo-li } \gamma = \gamma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (11.2)$$

kde:

γ_0 – amplituda

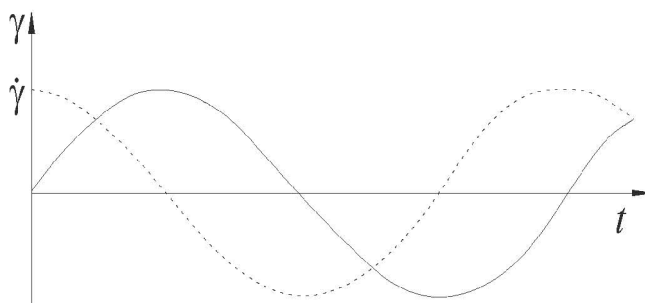
ω - úhlová frekvence.

Rychlost smykové deformace:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (11.3)$$

$$\text{nebo-li } \dot{\gamma} = i\omega \gamma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (11.4)$$

Grafické znázornění deformace a rychlosti smykové deformace jako funkce čase zobrazuje Obr.11.1.

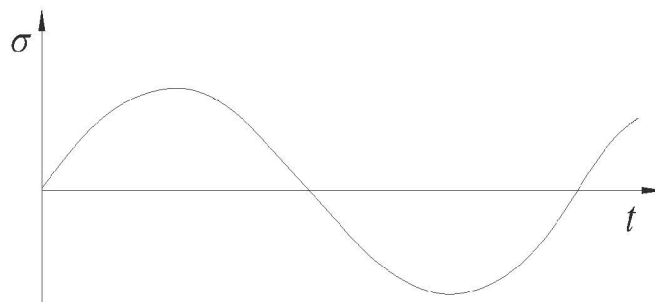


Obr. 11.1: Smyková deformace a rychlost smykové deformace viskoelastických materiálů jako periodická funkce času

Napětová odezva odpovídající hookovskému materiálu (ve fázi) znázorněna na Obr.11.2:

$$\sigma = G\gamma = G\gamma_0 \sin(\omega t) \quad (11.5)$$

$$\text{nebo-li } \sigma = G\gamma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (11.6)$$

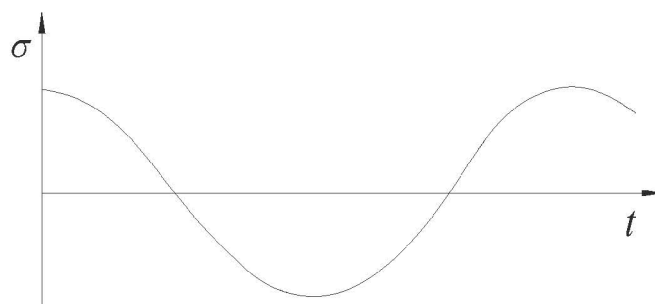


Obr. 11.2: Napěťová odezva ideálně elastického materiálu při dynamických experimentech

Napěťová odezva odpovídající newtonskému materiálu (mimo fázi) znázorněna na Obr.11.3:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} = \eta \gamma_0 \sin(\omega t + 90^\circ) = \eta \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (11.7)$$

nebo-li $\sigma = \eta i \gamma_0 \omega \cdot e^{(i\omega t)} = \eta i \gamma \omega \quad (11.8)$



Obr. 11.3: Napěťová odezva ideálně viskózního materiálu při dynamických experimentech

Celková napěťová odezva elastického materiálu je dána součtem elastické složky a viskózní složky a schematicky ji znázorňuje Obr. 11.4:

$$\sigma = \sigma'_0 \sin(\omega t) + \sigma''_0 \cos(\omega t) \quad (11.9)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (11.10)$$

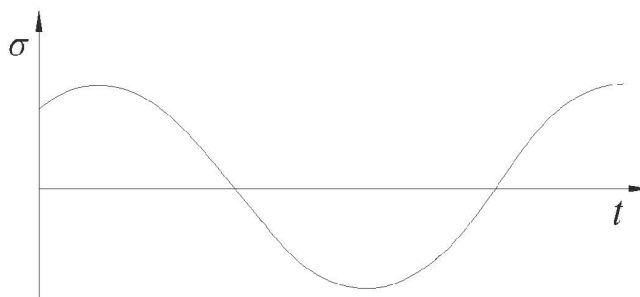
nebo $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (11.11)$

nebo-li $\sigma = \sigma_0 \cdot e^{(i\omega t + \delta)} \quad (11.12)$

kde:

$$\sigma_0^2 = \sigma_0'^2 + \sigma_0''^2$$

$$\text{tg} \delta = \frac{\sigma_0''}{\sigma_0'} - \text{ztrátový úhel.}$$



Obr. 11.4: Napěťová odezva viskoelastického materiálu při dynamických experimentech

11.1 Definice viskoelastických funkcí

absolutní dynamický modul pružnosti ve smyku:

$$G_D = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \quad (11.13)$$

soufázový (storage) modul:

$$G' = \frac{\sigma'_0}{\gamma_0} = G_D \cdot \cos \delta \quad (11.14)$$

kde:

G' - reálná složka; ve fázi.

ztrátový (loss) modul:

$$G'' = \frac{\sigma''_0}{\gamma_0} = G_D \cdot \sin \delta \quad (11.15)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{G''}{G'} \quad (11.16)$$

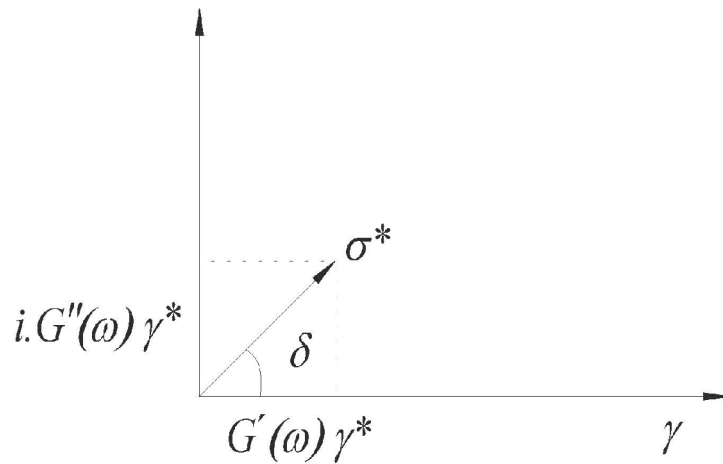
$$G_D^2 = G'^2 + G''^2 \quad (11.17)$$

kde:

G'' - imaginární složka; mimo fázi.

11.2 Komplexní dynamický modul ve smyku

$$G^* = \frac{\sigma^*}{\gamma^*} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i(\omega \cdot t + \delta)}}{\gamma_0 \cdot e^{i\omega \cdot t}} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cdot e^{i\delta} \quad (11.18)$$



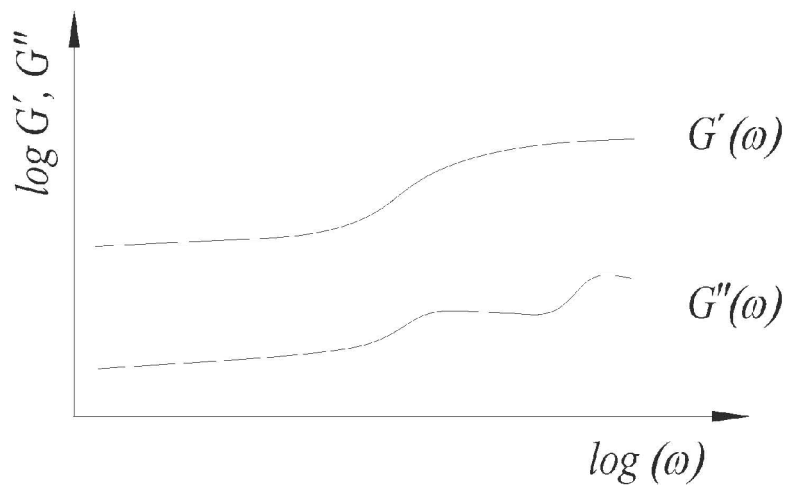
Obr. 11.5: Komplexní vyjádření dynamického modulu ve smyku

$$|G^*| = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} = G_D \quad (11.19)$$

$$G^* = G_D(\cos \delta + i \sin \delta) = G' + i G'' \quad (11.20)$$

kde:

G_D, G', G'', d - závislé na ω

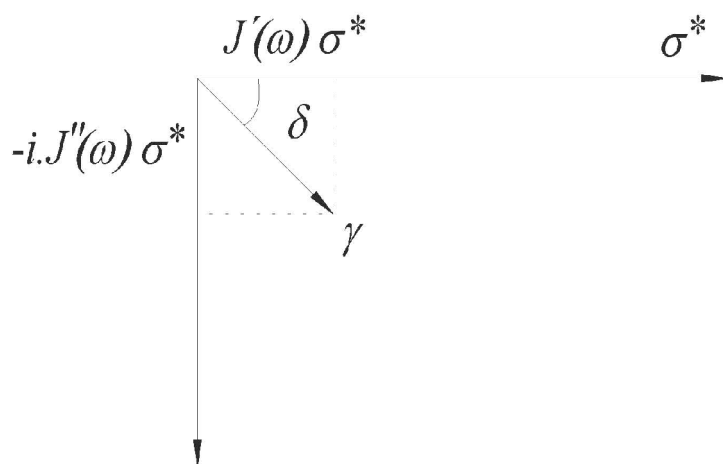


Obr. 11.6: Závislost souřazového a ztrátového modulu na úhlové rychlosti

11.3 Komplexní dynamická poddajnost ve smyku

$$J^* = \frac{\gamma^*}{\sigma^*} = \frac{\gamma_0}{\sigma_0} \cdot e^{i \cdot \delta} \quad (11.21)$$

$$|J^*| = \frac{\gamma_0}{\sigma_0} = J_D \quad (11.22)$$



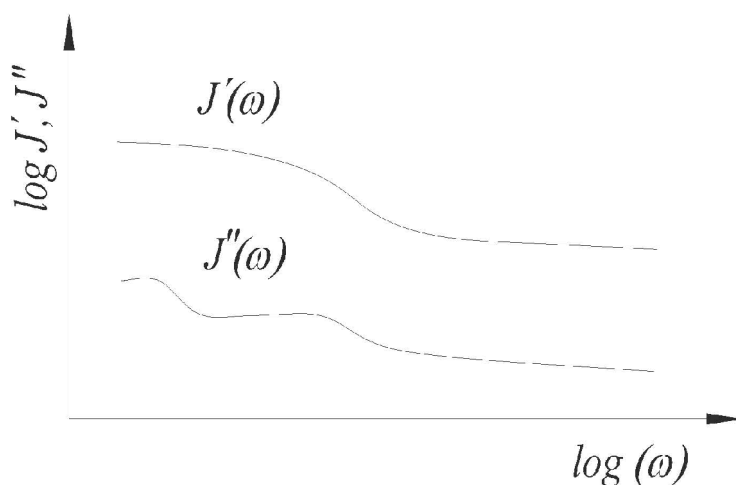
Obr. 11.7: Komplexní vyjádření dynamické poddajnosti ve smyku

$$J^* = J_D(\cos \delta - i \sin \delta) = J' - i J'' \quad (11.23)$$

$$\frac{J'}{J_D} = \frac{G'}{G_D}; \quad J' = \frac{G'}{G_D^2}; \quad J'' = \frac{G''}{G_D^2} \quad (11.24)$$

kde:

J_D, J', J'', d - závislé na ω



Obr. 11.8: Reálná a imaginární složka dynamické poddajnosti ve smyku jako funkce úhlové rychlosti

11.4 Komplexní dynamická viskozita ve smyku

$$\eta^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\gamma}^*} = \frac{G^*}{i\omega} = \frac{G'}{\omega} - i \frac{G''}{\omega} \quad (11.25)$$

$$|\eta^*| = \eta_D = \frac{G_D}{\omega} \quad (11.26)$$

reálná (dynamická) složka komplexní viskozity:

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} \quad (11.27)$$

imaginární složka komplexní viskozity:

$$\eta'' = \frac{G''}{\omega} \quad (11.28)$$

ztrátový úhel:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\eta'(\omega)}{\eta''(\omega)} \quad (11.29)$$

11.5 Korelace hodnot reologických veličin měřených v dynamickém a statickém režimu

Rotační reometry, jak již bylo zmíněno, lze využít jednak pro měření smykové viskozity pro malé rychlosti smykových deformací v ustáleném (*steady-state*) režimu, jednak pro stanovení hodnot viskoelastických funkcí (komplexní viskozity, komplexního modulu a jejich reálných a imaginárních složek), pokud se deformace periodicky mění s časem (dynamické namáhání viskoelastických látek).

Pro porovnání hodnot reologických veličin měřených v dynamickém a statickém módu při srovnatelných rychlostech smykové deformace a úhlové frekvence se nejčastěji používají tzv. *Cox-Merz pravidla*:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta^*(\omega) \quad \text{pro } \dot{\gamma} = \omega \quad (11.30)$$

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta'(\omega) \quad \text{pro } \dot{\gamma} = \omega \quad (11.31)$$

Jedná se o empirická pravidla určená pro polymerní taveniny s nevýraznou elasticitou, tj. k odchýlkám dochází zejména u plněných polymerů, ale např. i u polyolefinů metalocenového typu.