

2 Tokové chování polymerních tavenin – reologické modely

2.1 Reologie jako vědní obor

Polymerní materiály jsou obvykle zpracovávány v roztaveném stavu, proto se budeme v první řadě zabývat jejich tokovým chováním.

Chováním polymerních tavenin během toku, tj. během deformace, se zabývá reologie. Název tohoto vědního oboru pochází z řeckého *Panta rei* neboli *Vše plyne* a vyjadřuje neustálou proměnlivost materiálů v průběhu času.

Reologie řeší vztah mezi napětím, deformací a časem, s cílem porozumět chování polymerního materiálu v průběhu jeho zpracování (např. vytlačováním) a kvantifikovat reakci materiálu na tok (deformaci).

K popisu tokového chování se používá reologických modelů.

2.2 Newtonské kapaliny

Nejjednodušším modelem, který lze použít pro popis reologického chování během smykového namáhání, je **Newtonův zákon**:

$$\tau_{xy} = \eta_0 * \dot{\gamma}_{xy} \quad (2.1)$$

kde:

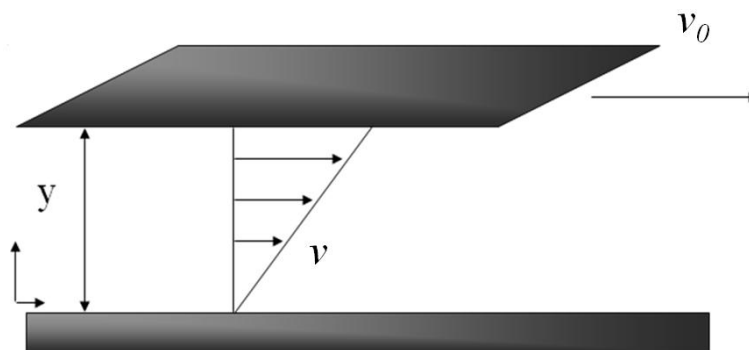
τ_{xy} – smykové napětí

$\dot{\gamma}_{xy}$ – rychlost smykové deformace

η_0 – newtonská (limitní) viskozita.

Při jeho definici vyjdeme z představy polymerní taveniny mezi dvěma deskami. Dolní deska je stacionární (nepohybuje se), horní deska se pohybuje rychlostí v_0 vyvolanou smykovou silou F působící v rovině desky s plochou A (Obr. 2.1). Smykové napětí je pak dáno:

$$\tau = F / A \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Model reologického chování během smykového namáhání

Dolní vrstva materiálu se nepohybuje, avšak horní vrstva se vlivem působící síly posune, jak je znázorněno na Obr. 2.1.

Relativní posunutí (mezi dvěma vrstvami) vyjadřuje smykovou deformaci:

$$\gamma = v / y \quad (2.3)$$

Rychlost smykové deformace je pak dána vztahem:

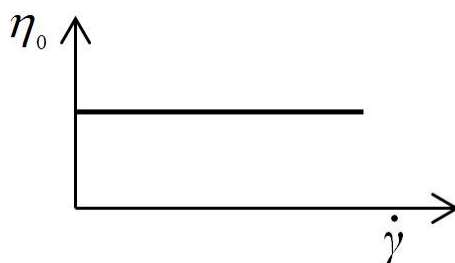
$$\frac{dv}{dy} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) = \dot{\gamma}_{xy} \quad (2.4)$$

Viskozita je mírou úměrnosti mezi napětím a rychlostí smykové deformace.

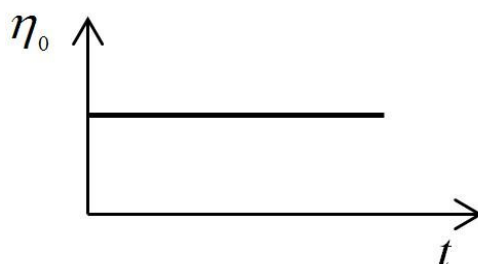
Viskozita má rozměr Pa.s.

Pro látky, které se chovají během deformace podle Newtonova zákona, tzv. **newtonské látky**, je viskozita materiálovou konstantou. Její hodnotu při určité teplotě pro různé materiály lze nalézt v tabulkách.

Viskozita newtonských látek je nezávislá na čase a rychlosti smykové deformace (viz. Obr. 2.2 a 2.3):



Obr. 2.2: Viskozita newtonských látek jako veličina nezávislá na rychlosti smykové deformace

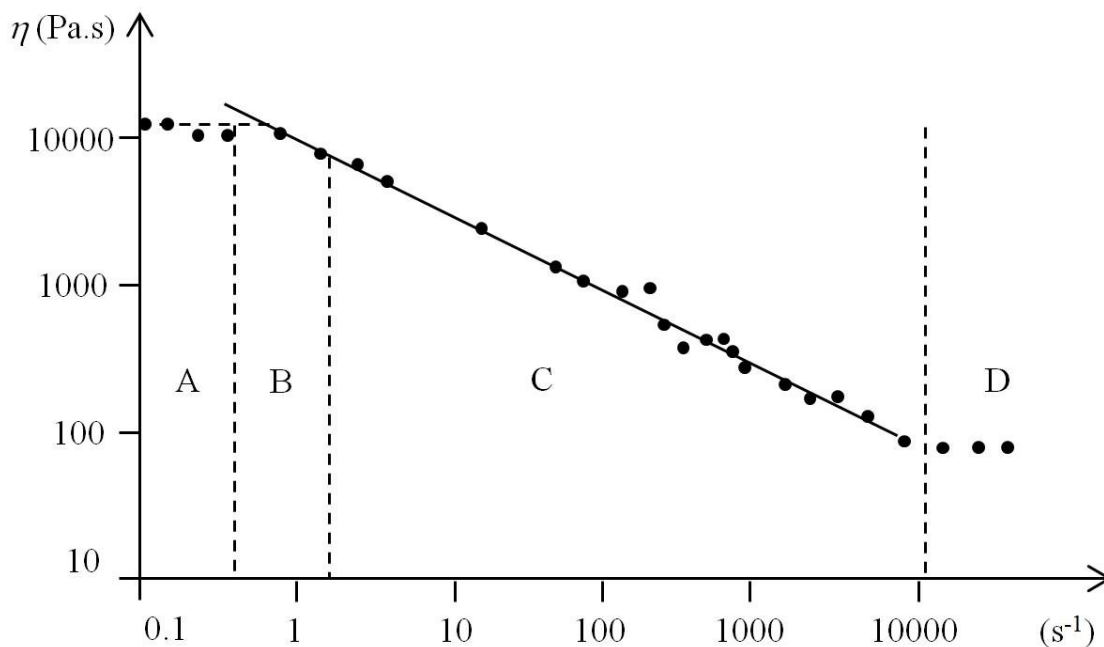


Obr. 2.3: Viskozita newtonských látek jako veličina nezávislá na čase

Viskozita se ale mění s teplotou, tlakem a závisí na molekulárních parametrech (molekulární hmotnost, distribuce molekulárních hmotností, větvení řetězců) zkoumané polymerní látky.

2.3 Neneutonské látky

Většina polymerních látek se během toku chová *newtonsky* jen při velmi nízkých rychlostech smykové deformace (Obr. 2.4 - oblast A). Při dalším zvyšování rychlosti smykové deformace přestává být na této proměnné viskozita nezávislá – buď klesá (typické chování pro polymerní taveniny) nebo stoupá, přičemž v tzv. přechodové oblasti (oblast B) se směrnice závislosti mění, ale postupně se ustaluje do konstantní hodnoty, která určuje stupeň neneutonského chování (oblast C). Poslední oblast tokové křivky (oblast D) je tzv. druhé newtonské plateau, které je charakterizované opětovným ustálením viskozity nezávisle na stále se zvyšující rychlosti smykové deformace (oblast takto vysokých rychlostí smykových deformací je obtížně měřitelná).



Obr. 2.4: Toková křivka polymerních látek

Úkolem reologie je matematicky popsat kompletní závislost zobrazenou na Obr. 2.4. Je zřejmé, že oblast A dobře vystihuje Newtonův zákon.

Oblast C je nejčastěji popisována tzv. **mocninovým zákonem** (též Ostwald–de Waele):

$$\tau = m * \dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

kde:

m – konzistence (Pa.s^n), vyjadřuje fluiditu materiálu (vysoká hodnota m značí velkou viskozitu)

n – index nenewtonského chování ($n > 1$ dilatantní; $n < 1$ pseudoplastické - většina polymerních tavenin; $n = 1$ newtonské).

Předností mocninového zákona je jeho jednoduchost – jedná se o dvouparametrový model, přičemž oba parametry získáme z experimentálních dat (linearizací rovnice).

Omezením použití mocninového zákona je skutečnost, že souhlasí s experimentem jen pro určité rozmezí rychlostí smykové deformace (oblast C); pro nízké rychlosti smykové deformace predikuje nekonečně velkou viskozitu, nepostihuje přechodovou oblast (oblast B), ani oblast tzv. druhého newtonského plateau (oblast D).

2.4 Další reologické modely

Existuje celá řada modelů, které vystihují tokovou křivku v celé šíři rychlostí smykových deformací.

Prvním, který zmíníme, jelikož je velice často součástí vyhodnocovacího softwaru reologických přístrojů, je **Carreau model**:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (2.6)$$

kde:

η_0 , η_{∞} , λ – jsou materiálové parametry.

Model vychází z fenomenologické teorie, v generalizované formě ho lze použít i pro popis elastické odezvy polymerních látek během toku.

Polynomický model:

Polynomický model je v podstatě rozšířený mocninový zákon tak, aby vystihl některé nelinearity tokové křivky:

$$\log \tau = A_0 + A_1 * \log(\dot{\gamma}) + A_2 * (\log \dot{\gamma})^2 \quad (2.7)$$

kde:

A_0 , A_1 , A_2 – jsou materiálové parametry, které určíme z reologických dat.

Ellisův model:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left| \frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right|^{\alpha-1}} \quad (2.8)$$

Rovnice podle Ellise je dalším 3-parametrovým modelem. Vystihuje dobře oblast limitní (newtonské) viskozity v oblasti nízkých rychlostí smykové deformace i lineární vztah mezi $\log \tau$ a $\log \dot{\gamma}$ pro oblast vyšších rychlostí smykové deformace. Parametr α lze vztáhnout k indexu neneutonského chování.

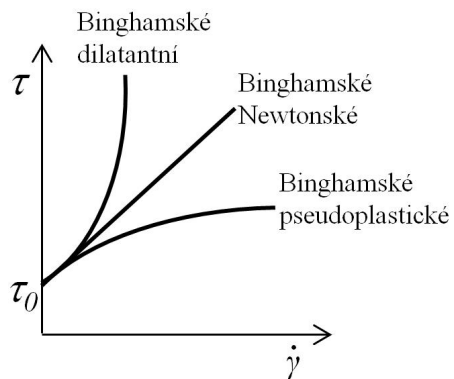
Binghamův model:

Velmi důležitým reologickým modelem je Binghamův model. Tento model popisuje tokové chování tzv. *binghamských látek*. Tyto látky se začnou deformovat (téci) až po překonání určitého tzv. prahového napětí (*yield stress*). Tuto skutečnost vystihuje matematické vyjádření:

$$\tau = -\eta_0 \dot{\gamma} \pm \tau_0 \dots \dots \dots \text{když } |\tau| > |\tau_0| \quad (2.9)$$

$$\dot{\gamma} = 0 \dots \dots \dots \text{když } |\tau| \leq |\tau_0| \quad (2.10)$$

Binghamské látky mohou být newtonské, pseudoplastické či dilatantní, jak schematicky vyjadřuje Obr. 2.5.

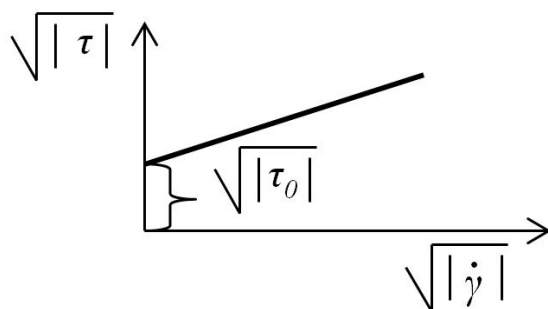


Obr. 2.5: Rozdělení Binghamových látek

Cassonův model:

$$\sqrt{|\tau|} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\eta_0 |\dot{\gamma}|} \quad (2.11)$$

Zobrazení tokové křivky v tzv. *cassonských souřadnicích* (Obr. 2.6) slouží k jednoduchému určení hodnoty prahového napětí :



Obr. 2.6: Toková křivka v cassonských souřadnicích