

# 11. KAPITOLA

## DYNAMICKÉ ZKOUŠKY

### Rázová a vrubová houževnatost

Zkouška rázové a vrubové houževnatosti materiálů spočívá v namáhání tělesa rázem, tedy silou koncentrovanou do velmi krátké doby. Souvisí s jejich deformačními vlastnostmi, schopností rychle absorbovat energii, tedy deformovat se určitou rychlostí. Narozdíl od statického namáhání například v ohybu, kdy dojde k porušení tělesa až při extrémním průhybu a nebo vůbec, tak s rostoucí rychlostí namáhání se materiály stávají křehčími, což se projeví deformací či porušením zkušebního tělesa už při malém průhybu. Je to důsledek toho, že některé rovnovážné pochody v materiálu nemají dostatek času k tomu aby proběhly. Lomy, které se při nízkých rychlostech namáhání jeví jako tažné, se mění na křehké.

Střední odpor proti deformaci při statické zkoušce tahem je definován jako

$$\delta_l = \frac{A_\varepsilon}{\Delta l \cdot A_0} \quad [MPa]$$

kde

$A_\varepsilon$  ... deformační práce daná plochou tahové křivky

$\Delta l$  ... přírůstek deformace

$A_0$  ... počáteční průřez zkušebního tělesa

A podobně se stanoví pro deformaci rázem

$$\delta_\alpha = \frac{A_d}{\Delta l \cdot A_0} \quad [MPa]$$

Poměr obou hodnot je potom tak zvaný součinitel dynamického působení

$$c_d = \frac{\delta_d}{\delta_l}$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Hodnota součinitele dynamického působení, která je větší než 1 u všech materiálů, potvrzuje, že při dynamickém namáhání roste odpor materiálu proti deformaci.

Rázové zkoušky se provádí především v ohybu. Pro srovnání s ostatními druhy deformací, je lze však provádět také v tahu, tlaku, případně krutu. Energie pro deformaci se rázem získává pomocí padacího závaží (padostroje) anebo častěji pomocí kyvadlovým pohybem kladiva, které při dopadu působí na zkušební těleso kinetickou energií

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{G}{g} \cdot v^2 \quad [N \cdot m = J]$$

kde

$v$  ... okamžitá rychlost

$G$  ... hmota kladiva

$g$  ... zemské tíhové zrychlení ( $= 9,81 \text{ s}^{-2}$ )

Otočně zavěšené kladivo má ve své horní (počáteční) poloze maximální potenciálovou energii rovnou

$$E_p = m \cdot g \cdot h = G \cdot h \quad [N \cdot m = J]$$

a nulovou kinetickou. Po uvolnění zavěšené kladivo padá a prochází nejnižší polohou, přičemž dosahuje maximální kinetické energie (a nulové potencionální), se kterou působí na zkušební těleso. Hodnota kinetické energie je dána polohou zavěšení kladiva, protože jeho hmota se považuje za konstantní. Rozdíl výšky kladiva před a po zkoušce odpovídá energii spotřebované na přeražení zkušebního tělesa

$$W = G \cdot (h_1 - h_2) = G \cdot l \cdot (\cos \beta - \cos \alpha) \quad [N \cdot m = J]$$

Při zkoušce se však ne všechna energie využije k deformaci zkušebního tělesa. Určitá část slouží k iniciaci trhliny ( $W_i$ ) a její šíření tělesem ( $W_p$ ), odmrštění přeražených částí zkušebního tělesa ( $W_z$ ), ztrátám třením v ložiscích, vzduchu či vibracemi ( $W_k$ ) a zbylá část slouží k vynesení kyvadla do výšky  $h_2$  ( $W_h$ ). Podíly jednotlivých složek energie se mění v závislosti na zkoušeném materiálu.

$$W = W_i + W_p + W_z + W_k + W_h$$

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti se obvykle provádím jedním ze tří metod:

- *Charpy* - zkušební těleso je umístěno na dvou podpěrách a přeráží se otáčivým kladivem uprostřed. V principu se jedná se o třibodový ohyb
- *Izod* - zkušební těleso tvaru trámce se na jednom konci pevně upevní (vetknutý trámec) a na druhém se přeráží
- *Dynstat* - je metoda pro zkoušení těles malých rozměrů, například z hotových výrobků

## Rázová a vrubová houževnatost metodou Charpy

Rázová houževnatost je definována jako kinetická energie kyvadlového rázového kladiva nutná k přeražení zkušební tělesa vztahovaná na původní plochu příčného průřezu (u zkušebních těles obdélníkového profilu je důležité rozlišovat šířku a tloušťku)

$$A_n = \frac{W}{b \cdot h} \quad [kJ \cdot m^2]$$

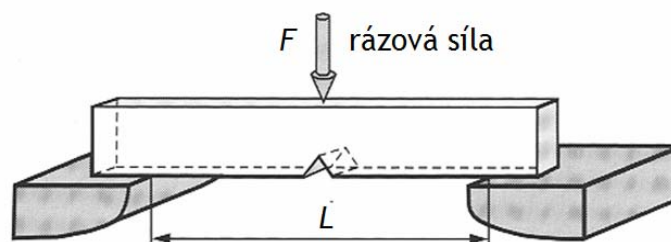
kde

$W$  ... deformační energie spotřebovaná k přeražení zkušební tělesa a odečtená na stupnici zkušebního zařízení

$b$  ... šířka zkušební tělesa

$h$  ... tloušťka zkušební tělesa

Vrubová houževnatost je hodnota získaná na zkušebních tělesech zeslabených vrubem různého tvaru (obrázek 11.1) vztahovaná na průřez po odečtení vrubu.



Obrázek 11.1: Schéma rázové deformace metodou Charpy.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$A_k = \frac{W}{b \cdot h_k} \quad [kJ \cdot m^2]$$

kde

$h_k$  ... redukovaná tloušťka (v místě vrubu) zkušebního tělesa

Účelem úpravy zkušebního tělesa vrubem je, aby lom proběhl uprostřed a kolmo na podélnou osu vzorku. Při samotné zkoušce se vzorky pokládají na podpěry tak, aby vrub ležel na opačné straně (tahové namáhání), než ze které dochází k nárazu kladivem (tlakové namáhání), tedy rázové deformaci.

Vzhledem k násobně nižším hodnotám vrubové než rázové houževnatosti ( $5 \times - 10 \times$ ), bylo zavedeno kritérium, tak zvaný vrubový koeficient (vrubové číslo), který udává citlivost jednotlivých polymerních materiálů vůči zeslabení vrubem, případně zesílení či zeslabení matrice plnivý nebo jinými výztužnými materiály (vlákna).

$$K_v = \frac{A_k}{A_n}$$

Vrubová houževnatost je výrazně ovlivněna tvarem vzorku (používá se půlkruhový, U a V vrub) a jeho rozměry (tabulka 11.1). Větší hloubka vrubu než 20 % tloušťky zkušebního tělesa už má však zanedbatelný vliv na houževnatost. Informace o lomovém chování polymerních materiálů při rázových zkouškách lze rozšířit zkoušením vzorků opatřených oboustranným vrubem, případně otvorem (obrázek 11.2). Vruby se na zkušebních tělesech vytváří frézováním či pilováním. Většinou se používá vrubu o šířce 2 mm a hloubce 3,3 mm se zaoblením o poloměru 0,2 mm. U malých zkušebních těles jsou vruby menší, u vrstevnatých materiálů se vruby dělají až do 1/3 jejich tloušťky.

Rázové a vrubové zkoušky se provádí na zkušebních přístrojích Charpy lišících se rozsahem podle typu zkoušeného materiálu a rozměrů zkušebních vzorků. Naměřené hodnoty by měly vždy pohybovat mezi 10 % až 80 % rozsahu měřicí stupnice (tabulka 11.2 a 11.3).

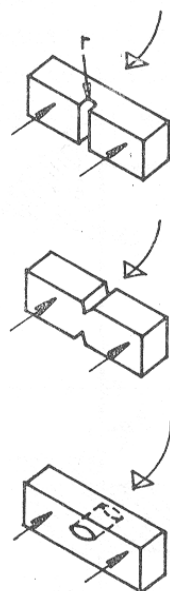
Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tabulka 11.1: Normované rozměry zkušebních těles

Zkušební těleso	Délka $l$ [mm]	Šířka $b$ [mm]	Tloušťka $h$ [mm]	Vzdálenost podpěr [mm]
velké	120	15	10	70
střední	80	4	10	70
malé	50	6	4	40



Obrázek 11.2: Různé tvary zkušebních těles pro sledování vrubové houževnatosti.

Tabulka 11.2: Rozsah zkušebního zařízení Charpy

	Rázová energie		Rychlost dopadu kladiva $\text{Cm s}^{-1}$
	kpcm	Nm J	
5	0,49	290 ± 10	
10	0,98	290 ± 10	
40	3,92	290 ± 10	
150	14,71	380 ± 20	
500	49,03	380 ± 20	

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



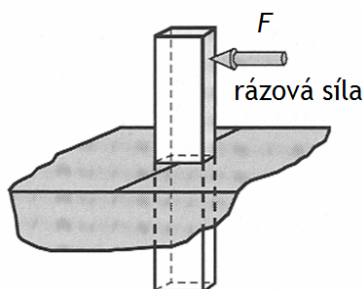
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Tabulka 11.3: Rázová a vrubová houževnatost vybraných polymerních materiálů

Polymerní materiál	Rázová energie	Vrubová energie
PP - polypropylen	9 – 13	4 – 15
PVC tvrdý polyvinylchlorid	N	2 – 5
PS - polystyren	10 – 20	2 – 3
ABS - akrylobutadienstyren	80 – 100	6 – 10
PMMA - polymethylmetakrylat	10 – 11	2 – 3
PA 66 - polyamid 66	N	20
PA 6 - polyamid 6	N	3 – 10
PA 6 - polyamid 6 plněné SK 25 %	30	10
PA 6 - polyamid 6 plněné SK 35 %	45	14
Fenolformaldehydové pryskyřice	2 – 10	1 – 10
Melaminformaldehydové pryskyřice	3 – 11	1 – 8
Epoxidové pryskyřice	8 – 11	1 – 8

## Metoda IZOD

Metoda Izod a Charpy se navzájem odlišují ve způsobu přerážení zkušební tělesa, kdy v případě metody Izod se vzorek na jedné straně upne a na druhé přeráží. Vrubová zkušební tělesa se uchytávají tak, aby se přerážela ze strany opatřené vrubem (obrázek 11.3).



Obrázek 11.3: Schéma rázové deformace metodou Izod.

Nevýhodou této metody je, že přerážený zbytek zkušební tělesa brzdí pohyb kladiva, což snižuje naměřené hodnoty. Proto se vedle vlastního měření provádí tak zvaný slepý pokus s kyvadlem, na kterém je umístěna přerážená část zkušební vzorku. Z této rozdílu hodnoty a hodnoty naměřené s volným kladivem se získá energie nutná k odmrštění zkušební vzorku, která se pak odečítá od hodnoty získané při vlastním přerážení zkušební tělesa. Výpočet rázové houževnatosti se provede podle vzorce

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

$$A_n = \frac{W - (W_0 - W_z)}{b \cdot h} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^2]$$

kde

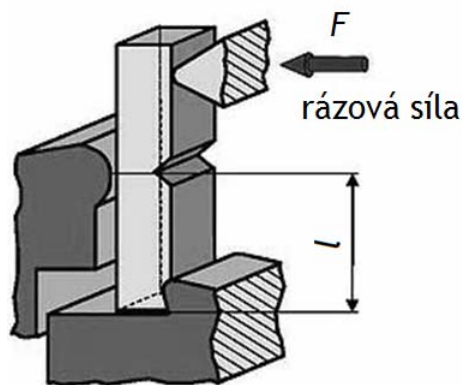
$W$  ... práce odečtená na stupnici po přeražení zkušební tělesa

$W_0$  ... hodnota volného kyvu ze stejné výchozí výšky

$W_z$  ... hodnota odečtená při volném kyvu a odmrštění části přeraženého zkušební tělesa

## Metoda Dynstat

Rázovou a vrubovou houževnatost je možné měřit také pomocí přístroje Dynstat, který má výměnná kladiva s různými energiemi (0,49 Nm, 0,98 Nm, 1,96 Nm a 3,92 Nm). K měření se používají relativně malá zkušební tělíska o rozměrech 15 mm × 10 mm a tloušťky 1,5 až 4,5 mm, která se přerážejí podobně jako u metody Izod systémem vetknutého trámce (obrázek 11.3).



Obrázek 11.3: Schéma rázové deformace na přístroji Dynstat.

Výpočet rázové houževnatosti je podobný jako u metody Charpy. Největší výhodou této metody spočívá v použití malých zkušebních těles, která mohou být připraveny z destiček anebo přímo vyříznutím z konkrétního výrobku.

## Rázové zkoušky pádem

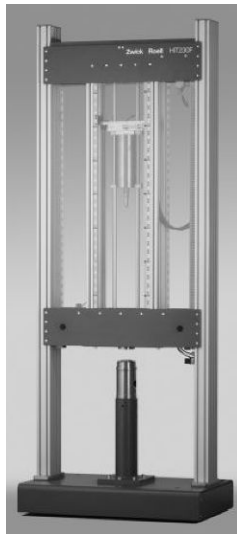
Padostroje představují alternativní způsob měření rázové houževnatosti polymerních materiálů, když eliminují nedostatky kyvadlových přístrojů (volba energie, rychlost provedené deformace).

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Padostroje pracují na principu padajícího tělesa na zkušební vzorek s libovolně volitelnou kinetickou energií (závisí na hmotě padající tělesa) a rychlosti (ovlivněna výškou pádu).



Obrázek 11.4: Komerčně dostupný padostroj.

Stanovení se provádí tak, že se na zkušební těleso nechá volně padat ocelová kulička, případně padací čidlo, jejichž hmotnost lze dodatečně navyšovat závažím. Hledá se přitom taková zátěž, při níž dojde zlomení alespoň 50 % všech zkušebních vzorků (série 10 vzorků). Energie k tomu vynaložená se počítá ze vztahu

$$W = G \cdot h$$

kde

$G$  ... tíha závaží [g]

$h$  ... výška pádu [mm]

### Rázové zkoušky tahem

Metoda se využívá ke zkoušení materiálů s vysokou houževnatostí, které se během ohybových zkoušek nezlomí, ale pouze prohnu. Deformace tahem umožňuje také rovnoměrnější deformaci. Jako zkušební tělesa se používají tělesa tvarově podobné oboustranným lopatkám k měření tahových vlastností s různou délkou pracovní části. Tělesa s krátkou pracovní částí poskytují výsledky

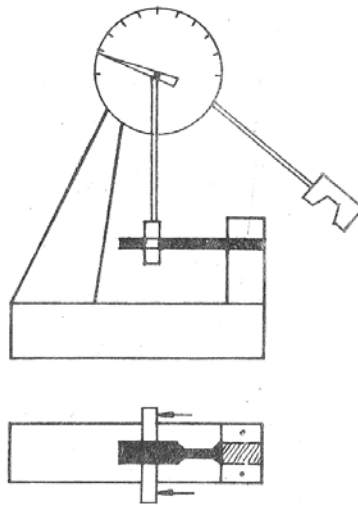
Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



srovnatelné s ohybovými rázovými zkouškami, u vzorků s delší pracovní částí vzniká určité protažení, což umožňuje vyhodnotit dynamickou tažnost a trvalou deformaci (průtažnost) (obrázek 11.5).



Obrázek 11.5: Schéma uspořádání kyvadla pro rázovou zkoušku tahem.

Práce vynaložená na destrukci tělesa je vyhodnocena součinem spotřebované energie a deformace tělesa. Takto lze teoreticky dosáhnout stejných výsledků u dvou materiálů, z nichž jeden bude vykazovat velké protažení a malou spotřebu energie a druhý naopak. Rázová houževnatost v tahu se spočítá podle vztahu

$$A_{\varepsilon} = \frac{W_{\varepsilon}}{b \cdot h} \quad [\text{kJ m}^{-2}]$$

kde

$W_{\varepsilon}$  ... korigovaná rázová práce

$$W_{\varepsilon} = W - (W_k + c)$$

kde

$W$  ... deformační práce odečtená na stupnici Charpyho kladiva

$W_k$  ... ztráty třetím a kyvem

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

c ... rázový korekční faktor daný konstrukcí kyvadla

Trvalá deformace (průtažnost) se vyhodnocuje se změny délky pracovní části zkušební tělesa

$$TD = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde

$l$  ... délka zkušební tělesa po jeho rekonstrukci měřená 1 min po přeražení [mm]

$l_0$  ... původní délka zkušební tělesa před započítáním zkoušky [mm]

## Odrázová pružnost

Zkouška odrazové pružnosti patří mezi jednoduché a rychlé metody srovnání schopnosti materiálů (využívá se zejména pro pryže) absorbovat, respektive vracet mechanickou energii při rázové deformaci.

V principu se jedná o to, že kyvadlové kladivo dopadá z předepsané výšky na zkoušený vzorek a podle poměru výšky dopadu a odrazu se stanoví odrazová pružnost

$$R_s = \frac{h_r}{h_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Jedná se o poměr energií vrácené k energii dodané při rázovém namáhání a je mírou dynamických elastických vlastností zejména kaučukových vulkanizátů.

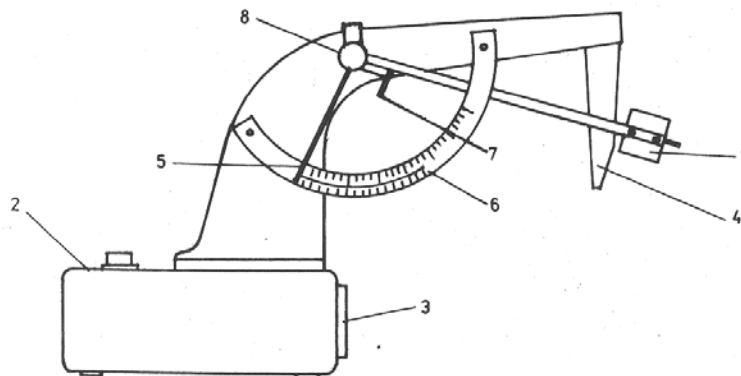
## Odrázová pružnost podle Schoba

Metoda zkoušení odrazové pružnosti podle Schoba (obrázek 11.6) se používá zejména pro rychlou kontrolu v gumárenské praxi. Pracovní část se skládá z kladiva s nárazníkem ve tvaru ocelové kuličky o průměru 7,5 mm, která má potenciální energii 0,5 J a rychlost pádu  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Ručička unášená kyvadlem i při zpětném chodu pak slouží k přímému odečtu odrazové pružnosti na stupnici dělené v % dopadové výšky.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 11.6: Zkušební zařízení pro odrazovou pružnost podle Schoba. Kyvadlo s kuličkou ve výchozí poloze (1), podstava (2), kovadlina se zkušebním vzorkem (3), výška odečítaná na spodní stupnici (4), ukazatel výsledků (5), stupnice procentuální odrazové pružnosti (6), unášec ukazatele (7) a nulování ukazatele (8).

Jako zkušební tělesa se používají kotouče předepsaných rozměrů (průměr > 36 mm, tloušťka > 6 mm), které se přichytávají na kovadlinu. Vzhledem k tixotropnímu chování pryže, tak se nejprve zkušební těleso tak zvaně připraví (první tři pokusy se nezaznamenávají) a měří se až následující tři pokusy, které se zprůměrují. Zkouška se provádí při teplotě 20 °C.

### Odrazová pružnost podle Lüpkeho

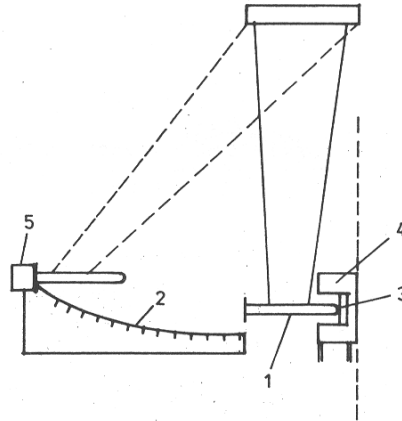
Zkušební zařízení podle Lüpkeho (obrázek 11.7) slouží zejména k měření odrazové pružnosti za zvýšené, případně snížené teploty a výsledky se srovnávají s jinými metodami (tlumení, vzrůst teploty při cyklickém namáhání).

Princip metoda spočívá v měření vzdálenosti odrazu tyčového kyvadla (350 g) po dopadu na zkoušený vzorek. Jako zkušební tělesa slouží vyseknutá kolečka slepená na požadovanou tloušťku (průměr 55 mm a tloušťka 13 mm až 16 mm). Při zkouškách za zvýšené teploty se vzorek ponechá vytemperovat předepsanou dobu (45 min) v temperační lázni a do 1 min po vytažení se musí provést samotná zkouška v komoře temperované na stejnou teplotu.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



Obrázek 11.7: Zařízení ke stanovení odrazové pružnosti podle Lüpkeho. Kyvadlo na hedvábné niti (2 m) (1), stupnice (2), zkušební těleso (3), duplikátor pro vyhřívání ultra termostatem (4) a elektromagnet k uvolnění kyvadla (5).

Podobně jako u předchozí metody, první tři pokusy se nezapočítávají a z dalších dvou se stanoví průměrná hodnota. Oblouková stupnice dělená od 0 do 100 dílků potom udává přímo odrazovou pružnost v procentech.

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



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ