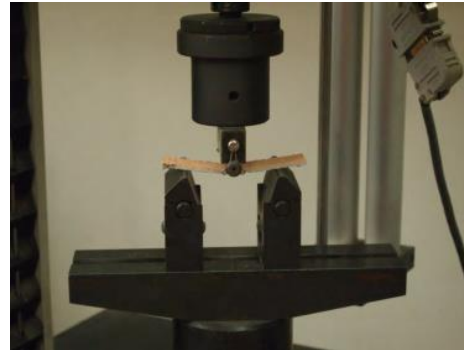
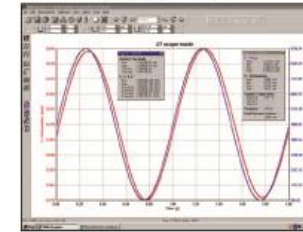


Cyklické, polo-cyklické a dynamické namáhání

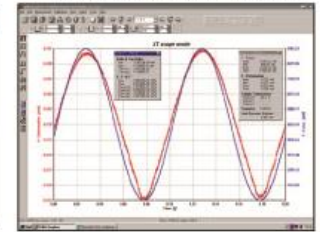


Existuje velké spektrum různých způsobů namáhání, které poskytují různé informace o mechanických projevech polymerů

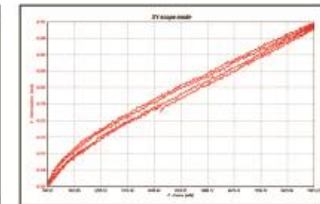
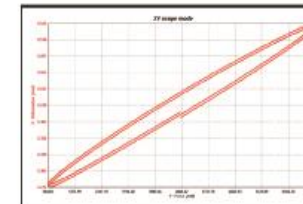
Jednovrstvý vzorek z čediče ve směru útku při frekvenci 1 Hz



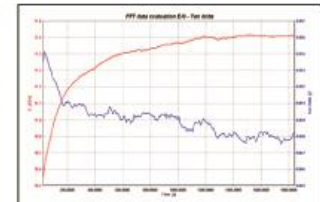
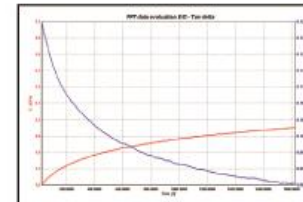
Vrstvený vzorek z kombinace čedič/kevlar ve směru osnovy při frekvenci 10 Hz



Grafy dvou nezávisle na sobě vybraných vzorků zobrazující podobný průběh zkoušky ■ deformace X [mm] ■ síla F [mN]





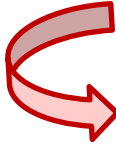







Grafy hysterezních křivek, jež popisují deformaci X [mm] vzorku v závislosti na síle F [mN]

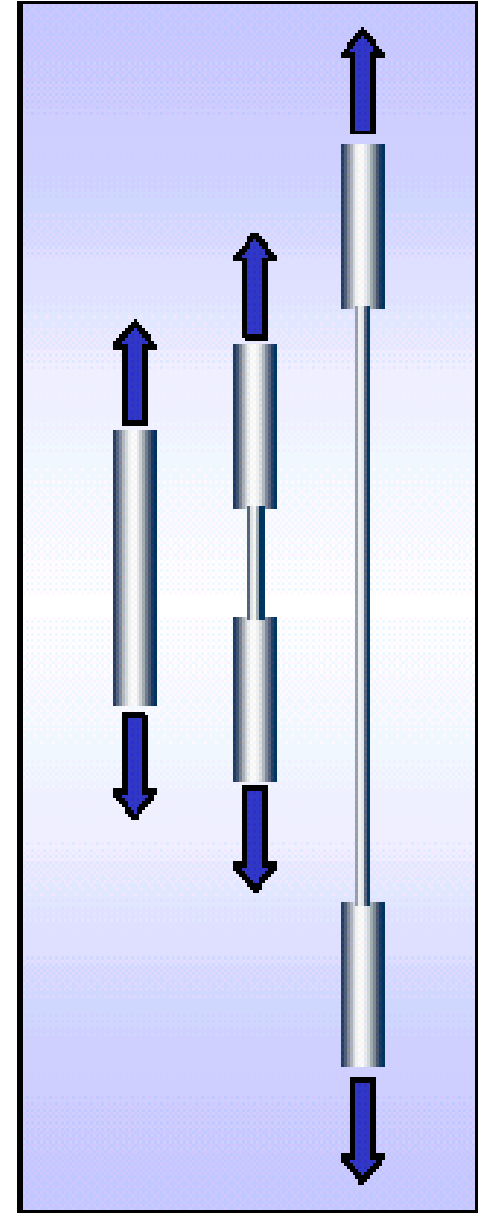


Grafy zobrazující srovnání průběhu zkoušky, kde ■ je modul pružnosti E [GPa] a ■ je ztrátový číselník tan delta [-], v závislosti na čase



Mechanické testy

-  Jednoosá deformace (tahová, tlaková)
-  Víceosá deformace (kroucení, ohyb)
-  Prostá deformace (bez cyklů)
-  Cyklická deformace
-  Statická (časově nezávislá) deformace
-  Dynamická (časově závislá) deformace
 - Rázová (extrémně krátké časy) deformace
-  Ultimatívní deformace (přetrh)
-  Nedestruktivní deformace
-  Izotermní deformace
-  Neizotermní deformace





Mechanické vlastnosti polymerů

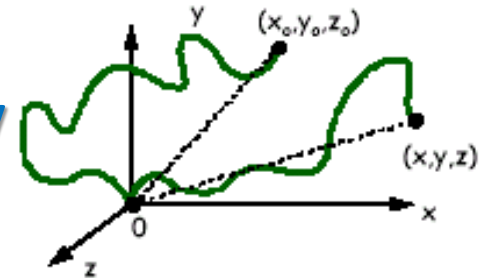
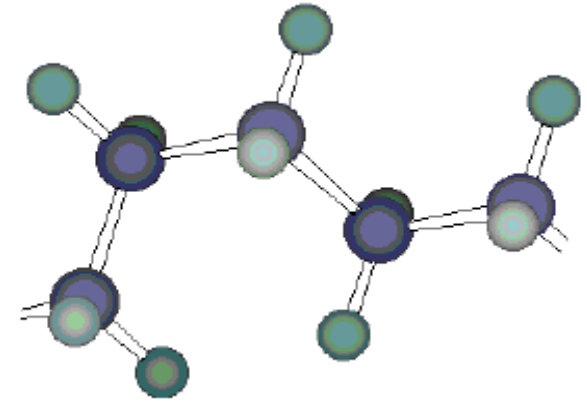
- ❑ Rozdělení zkoušek
 - ❑ podle způsobu stanovení vlastností
 - ❑ podle účelu zkoušky

- ❑ **Krátkodobý vliv relaxačních dějů**

- ❑ považuje se za zanedbatelný
- ❑ stanovení požadovaných parametrů proběhne do několika minut
 - ❑ zkouška tahem, zkoušky tvrdosti

- ❑ **Dlouhodobé – podle charakteru působící síly**

- ❑ statické (relaxace napětí, creepové deformační zkoušky)
- ❑ dynamické (rázová a vrubová houževnatost, cyklické zkoušky)





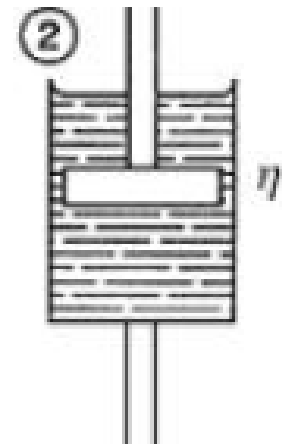
Viskoelastické chování polymerů I

- Pro objektivní testování polymerních materiálů jsou **časově závislé** experimenty nezbytné
- Při aplikaci polymerních materiálů v praxi se jejich deformační vlastnosti, které vyjadřují vztah mezi vnější silou a deformací materiálu, liší od klasických konstrukčních materiálů
- Polymery jsou tzv. **viskoelastická tělesa**



Jejich deformační chování modelují mezní případy:

1. Ideálně pružné těleso **E [Pa]**
2. Ideálně viskózní kapalina **η [Pa·s]**





Ideálně pružné těleso

- ❑ Deformace se dostaví okamžitě a její velikost je přímo úměrná napětí a s časem se nemění
 - ❑ Veškerá práce vynaložená na deformaci tělesa se v něm akumuluje jako potenciální energie
 - ❑ Lze ji kvantitativně získat zpět po zrušení vnějšího napětí
- ❑ K popisu deformačního chování stačí jediná materiálová konstanta – modul pružnosti E
 - ❑ Nezávisí ani na velikosti deformace, ani na době jejího trvání

$$\sigma \text{ [Pa]} = E \text{ [Pa]} \cdot \epsilon \text{ [1]}$$

- ❑ Při modelování se ideálně pružné těleso znázorňuje zavěšenou pružinou

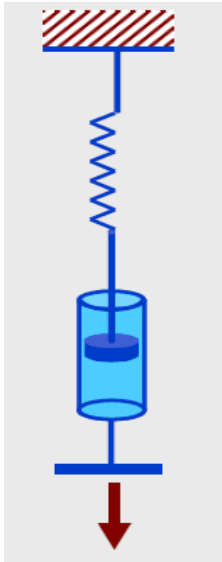


Ideálně viskózní kapalina

- Vztah mezi smykovým napětím τ [Pa] a deformací vyjadřuje Newtonův zákon

$$\tau = \eta \frac{du}{dx} \quad \eta \text{ [Pa.s]} - \text{ dynamická viskozita}$$

- působením vnějšího napětí dochází k posuvu jednotlivých vrstev kapaliny – nastává tok
 - rychlost toku u, x - souřadnice kolmá na směr proudění
- mezi napětím a deformací se rovnováha neustaví, deformace narůstá po celou dobu působení síly, deformovaný stav zůstává zachován
- Celková deformace závisí na velikosti napětí i na době jeho působení
 - veškerá práce vynaložená na deformaci se mění v kinetickou energii pohybujících se částic a nakonec v teplo
- Znázorňuje se válcem s netěsným pístem pohybujícím se v kapalině určité viskozity

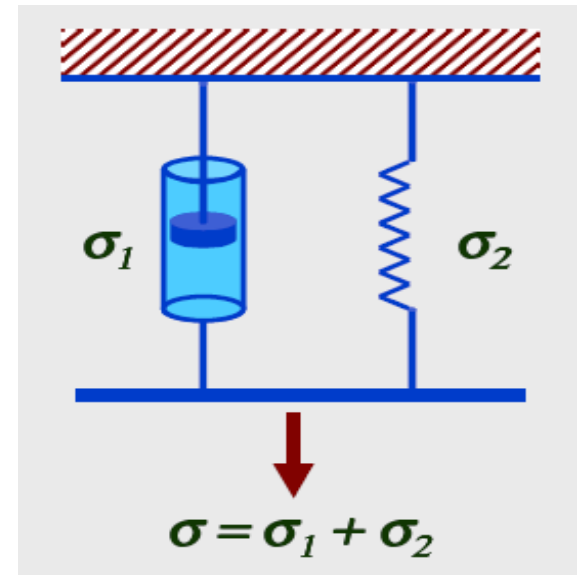


Viskoelastické chování polymerů II

- ❑ Složitá struktura polymerů se projevuje i v jejich komplikovanějším deformačním chování
- ❑ Na vnější namáhání reagují tak, že deformace zahrnuje vždy současně složku elastickou i plastickou a navíc ještě deformaci zpožděně elastickou

- ❑ Celková *deformace* je tedy *časově závislá* a deformační chování je označováno jako viskoelastické

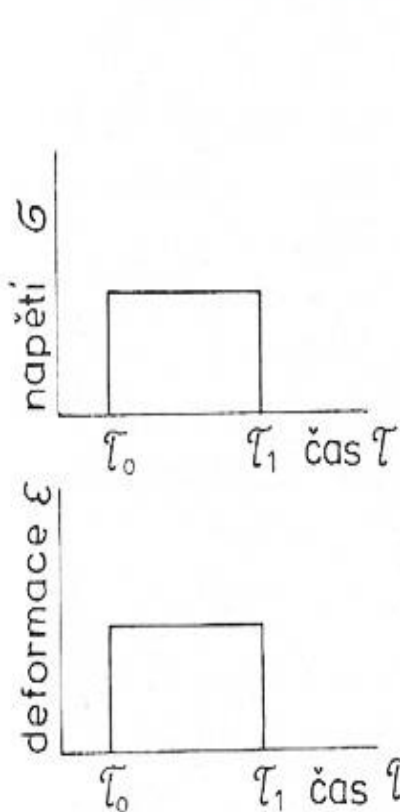
- ❑ Nejjednodušší nelineární viskoelastické modely využívají pružino-pístových modelů (mechanických analogů, Kelvin-Voight)
- ❑ Viskoelasticitu materiálu je možné znázornit např. Tucketovým modelem (čtyřelementový)
- ❑ Pro polymerní vlákna je z této skupiny nejčastěji používán Eyringův tříelementový model obsahující dvě pružiny a jeden píst (Kelvin+pružina)





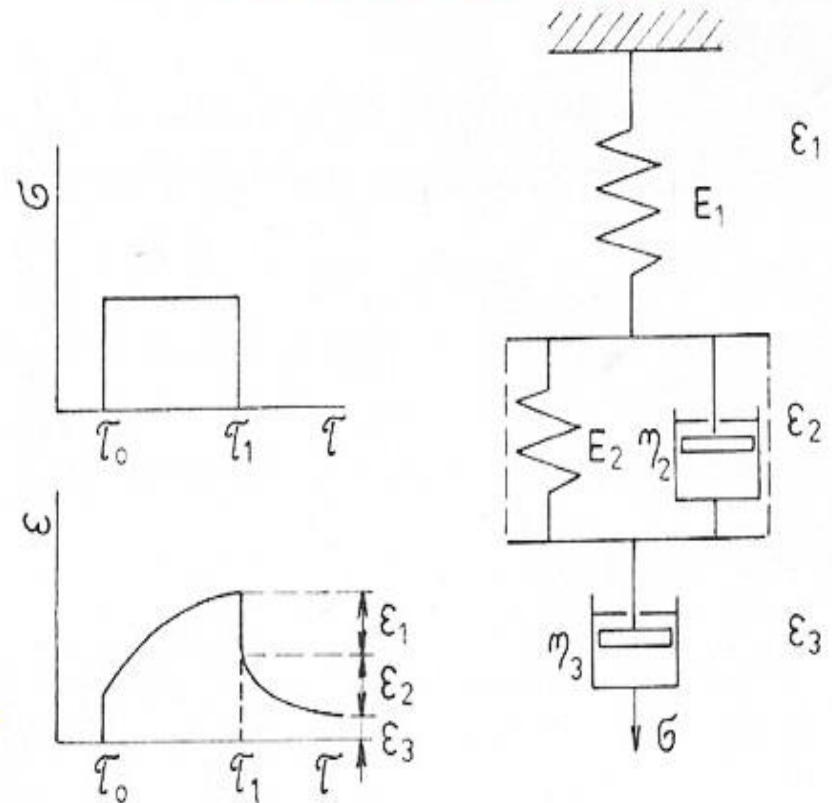
Viskoelastické chování polymerů III

ELASTICKÉ TĚLESO



- ϵ_1 elastická, časově nezávislá deformace
- ϵ_2 viskoelastická, časově závislá vratná deformace
- ϵ_3 trvalá (plastická) deformace vzniklá viskózním tokem

VISKOELASTICKÉ TĚLESO





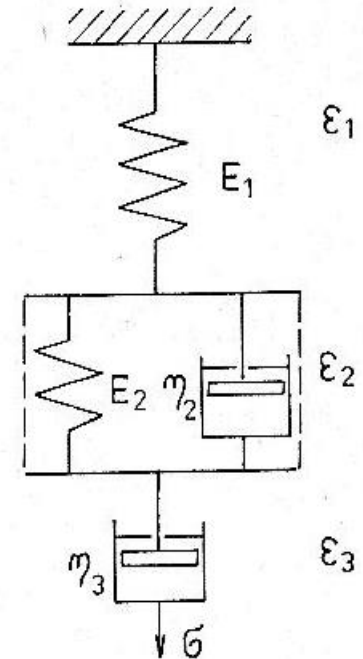
Viskoelastické chování polymerů IV

□ Tucketův model se skládá ze 3 členů (čtyř elementů)

- 1 - pružina – představuje ideální elastickou neboli Hookovu pružnou deformaci ε_1
- 2 - Kelvinův model – vznikl paralelním zapojením pružiny a netěsného válce s pístem – reprezentuje elastickou deformaci ε_2
- 3 - netěsný válec s pístem – představuje viskózní tok – trvalou deformaci ε_3

□ Celková deformace viskoelastického tělesa se rovná součtu deformací jednotlivých členů

- Deformace 1 nastane okamžitě a je vratná
- Deformace 2 je časově závislá a je vratná
- Deformace 3 je časově závislá a je nevratná





Viskoelastické chování polymerů V

- ❑ **Vyznačuje se těmito znaky:**
 - ❑ Deformace je funkcí nejen napětí, ale i času
 - ❑ Je vratná jen zčásti
- ❑ **Práce spotřebovaná k deformaci**
 - ❑ Ukládá se částečně jako potenciální energie a tuto část lze získat zpět
 - ❑ Částečně se ztrácí ve formě tepla
- ❑ **Poměr mezi napětím a deformací**
 - ❑ **Není** materiálovou konstantou
 - ❑ Je funkcí času, po který působí napětí
 - ❑ Časově závislý modul pružnosti



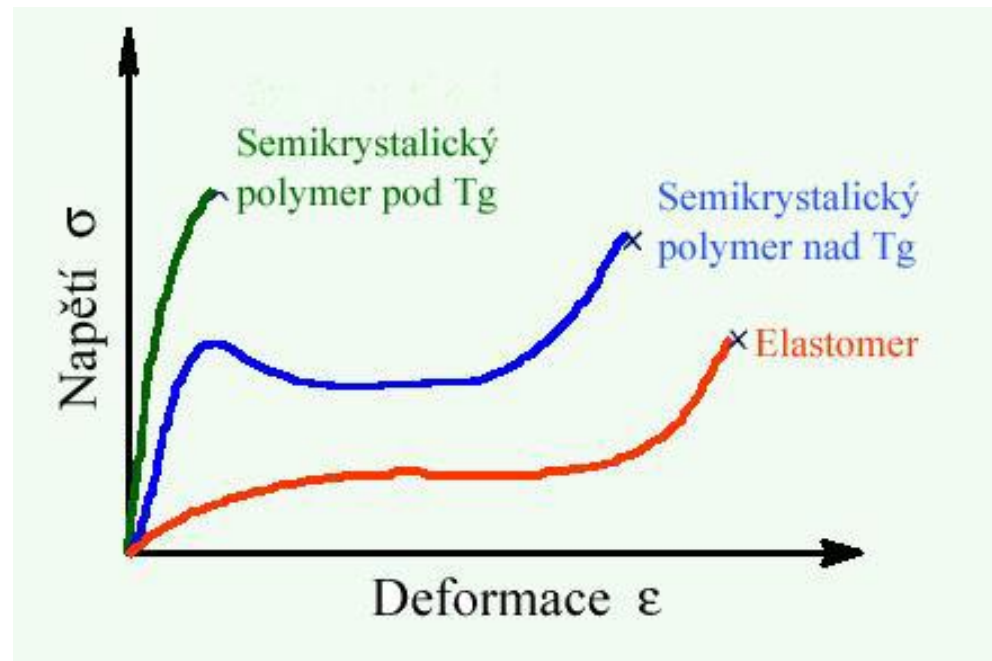
Viskoelastické chování polymerů VI

- ❑ Deformace tělesa je brzděna vnitřními odpory ve hmotě
 - ❑ Nemůže nastat okamžitě
 - ❑ Čím rychleji má deformace proběhnout, tím je brzdící účinek viskózních členů výraznější a tím větší napětí je nutno vynaložit na dosažení určité požadované deformace
- ❑ Ve skutečnosti probíhají procesy relaxace deformace pomaleji než odpovídá jednoduchému Tucketovu modelu
 - ❑ Kombinace více Kelvinových modelů
 - ❑ Vzniká modelové spektrum
 - ❑ Lze odhadnout chování polymerů při různých podmínkách vnějšího namáhání
 - ❑ Např. vliv teploty nebo rozdílné rychlosti deformace



Vliv teploty

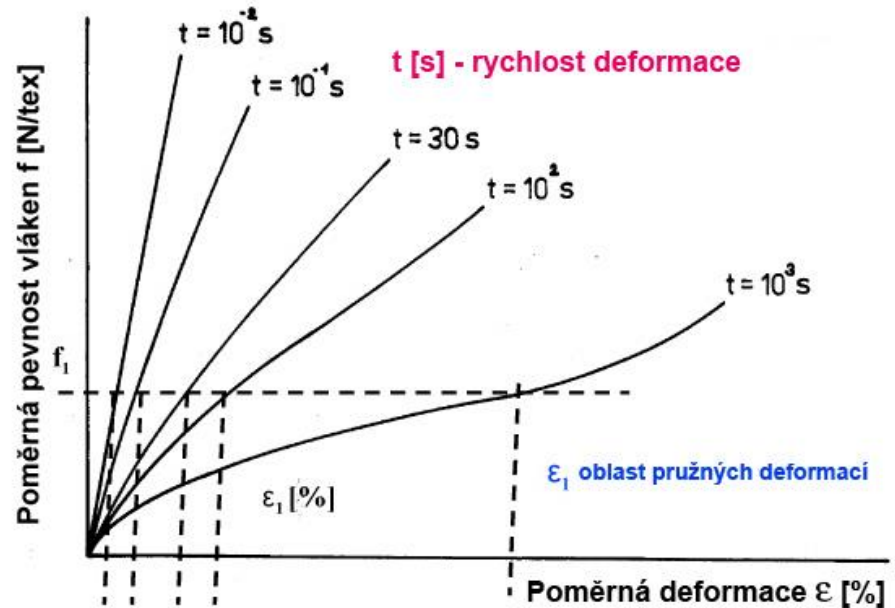
- ❑ Jestliže je teplota, při níž je polymer zatěžován mnohem nižší než jeho T_g
 - ❑ Viskozita ve válčích členů 2 a 3 je tak vysoká, že se tyto členy při deformaci nemohou uplatnit a hmota vykazuje vlastnosti blížící se dokonale pružnému tělesu
- ❑ Blíží-li se teplota teplotě T_m
 - ❑ Viskozita klesne a uplatní se pouze vliv viskózního členu a tavenina se přibližuje ideální kapalině





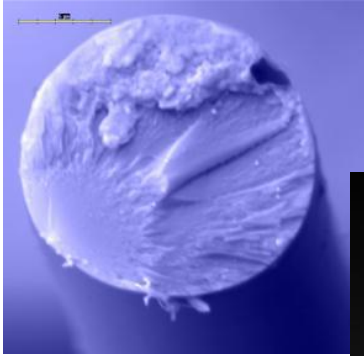
Vliv rozdílné rychlosti deformace

- ❑ Rozdílná doba působení vnější síly
- ❑ Působí-li síla po velice krátkou dobu
 - ❑ Kapalina ve válcih klade tak velký odpor posuvu pístu, že se tyto složky nemohou uplatnit a výsledná deformace odpovídá prakticky jen deformaci ideálně pružného členu
 - ❑ Např. namáhání rázem
- ❑ Bude-li síla působit naopak po velmi dlouhou dobu
 - ❑ Má zpožděný i viskózní člen dost času, aby se jeho deformace mohly plně rozvinout
 - ❑ Při dlouhé době zatěžování pak obě tyto složky mohou převládnout

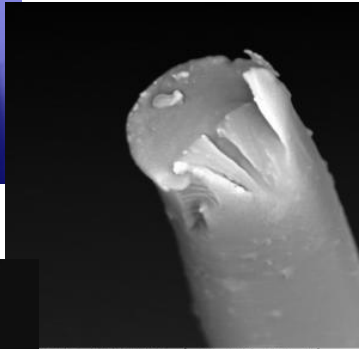




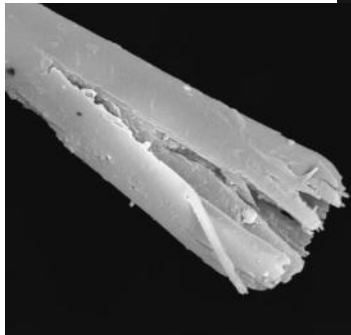
Mechanismus porušení vláken



Pro vlákna ve skelném stavu, vlákna keramická a skleněná je typický **křehký lom**



U většiny syntetických vláken zvlákňovaných z taveniny dochází k **houževnatému lomu**



U vysoce pevných vláken typu aromatických polyamidů, PBO atd. jde o **axiálnímu štěpení**



U vláken zvlákňovaných z roztoku a vláken mikroporézních (obsahujících síť mikro dutin) je typický **granulární lom**



Cyklické namáhání I.

- ❑ Definováno jako pravidelný **vzrůst a pokles** deformace a napětí doplněný prodlevami
- ❑ Tento postup může být realizován:
 - ❑ do konstantní deformace (resp. síly) $\frac{d\varepsilon}{dt} = \textit{konst.}, \frac{d\sigma}{dt} = \textit{konst.}$
 - ❑ na moderních dynamometrech převažuje konstantní přírůstek deformace v čase (mm/min)
 - ❑ za vzrůstající úrovně napětí, popř. až do přetrhu
- ❑ **Polo-cyklické namáhání**
 - ❑ Vynecháme-li některou část cyklu (zejména prodlevu)
 - ❑ Podle této definice by také zkouška pevnosti v tahu byla definována jako namáhání polocyklické do přetrhu
- ❑ **Cyklické namáhání je možno realizovat**
 - ❑ V pomalém režimu (pseudostaticky)
 - ❑ V rychlém režimu (dynamicky)

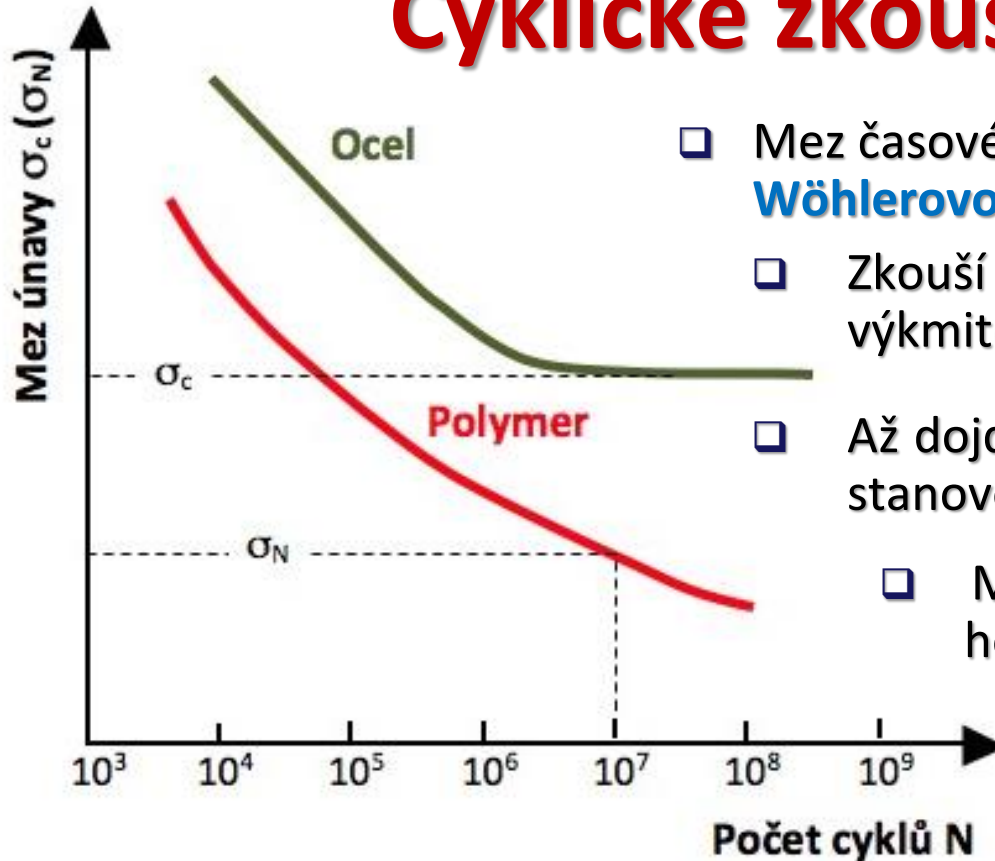


Cyklické zkoušky II.

- ❑ V případě dynamického namáhání dochází k porušování materiálu **při podstatně menším zatížení** než při statické zkoušce
 - ❑ Únava materiálu je proces probíhající v materiálu v důsledku dlouhodobého statického nebo časově proměnlivého namáhání
 - ❑ To způsobuje, že materiál se poruší při **napětích nižších než odpovídá mezi pevnosti** zjištěné krátkodobými zkouškami
- ❑ **Únavové zkoušky**
 - ❑ Používá se cyklického namáhání nucenými kmity za takových podmínek, které vedou k destrukci zkušebních těles
 - ❑ Způsob deformace je např. jednosměrný tah-tlak, ohyb apod.



Cyklické zkoušky III.



- ❑ Mez časové únavy se zjišťuje **Wöhlerovou metodou**
- ❑ Zkouší se zkušební tělesa při různých výkmitech napětí
- ❑ Až dojde k lomu nebo až se dosáhne stanovené mezní hodnoty
- ❑ Mez únavy plastů - značně nižší hodnoty než je pevnost statická

- ❑ Polymery se během namáhání zahřívají
 - ❑ špatná tepelná vodivost, mění se počáteční modul E [MPa]
- ❑ Vyztužené plasty - 25 – 35% krátkodobé pevnosti
- ❑ Nevyztužené termoplasty – 10%



Cyklická deformace

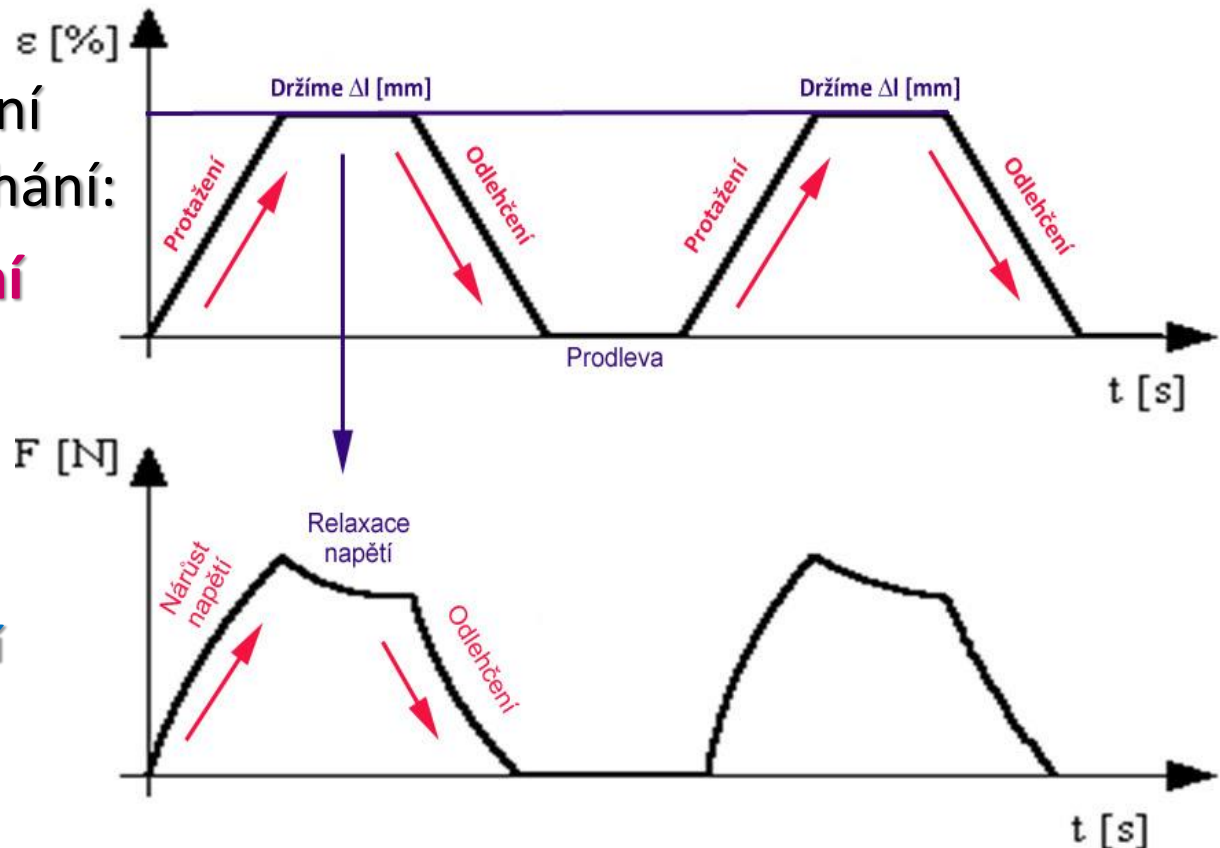
- 1 cyklus:
 - Deformace – prodleva - odlehčení – prodleva

□ 1 – 2 – 3 – 4

- Možné uspořádání cyklického namáhání:

- **Do konstantní deformace**

- **Odezva:**
postupně klesající síla
Relaxace napětí





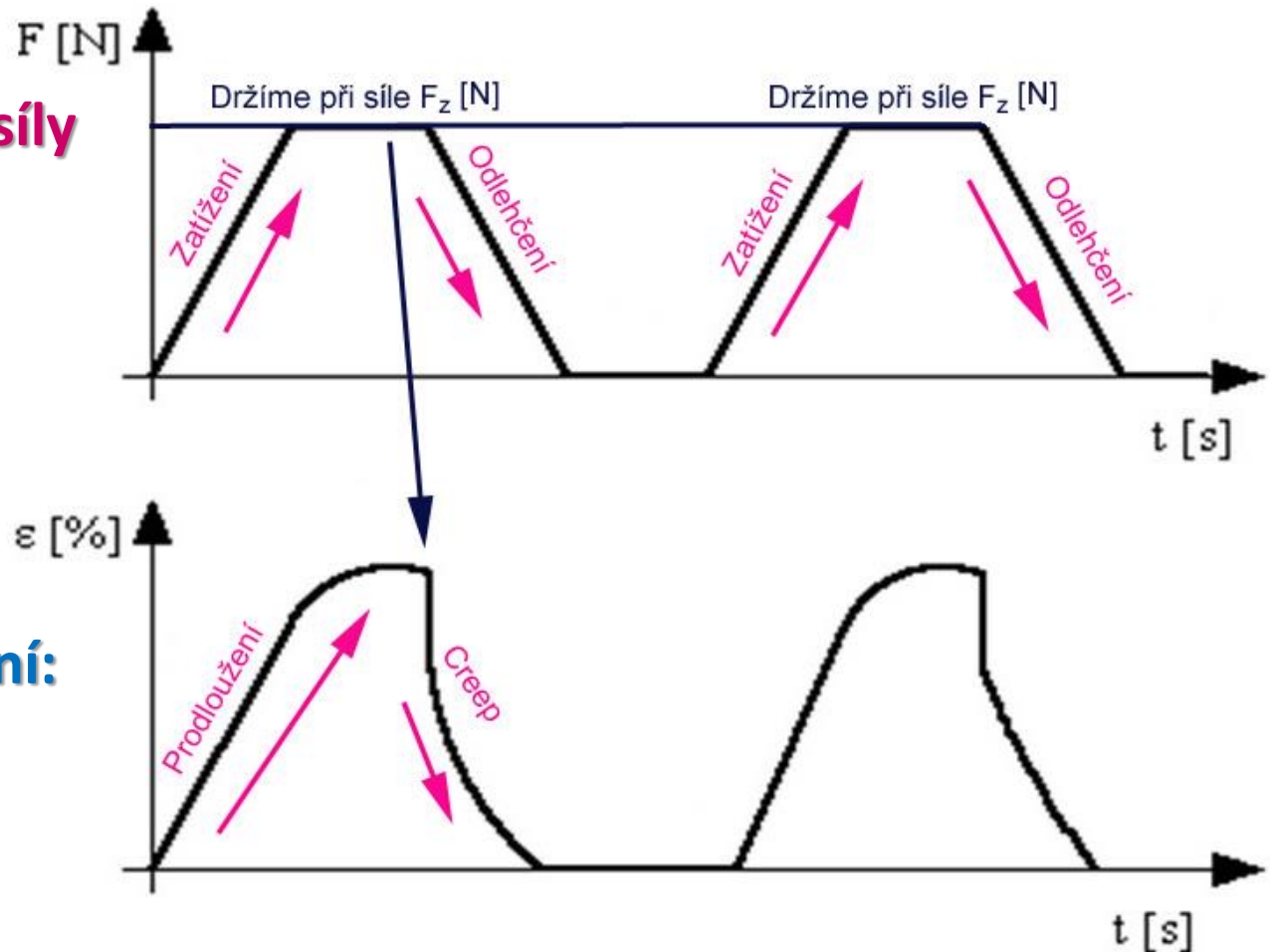
Cyklické napětí

Do konstantní síly

- Odezva: postupně rostoucí deformace

Creep

- Při odlehčení: zpětný – sekundární creep





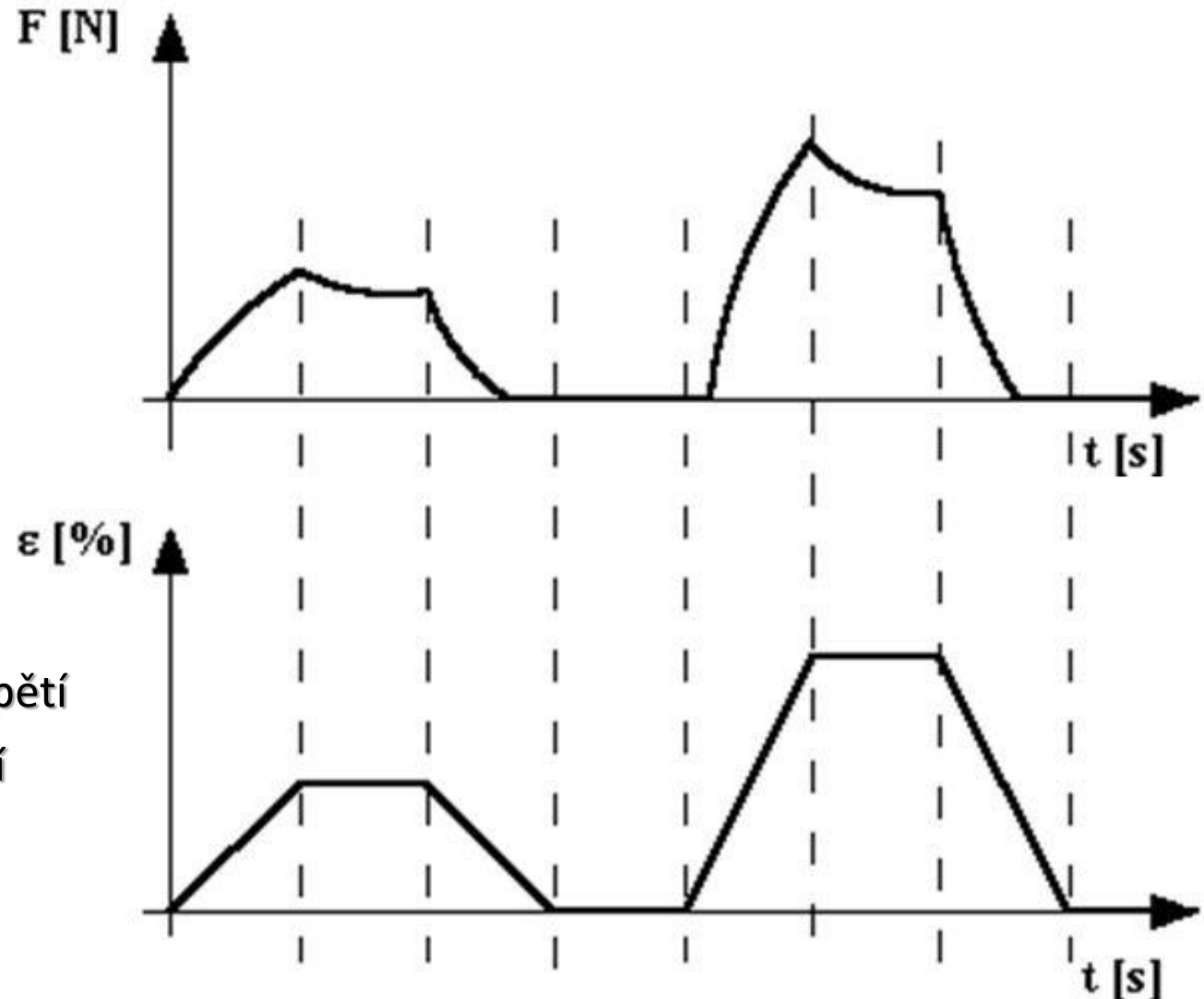
Rostoucí deformace

- Namáhání do **rostoucí deformace**, nebo síly

- **Do rostoucí deformace**

- **Odezva:** postupně rostoucí síla s relaxací napětí

- Při odlehčení se projevuje plastická deformace

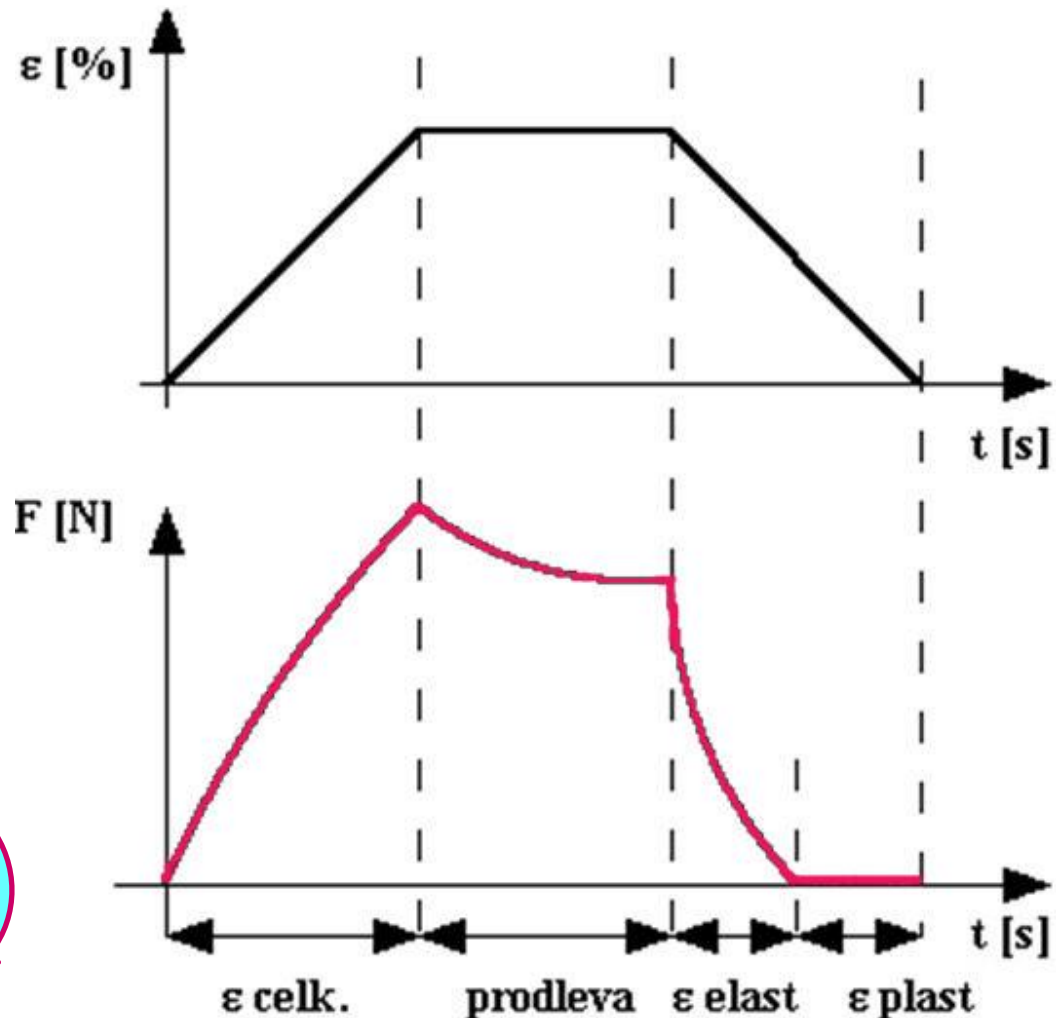




Cyklické namáhání nitě I.

- ❑ Chování nitě při cyklickém zatížení a odlehčení nitě
- ❑ Při odlehčení se nevrátí celá elastická deformace
- ❑ Při zotavení se projeví plastická deformace

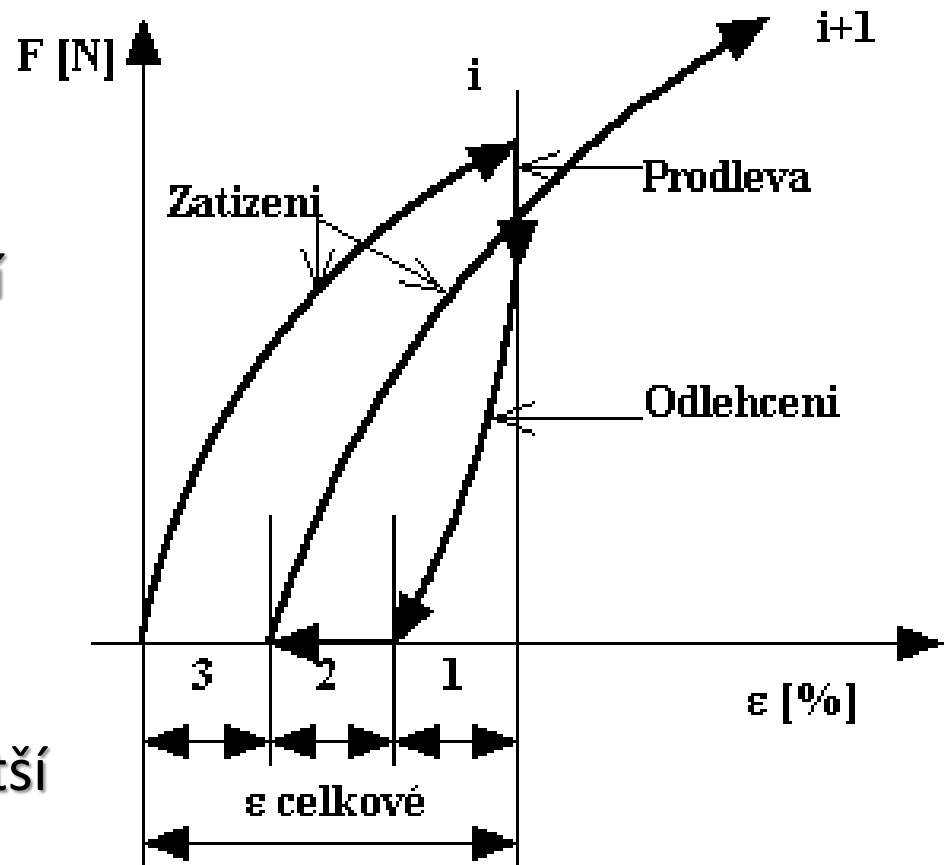
$\epsilon_{\text{celková}}$
 $\epsilon_{\text{elastická}} + \epsilon_{\text{plastická}}$





Cyklické namáhání nitě II.

- ❑ Na dynamometru je zapisována závislost síly F [N] na deformaci ε [%]
- ❑ **Relaxace napětí** se projevív jako **pokles síly**
- ❑ **Zotavení deformace** mezi body 1 a 2
- ❑ **Zotavená plastická deformace** se projevív při nástupu další křivky do větší úrovně namáhání



$$\varepsilon_{\text{celková}} = \varepsilon_{\text{elastická zotavená}} + \varepsilon_{\text{plastická zotavená}}$$



Elasticita nitě

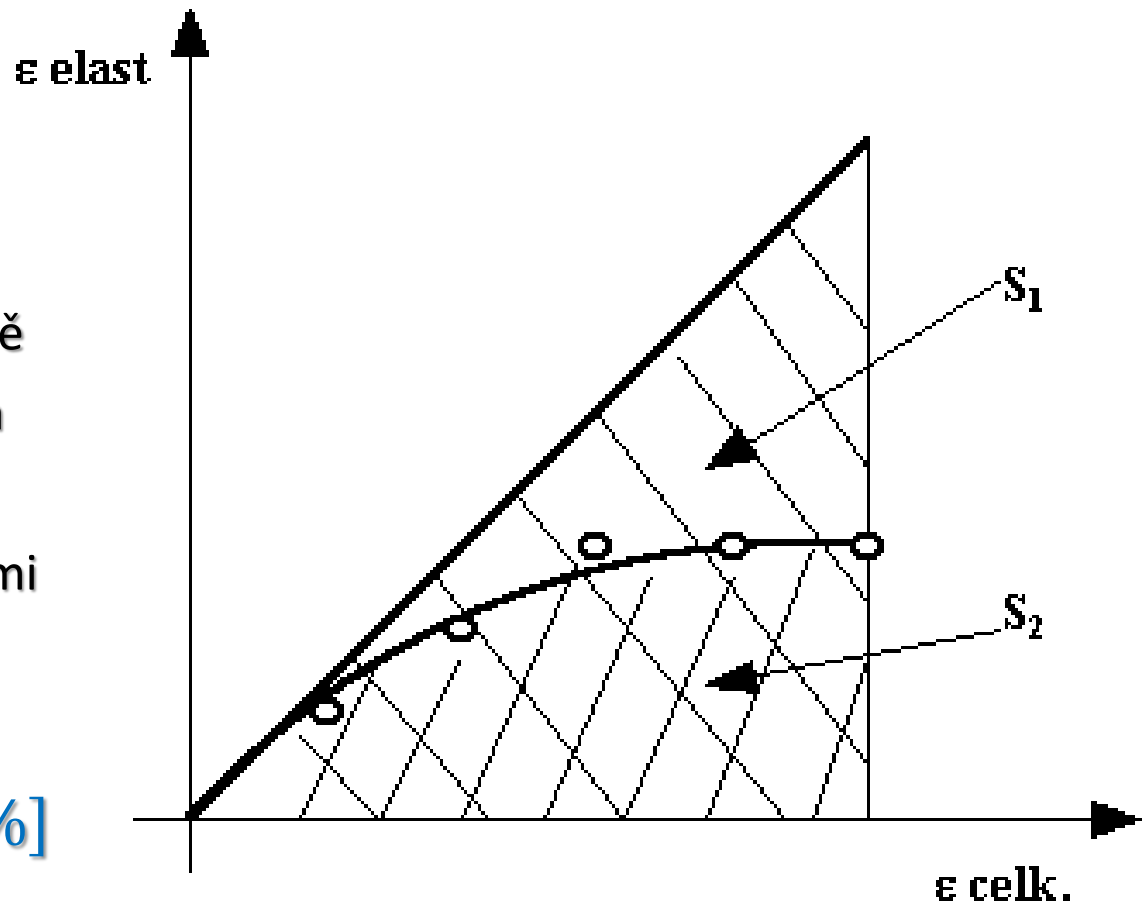
- ☐ Nit je namáhána do rostoucího napětí a odečítá se elastická a celková deformace

- ☐ Po vynesení do grafu:

- ☐ $\epsilon_{\text{celková}} - \epsilon_{\text{elastická}}$ se srovnává s přísně elastickým tělesem (pružina)

- ☐ Z ploch pod křivkami se vypočítá stupeň elasticity E

$$E = \frac{S_2}{S_1} \cdot 10^2 \text{ [%]}$$





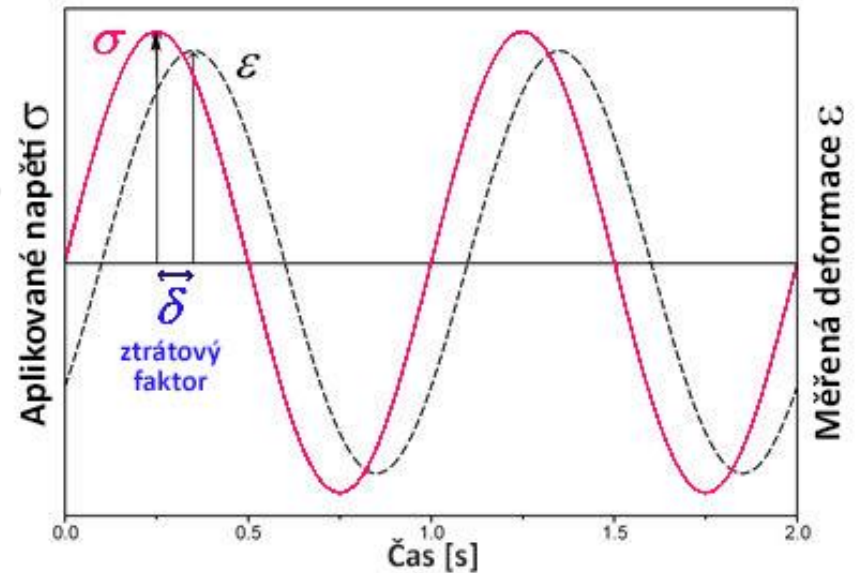
Dynamicko-mechanická analýza (DMA)

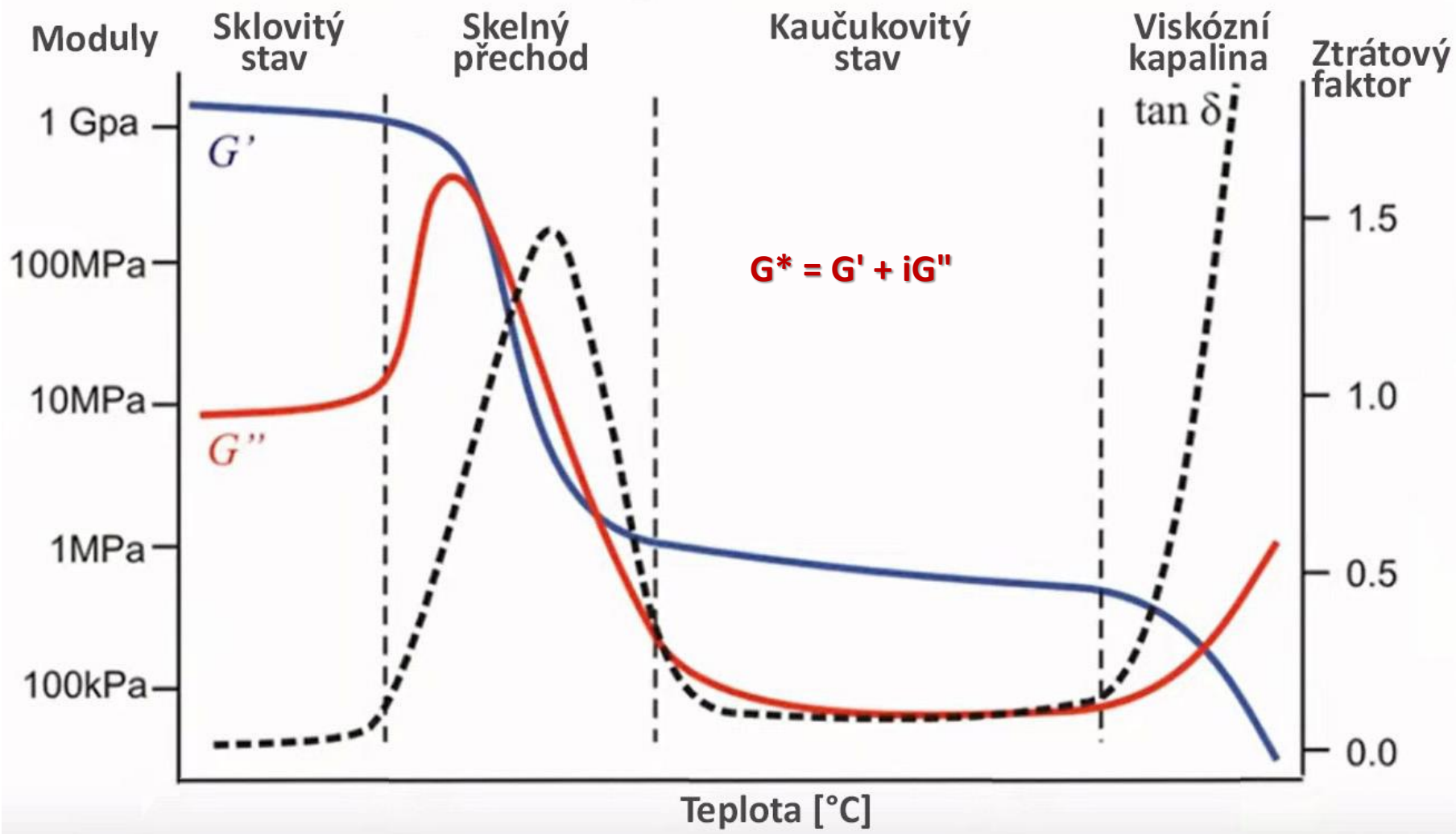
- ❑ Sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobeného malému oscilačnímu napětí (zatížení v tahu, ve smyku...)
 - ❑ Popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu:
 - ⇒ **elasticitu** (vratná složka)
 - ⇒ **viskozitu** (ztrátová, disipační energie)
 - ❑ Metoda odděluje viskoelastickou odezvu materiálu na dvě komponenty modulu (E^* , G^*):
 - ❑ **reálná část**, která reprezentuje **elastický modul** (E' , G')
 - ❑ **imaginární část**, která představuje útlumovou nebo **viskozitní složku** (E'' , G'')
 - ❑ Celkový tzv. komplexní modul je **$E^* = E' + iE''$; $G^* = G' + iG''$**



Dynamicko-mechanická analýza (DMA)

- ❑ Pomocí DMA lze určit:
 - ❑ teploty skelného přechodu, bodu měknutí a tání
 - ❑ mechanické ztráty v materiálu (charakterizuje jeho tlumící schopnost)
 - ❑ tečení metodou creepu (postupná změna rozměrů materiálu při zatížení)
 - ❑ stupeň krystalizace, míra orientace, bod zesítní
 - ❑ dlouhodobou teplotní stabilitu (stárnutí materiálu)







Rázová pevnost

- ❑ Zkouška rázové a vrubové houževnatosti materiálů
 - ❑ Spočívá v namáhání tělesa rázem, tedy ⇒
silou koncentrovanou do velmi krátké doby
 - ❑ Souvisí s deformačními vlastnostmi materiálů, schopností rychle absorbovat energii, tedy deformovat se určitou rychlostí
 - ❑ Na rozdíl od statického namáhání například v ohybu, kdy dojde k porušení tělesa až při extrémním průhybu a nebo vůbec, 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 houževnaté, se mění na křehké



Zkoušky rázové a vrubové houževnatosti

□ Charpy

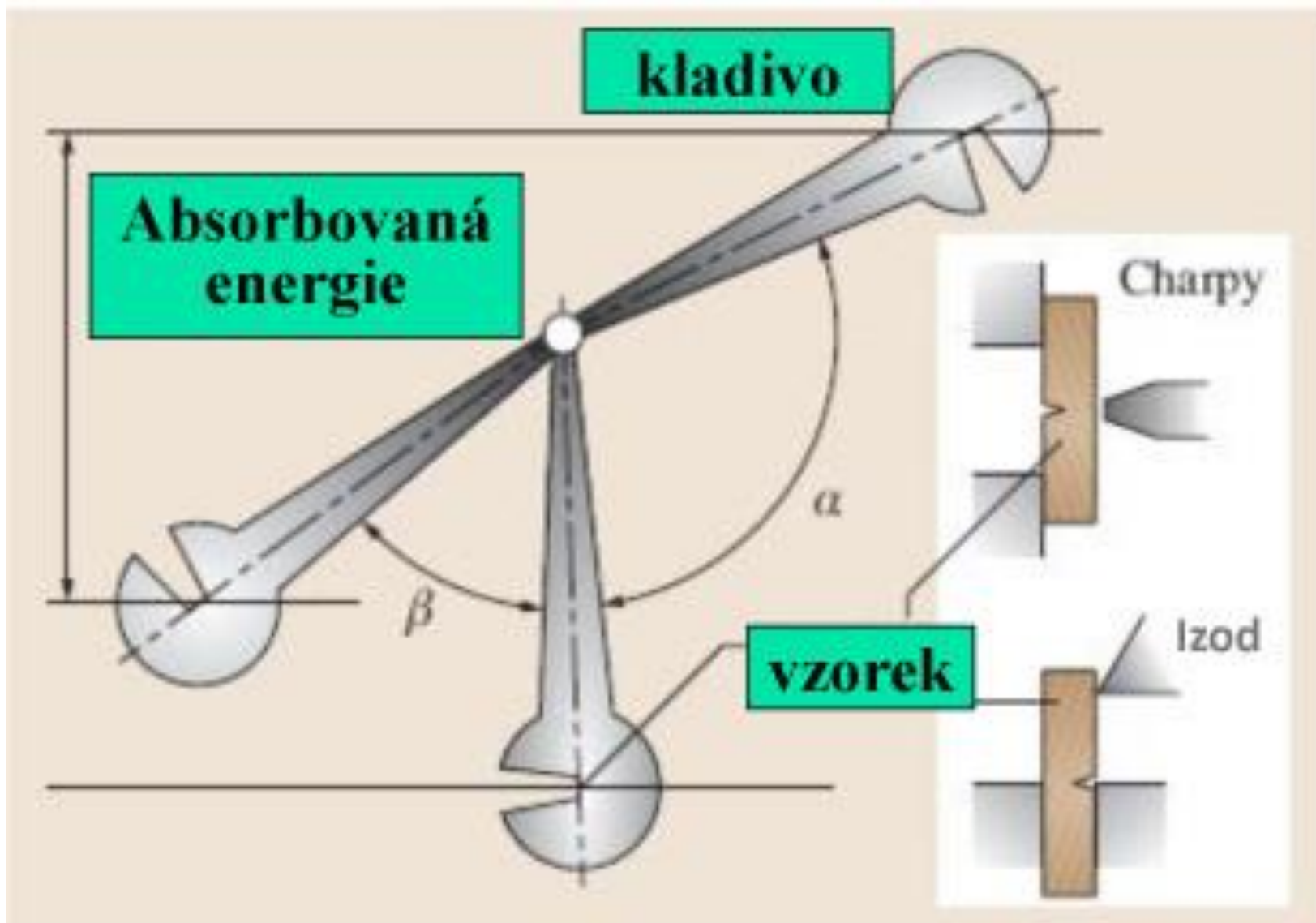
- Zkušební těleso je umístěno na dvou podpěrách a přeráží se otáčivým kladivem uprostřed
- ČSN EN ISO 179-1,2 (640612) „Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy“
- Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška
- Část 2: Instrumentovaná rázová zkouška
- V principu se jedná se o tříbodový ohyb

□ Izod

- Zkušební těleso tvaru trámce se na jednom konci pevně upevní (vetknutý trámec) a na druhém se přeráží
- ČSN EN ISO 180 (640616) „Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Izod“

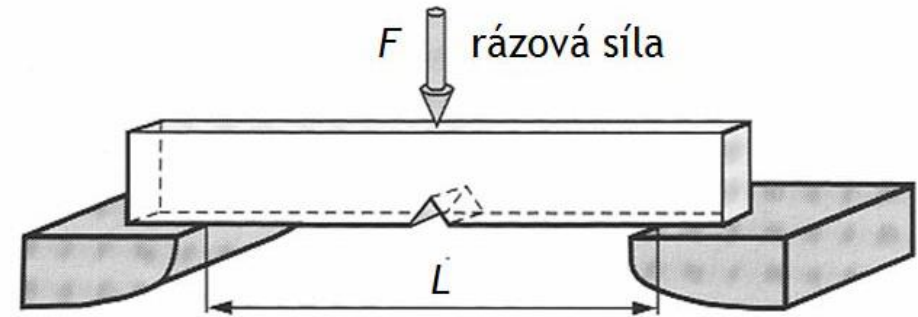
□ Dynstat

- Metoda pro zkoušení těles malých rozměrů, například z hotových výrobků
- ČSN EN ISO 178 (640607) „Plasty - Stanovení ohybových vlastností“





Metoda Charpy



- ❑ Rázová houževnatost je

definována jako kinetická energie kyvadlového rázového kladiva nutná k přeražení zkušebního tělesa vztažená na původní plochu příčného průřezu

- ❑ U zkušebních těles obdélníkového profilu je důležité rozlišovat šířku a tloušťku

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

- ❑ **W** ... deformační energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa a odečtená na stupnici zkušebního zařízení
- ❑ **b** ... šířka zkušebního tělesa
- ❑ **h** ... tloušťka zkušebního tělesa

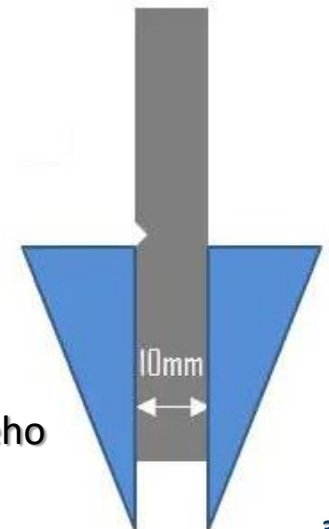
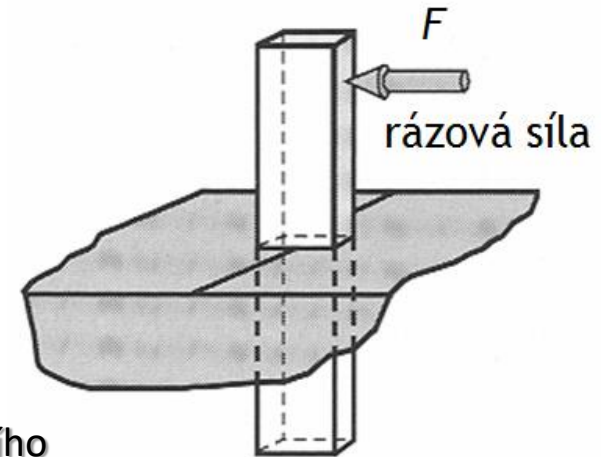


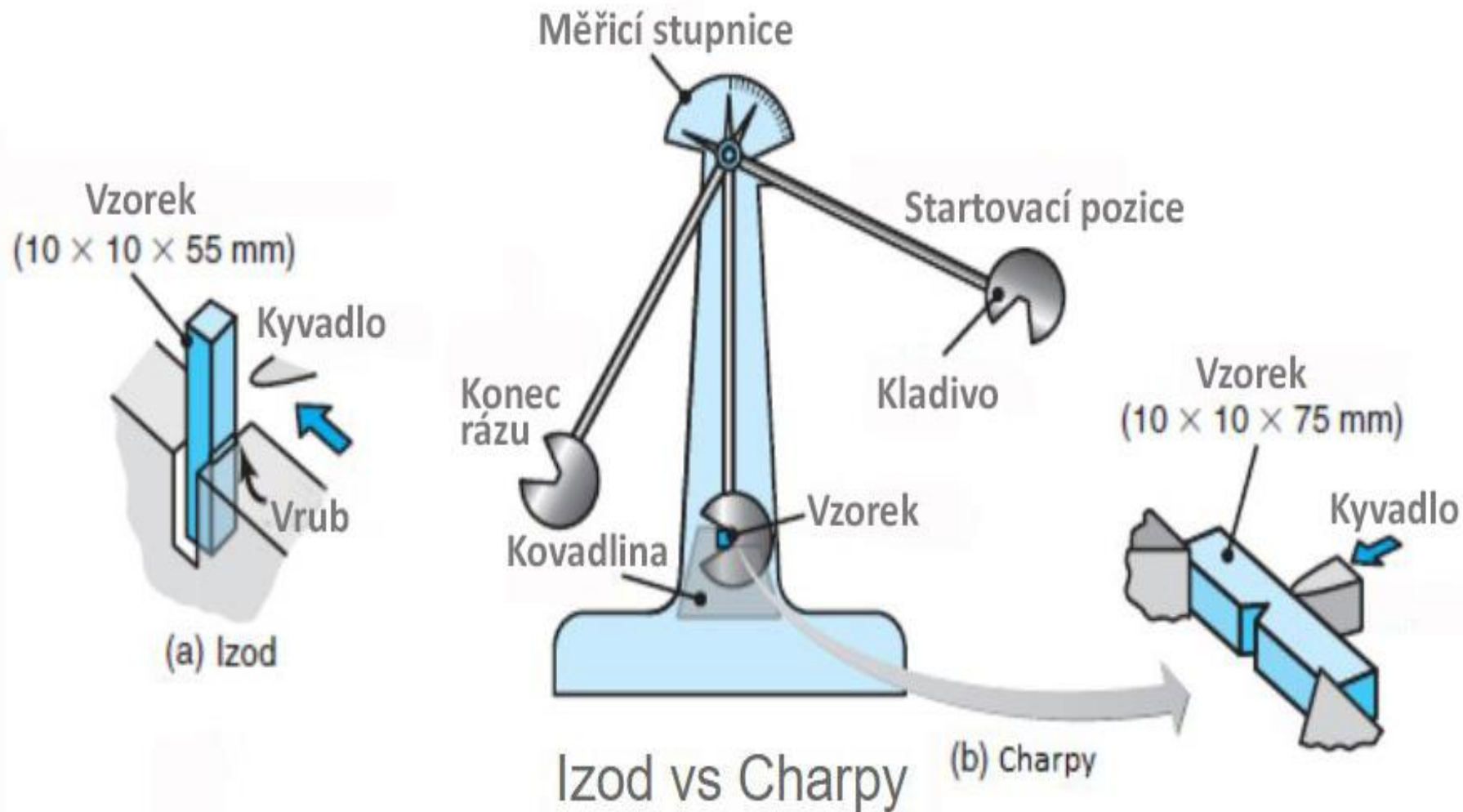
Metoda Izod

- ❑ 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 uchyťávají tak, aby se přerážela ze strany opatřené vrubem
 - ❑ Nevýhodou této metody je, že přeražený 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 přeražená část zkušební vzorku
 - ❑ Z rozdílu této 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

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

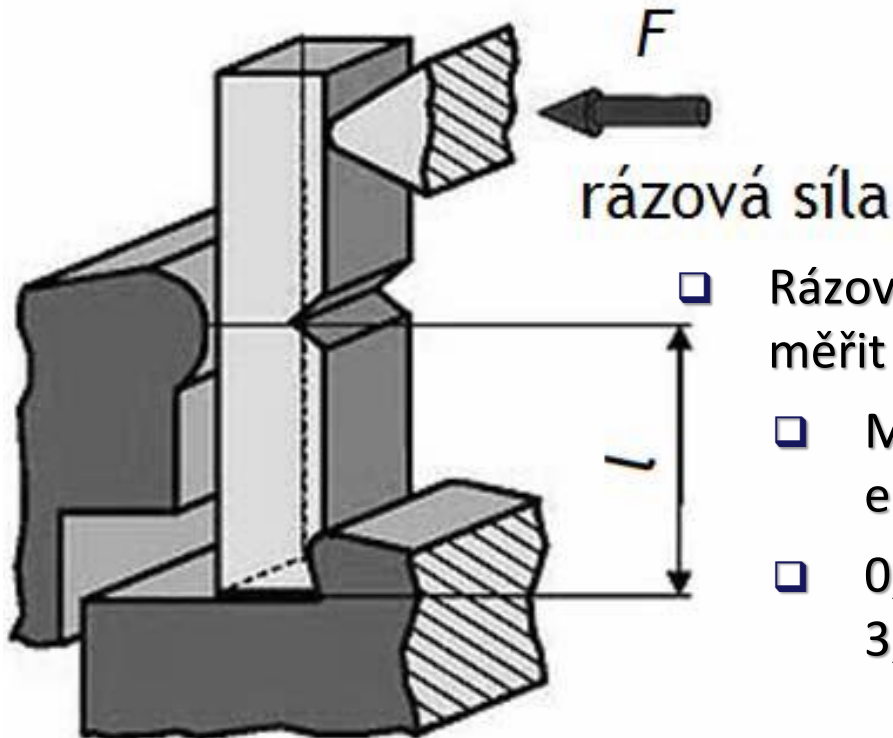
- ❑ **W** ... práce odečtená na stupnici po přerážení zkušební tělesa
- ❑ **W₀** ... hodnota volného kyvu ze stejné výchozí výšky
- ❑ **W_z** ... hodnota odečtená při volném kyvu a odmrštění části přeraženého zkušební tělesa







Metoda Dynstat



- ❑ Rázovou a vrubovou houževnatost je možné měřit také pomocí přístroje Dynstat
 - ❑ 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, tloušťka 1,5 až 4,5 mm
 - ❑ přerážejí se podobně jako u metody Izod systémem vetknutého trámce

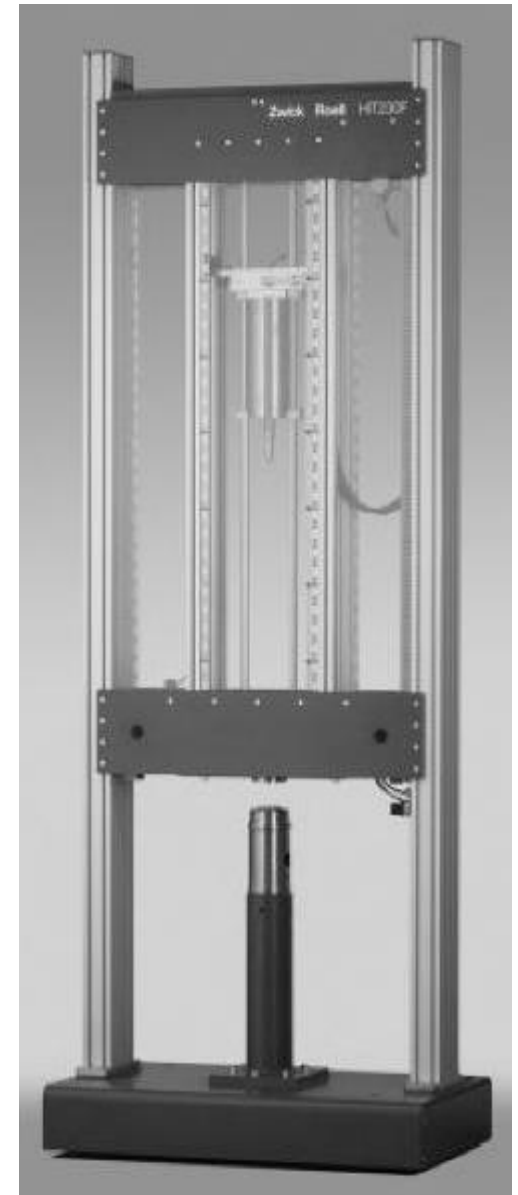


Rázové zkoušky pádem

- ❑ Padostroje představují alternativní způsob měření rázové houževnatosti polymerů
 - ❑ Eliminují nedostatky kyvadlových přístrojů
 - ❑ Volba energie, rychlost provedené deformace
- ❑ Padostroje pracují na principu padajícího tělesa na zkušební vzorek s libovolně volitelnou:
 - ❑ Kinetickou energií
 - ❑ Závisí na hmotě padajícího tělesa
 - ❑ Rychlostí (ovlivněna výškou pádu)

$$W = G \cdot h \text{ [J]}$$

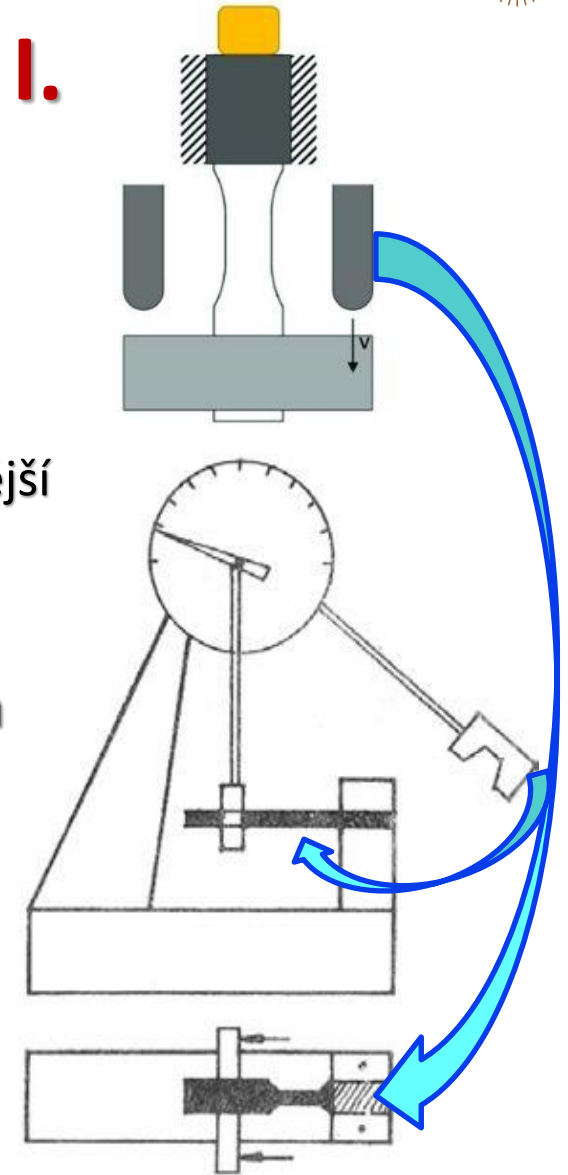
- ❑ **G** ... tíha závaží [g]
- ❑ **h** ... výška pádu [mm]





Rázové zkoušky tahem I.

- ❑ Metoda se využívá ke zkoušení materiálů s vysokou houževnatostí
 - ❑ Během ohybových zkoušek se nezlomí, ale pouze prohnou
 - ❑ Deformace tahem umožňuje také rovnoměrnější deformaci
- ❑ Jako zkušební tělesa se používají tělesa tvarově podobná oboustranným lopatkám k měření tahových vlastností s různou délkou pracovní části
 - ❑ Tělesa s krátkou pracovní částí poskytují výsledky srovnatelné s ohybovými rázovými zkouškami
 - ❑ U vzorků s delší pracovní částí vzniká určité protažení, což umožňuje vyhodnotit dynamickou tažnost a trvalou deformaci (průtažnost)





Rázové zkoušky tahem II.

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

- W_{ε} ... korigovaná rázová práce $W_{\varepsilon} = W - (W_k + c)$
 - W ... deformační práce odečtená na stupnici Charpyho kladiva
 - W_k ... ztráty třetím a kyvem
 - c ... rázový korekční faktor daný konstrukcí kyvadla
- Trvalá deformace (průtažnost) se vyhodnocuje ze změny délky pracovní části zkušební tělesa

$$T_D = (l - l_0) / l_0 \cdot 100 \quad [\%]$$

- l ... délka zkušební tělesa po jeho rekonstrukci měřená 1 min po přeražení [mm]
- l_0 ... původní délka zkušební tělesa před započítáním zkoušky [mm]



Pevnost v protržení

- ❑ Norma: „Hydraulic method for determination of bursting strength and bursting distension“, **ISO 13938-1**
- ❑ Speciálně pro pleteniny, kde je velká deformabilita textilie
 - ❑ Textilie upnutá v kruhové čelisti je deformována buď tlakem kapaliny nebo vzduchu
- ❑ Deformace je dána vztahem:

$$\varepsilon = \left[\frac{1}{r} \left(\frac{r^2 + h^2}{h} \right) \arctg \left(\frac{h}{r} \right) - r \right]$$

- ❑ Síla vyvolaná tlakem p :

$$F_p = p \left(\frac{h^2 + r^2}{4h} \right) (1 + \varepsilon)$$

