

3. KAPITOLA

REOLOGIE

Reologie je nauka zabývající se deformací a tokem. Název reologie má původ v řečtině, kde rheos znamená řeka, tok či proudění. Reologie je tedy v doslovném překladu věda o toku. Reologie se však neomezuje pouze na tokové chování kapalin, ale také deformaci tuhých těles, které za určitých okolností (čas) rovněž tečou. „Panta rhei!“ - Vše plyne!

Základní veličinou v reologii, která charakterizuje tokové chování je viskozita, která určuje míru vnitřního odporu materiálů vůči vnějšímu zatížení, jinak řečeno odpor proti toku. Podle druhu zatížení potom rozlišujeme mezi smykovou a elongační viskozitou. A dále podle způsobu měření se rozlišuje mezi dynamickou a kinematickou viskozitou, které jsou vzájemně závislé.

Dynamická viskozita

Viskozita kapaliny vystavené smyku mezi dvěma rovnoběžnými deskami (obrázek 3.1), z nichž jedna se vzhledem k druhé pohybuje ve své rovině rovnoměrným přímočarým pohybem, se definuje Newtonovou rovnicí:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

kde

τ ... smykové napětí [Pa]

η ... dynamická viskozita [Pa s]

$\dot{\gamma}$... rychlostní gradient neboli

rychlost smykové deformace [s^{-1}], dána $\frac{du}{dx}$, kde u je rychlost pohybu jedné roviny vzhledem ke

druhé rovině a x je souřadnice kolmá k těmto rovinám.

Rozměr viskozity plynoucí z Newtonova zákona je Pa s a její násobná jednotka mPa s (dříve se používala jednotky Poise).

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s m}^{-2} = 1 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

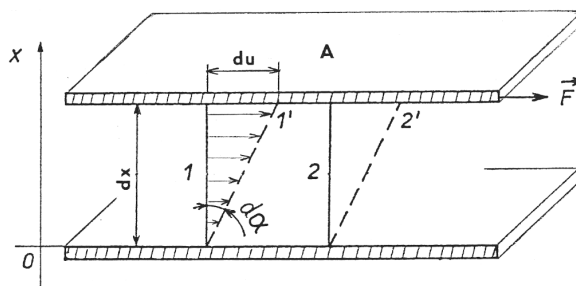
$$1 \text{ P} = 100 \text{ cP}$$

$$1 \text{ cP} = 0,1 \text{ Pa s} = 100 \text{ mPa s}$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.1: Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou.

Hodnoty dynamické viskozity vybraných materiálů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Dynamická viskozita vybraných materiálů

Látka	η [mPa s]
vzduch, plyny	0,01 – 0,02
benzín	0,65
voda	1
rtuť	1,5
motorové oleje	150 – 400
mazací oleje	300 – 800
glycerín	1 500
licí kaučuky	10 000 – 20 000
pasty, tmely	500 000
asfalt	1 000 000

Kinematická viskozita

Podíl dynamické viskozity a hustoty měřené kapaliny definuje kinematickou viskozitu, jejíž rozměrem je $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. S výhodou však se používá násobných jednotek $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ nebo $\text{mm}^2 \text{s}^{-1}$, které odpovídají užívaným jednotkám St (Stokes), respektive cSt.

Polymerní systémy s relativně vysokou viskozitou se však ve svých tokových vlastnostech většinou nepodřizují jednoduchému Newtonovu zákonu. Tedy, chovají se jako neneutonské kapaliny. Závislost napětí na rychlosti smykové deformace tedy není lineární a obvykle se vyjadřují vztahem

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

anebo například:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

kde

K ... koeficient úměrnosti (konzistence)

n ... exponent vyjadřující stupeň odklonu tokové křivky $\dot{\gamma} = f(\tau)$ od ideálního, newtonského průběhu

τ_0 ... prahové smykové napětí (mez toku), při kterém se začne projevovat trvalá (plastická) deformace

Při napětích nižších než τ_0 se látka chová jako ideálně pružné hookeovské těleso.

Charakter závislosti $\eta = f(\dot{\gamma})$ může být v principu dvojitý (obrázek 3.2):

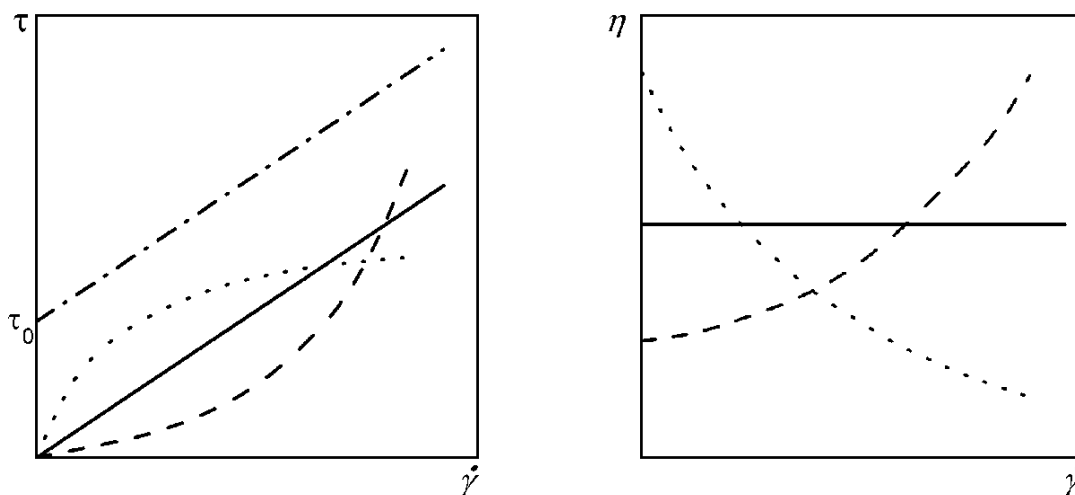
- viskozita η klesá se zvyšující se rychlostí smykové deformace, $\dot{\gamma}$; index $n < 1$ (pseudoplastické chování typické pro polymerní taveniny)
- viskozita η vzrůstá se zvyšující se rychlostí smykové deformace, $\dot{\gamma}$; index $n > 1$ (dilatantní chování vykazuje například míchání betonu)

Všeobecné představy o tokových vlastnostech polymerních systémů se ještě dále komplikují případnou závislostí viskozity na experimentální čase (obrázek 3.3). Konstantní smykové napětí může rozrušovat pseudoplastické nadmolekulární struktury, což způsobí, že se viskozita s časem snižuje (tixotropie). Někdy naopak působení smykového napětí napomáhá vzniku vyššího stupně uspořádanosti řetězců, což je provázeno vzrůstem viskozity s dobou měření (reopexie). Tyto jevy mohou nastat i vlivem chemických reakcí (tuhnutí cementu, ztužování tuků, polymerace, vulkanizace, degradace).

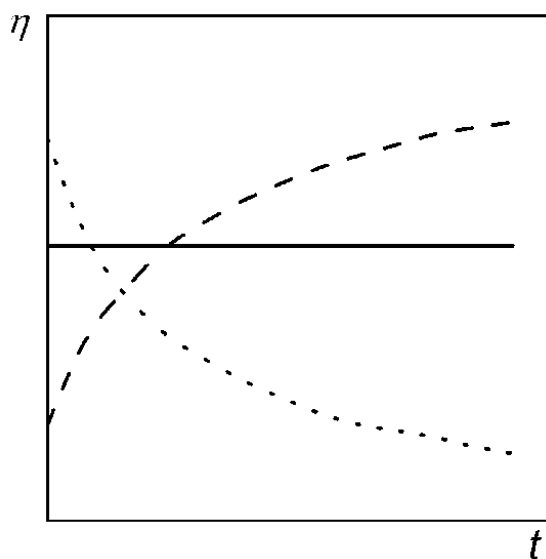
Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.2: Tokové křivky pro různé typy modelových kapalin. Newtonská kapalina (plná čára), pseudoplastická kapalina (tečkovaná), dilatantní kapalina (čárkovaná), binghamská kapalina (čerchovaná)



Obrázek 3.3: Časová závislost viskozity. Newtonská kapalina (plná čára), tixotropní kapalina (tečkovaná), reopexní kapalina (čárkovaná).

Viskozitní parametry η a K se neobyčejně významně mění s teplotou T podle exponenciálního Arrheniova vztahu:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\eta = A \cdot e^{\frac{\Delta G}{RT}}$$

kde

ΔG ... volná entalpie, míra energie aktivačního toku

A ... hodnota viskozity při referenční teplotě

R ... plynová konstanta

Arrheniova rovnice umožňuje stanovit experimentálně hodnotu aktivační energie toku z měření viskozity při různých teplotách. Pokles viskozity s rostoucí teplotou je způsoben větší tepelnou energií molekul, která zvyšuje pravděpodobnost jejich přeskoků. S rostoucí hodnotou aktivační energie roste závislost viskozity na teplotě. Proto je nezbytné při reologických měřeních sledovaný vzorek vytemperovat a samotné měření provádět při konstantní teplotě.

K měření reologických veličin se používá nejrůznějších typů reometrů, které se rozlišujeme například podle sledované veličiny, rozsahu měření, ale i jednoduchostí a přesností vlastního měření.

Výtokové pohárky

Výtokové pohárky (obrázek 3.4) patří k nejjednodušším zařízením sloužícím ke stanovení viskozity kapalných vzorků. Výtokové pohárky mají definovanou geometrii s daným objemem. Během měření zkoušená kapalina protéká gravitačním působením přes soustředný otvor v pohárku a přitom se měří doba toku, ze které se počítá kinematická viskozita. K tomuto účelu slouží celá řada různých typů výtokových pohárků. Pro účelné srovnání výsledků je však nezbytné použít jen výtokové pohárky odpovídající ISO standardům (ISO 2431).

Kuličkové viskozimetry

Měření viskozity pomocí padající kuličky patří k nejstarším metodám v reologii (G. Stokes v roce 1851). Jedná se o jednoduchý, ale velice přesný způsob měření viskozity průhledných tekutin od plynů po kapaliny s nízkou až střední viskozitou.

Princip měření spočívá ve sledování pádu skleněné nebo ocelové kuličky vlivem gravitační síly měřenou kapalinou (obrázek 3.4). Na tuhou kuličku padající viskózní kapalinou působí tíhová síla G , vztlačková síla F_{vz} a odporová hydrodynamická síla F_h , která je při pomalém proudění přímo úměrná rychlosti. Pro odpor, který klade kapalina o viskozitě, η , pohybu koule o poloměru, r , odvodil Stokes z pohybové rovnice pro nestlačitelné kapaliny s vnitřním třením vztah:

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$F_h = 6\pi \eta r v$$

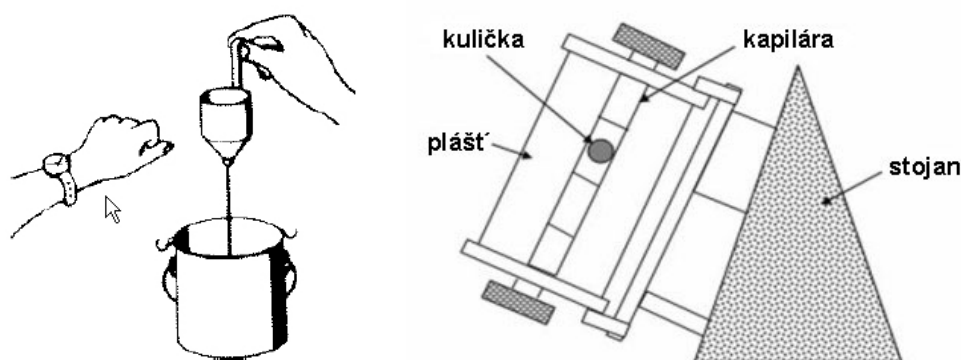
kde

η ... dynamická viskozita kapaliny, ve které se kulička pohybuje [Pa s]

r ... poloměr kuličky [m]

v ... rychlost kuličky [m s^{-1}]

K výhodám těchto typů viskozimetrů patří především jednoduchost jejich použití. Nevýhodou je naopak věrohodnost měření pouze pro ideálně viskózní (Newtonské) materiály, u kterých se nemění viskozita v závislosti na rychlosti smykové deformace či čase a použitelnost pouze pro transparentní materiály, protože měření se provádí vizuálně.



Obrázek 3.4: Výtokový pohárek (vlevo) a Höpplerův kuličkový viskozimetr (vpravo).

Nízkotlaké kapilární viskozimetry

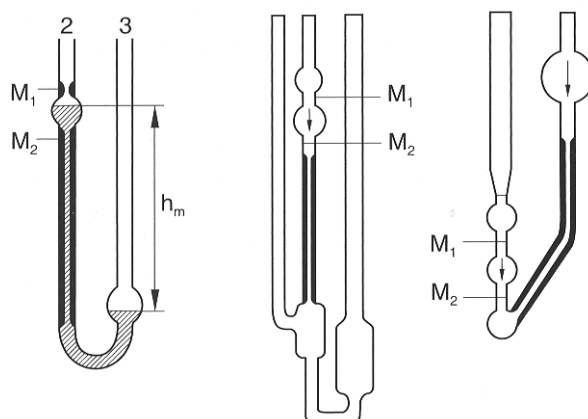
Ke stanovení kinematické viskozity se používají skleněné kapilární viskozimetry (obrázek 3.5). Smykové napětí, které způsobuje vlastní tok, je vyvozeno gravitační silou. Definovaný objem měřeného vzorku protéká dlouhou kapilárou s přesně definovaným vnitřním průměrem. Doba, kterou sledovaná kapalina potřebuje k průtoku kapilárou se měří a slouží k výpočtu kinematické viskozity. Existují různé typy kapilárních viskozimetrů (Cannon-Fenskeův, Ostwaldův a Vogel-Ossagův a Ubbelohdeho), které se liší svou složitostí, tokovým polem, či možnostmi korigovat tokové poruchy. Měření na kapilárních viskozimetrech je pouze jednobodové, čímž dostáváme pouze jednu hodnotu viskozity závislosti na daných podmínkách měření. Ve skutečnosti se však rychlost smykové deformace mění v určitém intervalu v závislosti na klesajícím množství kapaliny (a tedy poklesu

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

působící síly), která už protekla viskozimetrem. Proto je použití této metody omezeno pouze na ideálně viskozí (Newtonské) kapaliny.



Obrázek 3.5: Nízkotlaké kapilární viskozimetry: Ostwaldův (vlevo), Ubbelohdeho (uprostřed) a Cannon-Fenskeův (vpravo).

Rotační reometry

Rotační reometry představují sofistikovanější skupinu přístrojů určených k charakterizaci reologického chování širokého spektra materiálů, kde kromě viskozity umožňují měřit i jiné reologické vlastnosti, a to jak v ustáleném smykovém (smykové napětí, rychlost smykové deformace, prahové napětí), tak i v oscilačním (viskoelastické moduly, komplexní viskozita) poli.

Hlavní, pracovní část rotačního reometru tvoří dvě části geometrie - pohyblivá (rotor) a statická (stator), mezi kterými je umístěn zkoušený materiál. Obě části geometrie jsou souosé a mohou používat se ve třech základních konfiguracích - válec - válec, deska - deska, kužel - deska (obrázek 3.6), z nichž každá je vhodná pro určité konzistence zkoušených materiálů a různé druhy měření.

Rychlost smykové deformace se počítá z úhlové rychlosti rotující části geometrie; smykové napětí je určeno kroutícím momentem (tabulka 3.2). V podstatě existují

dva režimy, na kterých tyto reometry pracují. Buďto je nastaveno smykové napětí a úměrně tomu se měří rychlost smykové deformace (CS - Controlled Stress) anebo opačně nastavíme rychlost smykové deformace a měříme smykové napětí (CR - Controlled Rate). Podle toho, která část geometrie je ta pracující, dělíme měřicí systémy na Couettův (otáčí se vnější válec, případně dolní deska geometrie), anebo se pohybuje vnitřní válec a horní deska geometrie - Searlův měřicí systém (častější).

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tabulka 3.2: Vypočet smykového napětí, rychlosti smykové deformace a smykové viskozity

Geometrie	smykové napětí	Rychlost smykové deformace	smyková viskozita
válec -válec	$\tau(r) = \frac{M}{2\pi \cdot L \cdot r^2}$	$\dot{\gamma}(r) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{(2 \cdot R_i^2 \cdot R_e^2)}{(R_e^2 - R_i^2)} \cdot \omega$	$\eta(r) = \frac{(R_e^2 - R_i^2)}{4\pi \cdot L \cdot R_e^2 \cdot R_i^2} \cdot \frac{M}{\omega}$
kužel -deska	$\tau(R) = \frac{3 \cdot M}{2\pi \cdot R^3}$	$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\alpha}$	$\eta(R) = \frac{3 \cdot M \cdot \alpha}{2\pi \cdot R^3 \cdot \omega}$
deska -deska	$\tau(R) = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot R^3}$	$\dot{\gamma}(R) = \frac{\omega \cdot R}{H} = \frac{2\pi \cdot n \cdot R}{60 \cdot H}$	$\tau(R) = \frac{2 \cdot M \cdot H}{\pi \cdot R^4 \cdot \omega}$



Obrázek 3.6: Geometrie rotačního válce. Válec -válec (vlevo), kužel - deska (uprostřed) a deska - deska (vpravo).

Kapilární vysokotlaké viskozimetry

Vysokotlaké kapilární viskozimetry se používají na měření reologických vlastností vysoce viskózních polymerních tavenin anebo vysoce koncentrovaných polymerních roztoků a disperzí. Tlak, který je nezbytný k vyvození smykového napětí je v případě vysokotlakých viskozimetrů způsoben vnější působící silou. Při průtoku kapaliny kruhovým kanálem se vytváří tokový profil. Charakteristickými veličinami při měření na vysokotlakých kapilárních viskozimetrech jsou: Tlakový pokles po délce kapiláry, objemový průtok a teplota. Tlakový pokles je u kruhových kapilár definován jako rozdíl tlaků na počátku kapiláry v zásobníku a atmosférického tlaku na konci kapiláry.

Volba geometrie kapiláry se řídí podle aktuálního měření. Obecně se používá průměr kapiláry od 0,5 mm do 5 mm a délka kapiláry od 5 mm do 60 mm. Měření se mohou provádět v rozsahu rychlostí smykové deformace od 10^{-1} s^{-1} do 10^{+5} s^{-1} a tak pokrýt rozsah smykových deformací při zpracování polymerů.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pro kapiláry s kruhovým průřezem a v případě adheze ke stěně se u polymerních tavenin získávají zdánlivé hodnoty smykové napětí a rychlosti smykové deformace, což je dostačující pro srovnávací měření.

$$\tau_a = \frac{\Delta p \cdot R}{2L}$$

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4 \cdot Q}{\pi R^3}$$

Korekce newtonského chování

Naměřené hodnoty smykového napětí i rychlosti smykové deformace je však nezbytné zkorigovat. Na rozdíl od Newtonských kapalin, polymerní materiály vykazují výrazně vyšší rychlosti přerozdělení v okolí stěny trysky, především při vyšších průtokových rychlostech. Spočítána zdánlivá rychlost smykové deformace je tak nižší než skutečná rychlost a tak uměle zvyšuje viskozitu. Pomocí Weissenberg-Rabinowitschovy korekce je však možné získat skutečnou hodnotu rychlosti smykové deformace.

$$\dot{\gamma}_c = \frac{(3n + 1)}{4n} \cdot \dot{\gamma}_a$$

Kde n je tangenciální růst funkce $\log \tau_s = f(\log \dot{\gamma}_s)$ v bodě, ve kterém má být zdánlivá rychlost smykové deformace korigována:

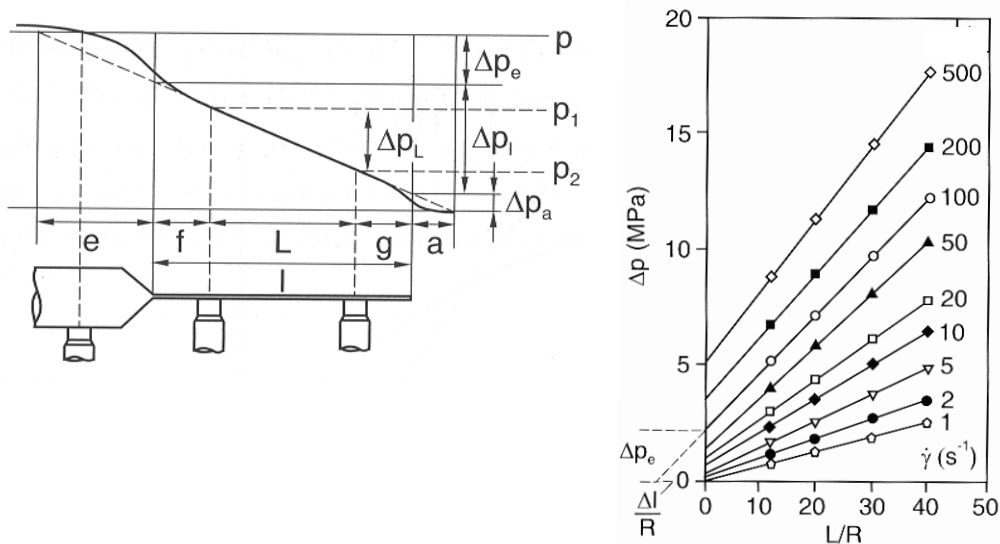
$$n = \frac{d \log \tau_c}{d \log \dot{\gamma}_a}$$

Tlakové ztráty, které nastávají v důsledku viskoelastického chování polymerů při toku tryskou vyvolané třením a elastickou deformací je také nezbytné zkorigovat. Elastická energie tekoucí a deformované taveniny vyvolává redeformaci na výstupu trysky označované jako narůstání (Barus efekt) (obrázek 3.7).

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.7: Tlakový profil v kapiláře (vlevo) a .

Stanovením tlakového spádu při použití kapilár s různým poměrem L/D se získá tlaková závislost na poměru L/D - Bagleyho korekce. Úsek na ose y při nulové L/R Δp_e odpovídá tlakové ztrátě v závislosti na délce kapiláry.

$$\Delta p_k = \Delta p - \Delta p_e$$

$$\tau_c = \frac{\Delta p \cdot R}{2(L + \Delta L)} \text{ anebo } \tau_c = \frac{(\Delta p - p_0) \cdot R}{2L}$$

$$\eta = \tau_c / \dot{\gamma}_c$$

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Elongační viskozita

Reologické chování viskoelastických materiálů se výrazně liší při smykovém a elongačním zatížení. Na rozdíl od smykového toku, kde je rychlostní gradient kolmý k směru toku, při elongačním namáhání je rychlostní gradient ve směru toku. Elongace se projevuje například při toku taveniny kapilárou, jednoosém zvlákňování nebo při vyfukování. Proto bylo nezbytné popsat chování materiálu při tomto typu zatížení stejně důsledně jako při smykovém.

Existuje několik metod, jak změřit elongační viskometrické parametry. Jejich určení vychází z tahového napětí a elongační rychlosti nezbytné k deformaci. Nejznámější metody jsou Meissnerův a Münstedův elongační reometr. Meissnerův přístroj pracuje na principu, kdy konstantní elongační rychlost při konstantní délce L je dosažena konstantní rychlostí odtahovacích válečků.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2\pi R (n_1 + n_2)}{L_0}$$

Protahující síla F je měřena pomocí čidla na ozubeném soukolí. Tahové napětí se potom počítá ze síly a okamžité plochy průřezu, která exponenciálně klesá s rostoucím protažením.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F \exp(\varepsilon)}{A_0}$$

STANOVENÍ INDEXU TOKU TAVENINY (ITT)

Speciálním typem kapilárního viskozimetru je výtokový indexer (obrázek 3.9) určený k měření indexu toku taveniny termoplastických polymerů. Index toku taveniny (melt flow index MFI) je definovaný jako množství materiálu, které proteče definovanou kapilárou při určitém tlaku a teploty za deset minut (tabulka 3.3).

$$MFI = \frac{m \cdot 600}{t}$$

kde

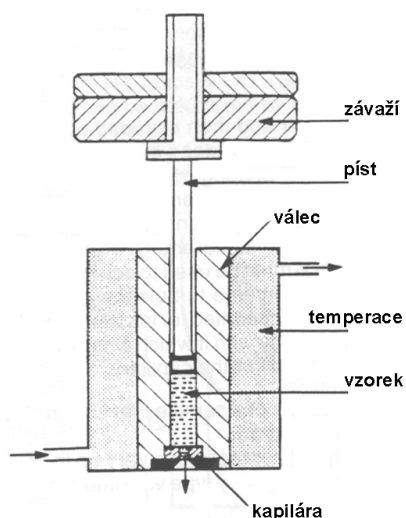
m ... průměrná hmotnost struny

t ... časový interval odřezávání struny

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.8: Výtokový indexer.

Tryska indexeru je velice krátká kapilára s definovanými rozměry (obvykle L/D 10:1). Tlak působící na taveninu v kapiláře je vyvozen přidáváním definovaného závaží. Teplota měření je zvolena s ohledem na zkoušený materiál a zvolené závaží a je specifikována normou.

Kromě hmotnostního indexu toku taveniny udávaného v gramech za deset minut, se někdy spíše určuje objemový index toku taveniny jako objem taveniny která proteče kapilárou za daný časový úsek. Tak se dá eliminovat vliv hustoty taveniny.

$$MVI = \frac{427 \cdot l}{t}$$

kde

l ... délka dráhy pístu

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tabulka 3.3: Podmínky měření indexu toku taveniny.

Závaží [g]	Síla pístu [N]	Tlak pístu [bar]	Zdánlivé smykové napětí [Pa]
0,325	3,187	0,4516	$2,956 \times 10^3$
1,20	11,77	0,1667	$1,092 \times 10^4$
2,16	21,18	3,0010	$1,965 \times 10^4$
3,8	37,27	5,2800	$3,457 \times 10^4$
5,0	49,03	6,9470	$4,548 \times 10^4$
10,0	98,07	13,8900	$9,096 \times 10^4$
15,0	147,1	20,8400	$1,364 \times 10^5$
21,6	211,8	30,0100	$1,965 \times 10^5$

Index toku taveniny tak představuje jeden bod na tokové křivce při relativně nízkých rychlostech smykové deformace. Díky jednoduchosti metody měření nelze úplně věrohodně srovnávat tuto hodnotu s hodnotou viskozity získanou z měření na skutečném vysokotlakém kapilárním reometru. Obě hodnoty se mohou lišit až o 30%! I přesto, indexu toku taveniny je velice rozšířený v průmyslové praxi jako rychlá a jednoduchá metoda kontroly vstupních surovin anebo ke zjištění kvality materiálu.

HODNOCENÍ TEKUTOSTI REAKTOPLASTŮ

Lisovací, teplem tvrditelné pryskyřice jsou většinou nízkomolekulární látky, které mají při vyšších teplotách příznivé tokové vlastnosti. Protože však tyto materiály povětšinou obsahují vysoké procento plniva (částice, vlákna), tak se v důsledku toho výrazně mění jejich tokové chování. Také samotné zpracování za vysokých teplot a tlaků vede ke změnám teploty či rychlosti toku v materiálu. Dochází k zvýšení molekulové hmotnosti pryskyřice, větvení a síťování.

Proto je z praktického hlediska nezbytné optimalizovat tokové vlastnosti s průběhem vytvrzování a vyladit lisovací podmínky pro konkrétní polymerní systém (teplota, tlak, rychlost lisování, doba vytvrzování). K tomu slouží speciální empirické metody anebo speciální rotační reometry.

Základním měřítkem tokového chování lisovacích hmot je tekutost, což je v podstatě jejich schopnost vyplnit tvarovou formu za daných technologických podmínek - teplota, tlak, doba. K tomuto účelu slouží několik metod, které pracují za podmínek podobných skutečné technologii zpracování lisovacích termoaktivních hmot.

Modelové lisovací cykly

Zřejmě nejrozšířenější způsob, kdy se používají lisovací anebo přetlačovací formy na pohárky, spirály anebo kotouče, do kterých se zalisuje zkoušený materiál za daných podmínek. Z tvaru výlisku, doby uzavírání formy, síly přetoků a vlastního výlisku se odhaduje tekutost materiálu.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Lisování pohárků

Míra tekutosti je doba potřebná k uzavření lisovacího stroje s přesným množstvím vzorku při definovaných podmínkách do pohárku definovaných rozměrů. Po uzavření se měří doba nezbytná k úplnému uzavření (dosažení maximálního tlaku).

Lisování ostravského kotouče

Slouží k hodnocení lisovacích hmot plněných vláknitými plnivými. Lisovací hmota se zalisuje do formy opatřené kruhovými drážkami, které vymezují na vylisovaném kotouči různě velká mezikruží. U vylisovaného kotouče se změří tloušťka na dvou definovaných místech. Podle tabelovaných hodnot se vyhodnotí tekutost lisovací hmoty (tabulka 3.4).

Tabulka 3.4: Hodnocení tekutosti lisováním kotouče

Stupeň tekutosti	Označení	Tloušťka 3. mezikruží ostravského kotouče (mm)
1	velmi měkká	méně než 0,36
2	měkká	0,37 – 0,46
3	středně tvrdá	0,47 – 0,56
4	tvrdá	0,57 – 0,66
5	velmi tvrdá	0,67 a více

Lisování do spirály

Sledovaný vzorek se zalisuje za definovaných podmínek do zkušební spirály (obrázek 3.10). Délka zatečení vyznačená na formě přímo koresponduje s hmoty za daných podmínek, které se volí s ohledem na zkoušený materiál.

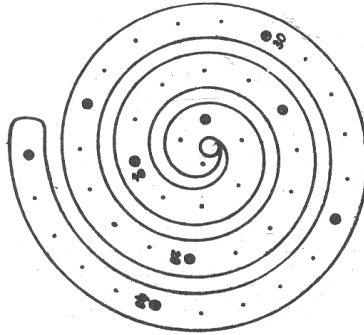
Lisování do kapiláry

Jedna z nejběžnějších metod měření tekutosti teplem tvrditelných pryskyřic. Na přístroji se sleduje délka vtoku na normované kapiláře obdélníkového anebo kruhového průřezu a definovaných podmínek. Kromě toho lze získat křivku tekutosti a také dále využít zkušební vzorky pro stanovení mechanických vlastností (tvrdost, rázová houževnatost).

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.10: Spirálová metoda stanovení tekutosti při lisování.

Metoda Olsen-Krahlov

Spočívá v lisování tablety zkoušeného materiálu do zužujícího se kanálku za daných podmínek. Délka vylisované tyče je přímoúměrná tekutosti lisovací hmoty.

Druhou skupinou tvoří zkoušky na rotačních viskozimetrech speciálně upravených pro studium tokových vlastností teplem tvrditelných reaktoplastů, které svým charakterem odpovídají lisovacímu cyklu. Zároveň umožňují stanovit smykové napětí při konstantní rychlosti smykové deformace, a tak spočítat zdánlivou viskozitu za podmínek lisování.

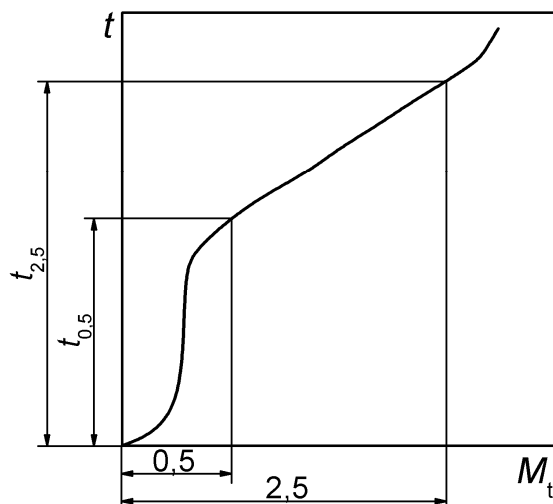
Kanavcův plastometr

Plastometr umožňující sledovat časovou závislost viskozity při zpracování. Zkoušený materiál je pod tlakem zalisován do rýhované formy. Vnější část formy je potom temperována na zkušební teplotu. Vnitřní část se otáčí definovanou rychlostí smykové deformace a snímá se časová závislost kroutící moment (smykové napětí) (obrázek 3.11). Obvykle se vyhodnocuje doba $t_{0,5}$ odpovídající smykovému napětí 0,5 MPa (dosud lisovací hmota v plastickém stavu) a doba $t_{2,5}$, respektive smykové napětí 2,5 MPa, které se vyhodnocuje jako minimální vytvrzovací čas. Maximální smykové napětí potom odpovídá porušení vzorku. Pomocí smykových napětí 0,5 MPa a 2,5 MPa lze potom charakterizovat tokové chování materiálu za dané teploty a lisovacího tlaku. Z rychlosti vzrůstu lze odhadnout rychlost vytvrzování.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 3.11: Vytvrzovací křivka. Časový průběh kroutícího momentu.

Fenolické pryskyřice lze také vyhodnotit pomocí kritéria tekutosti definovaného poměrem $t_{2,5}^{170} / \tau^{120}$ (minimální vytvrzovací doba při 170 °C a smykové napětí 120 °C a při tlaku 30 MPa) (tabulky 3.5 a 3.6)

Tabulka 3.5: Kritérium tekutosti

$t_{2,5}^{170} / \tau^{120}$	Stupeň tekutosti
> 30	velmi dobře tekoucí
15 – 30	dobře tekutá
7 – 15	středně tekoucí
3,1 – 7	tekoucí
< 3	špatně tekoucí

Tabulka 3.6: Rychlost vytvrzování

$t_{2,5}^{170}$ [s]	Rychlost tuhnutí
< 55	velmi rychle tuhnoucí
56 – 75	rychle tuhnoucí
76 – 90	středně rychle tuhnoucí
> 90	pomalou tuhnoucí

Plastograf Brabender

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tokové chování lze vyhodnotit z časové závislosti hodnoty kroutícího momentu (smykového napětí), maximální a minimální hodnoty kroutícího momentu, anebo doby k jejich dosažení.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ