

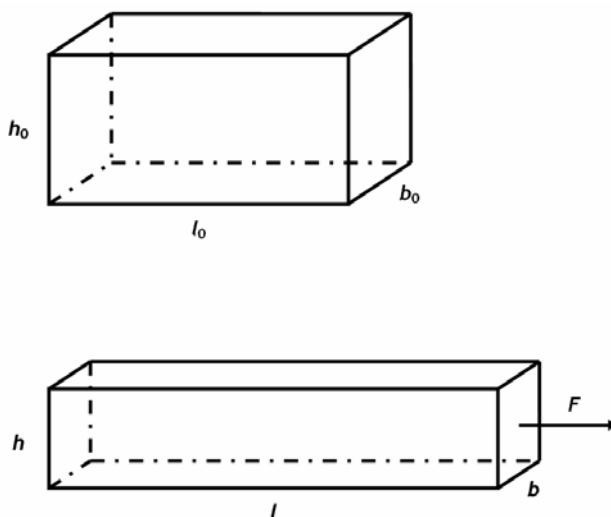
## 9. KAPITOLA

### STATICKÉ ZKOUŠKY KRÁTKODOBÉ

Statické krátkodobé zkoušky patří do skupiny mechanických zkoušek, které patří k vůbec nejrozšířenějším způsobům zkoušení materiálů. Principem je krátkodobé (v minutách) namáhání zkušebního tělesa definovaným zatížením, například v tahu, tlaku, smyku, ohybu, krutu, malými rychlostmi deformace ( $10^{-5}$  až  $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) dokud nedojde k jejich porušení anebo předepsané deformaci za normovaných podmínek měření (teplota, rychlost).

### Tahové zkoušky

Tahová zkouška patří k základním metodám sloužícím k hodnocení mechanických vlastností materiálů. Deformaci zkušebního tělesa si lze nejlépe přiblížit na chování hranolu s definovaným průřezem, které se zatíží jednosměrnou tahovou silou (obrázek 9.1).



Obrázek 9.1: Jednosměrná deformace tělesa tahem. Původní rozměr tělesa (nahore) a jeho rozměry po tahové deformaci (dole).

$$A_0 = b_0 \cdot h_0 \quad [m^2]$$

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right]$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Po zatížení se začne zkušební hranol deformovat a v důsledku toho měnit své rozměry až do okamžiku rovnováhy mezi deformací a vyvozeným napětím, pokud však předtím nedojde k celkové destrukci vzorku.

Prodloužením zkušebního tělesa se mění jeho původní délka a nastalá délková změna se definuje jako poměrné (relativní) prodloužení.

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-]$$

Současně se však mění také velikost průřezu tělesa, které se vyjadřuje jako poměrné zkrácení

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0}, \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr

$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_L} = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} \quad [-]$$

charakterizující změnu do určité míry změnu objemu protažením, která je dána

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l_0}$$

V případě, že s objem tělesa během tahové zkoušky nemění, tak  $\nu$  nabývá hodnoty 0,5. Ve většině případů se však průřez zmenšuje méně než by odpovídalo protažení, v důsledku čehož narůstá objem a hodnoty Poissonova poměru klesají. Vyšší hodnoty vypovídají o vyšší poddajnosti materiálu (tabulka 9.1). Hodnota Poissonova poměru je prakticky teplotně nezávislá.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tabulka 9.1: Hodnoty Poissonova poměru pro některé polymery

Polymery	$\nu$	Tradiční materiály	$\nu$
PS - polystyren	0,30	Křemen	0,07
PA66 - polyamid	0,33	Sklo	0,23
PMMA - polymethylmetakrylát	0,35	Ocel	0,28
LDPE - nízko hustotní polyetylen	0,45	Hliník	0,43
kaučuky	0,49	Olovo	0,50

Poměrné protažení se často vyjadřuje také v procentech jako protažení:

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 [\%]$$

Podobně je definována mezní hodnota deformace, tedy protažení při přetržení, které se zkráceně označuje jako tažnost

$$\varepsilon_t = \frac{l_t - l_0}{l_0} \cdot 100 [\%]$$

kde  $l_t$  je délka zkušebního tělesa při přetržení. Hodnota tažnosti je důležitou materiálovou hodnotou z pohledu zamýšlených aplikací.

Ze zkoušení v jednosměrném tahu lze stanovit dvě hodnoty tahového napětí, a to efektivní napětí vztahující se na okamžitý průřez zkušebního tělesa (náročné na přesnost měření průřezu) anebo smluvní napětí vztahované na původní průřez vzorku (jednodušší).

Chování elastických materiálu v oblasti malých deformací lze popsat Hookovým zákonem, který definuje přímoúměrný vztah mezi napětím a deformací. Konstantou úměrnosti je modul pružnosti  $E$  (Youngův modul)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [Pa]$$

Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z tahových křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí na deformaci. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím je vyšší tuhost zkoušeného

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

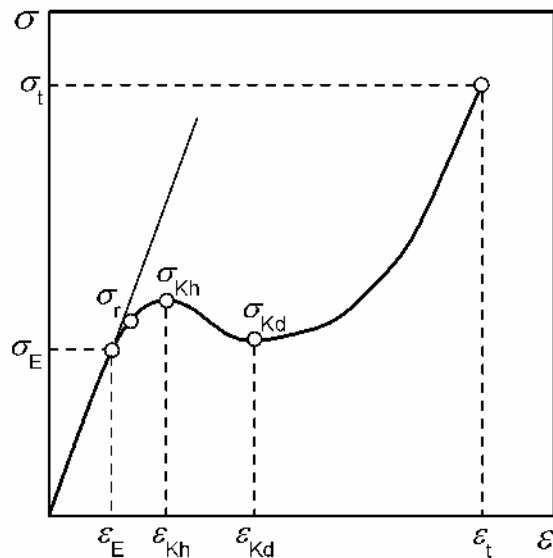


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

materiálu. Jeho hodnota je, zvláště pak u polymerních materiálů, závislá na čase, teplotě a okolním prostředí (například vlhkost).

U některých materiálů je obtížné stanovení modulu pružnosti, protože se od počátku chovají nelineárně. Například u elastomerů se postupuje tak, že se zkoušený vzorek protáhne na smluvní hodnotu (například o 100 %, 300 %, 600 %) a odečte se napětí vztážené na původní průřez vzorku jako modul protažení (gumarenský modul) (M-100, M-300, M-600).

Obecná tahová křivka polymeru je ukázána na (obrázku 9.2). Na této křivce je několik důležitých bodů, které vypovídají o tahovém chování zkoušeného materiálu.



Obrázek 9.2: Obecná tahová křivka.

Bod na křivce, kde končí oblast hookovského chování se označuje jako mez úměrnosti a je vyjádřena smluvním napětím

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A_0} \quad [Pa]$$

S rostoucím zatížením dochází k zakřivení tahové křivky, ve kterém je zahrnuta časově závislá elastická a plastická deformace. Místo, do kterého je ještě deformace vratná se označuje jako mez pružnosti.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A_0} \quad [Pa]$$

Po uvolnění napětí se deformace vrátí do původního stavu.

Za tímto bodem dochází i při nepatrném zvýšení napětí k velké deformaci, nastává plastická (nevratná) deformace. Nastává mez kluzu. Pokud za tímto bodem dojde k poklesu napětí, hovoříme o horní mezi kluzu, zatímco minimum na pokračující křivce se definuje jako dolní mez kluzu. Všechny meze kluzu se vyjadřují smluvním napětím

$$\sigma_K = \frac{F_K}{A_0} \quad [Pa], \quad \sigma_{Kh} = \frac{F_{Kh}}{A_0} \quad [Pa], \quad \sigma_{Kd} = \frac{F_{Kd}}{A_0} \quad [Pa]$$

Za dolní mezi kluzu dochází k opětovnému nárůstu napětí až do určitého maxima, kdy dojde k přetržení zkušební tělesa anebo k porušení soudržnosti doprovázené poklesem napětí a lomu.

Pokud dojde k destrukci těsně za mezí pružnosti, při relativně nízkých deformacích, tak se jedná o křehký lom (polystyren, polymethylmetakrylát). Pokud tomu však předchází velká deformace spojená s orientací makromolekul, tak dochází k takzvanému tažnému lomu (polyamidy, polyolefiny, pryž).

Mez pevnosti v tahu (pevnost v tahu) se definuje jako napětí potřebné k přetržení zkušební tělesa vztažené na původní průřez, tedy smluvní napětí potřebné k přetržení. K výpočtu se používá maximální hodnota síly, i když k vlastnímu přetržení dochází při nižším napětí

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad [Pa]$$

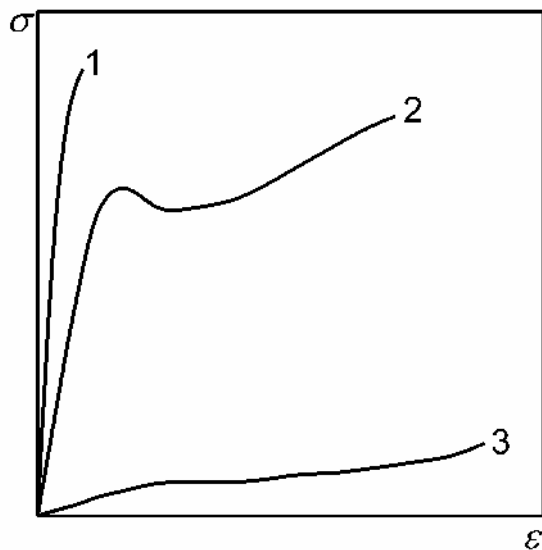
### Obecné tvary tahových křivek polymerních materiálů

Na obrázku jsou znázorněny typické průběhy tahového chování různých materiálů (obrázek 9.3). První (1) tvrdé a elastické materiály vykazující tahové křivky s vysokou pevností (vysoký modul) a malou tažností. Jejich lom je křehký, materiály jsou méně houževnaté (prykyřice, polystyren, polymethylmetakrylát, sklo, lehké kovy).

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 9.3: Tvary tahových křivek pro různé materiály.

Druhou skupiny (2) tvoří materiály s víceméně plastickým chováním, které jsou sice méně tuhé s přibližně lineárním počátkem, ale větší plastickou oblastí, ve které se projeví horní mezí kluzu. Za ní pak nastává pokles napětí a k lomu dochází zároveň s mezí pevnosti. Jde o měkké materiály, u kterých za horní mezí kluzu dojde k poklesu napětí a materiál se orientuje a přetrhne se až při mnohanásobném protažení. U nich je horní mez kluzu maximální hodnotou, tedy mezí pevnosti. Třetím případem (3) jsou elastomery. Nelineární plynulý průběh, kdy je velká deformace na počátku při nízkém napětí a na konci zvýšené napětí s tažným lomem, který je zároveň mezí pevnosti v tahu.

### Rychlost a teplota

Vedle tvaru, rozměru a kvality povrchu zkušebních těles, jejich rovnovážného stavu upraveného kondicionováním má vliv na průběh tahové zkoušky rychlost deformace a teplota.

Konstrukce trhacích strojů je uzpůsobena tak, aby čelist spojená s měřením síly je statická, zatímco druhá čelist se pohybuje konstantní rychlostí nezávislou na napětí. Rychlost posuvné čelisti je nastavitelná podle typu zkušebního tělesa, pro polymerní materiály se obvykle pohybuje v rozsahu od  $1 \text{ mm min}^{-1}$  do  $500 \text{ mm min}^{-1}$ . Efekt časové složky se začíná projevovat až v oblasti plastických deformací. Se zvyšující se rychlostí deformace se zvyšuje mez toku i mez pevnosti v tahu. Srovnání mezních hodnot (mez toku, mez pevnosti) v závislosti na rychlosti deformace pak vypovídá o deformačním chování. Obecně by se měla rychlost zvolit tak, aby došlo k přetržení zkušebního

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



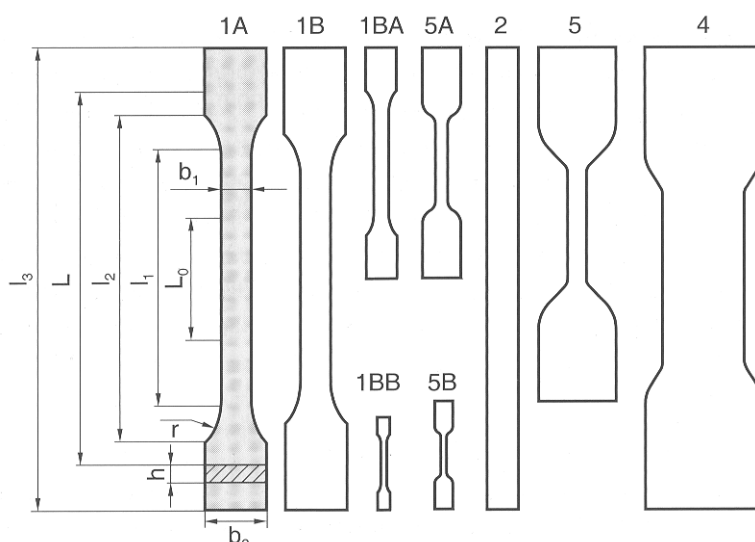
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

tělesa během 60 s. Pro jednotlivé materiály a zkušební tělesa je rychlost předepsána příslušnou normou zkoušení.

Významným faktorem je teplota. Se zvyšující se teplotou přechází polymer z tuhého, tvrdého stavu do kaučkovitého s menším modulem a vyšší tažností. Vyšší teplota má tedy podobný vliv jako rostoucí rychlost deformace. Toho lze s využitím v principu superpozice rychlost deformace v závislosti na teplotě, kdy lze získat tahovou křivku podávající komplexnější informace o změnách ve struktuře zkoušeného materiálu (zejména kaučuků a jejich vulkanizátů) během stárnutí, odolnosti vůči radiaci a dalších vlivů.

## Zkušební tělesa

Tvar a rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky jsou přesně definovány normou pro konkrétní polymerní materiál. Většinou se však používají zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek, takzvaných osmiček (obrázek 9.4). Tvar lopateček je zvolen záměrně, protože dovoluje dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části vzorku.



Obrázek 9.4: Různé tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky.

Pro sledování mechanických vlastností kaučukových vulkanizátů lze použít také zkušební tělesa tvaru kroužků. Pro folie či desky lze využít pásků.

Speciální případ zkušebních těles jsou vlákna. Pevnost vláken se udává v  $N \text{ tex}^{-1}$ , kde v texech se udává takzvaný titr vláken vztahující se k tloušťce vlákna a jeho hmotnosti. Kromě využití při výpočtu pevnosti vláken slouží i k označení jemnosti vláken a příze určených pro výrobu tkaniny a úpletů.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pevnost v tahu se u vláken vyjadřuje jako síla na původní titr, což znamená tloušťku vláken před protahováním.

Tabulka 9.2: Modul pružnosti v tahu a mez pevnosti v tahu vybraných polymerů

Materiál	$E$ [MPa]	$\sigma_M$ [MPa]	Materiál	$E$ [MPa]	$\sigma_M$ [MPa]
HDPE - vysoko Hustotní polyetylen	1 040	28	PP + 30 wt.% SV	6 200	73
LDPE - nízko hustotní polyetylen	280	-	PA6 + 30 wt.% SV	6 500	110
PS - polystyren	3 200	51	PP + mastek	3 000	190
PA6 - polyamid	1 300	32	PP + křída	3 000	32
PC - polykarbonát	2 300	71	PVC + křída	3 200	32
PMMA - polymethylmetakrylát	3 300	74			
PVC - tvrdé polyvinylchlorid	3 200	50	fenoplasty	8 800	-
mPVC - měkčené polyvinylchlorid	-	21	UF - močovinová pryskyřice	8 750	44
PP - polypropylen	1 300	34	MF - melaminoformaldehydová pryskyřice	7 000	-
ABS - akrylonitrilbutadien styren	2 400	38	nenasycené polyesterové pryskyřice	3 700	53
POM - polyoxymetylen	3 000	68	epoxidová pryskyřice	2 840	62
PET - polyetylentereftalát	2 700	40	silikonová pryskyřice	10 400	24
PEEK - polyetereterketon	3 900	-			
SAN - styrenakrylonitril	3 700	76			

## Tlakové zkoušky

Odolnost polymerních materiálů vůči tlakovému namáhání se většinou odhaduje z pevnosti určené tahovou zkouškou. Z pohledu deformace se jedná o inverzní průběh tahové zkoušky. Očekávaný zrcadlový průběh avšak nastává pouze u vysoce elastických kaučuků. U ostatních se tvarový faktor zkušebních těles uplatňuje zcela jinak.

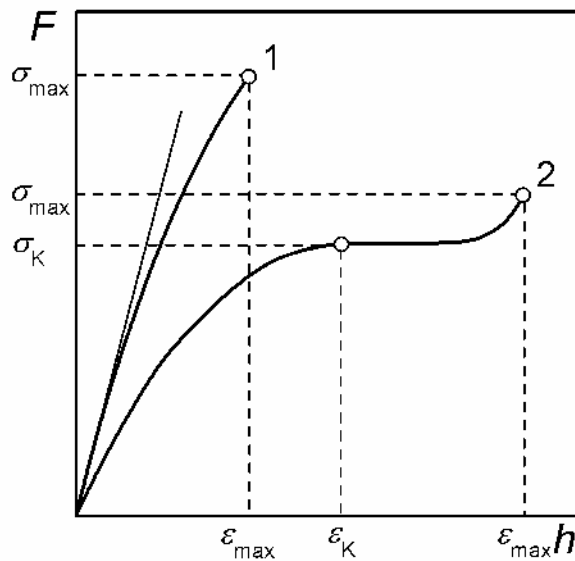
Stlačovaná zkušební tělesa vykazují dva obecné průběhy tlakových křivek (obrázek 9.5).

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ





Obrázek 9.5: Obecný tvar tlakových křivek.

U tvrdých, tuhých a křehkých materiálů roste napětí rovnoměrně až do meze pevnosti. Neexistuje však lineární hookovská oblast. Za meze pevnosti dochází k destrukci - rozdrčení nebo přímo roztržení materiálu. Obvykle se objevují povrchové trhliny, které však nemusí znamenat velkou deformaci anebo porušení celkové soudržnosti. Způsob lomu je ovlivněn strukturou materiálu.

Průběh tlakové křivky houževnatých a měkkých polymerních materiálů vykazuje pozvolnější nárůst napětí s mezí toku, nad kterou dochází k plastické deformaci bez viditelné destrukce (typické pro polyolefiny či polyamidy). Zkoušené těleso je prostoupeno mikrotrhlinami, které vznikají přemístováním materiálu.

Mez kluzu se stanoví jako napětí při smluvní hodnotě deformace (modul stlačení). Pevnost se počítá z maximální hodnoty talkového napětí.

Při deformaci tlakem dochází ke stlačení výšky vzorku  $h$  z počáteční  $h_0$ .

$$\varepsilon = \frac{(h_0 - h)}{h_0} \cdot 100 = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Mezní hodnota deformace odpovídající porušení tělesa se definuje jako stlačitelnost, kde  $h_{\max}$  je výška vzorku při porušení (anebo maximální hodnota)

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



**INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ**

$$\varepsilon_h = \frac{(h_0 - h_{\max})}{h_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Ostatní vyhodnocované parametry (meze úměrnosti, pružnosti, kluzu, maximální s destrukční) mají analogii s tahovými zkouškami. Pro napětí při smluvní hodnotě stlačení se definuje modul stlačení

$$M_h = \frac{\sigma}{\varepsilon_h} \quad [MPa]$$

Modul pružnosti v tlaku se vyhodnocuje z lineární oblasti tlakové křivky či jako tangenta směrnic k počáteční části křivky

$$E_h = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad [MPa]$$

Pevnost v tlaku (mez pevnosti v tlaku) (tabulka 9.3) se počítá z maximální tlakové síly  $F_{h \max}$  původního průřezu tělesa

$$\sigma_h = \frac{F_{h \max}}{A_0} \quad [MPa]$$

U materiálů s vysokým koeficientem tření (pryž, PVC) anebo křehkých, dochází k destrukci už při malých stlačeních a proto se průřez tělesa mění jen minimálně. U houževnatých je změna průřezu větší a tím je ovlivněno i napětí, nicméně se tato změna zanedbává a počítá s původním průřezem zkušební tělesa.

U tvrdých, lehčených materiálů se stanovuje takzvaná tlaková tuhost jako napětí potřebné ke stlačení o 10 % (modul stlačení  $M_c - 10$ ).

Vlastní měření tlakových vlastností se provádí na trhacím stroji s upravenou geometrií čelistí pro tlakové zkoušky (tak zvané reverzory).

Pro účely srovnání výsledků je nezbytné dodržovat tvar a rozměry zkušebních těles udávaných normou. Dodržuje se poměr volných ploch ku zatíženým, tedy štíhlost vzorku definovaná

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



**INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ**

$$\lambda = \frac{h}{i}$$

kde

$h$  ... je výška zkušební tělesa

$i$  ... je poloměr setrvačnosti plochy průřezu

Tabulka 9.3: Pevnost v tlaku vybraných polymerních materiálů

Materiál	$\sigma_M$ [MPa]	Materiál	$\sigma_M$ [MPa]
PMMA - polymethylmetakrylát	110	fenoplasty	170
PTFE - polytetrafluoretylén	12	UF - močovinová pryskyřice	200
PP + 30 wt.% SV	60	MF - melaminoformaldehydová pryskyřice	200
PA6 + 30 wt.% SV	160	PUR - polyuretan	110
PA66 + 30 wt.% SV	170		

Poloměr setrvačnosti plochy průřezu  $i$  je definován

$$i = \left( \frac{I}{A} \right)^{\frac{1}{2}}$$

kde

$I$  ... je moment setrvačnosti plochy průřezu

$A$  ... je plocha průřezu

Hodnota  $i$  pro zkušební těleso tvaru válce o průměru  $d$ , kde  $I = \frac{\pi d^4}{64}$ , průřez  $A = \pi r^2$ , je poloměr setrvačnosti průřezu

$$i = \sqrt{\frac{d^2}{16}} = \frac{d}{4}, \quad h = 2,5 d, \quad h = \lambda \cdot \frac{d}{4}$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Výška zkušebních těles se pohybuje v rozsahu 10 mm až 40 mm (doporučena 30 mm) při zachování štíhlosti  $\lambda = 10$ , u tenkých vzorků potom 15.

Rychlost deformace při tlakových zkouškách by měla být taková, aby deformace zkušebního tělesa proběhla v řádu 20 s až 30 s. Rychlosti jsou uvedeny v normě, doporučené jsou potom 1, 2, 5 10, 20 anebo 50 mm min<sup>-1</sup>. Rychlost zkoušení lze odhadnout podle výšky zkušebního tělesa

$$v = 0,03 \cdot h$$

Mezi typické reálné aplikace tlakového chování patří spojování polymerních materiálů (sešroubování) anebo jejich navršováním na sebe (přepravy).

## Ohybové zkoušky

Zkouška podává důležité konstrukční informace o chování polymerních materiálů v ohybu, což je velice časté namáhání (nosníky, střešní konstrukce, obkladové materiály a další). Ohybová zkouška dovoluje stanovit modul pružnosti u materiálů, u kterých to není možné s dostatečnou přesností určit z tahových či tlakových zkoušek.

Při namáhání v ohybu je napětí rozloženo ve zkušebním vzorku tak, že je maximální v krajních vrstvách (tahové a tlakové v závislosti na působení síly) a nulové uprostřed (neutrální vrstva). Maximální napětí se definuje

$$\sigma_+ = \frac{M_0 \cdot h_+}{I}, \quad \sigma_- = \frac{M_0 \cdot h_-}{I}$$

kde

$M_0$  ... je ohybový modul

$I$  ... je moment setrvačnosti plochy průřezu zkušebního tělesa vzhledem k neutrální ose

$h_+$  ... je tloušťka materiálu v tahové oblasti od neutrální osy

$h_-$  ... je tloušťka materiálu v tlakové oblasti

Dosažením poměru  $I/h = W$  dostáváme rovnici napětí v ohybu

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



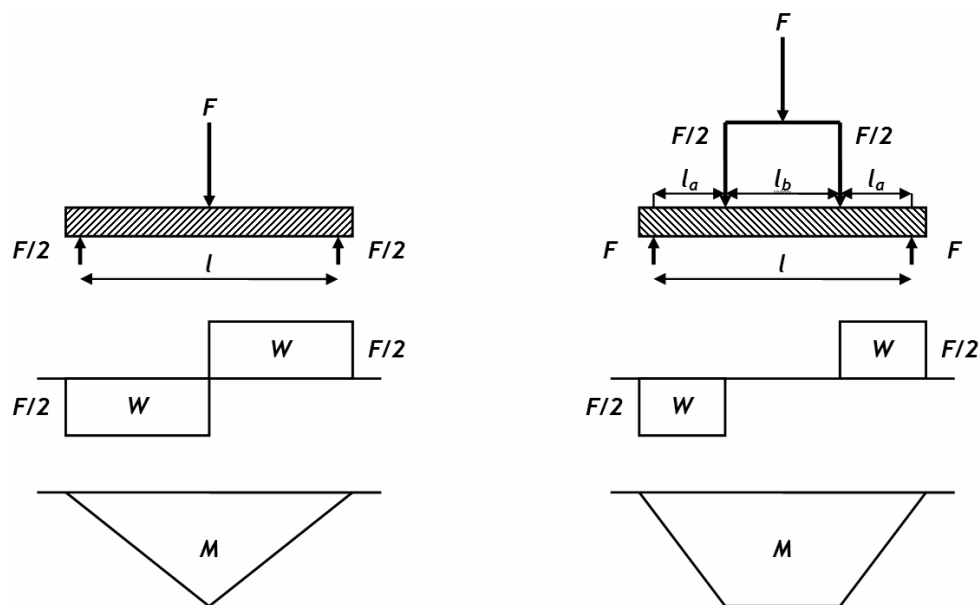
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$\sigma_y = \frac{M_0}{W} \quad [MPa]$$

kde

$W$  ... je modul průřezu

K ohybovým zkouškám se používají zkušební tělesa tvaru trámce, která se umístí na dvě podpěry v předepsané vzdálenosti. Síla působící na těleso potom působí uprostřed mezi podpěrami (tříbodový ohyb) anebo je rozdělena na dvě stejné velké síly působící v určité vzdálenosti od podpěr (čtyřbodový ohyb) (obrázek 9.6).



Obrázek 9.6: Tříbodový (vlevo) a čtyřbodový systém ohybové zkoušky.

Pokud dojde k porušení při maximálním ohybovém momentu, tak pevnost ohybu se počítá

$$\sigma_y = \frac{M_{\max}}{W} \quad [MPa]$$

Pro tříbodový ohyb a těleso obdélníkového průřezu se ohybový moment a pevnost ohybu počítá

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$M_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} \quad [N \text{ mm}], \quad W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [mm^3]$$

$$\sigma_y = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_{\max} \cdot l}{b \cdot h^2} \quad [MPa]$$

anebo pro zkušební tělesa válcové tvaru

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot d^3 \quad [mm^3]$$

$$\sigma_y = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{F_{\max} \cdot l}{d^3} \quad [MPa]$$

Rovnoměrnější rozložení ohybového momentu při čtyřbodovém ohybu po délce zkušební vzorku umožňuje přesnější stanovení modulu pružnosti.

Pevnost v ohybu se počítá pro obdélníkový (hranol) a kruhový (válec) průřez

$$\sigma_y = \frac{F_{\max} \cdot m}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F_{\max} \cdot m}{b \cdot h^2} \quad [MPa]$$

$$\sigma_y = \frac{F_{\max} \cdot m}{0,098 d} \quad [MPa]$$

Ohybovou zkoušku lze využít také ke stanovení modulu pružnosti, zejména u polymerů s malou tažností. V oblasti elastických deformací platí, že prohnutí je přímo úměrné síle a délce podpěr a nepřímým pružnosti a momentu setrvačnosti

$$y = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E_y \cdot I} \quad [mm]$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$E_y = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot l \cdot y} = \frac{l^3}{48 \cdot l} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta y} \quad [MPa]$$

pro obdélníkový průřez zkušební vzorku

$$y = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot E_y \cdot b \cdot h^3} \quad [mm]$$

$$E_y = \frac{F \cdot l^3}{4 \cdot y \cdot b \cdot h^3} \quad [MPa]$$

a pro válec

$$E_y = \frac{4}{3 \cdot \pi} \cdot \frac{F \cdot l^3}{d^4 \cdot y} \quad [MPa]$$

Pro čtyřbodový systém platí

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot m}{24 \cdot E_y \cdot y} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot m^2) \quad [mm]$$

pro obdélníkový tvar je potom prohnutí a modul pružnosti definován

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot m}{E_y \cdot b \cdot h^3} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot m^2) \quad [mm]$$

$$E_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{F \cdot m}{b \cdot h^3 \cdot y} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot m^2) \quad [MPa]$$

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

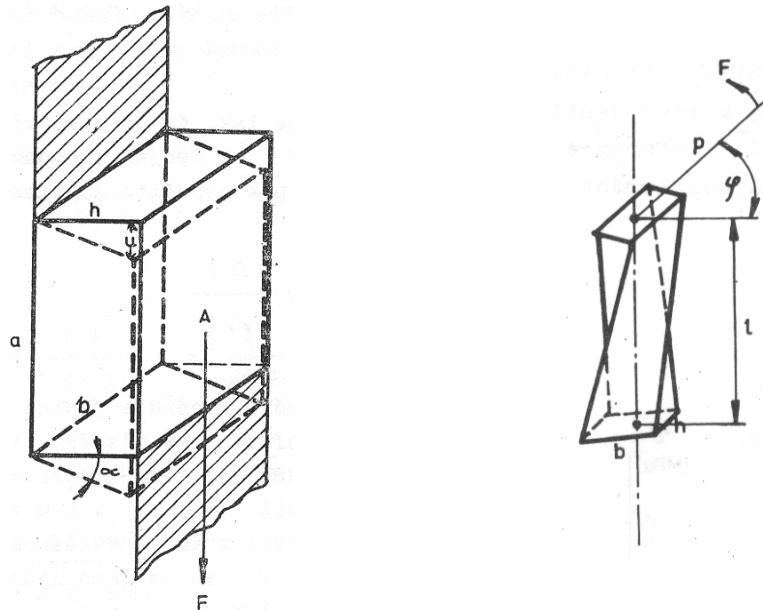


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Modul pružnosti se stanovuje tak, že se stanoví průhyby při různých zatíženích a ze směrnice závislosti zatěžovací síly a odpovídajícího prohloubení se odečte hodnota modulu.

## Smykové a torzní zkoušky

Jednoduché smykové namáhání si lze názorně popsat na hranolu, na jehož působí silou a deformuje ho do zkoseného tvaru (obrázek 9.7).



Obrázek 9.7: Smyková (vlevo) a torzní deformace páskového tělesa (vpravo).

I při tomto druhu deformace platí Hookův zákon, kde tuhost zkoušeného materiálu charakterizuje smykový modul a napětí

$$\tau = G \cdot \gamma$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{a \cdot b} \left[ \frac{N}{mm} = MPa \right]$$

Deformace je dána posunutím namáhané plochy o délku  $u$  ve vzdálenosti  $h$  od stacionární plochy, tedy tangentou

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



$$\gamma = \frac{u}{h} = \operatorname{tg} \alpha$$

Protože smykové napětí způsobí zkosení dané tangentou úhlu, tak se napětí označuje jako tangenciální.

Nejčastěji se tento druh napětí vyskytuje u pryžových výrobků (pružiny, silentbloky a jiné). Pryž, která je pevně navulkanizovaná na kovové destičky, je namáhána smykem a měří se závislost napětí na deformaci, která vychází lineárně až do vysokých deformací. U desek však dochází i k ohybu a protahování v celém objemu zkušební tělesa.

Pro smykové deformační zkoušky se používají zkušební tělesa o rozměrech  $25 \times 25 \times 12,5$  mm. Smykové napětí se uplatňuje také při kroucení tyče či pásku. Při kroucení dochází v určité vzdálenosti od osy k posunutí elementárního hranolu, kde mírou deformace je úhel zkroucení.

Napětí je potom dáno kroutícím momentem a deformace pak úhlem zkroucení, jehož velikost je ovlivněna rozměry tyče (tvarovým faktorem)

$$M = F \cdot p$$

$$M = G \cdot \varphi \cdot k$$

pro tyč

$$k = \frac{\pi \cdot r^4}{2 \cdot l}$$

kde

$r$  ... poloměr

$l$  ... délka

$$G = \frac{M \cdot 2 \cdot l}{\varphi \cdot r^4}$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Pro obdélníkový průřez ( $b > h$ )

$$k = \frac{b \cdot h^3 \cdot f}{16 \cdot I}$$

kde

$f$  ... závisí na poměru stran obdélníkového průřezu (tabelováno)

Smykový modul se potom počítá podle vztahu

$$G = \frac{M \cdot 16 \cdot I}{b \cdot h^3 \cdot \varphi \cdot f}$$

Smykové a torzní zkoušky se nejčastěji využívají k stanovení tepelné závislosti smykového modulu a dále potom ve vulkametrech, kde se mění smykový modul s rostoucí vulkanizací a při únavových zkouškách.

## Tvrдост

Tvrдост je obecně definována jako odolnost či odpor materiálu proti průniku tvrdšího tělesa. Jedná se o fyzikální parametr charakterizující zejména povrch vzorku. Podle toho, jaké stopy zanechá vtlačované těleso se stanoví tvrдост zkušebního tělesa podle standardizované stupnice (Mohsova, Kohinoor a další).

Měření tvrдостi patří mezi nepoužívanější metody při zkoušení materiálů, což je dáno především jednoduchostí, rychlostí a efektivností metody. Navíc díky pouze nepatrné deformaci se měření tvrдостi řadí mezi nedestruktivní. To umožňuje měřit také velmi malá tělesa a tenké vrstvy. Výhodou měření tvrдостi je také fakt vzájemné souvislosti mezi tvrдостí a dalšími mechanickými vlastnostmi.

Metody tvrдостi se pro jednotlivé skupiny materiálů liší zejména použitím vtlačovacího tělesa různých tvarů (kulička, kužel, jehlan) a materiálů (ocel, slinuty karbid, diamant), ale také zatížením a dobou zatížení, či způsobem jejich aplikace (při zatížení, po odtížení). Proto je nezbytné vždy uvádět podmínky zkoušení a to zejména následující parametry:

- přibližná teplota při měření
- doba zatěžování
- doba zatížení

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

- předchozí historie materiálu (zpracování a uložení)

### Tvrdość podle Vickerse

Principem stanovení tvrdosti podle Vickerse je měření úhlopříčky vzniklé po vtlačování čtverhranného jehlanu (s vrcholovým úhlem 136 °). Vytvořená stopa se měří pomocí mikroskopie. Zatížení se přizpůsobuje jednotlivým geometrickým a morfologickým okolnostem, obvykle se však provádí při silách nižších než 5 N. Tvrdość podle Vickerse HV se spočítá podle vztahu

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1.8544 F}{d^2}$$

kde

$HV$  ... tvrdost podle Vickerse [ $N\ mm^{-2}$ ]

$F$  ... zkušební zatížení (síla) [N]

$A$  ... plocha vtisku [ $mm^2$ ]

$d$  ... aritmetický průměr dvou úhlopříček [mm]

Tvrdość podle Vickerse lze měřit také za použití mikrojeblanu. Tyto mikrotvrdoměry slouží k měření strukturních fází polymerních materiálů.

### Tvrdość podle Knoop

Tvrdość podle Knoop se od předchozí metody liší tvarem vtlačovacího tělesa (anizotropní jehlan s poměrem úhlopříček 7.114:1) a výpočtem tvrdosti podle Knoop s plochy vtisku.  $HK$  se počítá z délky dlouhé úhlopříčky vtlačeného tělesa:

$$HK = \frac{F}{A} = \frac{14.23 F}{l^2}$$

kde

$HK$  ... tvrdost podle Knoop [ $N\ mm^{-2}$ ]

$F$  ... zkušební zatížení (síla) [N]

$A$  ... promítnutá plocha vtlačení povrchu [ $mm^2$ ]

$l$  ... délka delší vtlačené úhlopříčky [mm]

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tato metoda je vhodná především pro měření velmi tenkých ploch a plastových folií či potahů. Ve srovnání s tvrdostí podle Vickerse je tvrdost podle Knoopu citlivější k materiálové anizotropii. Důležitým faktorem je zajištění ideálně rovné měřicí plochy.

### **Tvrdost podle Rockwella ( $R$ , $L$ , $M$ , $E$ , $K$ )**

Měření tvrdosti podle Rockwella umožňuje pokrývá širokou oblast materiálů díky použití vlačovací tělesa tvaru kuličky různých průměrů ( $R$ : 12,7 mm,  $L$  a  $M$ : 6,35 mm,  $E$  a  $K$ : 3,1758 mm). Před vlastním měřením je zkušební těleso předzatíženo po dobu 10 s silou  $F_0$ , čímž se získá definovaný kontakt mezi kuličkou a vzorkem. Následně se přiloží doplňkové zatížení  $F_1$  po dobu 15 s, po jehož opětovném odstranění se stanoví hloubka vtisku  $h$ , ze které se počítá tvrdost podle Rockwella HR podle vztahu:

$$HR = 130 - h / 0.002 \text{ mm}$$

kde

$h$  ... hloubka v tisku [mm]

Nevýhodou této metody je porovnatelnost výsledků získaných jednotlivými metodami.

### **Metoda vtlačování kuličky**

Principem metody vtlačování kuličky je vtlačování kalené kuličky o průměru 5 mm (obrázek 9.8). Zkoušené těleso se nejprve definovaně zatíží počátečním zatížením, a následně zkušebním zatížením (49 N, 132 N, 358 N nebo 961 N) tak, aby výsledná hloubka vtlačení byla v rozsahu 0,15 mm až 0,35 mm zajišťující stejný povrchový tlak. Tvrdost vtlačení kuličky  $H$  se potom odečítá po 30 s a počítá podle vztahu:

$$H = \alpha \cdot \frac{F}{(h - 0.04)}$$

kde

$\alpha$  ... faktor (= 0.0535 [ $\text{mm}^{-1}$ ])

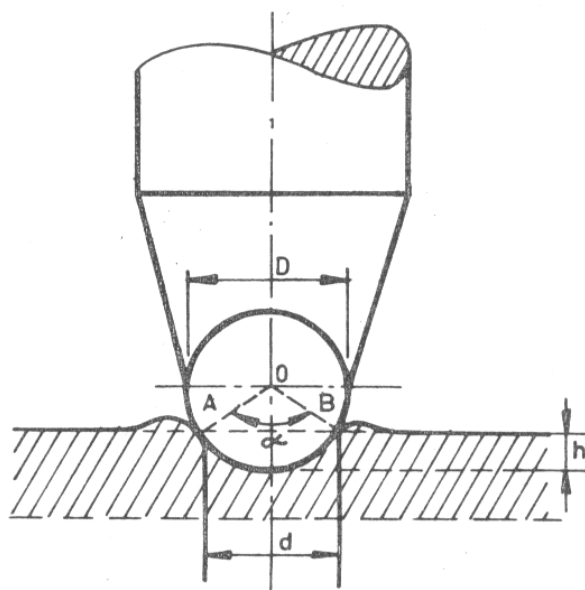
$F$  ... celkové zatížení (síla) [N]

$h$  ... aktuální hloubka [mm]

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 9.8: Princip měření tvrdosti kuličkou.

Výsledná hodnota tvrdosti se uvádí ve tvaru  $H\ 132 / 30 = 20\ \text{N mm}^{-1}$  (zkušební zatížení v N, doba měření a hodnota tvrdosti).

### Vtlačování kuličky IRHD

Metoda měření tvrdosti IRHD (International Rubber Hardness Degrese) je určena zejména pro měkké a středně tvrdé pryže a velmi měkké termoplasty (měkčené PVC). Podle očekávané tvrdosti materiálu se zvolí vhodná metoda a zatížení - N (standardní zkouška, průměr vtlačovací kuličky 2,5 mm a zatížení 5,4 N), H (vysoká tvrdost; 1 mm; 5,4 N), L (nízká tvrdost; 5 mm; 5,4 N) a M (mikrotvrdost; 0,395 mm; 0,145 N).

Po počátečním zatížením po dobu 5 s, se působím definovaným zkušebním zatížením. Po 30 s se odečte hloubka vtlačení. Pro dosaženou hloubku vtlačení se z tabulek odečte odpovídající stupeň tvrdosti IRHD. Stupnice tvrdosti je zvolena tak, že hodnota 0 odpovídá tvrdosti materiálu s Youngovým modulem rovno nule a naopak hodnota 100 potom odpovídá tvrdosti materiálu s nekonečně velkým modulem.

### $\alpha$ - tvrdost podle Rockwella

Na rozdíl od metody stanovení tvrdosti podle Rockwella, se hloubka vtlačení měří při celkovém zatížení ( $F_0 + F_1$ ). Jako vtlačovací hrot se používá kulička o průměru 12,7 mm, což vyžaduje větší plochu zkušebního tělesa.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Jak již vyplývá z definice  $\alpha$ -tvrdosti podle Rockwella  $HR\alpha$  a metoda je omezena maximální hloubkou vtlačení méně než 0,5 mm, protože už při hloubce vtlačení větší než 0,3 mm jsou naměřené hodnoty tvrdosti záporné

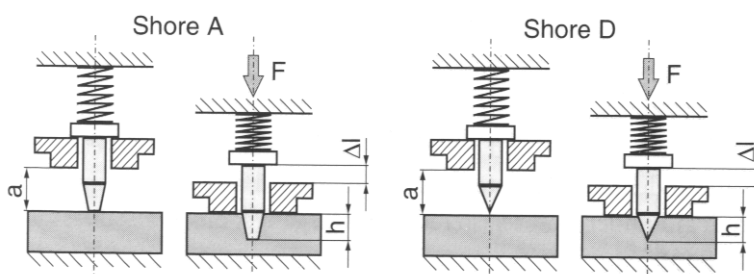
$$HR\alpha = 150 - h / 0,002 \text{ mm}$$

kde

$h$  ... hloubka vtlačení měřená při celkovém zatížení [mm]

## Tvrdot Shore

Metodou Shore patří k nejrozšířenějším metodám měření tvrdosti v průmyslové praxi. Podle rozsahu se používají zejména měření tvrdosti Shore A (měkkí materiály) a Shore D (tvrdší materiály), lišící se tvarem vtačovacích hrotů - komolý kužel (Shore A) a komolý kužel s kulatým vrchlíkem (Shore D), které jsou vtlačeny pomocí pružiny (obrázek 9.9). Hloubka vtlačení slouží jako míra tvrdosti, přičemž tvrdost Shore je definována na stupnici 0 až 100.



Obrázek 9.9: Zkušební hroty pro metodu Shore A a Shore D.

Minimální tloušťka zkušebních vzorků je pro obě metody 6 mm. Při metodě Shore A se tvrdost odečítá 3 s po dotyku vtačovaného tělesa se zkušebním vzorkem. Pokud se tvrdost mění i nadále, odečte se hodnota znova po 15 s. Tvrdot Shore D se odečítá po 15 s od počátku měření.

## Tvrdot podle Barcola

Tvrdot podle Barcola je vhodná zejména pro vlákny plněných termosetů a tvrdých termoplastů. Tvrdoměr Barcol je navržen výhradně jako přenosné zařízení pro použití jak v laboratoři, tak i v provozu.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zkušební zatížení je pomocí pružinky aplikováno na vlačovací těleso tvaru komolé kuličky z kalené oceli. Z hloubky vlačení pod zatížením se zaznamenává pomocí číselného měřidla a tvrdost podle Barcola se počítá podle vztahu

$$TB = 100 - h / 0,0076 \text{ mm}$$

kde

$h$  ... hloubka vlačení měřená při zatížení v mm

Oproti stanovení tvrdosti podle Shore D dovoluje měřit plasty s vysokou tvrdostí.

Hodnoty tvrdosti materiálů zjištěných jednotlivými metodami měření nelze srovnávat anebo pouze v omezeném rozsahu (tabulka 9.4).

Tabulka 9.4: Hodnoty tvrdosti podle VDI/VDE 2616 (> tvrdost materiálu je větší než tvrdost měřitelná danou metodou, < tvrdost materiálu je menší než tvrdost měřitelná danou metodou)

	H [N mm <sup>-2</sup> ]	Tvrdost Shore		HR $\alpha$	Tvrdost podle Barcola
		A	D		
PS	145 – 195	>	80	100 – 110	20 – 30
PMMA	185 – 210	>	87 – 88	110	50 – 55
PC	115 – 135	>	82 – 85	95 – 100	10 – 20
PVC-U	95 – 145	>	75 – 80	75 – 95	– 10
ABS	95 – 120	>	75 – 80	85 – 95	< 15
LDPE	10 – 25	95 >	40 – 50	< -110	<
HDPE	40 – 65	>	50 – 70	25 – 55	<
PP	40 – 80	>	65 – 75	30 – 70	<
POM	135 – 175	>	79 – 82	95 – 105	< 15
PA 66	120	>	80	95	8
PA 610	90	>	78	80	<
PA 612	105 – 120	>	75 – 80	95	<
PA 66/ skl. vlákno	230	>	85	115	40
PP / skl. vlákno	75 – 115	>	70 – 75	65 – 90	<
pryskyřice/ skl. vlákno	300 – 475	>	>	>	57 – 70

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ