

Úloha 12. Mechanické vlastnosti pevných látek (zejména kovů)

prof. RNDr. Bohumil Vlach, CSc. a doc. Ing. Rudolf Foret, CSc.
Ústav materiálových věd a inženýrství, FSI VUT Brno

12.1 Úvod

- 12.1.1 Základní pojmy
- 12.1.2 Pružná deformace
- 12.1.3 Plastická deformace
- 12.1.4 Lomové chování

12.2 Srovnávací zkoušky mechanických vlastností

- 12.2.1 Úvod
- 12.2.2 Universální zkušební zařízení
- 12.2.3 Zkoušky na universálním zkušebním stroji (tahem, ohybem, tlakem, krutem)
- 12.2.4 Zkoušky tvrdosti
- 12.2.5 Rázové zkoušky

12.3 Zkoušky potřebné k návrhu konstrukcí

- 12.3.1 Creepové zkoušky
- 12.3.2 Únavové zkoušky
- 12.3.3 Křehkolomové zkoušky

Příklady

Literatura

12.1 Úvod

12.1.1 Základní pojmy

Materiály vykazují rozmanité vlastnosti, které jsou určeny zejména jejich chemickým složením a strukturou. Z hlediska použití materiálů je obvyklé dělení jejich vlastností na vlastnosti fyzikální, chemické, mechanické, technologické atd.

Mechanickými vlastnostmi se rozumí soubor jevů charakterizujících chování materiálů za působení určitého namáhání, které je důsledkem působení vnějších sil a okolního prostředí (teplota, koroze, radiace apod.). Mechanické vlastnosti, lépe řečeno jejich charakteristiky, spolu s velikostí a charakterem namáhání umožňují dimenzovat důležité komponenty konstrukcí a stanovit jejich funkční spolehlivost, která vymezuje tzv. **mezní stav**. Mezní stav je určen situací, kdy součástí či konstrukce ztrácejí schopnost plnit funkci ke které byly určeny. Mezní stavy ovlivňují faktory vnější (tvar a rozměry, časový průběh zátěžných sil, charakter prostředí, teplota) i vnitřní (chemické složení a struktura materiálu, rozsah výrobní a provozní degradace, apriorní defekty). Příklady mezních stavů jsou např. elastická nestabilita (vybočení), nadměrná plastická deformace, všechny typy lomů (křehký, únavový, creepový, koroze pod napětím), nadměrné opotřebení atd.

Pod účinkem vnějších sil v součástech může docházet k řadě jevů, jako je deformace pružná i plastická, případně iniciace a šíření lomu. Vzájemné vztahy uvedených jevů jsou významně závislé na mechanických vlastnostech použitých materiálů. Všechny materiály jsou citlivé na strukturní stav, zejména na submikroskopické úrovni, přičemž především u kovů prvořadý význam náleží čárovým poruchám krystalové mřížky (dislokacím), jejichž nevratný pohyb způsobuje plastickou deformaci. Výklad mechanických vlastností kovů se tudíž opírá zejména o teorii dislokací, která mj. vysvětluje plastickou deformaci a uplatňující se mechanismy zpevňování kovů a slitin, včetně zpevnění deformačního.

12.1.2 Pružná deformace

Zatížení tuhých těles vnějšími silami vede ke změně jejich tvaru – deformaci. Pokud uvažované těleso po odlehčení dosáhne původního tvaru a rozměrů, pak materiál tělesa vykazuje pružné chování, jehož projevem je **pružná (elastická) deformace**. V případě jednoosového zatěžování isotropního tělesa v oblasti pružných deformací závislost poměrné deformace $\varepsilon = \Delta l/l_0$ na napětí ($\sigma = F/S$) je lineární a vyjadřuje ji **Hookův zákon** - $\varepsilon = \alpha \cdot \sigma$, který se častěji uvádí ve tvaru $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Obvykle se uvažují složky napětí působící ke sledované ploše kolmo (**normálové napětí σ**) a rovnoběžné s touto plochou (**smykové napětí τ**). Normálové tahové napětí způsobuje protažení tělesa (ε_a) a příčné zúžení deformací (ε_p); v případě tlakových normálových napětí dochází ke stlačení tělesa a jeho příčnému rozšíření. Závislost mezi ε_a a ε_p je opět lineární a ve tvaru $\varepsilon_a = \mu \varepsilon_p$, kde konstanta μ se nazývá **Poissonovo číslo**. Smykové (tangenciální, stříkové) napětí τ způsobuje distorzi tělesa (**obr.1**).

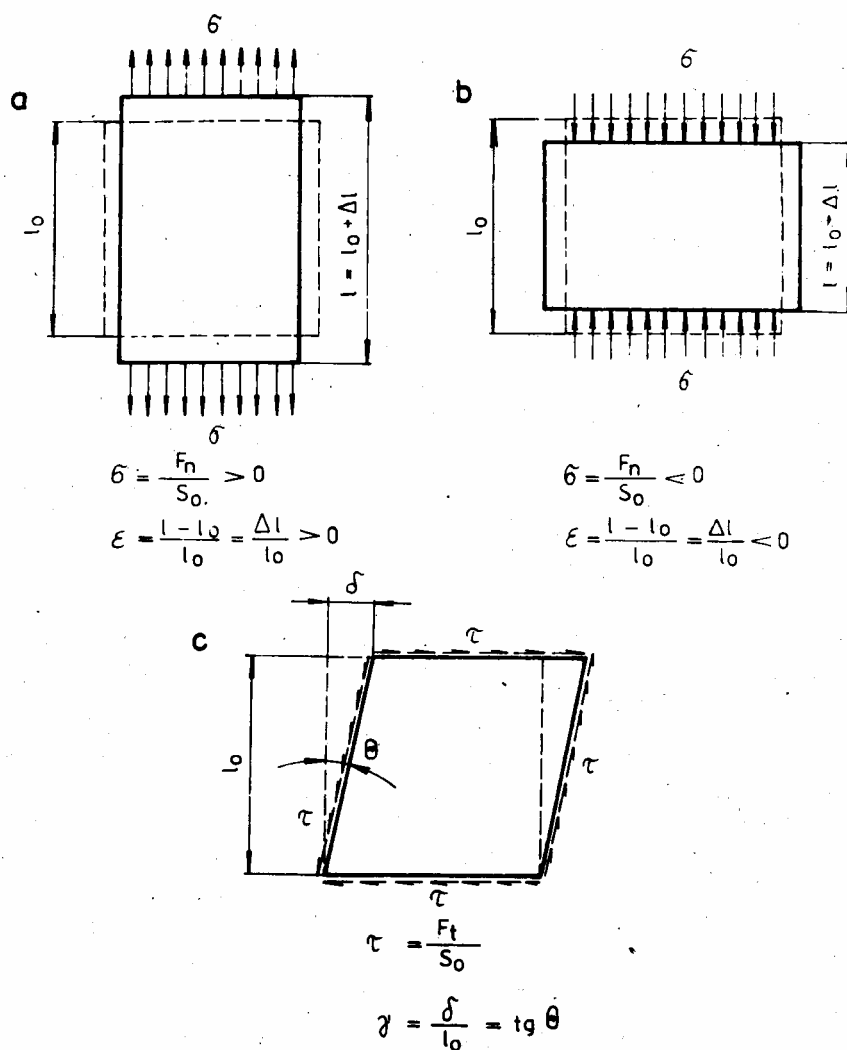
U většiny kovových a keramických materiálů se uplatňuje lineární elasticita, tedy deformace je přímo úměrná napětí a probíhá okamžitě. Pro tahové a tlakové napětí platí již zmíněný Hookův zákon $\varepsilon = 1/E \cdot \sigma$, pro smykové napětí se uplatňuje analogický vztah $\gamma = 1/G \cdot \tau$. V těchto rovnicích je **E modul pružnosti v tahu** (též Youngův modul) a **G je modul pružnosti ve smyku**.

Je-li těleso ve tvaru koule zatíženo všestranně působícím tlakem (hydrostatický tlak σ_{hyd}), pak se jeho původní objem V_0 změní o ΔV podle vztahu $\sigma_{hyd} = K \cdot \Delta V/V_0$, ve kterém K je objemový modul pružnosti, jeho reciproká hodnota β se nazývá stlačitelnost. Pro materiály elas-

ticky isotropní jsou ze čtyř výše uvedených konstant (E, G, μ a K) jen dvě nezávislé, neboť mezi nimi platí tyto vztahy:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad K = \frac{1}{\beta} = \frac{E}{3(1 - 2\mu)}$$

Kovové krystaly jsou elasticky výrazně anizotropní, tedy jejich elastické moduly se mohou výrazně lišit v jednotlivých krystalografických směrech, jak je patrné z hodnot uvedených v tab.1. Technické kovové materiály jsou zpravidla polykrystalické a pokud je orientace jednotlivých zrn nahodilá, pak výše zmíněná anizotropie, dobře měřitelná na monokrystalech, mizí.



Obr. 1 Typy napětí a deformací (a-tahové napětí, b-tlakové napětí, c-smvkové napětí)

ce se tedy opoždí za napětím. Tento jev, tedy časově závislá velikost pružné deformace materiálů, se nazývá **anelasticita**. Anelasticita je značná u polymerů a podílí se na jejich viskoelastickém chování. U kovových materiálů je projevem anelasticity hysterezní smyčka, která vzniká v souřadnicích σ - ϵ při cyklickém zatěžování. Plocha této smyčky odpovídá ztrátě energie na jeden zátěžný cyklus.

Ideální tuhé těleso se působením napětí pružně doformuje okamžitě a obráceně pružná deformace mizí současně s poklesem napětí na nulovou hodnotu.

V atomárním měřítku se atomy nebo molekuly vlivem napětí přemísťují okamžitě ze svých rovnovážných poloh a po odlehčení se rovněž okamžitě navrací do výchozích poloh, charakterizovaných nejnižší energií. V reálných tuhých látkách je však čas potřebný pro jejich přemístění konečný, deforma-

Tab. 1 Anizotropie modulů pružnosti E a G vybraných kovů

Kov	Modul pružnosti v tahu E , GPa			Modul pružnosti ve smyku G , GPa			Tep- lota tave- ní, °C
	maximální	minimální	izotropní	maximální	minimální	izotropní	
Fe	289	135	210	119	61	84	1 539
Cu	196	68	113	98	32	46	1 083
Zn	127	35	103	50	28	39	420
Al	77	64	70	29	25	27	660
Mg	52	44	44	18	17	17	650

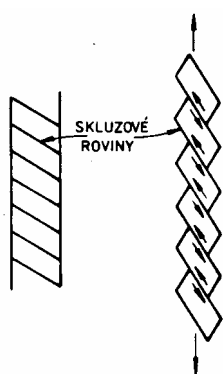
12.1.3 Plastická deformace

Pro většinu kovů je typické, že před porušením vykazují mimo pružné i **trvalou - plastic-kou deformaci**. V krystalických látkách nastává plastická deformace krystalograficky definovaným vzájemným relativním posunem atomárních rovin. Pro nekrystalické látky je charakteristická **viskózní deformace**, při které malé skupiny sousedních atomů, nebo molekul mění své polohy s určitou volností, která v krystalech zpravidla není možná.

Mechanismy plastické deformace.

Kovová tělesa se plasticky deformují pokud působící napětí překročí hodnotu nutnou pro nevratný pohyb dislokací. V teplotní oblasti, ve které je tepelně aktivovaný pohyb atomů málo významný, je hlavním mechanismem plastické deformace skluzový pohyb dislokací. Za vyšších teplot (např. tečení za tepla – creep) se mohou uplatňovat také difúzní mechanismy plastické deformace, mezi které patří šplhání dislokací, difúzní tok atomů usměrněný gradientem napětí a pokluzu po hranicích zrn.

V případě skluzového mechanismu plastické deformace kovového monokrystalu (daného zrna) se jeho jednotlivé bloky pohybují vůči sobě pod účinkem smykových napětí v důsledku pohybu dislokací ve **skluzových rovinách**. (Na vyleštěném povrchu lze pozorovat tzv. skluzové čáry, které odpovídají „vyústění“ skluzu na volné plochy).



Se vzrůstající velikostí plastické deformace se skluzové roviny natáčejí (viz **obr. 2**), objem však zůstává konstantní. Skluzové roviny jsou zpravidla roviny s nejhustším uspořádáním atomů v příslušné mřížce. **Směr skluzu** je rovnoběžný s Burgeresovým vektorem dislokace a vždy je to směr nejměstnanějšího uspořádání atomů. Příklady rovin a směrů skluzu v nejčastějších strukturách kovů jsou uvedeny v tab. 2.

Obr. 2 Schéma plastické deformace skluzem při tahovém zatěžování např. monokrystalu Zn

V určité skluzové rovině může být několik směrů skluzu a daný směr skluzu může ležet ve více než jedné skluzové rovině. Počet možných kombinací rovin a směrů skluzu určuje **počet skluzových systémů** (viz tab. 2).

Většina kovů se vyznačuje vysokým počtem skluzových systémů, což umožňuje jejich rozsáhlou plastickou deformaci a vysvětluje jejich velikou tvárnost. S rostoucí teplotou se zvětšuje počet aktivních skluzových systémů. V BCC kovech jsou za zvýšených teplot aktivní

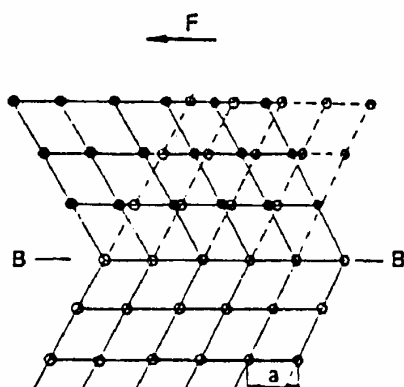
Tab. 2 Skluzové systémy v nejčastějších kovových strukturách

Krystalová struktura	Roviny skluzu	Směry skluzu	Počet skluzových systémů	Příklady kovů
FCC	{111}	$\langle 1\bar{1}0 \rangle$	12	Al, Cu, Ni
BCC	{110} ^{x)}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12	α -Fe, Ta, W α -Fe, Ta, W α -Fe
	{211}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	12	
	{321}	$\langle \bar{1}11 \rangle$	24	
HCP	{0001}	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	Mg, Be α -Ti, α -Zr
	{10 $\bar{1}0$ }	$\langle 11\bar{2}0 \rangle$	3	

^{x)} převládající skluzový systém za všech teplot

všechny skluzové systémy uvedené v tab.2, zatímco za nízkých teplot jen ty, které zahrnují roviny {110}. Také u HCP kovů je za nízkých teplot aktivní jediný systém skluzových rovin.

Druhým základním mechanismem plastické deformace je **dvojčatění**, při kterém se deformace uskutečňuje smykem atomárních rovin relativně vůči sobě, avšak jedná se o kooperativní posun, jehož důsledkem je vznik dvojčatové oblasti v krystalu, jak je patrné z **obr.3**. Pro tuto oblast náhlého přeskupení je charakteristické zachování původního uspořádání atomů, avšak uzlové body jsou rozloženy tak, že původní a dvojčatová orientace mřížek jsou zrcadlově symetrické vůči tzv. rovině dvojčatění. Dvojčatění je běžné u kovů a slitin s mřížkou hexagonální nebo s mřížkami, které mají malý počet skluzových systémů. Ve všech kovech a slitinách k dvojčatění dochází při deformacích za nízkých teplot, nebo při vysokých rychlostech deformací.



Obr.3 Schéma deformace dvojčatěním (B-B rovina dvojčatění)

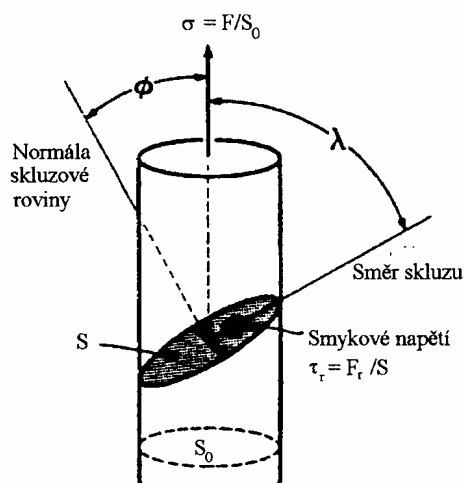
pohybu dislokací. Jeho velikost klesá s rostoucí teplotou a výrazně závisí na čistotě a stavu mřížkových poruch konkrétního kovu.

Plastická deformace skluzem monokrystalů

Kovové materiály větších rozměrů mají relativně vysokou hustotu dislokací, které vznikly během jejich růstu. V těchto monokrystalech je velikost tahového napětí potřebného k vyvolání plastické deformace závislá na orientaci krystalu. Pohyb dislokací (a tedy plastickou deformaci) způsobují smyková napětí, jejichž velikost odpovídá tangenciální složce působícího napětí v rovině a směru skluzu. K plastické deformaci dojde, pokud uvedená tangenciální složka dosáhne velikosti kritického skluzového napětí τ_0 .

Kritické skluzové napětí τ_0 je materiálovou charakteristikou a odpovídá počátku nevratného

Každému z rozdílně orientovaných skluzových systémů kovového monokrystalu, který je zatěžován tahovým napětím σ , odpovídá jiná hodnota smykové složky τ . Se zvyšováním hodnoty σ úměrně vzrůstají napětí τ ve všech skluzových systémech a k plastické deformaci dojde v okamžiku, když napětí τ v nejhodněji orientovanému skluzovému systému dosáhne hodnoty τ_0 .



Obr.4 Schéma smyku v jediné skluzové rovině monokrystalu

Geometrické vztahy uvedených veličin jsou zřejmé z **obr.4**, ve kterém je naznačen pouze jeden skluzový systém monokrystalu v průřezu S , zatěžovaný v tahu silou F . Význam ostatních veličin je patrný z **obr.4** Pro smykovou složku τ platí vztah

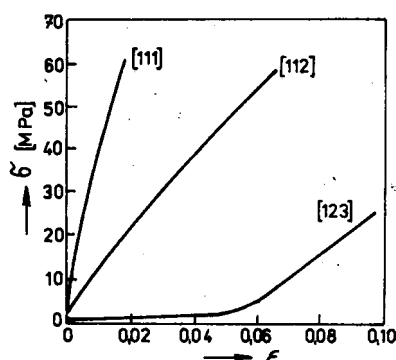
$$\tau = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \lambda}{S / \cos \phi} = \sigma \cos \phi \cos \lambda$$

Nejhodněji orientovanému skluzovému systému přísluší maximální hodnota tzv. geometrického faktoru $\cos \phi \cos \lambda$. Pro tento skluzový systém platí $\tau_{\max} = \sigma (\cos \phi \cos \lambda)_{\max}$ Při rovnosti $\tau_{\max} = \tau_0$ nastává skluz a pro tahové napětí nutné k zahájení

plastické deformace platí

$$R_e' = \frac{\tau_0}{(\cos \phi \cos \lambda)_{\max}}$$

Průběh plastické deformace monokrystalu tedy závisí na orientaci jeho skluzových systémů vzhledem ke směru působící síly, a to zejména u kovů s mnoha aktivními skluzovými systémy. Při stejné hodnotě τ_0 dochází k plastické deformaci u různě orientovaných monokrystalů při rozdílných hodnotách tahového napětí. Také další průběh plastické deformace se může lišit. V případě aktivace jediného skluzového systému se zpočátku monokrystal plasticky deformuje pod účinkem malého, přibližně konstantního napětí – tzv. snadný skluz. Od jistého stupně deformace dochází ke skluzu i v jiných rovinách, což vede k interakci dislokací na protínajících se skluzových systémech, která vyžaduje zvýšení působícího napětí. Postupný růst odporu proti plastické deformaci v průběhu zatěžování se označuje jako **deformační zpevnění**. Pokud v důsledku vhodné orientace monokrystalu již od počátku dochází k vícenásobnému skluzu, tedy ke skluzu ve více skluzových systémech, pak deformační zpevnění je výrazné již od počátku, jak je patrné z **obr.5**.



Obr.5 Křivky σ - ϵ při tahové zkoušce monokrystalu Cu při jeho různé orientaci vzhledem k ose zatížení

Plastická deformace skluzem polykrystalů

Plastická deformace vyžádaného polykrystalického čistého kovu vyžaduje podstatně vyšší napětí ve srovnání s odpovídajícím monokrystalem. Příčiny tohoto rozdílu spočívají v náhodné orientaci jednotlivých zrn a v přítomnosti hranic zrn, které tvoří účinnou bariéru (překážku) pohybu dislokací.

V množině zrn o náhodné orientaci některá příznivě

orientovaná zrna vzhledem k působící síle dosahují hodnoty τ_0 při nízké úrovni působícího napětí, zatímco zbývající zrna jsou deformována pouze pružně. Polykrystal jako celek je tedy v pružně-plastickém stavu. Plastická deformace nabude makroskopické hodnoty při takovém tahovém napětí (viz. mez kluzu), kdy k plastické deformaci dojde i v méně vhodně orientovaných zrnech. Aby nedošlo k porušení spojitosti (soudružnosti) hranic zrn při pokračující plastické deformaci je nutná střídavá funkce nejméně pěti nezávislých skluzových systémů. Např. v polykrystalickém zinku s HCP strukturou se při normální teplotě uplatňují pouze tři skluzové systémy a porušuje se tedy při malé plastické deformaci na rozdíl od mědi, která má FCC mřížku s 12 skluzovými systémy a snáší značnou plastickou deformaci.

Jak již bylo uvedeno, je kritické skluzové napětí τ_0 fyzikálně podložená veličina, která v monokrystalu definuje smykové napětí potřebné k nevratnému pohybu dislokací, a tedy k plastické deformaci. Existence pružně-plastického stavu při zatěžování polykrystalického materiálu neumožňuje definovat veličinu analogickou k τ_0 . Zavádějí se tudíž následující smluvní veličiny:

mez pružnosti R – definovaná smluvně stanovenou a současně spolehlivě měřitelnou hodnotou plastické deformace (0,05 – 0,005%), přibližně koresponduje s τ_0 ;

mez kluzu R_e , R_p (skutečná, smluvní) – jejichž definice jsou uvedeny v kap.12.2.3 a můžeme je v prvním přiblížení porovnávat s napětím, které způsobí makroskopickou plastickou deformaci, kdy k plastické deformaci dojde ve všech zrnech polykrystalického materiálu.

Hranice zrn působí jako vnitřní překážky pro pohyb dislokací, lze tudíž očekávat, že mez kluzu polykrystalických materiálů se bude zvětšovat s klesající velikostí zrn. Tuto závislost popisuje teoreticky podložený a experimentálně ověřený Hallův-Petchův vztah

$$R_e = \sigma_i + kd^{-1/2},$$

ve kterém d je velikost zrna, σ_i je tzv. třecí napětí (přibližně mez kluzu monokrystalu) a „ k “ je empirická konstanta.

12.1.4 Lomové chování

Lomy, jako krajní případ mezního stavu součástí či konstrukcí, jsou soustavně studovány, zejména u kovových materiálů. Lomové chování kovů, především těch s BCC mřížkou, je výrazně závislé na faktorech vnitřních (metalurgických, strukturních) i vnějších (podmínky namáhání, charakter prostředí apod.).

Podle energie potřebné pro vznik lomů je dělíme do těchto dvou základních skupin:

- lomy stabilní (houževnaté), kdy na jejich šíření je nutné dodávat energii;
- lomy nestabilní (křehké), jejichž šíření nastává účinkem akumulované vnitřní energie.

Podotýkáme, že nukleace obou typů lomů je podmíněna plastickou deformací alespoň v mikroměřítku.

Budeme-li lomy hodnotit podle mechanismů jejich vzniku, pak se zpravidla rozlišují tyto základní mechanismy: tvárný, štěpný, únavový, creepový a koroze pod napětím.

Poznamenáváme, že současné pevnostní výpočty součástí a konstrukcí respektují uplatňující se mechanismy porušování, musí se tedy používat adekvátní soubor charakteristik mechanických vlastností. Současně je nutné respektovat skutečnost, že zpravidla dochází ke kombinaci několika způsobů poškozování (např. kombinace únavy, creepu a vysokoteplotní koroze

u některých součástí parních a plynových turbín). Do popředí pak vystupuje problematika kumulace poškození.

12.2 Srovnávací zkoušky mechanických vlastností

12.2.1 Úvod

Metody a metodiky zkoušek, které budou probírány, nezahrnují zkoušky hotových výrobků s ohledem na jejich předpokládané použití. Budeme se zabývat víceméně standardními metodami studia mechanických vlastností konstrukčních materiálů – kovy, keramika, plasty, případně kompozity. Tyto typy zkoušek mají následující použití:

- I. Pro kontrolu kvality buď u výrobce nebo u odběratele.
- II. K řešení specifických problémů, např. na základě dohody dodavatel - odběratel, při vývoji nových materiálů apod.
- III. Pro výběr materiálu pro určitou konstrukční aplikaci.

Mechanické vlastnosti vyjadřují reakci materiálu na působení vnějších sil. Základní mechanické vlastnosti jsou tyto:

- Pružnost – schopnost materiálu se před porušením deformovat pružně; pružná deformace je deformace vratná.
- Plasticita - schopnost materiálu se před porušením deformovat plasticky; plastická deformace je deformace trvalá.
- Pevnost – schopnost materiálu před porušením přenést určité zatížení.
- Houževnatost – odolnost materiálu vůči porušení.

Pokud chceme některou z těchto vlastností kvantifikovat, tj. vyjádřit číselně jak moc je materiál pružný, plastický, pevný nebo houževnatý, pak musíme postupovat tímto způsobem:

- vyrobit z materiálu zkušební těleso;
- těleso podrobit působení vnějších sil;
- vyhodnotit chování tělesa podle určitého postupu.

Získaný výsledek, zpravidla číselná hodnota, je materiálová charakteristika, která je mírou určité vlastnosti. Např. v případě pružnosti se stanovují následující mechanické charakteristiky: modul pružnosti v tahu E a ve smyku G , objemový modul pružnosti K a Poissonův poměr μ ; v případě pevnosti existuje mez kluzu v tahu, smyku, tlaku, ohybu, únavová pevnost, creepová pevnost a pod. Již z názvu jednotlivých mechanických charakteristik je zřejmé, že jejich hodnota závisí nejen na materiálu, ale také na způsobu zatěžování (rychlost zatěžování, teplota, tvar zkušební tělesa). Pro získání srovnatelných hodnot mechanických charakteristik je proto nutné při měření dodržet určitý postup. K zajištění této podmínky slouží technické normy (standarty) pro zkoušení. V České republice mají technické normy označení ČSN (Česká národní norma). Normy vydává Český normalizační institut a seznam všech platných norem (nejen pro zkoušení materiálů) můžeme najít na www.csni.cz. Česká republika leží v evropském regionu a pro usnadnění obchodu a spolupráce v oblasti průmyslu s ostatními zeměmi postupně přejímáme evropské normy (ozn. EN; tyto normy vydává CEN – komise evropské normalizace se sídlem v Bruselu; ČR je také členem této organizace.). Proto např. norma pro zkoušku tahem kovových materiálů, o níž bude řeč dále, má označení ČSN EN 10 002 a tatáž norma platí i v Německu DIN EN 10002, Francii NF EN 10002 a v dalších zemích Evropy. Vedle uvedených evropských norem existují ještě další (celosvětové) mezinárodní normy a ty mají označení ISO (Mezinárodní organizace ISO pro standardizaci existuje od roku 1945, má sídlo v Ženevě) (Například normy pro měření tvrdosti platné u nás mají označení ČSN EN ISO XXXX, protože se jedná o normy ISO převzaté do systému evropských norem.

Měření mechanických charakteristik se provádí v laboratoři mechanických zkoušek. První laboratoře tohoto typu vznikly v 19. století pro zkoušení pevnostních charakteristik ocelí. K základnímu vybavení těchto laboratoří patří univerzální zkušební stroj. Druhé zařízení, tvrdoměr se objevuje na začátku minulého století a po druhé světové válce třetí přístroj - kyvadlové rázové kladivo. Na těchto třech zkušebních zařízeních prováděné zkoušky jsou časově nenáročné a proto se někdy označují jako krátkodobé, ale především to jsou zkoušky srovnávací. Výsledky těchto zkoušek se používají pro tuto činnost:

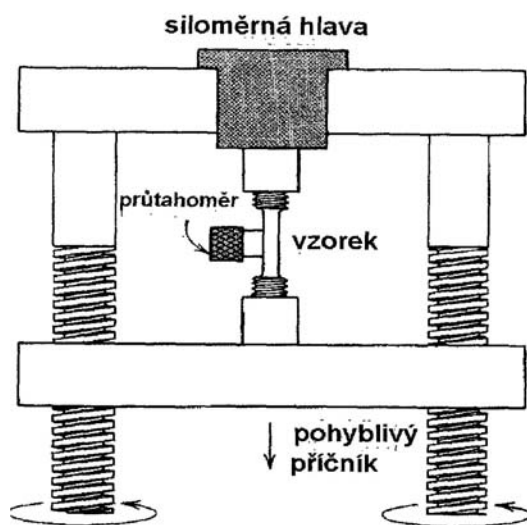
- kontrolu kvality při výrobě a nákupu konstrukčních materiálů;
- porovnání mechanických charakteristik různých materiálů;
- vývoj nových materiálů;
- pro jednoduché konstrukční výpočty (tuhost systému, vlastní frekvence součásti).

Termín srovnávací používáme proto, že získané číselné hodnoty srovnáváme s hodnotami v nějakém standardu (materiálovém listu), nebo hodnoty porovnáváme navzájem. Základní požadavky na tyto zkoušky jsou jednoduchost, nízká cena a reprodukovatelnost.

K pevnostním výpočtům konstrukčních částí slouží zkoušky, které se podmínkami zatěžování (teplota a rychlost zatěžování) a tvarem zkušební tělesa (přítomnost vrubů, trhlin) blíží skutečným provozním podmínkám. Jedná se o zkoušku tahem a o zkoušky únavové, creepové a křehkolomové. Tyto zkoušky jsou komplikovanější a cenově náročnější ve srovnání se zkouškami srovnávacími

12.2.2 Univerzální zkušební zařízení

Laboratoř mechanických zkoušek, podobně jako jiné laboratoře, mají svůj pracovní řád, pracovní a bezpečnostní předpisy. Z hlediska podnikání v oboru zkušebnictví je nutné, aby daná laboratoř měla osvědčení, tzv. „certifikát“ od ČNI, nebo jiné organizace. Např. zkušebny pracující pro Německý trh mají certifikát označený symbolem TÜV (Technischen Überwachungs-Vereine)



Obr. 6 Schéma univerzálního zkušebního stroje

Univerzální zkušební stroj

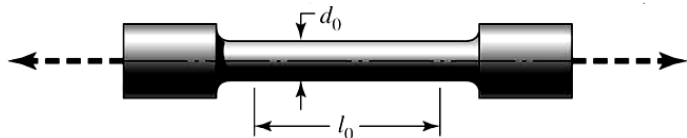
Toto zařízení umožňuje provádět různé typy zkoušek, většinou tah, tlak, ohyb – záleží na přípravcích pro uchycení zkušební tělesa (vzorku). Takovéto zařízení se zpravidla skládá ze dvou vertikálních nosných sloupů, na kterých je upevněn jak pevný (na němž je upevněna siloměrná hlava), tak pohyblivý příčník **obr.6**. Deformace zkušební tělesa se měří průtahoměrem (extenzometrem). Podle typu pohonu a způsobu měření základních veličin (síla prodloužení) při zkoušce rozeznáváme

stroje mechanické, hydraulické, elektronické, servohydraulické popř. jsou stroje řízené počítačem. Rozměry zařízení jsou určeny maximální silou, kterou můžeme aplikovat na zkušební těleso. Pro většinu plastů a keramik je dostačující silový rozsah 1 až 10 kN, pro zkoušky kovových materiálů se používají stroje s rozsahem stovek kN. Rychlost pohybu příčnicku je u těchto strojů řádově milimetry až metr za minutu. Vzhledem k poměrně pomalé rychlosti zatěžování se o zkouškách na univerzálním zkušebním stroji hovoří jako o zkouškách kvazistatických (někdy se nesprávně používá termínu statické zkoušky).

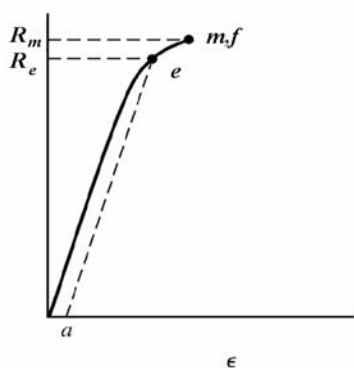
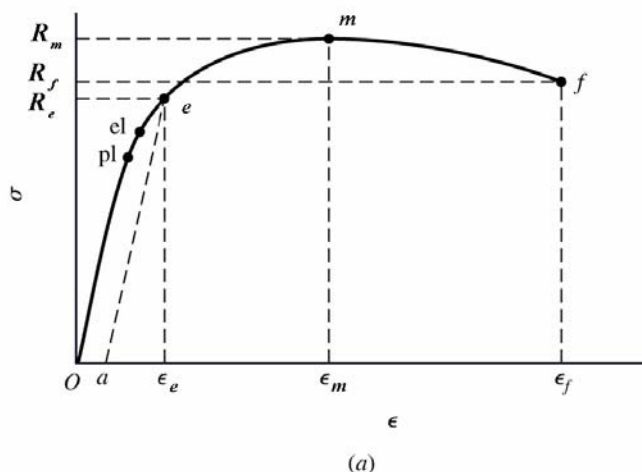
12.2.3 Zkoušky na univerzálním zkušebním stroji

Zkouška tahem

Standardní zkouška tahem kovových materiálů. (ČSN EN 10002 – 1 Kovové materiály, Zkouška tahem ta normální teploty)



Obr. 7 Charakteristický tvar zkušebního tělesa pro tahovou zkoušku kovových materiálů. poměr, pokud vzorek nemá kruhový průřez pak se jedná o poměr l_0/S_0 , kde S_0 je Podle standardu jsou tělesa geometricky podobná, tj. musí být zachován normou stanovený počáteční průřez zkušební tyče.



Obr.8 Diagram napětí-deformace získaný z tahové zkoušky (a) houževnatého (b) křehkého materiálu

pružnosti kolem 207 GPa bez ohledu na tepelné zpracování, obsah uhlíku příp. legujících prvků. V případě korozivzdorných ocelí je hodnota modulu kolem 190 GPa .

Bod *el* v **obr. 8a** se nazývá mez elasticity. Jestliže je zkušební tyč zatížena za tento bod, dochází k plastické deformaci a tedy dojde k trvalé tvarové změně zkušební tyče při odlehčení

Na **obr.7** je vyobrazena typická zkušební tyč pro zkoušku tahem včetně charakteristických rozměrů. Před zkouškou se nejprve změní počáteční průměr a měřená délka zkušební tyče. Pak se tyč uchyť do čelistí zkušebního stroje a začne se s jejím pomalým monotónně rostoucím zatěžováním. Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síla–prodloužení tyče. Síla se přepočte na napětí podle vztahu $\sigma = \frac{F}{S_0}$, kde

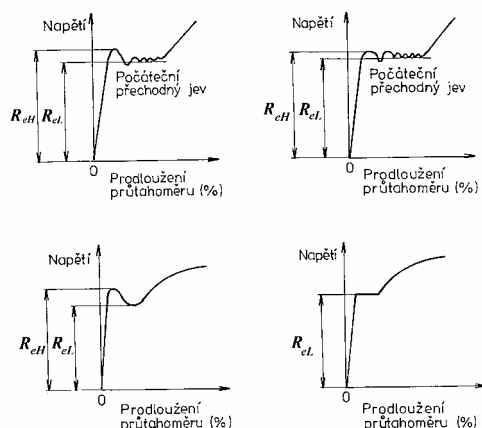
$$S_0 = \frac{1}{4} \pi d_0^2$$

je počáteční průřez zkušební tyče. Protážení, nebo prodloužení zkušební tyče měřené snímačem, je dáno rozdílem $l - l_0$, kde l je velikost měřené délky odpovídající zatížení F . Deformace se pak vypočítá ze vztahu $\varepsilon = (l - l_0) / l_0$. Na závěr, nebo v průběhu zkoušky jsou měřené hodnoty vynášeny do diagramu napětí–deformace. **Obr.8** znázorňuje tahový diagram typický pro materiál houževnatý a pro materiál křehký.

Bod *pl* v **obr. 8a** se někdy nazývá jako mez úměrnosti. To je bod ve kterém dochází k první odchylce od počáteční lineární (přímkové) závislosti napětí – deformace.

V případě, že odlehčíme zátěžnou sílu po zatížení do této hodnoty síly ještě nedojde k trvalé deformaci zkušebního tělesa. V lineární oblasti je vztah mezi napětím a deformací dán Hookovým zákonem. Modul pružnosti. E je mírou tuhosti materiálu a protože deformace je bezrozměrná veličina má modul pružnosti E stejnou jednotku jako napětí. Například ocel má hodnotu modulu pružnosti kolem 207 GPa bez ohledu na tepelné zpracování, obsah uhlíku příp. legujících prvků. V případě korozivzdorných ocelí je hodnota modulu kolem 190 GPa .

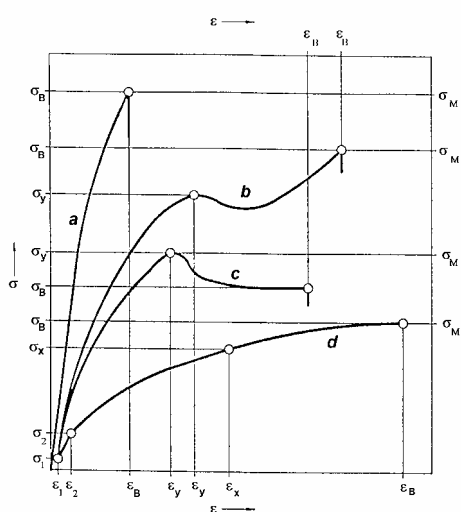
z tohoto bodu. Mezi body *pl* a *el* již není tahový diagram ideální přímkou, přestože chování zkušební tyče je ještě elastické.



U některých materiálů během tahové zkoušky je dosaženo bodu, od kterého deformace roste velice rychle bez přírůstku napětí. Tento bod se označuje jako výrazná mez kluzu. Výraznou mez kluzu vykazují oceli s nízkým obsahem uhlíku – viz exkurse ve zkušební a **obr.9**. Ne všechny materiály vykazují tuto výraznou mez kluzu. Z tohoto důvodu je mez kluzu často definovaná pomocí smluvní, nebo „odchylkové“ metody jak je uvedeno na **obr. 8b**; kde čára *ae* je rovnoběžka

Obr 4 Příklady výrazné meze kluzu

s přímkovou (elastickou) částí tahového diagramu. Bod *a* na ose deformací odpovídá definované nebo určené velikosti zpravidla plastické deformace, nejčastěji se používá hodnota 0,2 procenta plastické deformace počáteční měřené délky ($\varepsilon = 0,002$; označení meze kluzu pak je $R_{p0,2}$), někdy se používají též hodnoty 0,01; 0,1; 1 procenta plastické ($R_{p0,01}$ $R_{p0,1}$ R_{p1}), nebo i 0,5 procenta deformace celkové ($R_{t0,5}$). V dalším budeme obecně mez kluzu označovat jako R_e a myslíme tím jak výraznou mez kluzu, tak i smluvní mez kluzu/



Obr. 10 Příklady tahových diagramů plastů

Smluvní nebo jen tahová pevnost odpovídá bodu *m* v **obr.8** a je to maximální napětí dosažené v tahovém diagramu. Jak ukazuje **obr. 8a**, některé materiály vykazují pozvolný pokles napětí po dosažení maxima a k lomu dochází v bodě *f* diagramu. Jiné materiály (např. litiny a vysocepevné oceli) se porušují dříve, než je dosaženo maxima v závislosti napětí deformace, jak ukazuje **obr. 8b**; zde jsou body *m* a *f* identické.

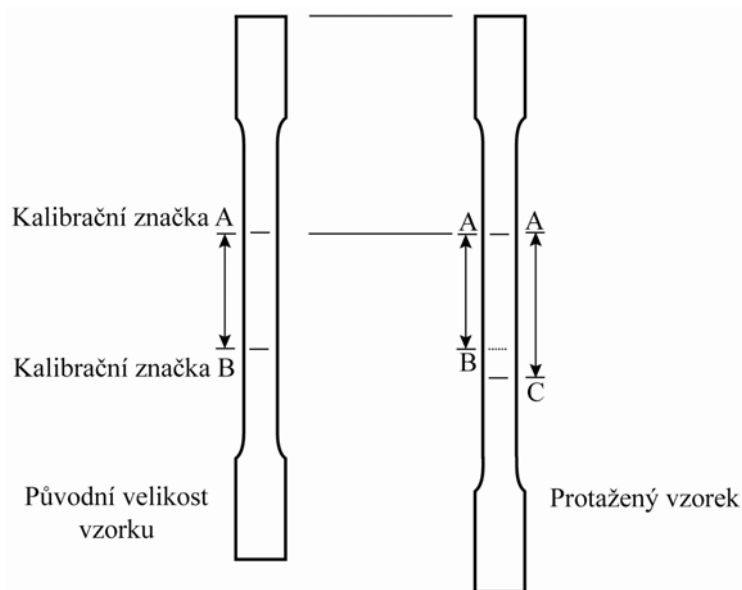
Na **obr. 10** jsou uvedeny příklady tahových diagramů plastů (ČSN EN ISO 527-1: 1997 (64 0604) Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 1: Základní principy. ČSN EN ISO 527-2: 1998 (64 0604) Plasty – Stanovení tahových vlastností – Část 2: Podmínky pro tvářené plasty.) Stejně jako u kovů, i zde existují materiály s výraznou mezí kluzu (b, c) a bez výrazné meze kluzu (a,d) s tím rozdílem, že v tomto případě se mez kluzu označuje symbolem σ_y a mez pevnosti σ_M a lomové napětí σ_B . Protože plasty zpravidla vykazují viskoelastické chování a obtížně by se hledala přímková část v tahovém diagramu. Proto se modul pružnosti plastů zpravidla určuje metodou „sečny“, podle vztahu:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1},$$

kde σ_1 je napětí odpovídající deformaci $\varepsilon_1 = 0,0005$ a σ_2 deformaci $\varepsilon_2 = 0,0023$. Střední hodnota modulu pružnosti běžných plastů je asi 2 000 MPa, což je dva řády méně než u oceli.

U třetí skupiny materiálů, keramiky, se pevnostní charakteristiky neurčují tahovou zkouškou. U těchto materiálů je problém jak s výrobou tvarově komplikovaných zkušebních těles, tak i s jejich upnutím při zkoušce. Proto se k měření pevnostních charakteristik velice křehkých materiálů a tedy i keramiky používá ohybová zkouška.

Vedle napěťových charakteristik se pro popis mechanických vlastností materiálů používají i charakteristiky deformační. U kovových materiálů jsou standardem zavedeny dvě, tažnost a zúžení. V případě plastů se používá zpravidla jediná charakteristika a tou je tažnost.



Obr.11 Měření tažnosti

a zúžení. V případě plastů se používá zpravidla jediná charakteristika a tou je tažnost.

Tažnost je deformace zkušební tělesa v okamžiku lomu při zkoušce tahem. Před zkouškou se na povrchu zkušební tělesa vyznačí kalibračními značkami (obr.11) měřená délka l_0 . Dojde-li k lomu tělesa mezi těmito značkami, pak se tažnost A určí podle vztahu

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad [\%],$$

kde l_u je vzdálenost kalibračních rysek měřená na přetrženém zkušebním tělese. Zvláště u kovových materiálů není vždy deformace zkušební tělesa rovnoměrná. K rovnoměrnému zužování a tedy k rovnoměrné deformaci dochází jen ve vzestupné části tahového diagramu – obr.8 od bodu 0 do bodu m – do maxima. Za maximem dochází k lokalizaci plastické deformace na měřené délce, říkáme že na zkušebním tělese vzniká krček v jehož nejužším místě nakonec dojde k lomu. Z důvodu nerovnoměrné deformace předepisují standardy pro zkušební tělesa poměr $k = \sqrt{S_0} / l_0$ (poměr výchozího průřezu tyče a měřené délky). Srovnávat tažnost je možné pouze tehdy, když byla určena na tělesech o stejném k . Vedle tažnosti je ještě jedna deformační charakteristika, která se určuje pouze u kovových materiálů a tou je zúžení definované vztahem

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%],$$

kde S_u je průřez zkušební tělesa v místě lomu.

Vedle materiálových charakteristik pružnosti (E), pevnosti (R_e , R_m) a plasticity (A , Z) se na základě tahové zkoušky určují i charakteristiky houževnatosti. Houževnatost je vlastně integrální veličinou, která v sobě zahrnuje jak pevnost, tak i tažnost. Houževnatost je možné vyjádřit pomocí plochy pod tahovým diagramem $w_t = \int_0^{\varepsilon_f} R d\varepsilon$. Tato plocha, nazývaná též tahová lomová houževnatost, v podstatě vyjadřuje deformační energii na jednotku objemu potřebnou k lomu materiálu. U ocelí se vyjadřuje tato veličina jako

$$w_t = \frac{R_e + R_m}{2} \cdot \frac{A}{100} \quad \left[\text{MPa} = \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} = \frac{\text{MNm}}{\text{m}^2 \text{m}} = \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} \right].$$

Podobná veličina, definovaná ale pro maximální elastickou deformaci (množství elastické energie akumulované v jednotce objemu materiálu zatíženého napětím R_e) se jmenuje resili-

ence $w_e = \int_0^{\varepsilon_e} R d\varepsilon$, kde ε_e je deformace odpovídající napětí na mezi kluzu.

$$w_e = \frac{1}{2} \frac{R_e^2}{E} \left[\frac{MPa \cdot MPa}{MPa} = \frac{MJ}{m^2} \right]$$

Některé druhy konstrukčních materiálů nejsou běžně dostupné a bylo by zbytečné normy pro jejich zkoušení překládat do češtiny i když se jedná o normy u nás platné. Například norma ČSN EN 658-1 Speciální technická keramika - Mechanické vlastnosti keramických kompozitů při pokojové teplotě - Část 1: Stanovení tahových vlastností, má česky napsanou pouze národní předmluvu, vlastní norma je k dispozici v jednom ze tří oficiálních jazyků EU. V této normě je popsána tahová zkouška kompozitu na bázi keramiky. Mechanická charakteristika se jmenuje kumulativní energie spojená s poškozením a určuje se z plochy pod tahovým diagramem:

$$\Phi = \frac{1}{l_0 \cdot S_0} \int_0^{lom} F \cdot d(\Delta L) \quad [kJ/m^3].$$

Jedná se o veličinu, která souvisí s houževnatostí materiálu.

Zkouška ohybem

Nejčastěji se používá tříbodový nebo čtyřbodový ohyb. Praktický význam má tato zkouška pro křehké materiály, ze kterých je obtížná výroba zkušební tělesa pro tahovou zkoušku. Z kovových materiálů se jedná o zkoušky šedé litiny (ČSN 42 0361) a některých nástrojových ocelí. Materiálovou charakteristikou je největší ohybové napětí v okamžiku lomu (ohybová pevnost) daná vztahem

$$R_{m0} = \frac{M_{max}}{W},$$

kde M_{max} je ohybový moment a W modul průřezu (v případě tříbodového ohybu zkušební tělesa obdélníkového průřezu platí $M_{max} = \frac{F \cdot l}{4}$, kde l je vzdálenost podpěr, F zátěžná síla a

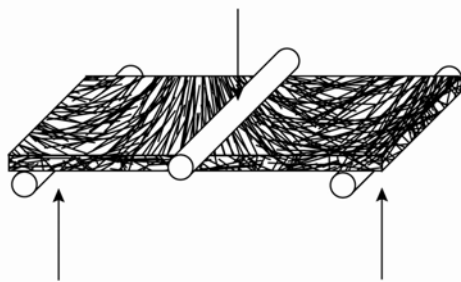
$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$, kde h je rozměr obdélníkového průřezu kolmý na směr zatěžování a zpravidla se označuje jako tloušťka tělesa a b je druhý rozměr obdélníkového průřezu tj. šířka.

Kromě síly se u modernějších zkušebních strojů snímá průhyb zkušební tělesa a tak se určuje diagram závislosti síla–průhyb. Z tohoto diagramu se vyhodnocuje nejen napětí a průhyb v okamžiku lomu, ale z oblasti počáteční lineární části diagramu i hodnota modulu E ze vztahu

$$E = \frac{F}{y} \frac{l^3}{4bh^3},$$

kde y je průhyb zkušební tělesa. Tato instrumentovaná ohybová zkouška (se snímačem průhybu) se používá jak pro keramiku – konstrukční keramika ČSN EN 843, keramické kompozity ČSN EN 658, tak i pro plasty ČSN EN ISO 178 a kompozity na bázi plastů např. ČSN EN ISO 14125 Vlákniny vyztužené plastové kompozity.

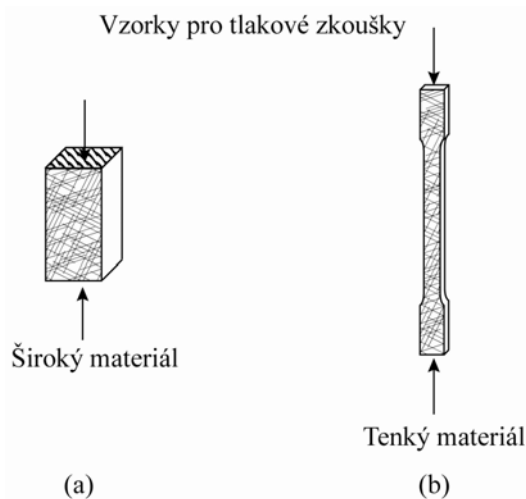
Přestože geometrie zkušební vzorku i jeho fixace je velmi jednoduchá, metodika zkoušky je komplikovanější a samotná zkouška má řadu následujících omezení:



Obr. 12. 3– bodový ohyb

- Zkouška v ohybu je více závislá na materiálových charakteristikách blízko povrchu zkušební vzorku, než je tomu u zkoušky tahem, příp. tlakem. Důvodem je nerovnoměrné rozložení napětí a deformace po průřezu zkušebního tělesa. Nejvyšší deformace je v povrchovém vlákne, takže je zřejmé, že např. při zkoušení nehomogenních materiálů – kompozitů dostaneme rozdílné výsledky v závislosti na umístění vzorku vzhledem k zatěžovacímu trnu.
- Výpočtové vztahy jsou zcela odlišné od vztahů používaných pro zkoušku tahem či tlakem. Rovnice pro výpočet pevnosti a modulu jsou funkcí h^2 resp. h^3 , kde h je tloušťka.
- S ohledem na platnost vztahů používaných pro výpočet ohybových charakteristik, je nutné především dodržet korelaci mezi vzdáleností podpěr a tloušťkou zkušebního tělesa. U kovových materiálů se zpravidla používá poměr 4:1. Pod touto hodnotou se již nejedná o ohybovou zkoušku, ale o zkoušku stříhem.
- Je uvedena limitní deformace 5 %, při které by měl být test ukončen. Tato skutečnost souvisí opět s aplikací teorie malých průhybů. V případě, že nedojde k porušení, zaznamená se síla při limitní deformaci.

Zkouška tlakem



Obr.13 Standardizované vzorky pro tlakovou zkoušku plastů

Zkouška se provádí na materiálech, které jsou namáhané tlakem a které zpravidla mají nehomogenní strukturu (šedá litina, stavební materiály apod.). Vzhledem k charakteru zatěžování při zkoušce tlakem se některé z těchto materiálů, např. šedá litina, deformují plasticky na rozdíl od tahové zkoušky, kde jsou křehké. Z hlediska norem v současné době existuje pouze norma pro stanovení tlakových vlastností plastů a plastových kompozitů – ČSN EN ISO 604. V této normě mají zkušební tělesa následující tvar. Pro materiál jehož tloušťka je 3,2 mm a více, je standardní vzorek pravoúhlý hranol, jehož délka je dvojnásobkem šířky (**obr. 13a**). Pro materiál jehož tloušťka je menší než 3.2 mm je zkušební těleso ve tvaru uvedeném na **obr. 13b**. Tenká zkušební tělesa je nutné upevnit do přípravku, který zabrání vybočení zkušebního tělesa během zkoušky.

Pro získání optimálních výsledků je třeba mít rovnoměrné rozložení síly na koncích zkoušeného vzorku. Dále je nutné dbát na tyto faktory:

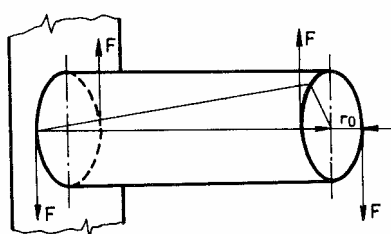
- dodržení planoparalelnosti protilehlých ploch a při použití hranolu se snažit, aby strany svíraly pravý úhel;

- síla musí být přenášena do vzorku přes ploché kovové membrány, které musí být uchyceny takovým způsobem, aby alespoň jedna z nich byla samonastavitelná ve směru přenosu síly. To zaručuje, že oba konce zkoušeného tělesa budou mít maximální kontakt s membránou;
- vzorek musí být vystředěn, aby zatížení bylo v jeho ose.

Stlačení je měřeno kompresometrem, což je opak extenzometru. Výsledkem zkoušky je pak závislost síly na stlačení, resp. napětí, na poměrném stlačení. Interpretace výsledků, konkrétně pevnosti v tlaku může být obtížná např. v těchto případech:

- Jestliže vznikne náhlý lom zkušební tělesa, což se stává většinou u tuhých materiálů, pak lom je veden diagonálně vzhledem k ose zkušební tělesa. Křivka síla versus stlačení vykazuje ostrý pokles. V takovémto případě je maximální napětí označeno jako „pevnost v tlaku při lomu“.
- V případě, kdy nedochází k tomuto náhlému lomu se jedná o materiály houževnaté. Pak křivka dosahuje postupně maxima a poté klesá. Test je zastaven v okamžiku poklesu křivky a maximální napětí je označeno jako „pevnost v tlaku“.

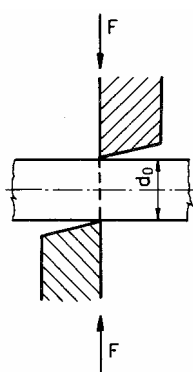
Zkoušky krutem, smykem.



Obr.14. Schéma namáhání válcového tělesa krutem.

Tento způsob namáhání si můžeme představit, že vzniká při utahování či uvolňování šroubu, nebo při prorážení tenké fólie malým razníkem. Princip zkoušky krutem, na základě které se určuje nejen pevnost v krutu, ale i modul pružnosti ve smyku, G je na **obr. 14**. Zkušební tyč je namáhána dvojicí sil F působících v rovinách kolmých na osu tyče. Na základě příslušných vzorců se počítá smykové napětí působící v rovině průřezu tyče. Toto napětí se mění do nuly v ose kroucení až po maximální hodnotu τ_{\max} na povrchu tyče.

Deformační charakteristika smyková deformace γ (skos) se počítá z úhlu zkroucení φ . Tato zkouška vyžaduje zvláštní zkušební zařízení, případně doplňky k univerzálnímu zkušebnímu stroji – zařízení pro krut a měření krouťícího momentu a úhlu zkroucení.

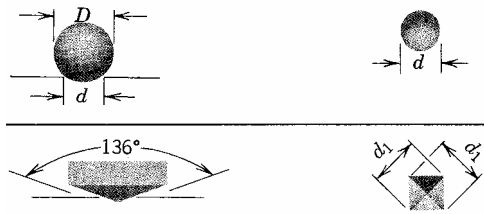


Smykové namáhání vzniká působením rovnoběžných, proti sobě působících sil ležících v rovině (**obr. 15**). V technické praxi jsou takto namáhané spojovací součásti – šrouby, nýty, čepy a pod. Pro tyto účely se smyková pevnost konstruktérem odvozuje zpravidla z hodnot pevnosti v tahu. Tyto zkoušky se provádějí na univerzálním zkušebním stroji.

Obr.11 Jednoduché smykové (stříhové) namáhání

12.2.4 Tvrdost

Z hlediska mechanických charakteristik materiálu je nečastěji měřenou charakteristikou tvrdost, kterou se rozumí odolnost materiálu vůči vnikání indentoru. I když existuje řada systémů měření tvrdosti, v dalším se zaměříme pouze na nejčastěji používané.



Obr.16

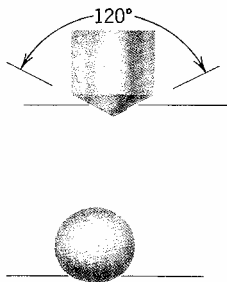
- a) Brinell, boční pohled na indentor, tvar vtisku;
- b) Vickers, boční pohled na indentor, tvar vtisku

Nejstarší evropskou zkouškou tvrdosti je tvrdost podle Brinella - **obr.16a**. Při této zkoušce je indentorem kulička (ocelová nebo z tvrdokovu o průměru D) a hodnota tvrdosti H_B je dáno podílem síly F působící na kuličku a plochy kulového vrchlíku vtisku (jež má průměr

$$d). H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Tvrdost podle Brinella má rozměr napětí, ale uvádí se jako bezrozměrná veličina. Hodnoty H_B jsou tabelovány v závislosti na průměru vtisku pro daný průměr kuličky a velikost závažné síly. Používá se jednak u kovů a jednak u plastů.

Na stejném principu jako Brinellova tvrdost, ale s diamantovým indentorem ve tvaru jehlanu, je zkouška tvrdosti podle Vickerse, **obr.16b**. $H_V = 1,854F / d_1^2$. Tato metoda je vhodná pro homogenní tvářené kovové materiály s vyšší pevností a keramiku. Výhodou je možnost provádět měření i při malých zatíženích - mikrotvrdost.



Obr. 17 Tvrdost podle Rockwella

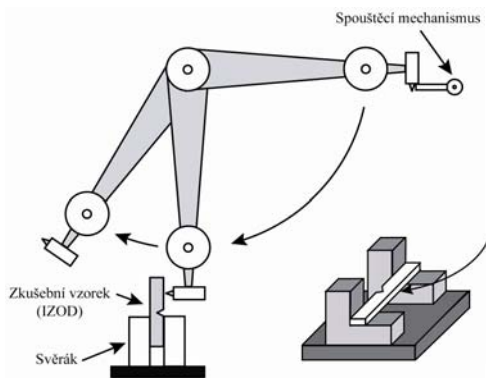
- a) indentor diamantový kužel, tvar vtisku
- b) indentor ocelová kulička

Třetí zkouška tvrdosti, tvrdost podle Rockwella, **obr. 17** má původ v USA. Měření jsou rychlá a jednoduchá, naměřené hodnoty jsou reprodukovatelné a použití zkušebního zařízení je snadné. Tvrdost se odečítá přímo ze stupnice přístroje. Stupnice tvrdosti podle Rockwella, podle typu indentoru a velikosti zatížení, jsou značeny jako A, B, C. atd. Tvrdost podle Rockwella je úměrná hloubce proniknutí indentoru do materiálu při daných podmínkách zatížení. Tvrdost označovaná jako R_A (Rockwell A) je měřena za použití diamantového kužele zatíženého silou odpovídající tíze 60 kg; R_B (Rockwell B) indentorem je ocelová kulička o průměru $1/16$ palce zatížený tíhou 100 kg; stupnice R_C je tvrdost měřená diamantovým kuželem zatíženým tíhou 150 kg. Takto získané hodnoty tvrdostí jsou relativní, tzn. např. $R_C = 50$ znamená, že porovnávat tvrdost ve vztahu k číslu 50 je možné pouze pro stupnici Rockwell C. Tento druh tvrdosti se používá prakticky jen pro kovové materiály

Hlavní výhodou měření tvrdosti je skutečnost, že při jejím měření téměř nedochází k poškození povrchu součásti, s výjimkou tvrdosti dle Brinella.

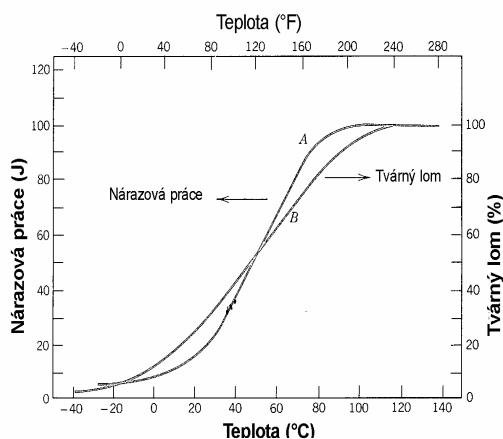
12.2.5 Rázové zkoušky

Rázové zatěžování systému (součást, konstrukce) vzniká tehdy, když časový interval působení síly je kratší, než jedna třetina minimální periody vlastních kmitů systému. V případě delších časových intervalů zatěžování hovoříme o zatěžování statickém, resp. kvazistatickém.



Obr. 18 Kyvadlové rázové kladivo s uložením zkušební vzorku při zkoušce podle Izoda a podle Charpyho

polohy beranu kladiva.



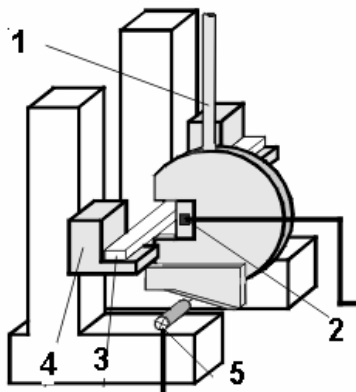
Obr. 19 Závislost nárazové práce na zkušební teplotě .

teplot je výrazně závislá jak na materiálu (chemické složení, struktura), tak i na geometrii vrubu (zpravidla U nebo V vrub)

Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho pro kovové materiály se provádí podle ČSN EN 10045, pro plasty ČSN EN ISO 179-1. V poslední době se pro výzkum deformačního a lomového chování jak kovů, tak i plastů používá instrumentovaná rázová zkouška. Příkladem takovéto normy je ČSN EN ISO 179-2, kde je popsáno stanovení rázových vlastností plastů ze záznamů závislosti síla-průhyb. Instrumentace spočívá v instalaci snímačů síly event. i průhybu (**obr.20**), které umožní sledovat průběh rázového děje, což je rozhodně pozitivum. Na druhé straně je nutné nastavit podmínky zkoušky tak, aby byly minimalizovány dynamické jevy (rezonance snímače, rezonance zkušební tělesa, setrvačné účinky), neboť tyto jevy mohou zkreslit záznam natolik, že neodpovídá skutečnému odporu materiálu proti rázovému zatížení.

Zkoušky podle Charpyho (pro oceli a plasty) příp. podle Izoda (zpravidla pro plasty) zkušebních těles s vrubem o určité geometrii, se používají k hodnocení křehkosti, případně houževnatosti. Zkoušky jsou vhodné jednak ke srovnávání lomového chování různých materiálů při rázu a jednak k hodnocení tranzitního lomového chování materiálů, především konstrukčních ocelí (změna charakteru lomu v závislosti na poklesu teploty). V případě obou zkoušek je zkušební těleso přerazeno břitem umístěným na beranu kyvadlového kladiva spouštěného z definované výšky. Při zkoušce se určuje tzv. nárazová práce, tj. energie spotřebovaná (absorbovaná) na přerazení zkušební tělesa. Hodnota nárazové práce je dána výškou, do které vykývne beran kladiva po zkoušce a buďto se odečítá ze stupnice umístěné na kladivu, nebo je zaznamenávána elektronickým snímačem

Vliv teploty na hodnotu nárazové práce materiálu, který vykazuje tranzitní lomové chování (přechod od houževnatého ke křehkému lomu v závislosti na poklesu teploty), je ukázán na **obr. 19**. Ne všechny materiály vykazují takovéto chování (např. austenitické oceli a většina neželezných kovů s FCC krystalovou strukturou) nevykazuje tranzitní lomové chování). Všimněme si úzké teplotní oblasti teplot, kde hodnota nárazové práce v závislosti na rostoucí teplotě prudce roste. Za nízkých teplot je lom křehký, (energetické hledisko) materiál se porušuje štěpně (hledisko mechanismu porušování), při teplotách nad kritickou oblastí je lom houževnatý a materiál se porušuje tvárně. Poloha kritické (tranzitní) oblasti na ose



Obr. 20 Schéma instrumentované rázové zkoušky podle Charpyho. Břit beranu (1) je opatřen tenzometrickým snímačem síly (2). Poloha beranu během přerážení zkušebního tělesa (3) je snímána optoelektrickým snímačem (5)

12.3 Zkoušky pro potřeby návrhu konstrukce

Doposud jsme hovořili o zkouškách charakteristik mechanických vlastností, které jsou jednoduché, levné a reprodukovatelné. Označili jsme je jako zkoušky srovnávací. V reálné konstrukci jsou podmínky zatěžování mnohem složitější a to jak z hlediska podmínek (teplota, rychlost zatěžování), tak i z hlediska způsobu zatěžování a tvaru součástí (kombinace tah, ohyb a pod.; přítomnost vrubů, trhlin). Tyto podmínky zatěžování jsou důvodem, proč během provozu zařízení dochází někdy k přílišným deformacím materiálu součástí, či dokonce k iniciaci a šíření poruch soudržnosti materiálu a to i v případech, že provozní napětí je nižší než mez kluzu. Dříve konstruktéři používali pro výpočet dovoleného namáhání strojních součástí vysoké součinitele bezpečnosti – poměr meze pevnosti a provozního napětí. Např. v 19. století se ojnice motorů dimenzovaly s 20ti násobnou a šrouby až s 30ti násobnou bezpečností. Navzdory takto vysokým součinitelům bezpečnosti docházelo často k náhlým poškozením, případně lomům strojních součástí. Od století páry do dnešních dnů se zdokonalují teorie a hledají metody návrhu bezpečné konstrukce z hlediska selhání materiálu – mezního stavu materiálu. V dalším se zmíníme o těchto mezních stavech:

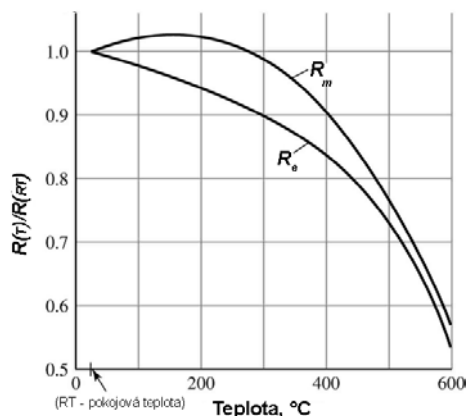
- mezním stavu pružné deformace;
- mezním stavu plastické deformace;
- mezním stavu porušení.

Mezní stav pružné deformace vznikne např. při ztrátě stability štíhlých nosníků namáhaných na vzpěr při vybočení, nebo při zborcení stěn plastové láhve, když při pití z ní vysajeme vzduch.

Vznik plastické deformace během provozu konstrukce je nepřijatelný. Při jednoosém namáhání začíná plastická deformace při dosažení meze kluzu materiálu. Při jiných způsobech namáhání a při víceosém stavu napjatosti se vznik plastické deformace určuje pomocí různých hypotéz. Vstupní materiálovou charakteristikou pro tyto výpočty je mez kluzu materiálu. Jistý problém nastane v případě zvýšených teplot. Pro tyto případy se chování materiálů za zvýšených teplot předpovídá na základě creepových zkoušek.

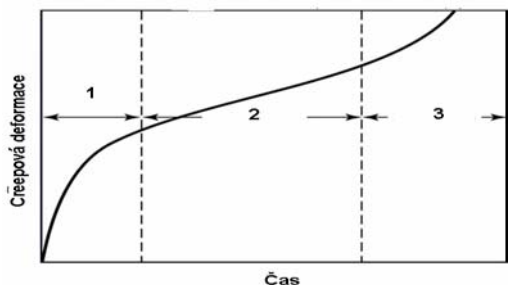
Mezní stav porušení je charakteristický vznikem lomu a je dán napětím, které za daných podmínek namáhání způsobí lom. Připomeňme si v této souvislosti dva mezní stavy porušení – únavové porušení a křehký lom.

12.3.1 Creepové zkoušky



Obr. 21 Vliv provozní teploty na relativní hodnoty (vzhledem k pokojové teplotě) meze kluzu R_e a meze pevnosti R_m , zjištěné z výsledků 145 zkoušek 21 uhlíkových a legovaných ocelí.

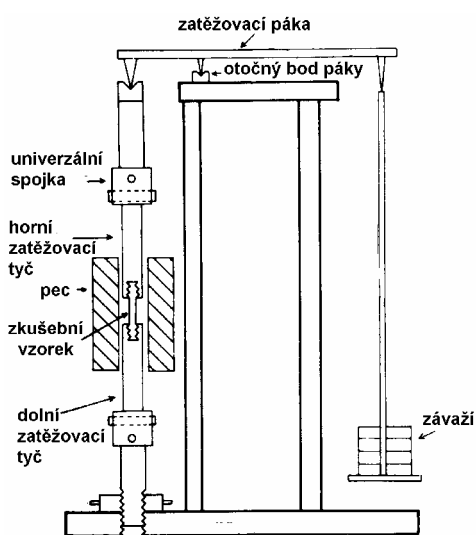
Pevnost, tažnost i houževnatost jsou vlastnosti materiálu, které ovlivňuje provozní (okolní) teplota. Vliv teploty na statické vlastnosti oceli je možné charakterizovat závislostí pevnostní charakteristiky versus teplota, která je schematicky uvedena na **obr.21**. Poznamenejme, že pevnost v tahu se prakticky nemění v závislosti na růstu teploty a to až do určité teploty. Od této teploty dochází k významnému poklesu R_m . Naproti tomu hodnota meze kluzu R_e s nárůstem teploty spojitě klesá. Jak se dá předpokládat, při vyšších teplotách dochází k podstatnému nárůstu tažnosti.



Obr.22 Schéma creepové křivky

Při zvýšených teplotách se na žárovevných materiálech provádí zkoušky při dlouhodobém působení konstantního zatížení. Během zkoušek dochází k trvalé deformaci zkušebních těles, přestože působící napětí je menší než hodnota meze kluzu určená pro zkoušený materiál při stejné teplotě. Tato časově závislá plastická deformace vyvolaná konstantním zatížením se označuje pojmem *creep* (tečení, křip).

Nejrozšířenější zkouškou vyvinutou pro studium mechanických vlastností materiálu za zvýšených teplot je dlouhodobá creepová zkouška při konstantním zatížení. Schematický průběh závislosti creepové deformace na čase je na **obr.22**. Zkouška probíhá při konstantní teplotě a zpravidla pro jednu teplotu se provádí několik zkoušek pro různé hodnoty zatížení. Experimentálně naměřená závislost, creepová deformace – čas, se dělí na tři oblasti (stádia).



Obr.23 Schéma zařízení pro creepové zkoušky

V první oblasti (1) se významně mění obě deformace – elastická i plastická; rychlost creepové deformace klesá vlivem nárůstu deformačního zpevnění. V druhé oblasti (2) dosahuje rychlost creepové deformace minimální hodnoty $\dot{\epsilon}_s$ a zůstává konstantní (v závislosti na čase se nemění), což je výsledek rovnováhy mezi deformačním zpevněním a zotavovacími procesy. Ve třetí oblasti (3) dochází již k významné redukci průřezu zkušebního tělesa, což vede ke zvýšení skutečného napětí a zvýšení creepové deformace a následně k lomu. Křivky creepové životnosti se zjišťují experimentálně. Na **obr.23** je schéma experimentálního zařízení pro tyto zkoušky.

Materiálové charakteristiky vyjadřující odolnost materiálu vůči creepu jsou tyto:

- mez pevnosti při tečení - označení v našich materiálových listech R_{mT} , ve standardu EN označeno jako σ_r , definována jako napětí které při dané teplotě vede k porušení za stanovený čas (např. $R_{mT} 10^4/580 = 80$ MPa);
- mez tečení - označení v našich materiálových listech R_T , ve standardu EN označeno jako σ_{AI} , zavedena jako napětí, které po dané době vyvolá určitou deformaci při zvolené teplotě (např. $R_T 10^4/1/580 = 110$ MPa);
- rychlost stacionárního creepu $\dot{\epsilon}_s$.

12.3.2 Únavové zkoušky

Únava materiálu je proces změn vlastností materiálu způsobený cyklickým zatěžováním. V současné době existují níže uvedené tři oblasti studia únavového porušení:

Hladká součást (filozofie bezpečného života / save live)

1. Měkké zatěžování - vysokocyklová únava, křivka životnosti Wöhler, Basquin (železnice-auto-podvozek letadla).

2. Tvrdé zatěžování - nízkocyklová únava, křivka životnosti Manson, Coffin (tlaková nádoba, rotor turbíny).

Součást s trhlinou (filozofie bezpečného lomu / failure save)

3. Měkké zatěžování, Parisův vztah; podmínky šíření únavové trhliny (drak letadla, most).

12.3.3 Křehkolomové zkoušky

Výroba velkých svařovaných konstrukcí v průběhu a po druhé světové válce byla provázena řadou havárií. Příčinou těchto havárií byla přítomnost defektů typu trhlín, v nichž došlo k iniciaci lomu. Postupně vznikl vědní obor, který se jmenuje lomová mechanika, která studuje stabilitu trhlín v materiálu, či počítá lomové napětí součásti obsahující trhlinu. Lomová mechanika zavedla novou materiálovou charakteristiku, lomovou houževnatost K_{Ic} , J_{Ic} . V oblasti zkoušení materiálu existují v současné době standardy pro měření lomové houževnatosti kovů. Pro plasty a keramiku jsou tyto standardy ve vývoji.

Příklady, otázky

- 1) Vyjmenujte základní mechanické vlastnosti.
- 2) Jaké typy univerzálních zkušebních strojů jste viděli v laboratořích a k jakým typům zkušek slouží.
- 3) Schematicky znázorněte závislost napětí – deformace určenou při zkoušce tahem zkušebního tělesa z a) nízkouhlikové oceli, b) mědi. Vysvětlete, které napěťové a deformační charakteristiky se určují ze zkoušky tahem.
- 4) Zkušební těleso pro zkoušku tahem vyrobené z oceli o středním obsahu uhlíku má průměr 10 mm a jeho měřená délka je 50 mm. Při zkoušce byla zaznamenána data jednak v oblasti elastických deformací (se snímačem pod zatížením) a jednak v oblasti deformací plastických (měřeno v odlehčeném stavu).

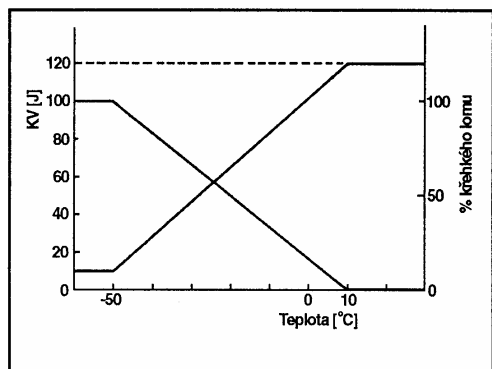
Elastická oblast			Plastická oblast	
Zatížení [kN]	Prodloužení [mm]		Zatížení [kN]	Průřez zkušebního tělesa [mm ²]
2,73	0,01		23,99	78,513
5,45	0,015		24,8	78,309
8,18	0,025		25,08	77,586
10,9	0,0325		35,98	76,045
19,1	0,0575		41,43	74,108
22,9	0,07		46,34	61,776
23,99	0,09		44,7	51,658
25,08	0,2225		40,34	42,568

Poznamenejme, že při zápisu dat došlo k jejich překrytí a tedy nejsou rozdělena přesně na elastickou a plastickou oblast. Vyneste dva smluvní tahové diagramy napětí – deformace; první diagram necht' má na ose –x hodnoty poměrné deformace 0 – 0,02 a druhý diagram hodnoty 0 – maximální deformace. Pomocí těchto diagramů stanovte pro zkoušený materiál modul pružnosti E, smluvní mez kluzu pro smluvní deformaci 0,2% plastické deformace, mez pevnosti a zúžení.

5) Jako materiáloví experti jste dostali k posouzení, zda označení ocelí uvedených v seznamu je v souladu s naměřenými hodnotami nárazové práce KV. Své rozhodnutí krátce zdůvodněte.

Materiál	Teplota [°C]	Hodnoty KV [J]			Hodnoty KV [J]		
		19	25	35	32	34	29
S235JRG2	20	31	14	38	26	33	35
S235J0G2	0	22	28	35	28	38	34
S275JRG2	20	26	24	38	22	29	37
S275J0G3	0	28	32	34			
S275J2G3	-20	26	14	35	38	36	29
S355J0	0	29	42	45	43	40	46
S355K2	-20						

6) U kalené a popuštěné nízkolegované oceli je nejvyšší teplota, při které je lomová plocha



Charpyho zkušebních těles s V-vrubem tvořena jen transkrystalickým štěpným lomem -50°C a hodnota nárazové práce $KV = 15\text{ J}$. Nejnižší teplota, při které je u této oceli lomová plocha tvořena tvárným lomem je 10°C a nárazová práce je 120 J . Procento štěpného lomu na lomové ploše i hodnota nárazové práce KV se v rozmezí teplot -50°C až 10°C mění lineárně. Vypočítejte nárazovou práci Charpyho zkušebního tělesa při teplotě nulové houževnatosti t_{NDT} . Jako kritérium pro stanovení teploty nulové houževnatosti použijte teplotu, při které je lomová plocha tvořena z 85 % štěpným

lomem. (Omluva pozorným studentům – v obrázku je chybně uvedeno % křehkého lomu a má být % štěpného lomu – v rámci diskuse k příkladu zdůvodněte proč se v souvislosti se vzhledem lomové plochy nemá používat termín křehký).

8) Šroub z oceli o modulu pružnosti $E = 210\text{ GPa}$ drží při sobě dvě ocelové desky. Tento spoj je podroben působení zvýšené teploty $T = 400^{\circ}\text{C}$. Experimenty ukázaly, že rychlost deformace oceli, ze které je šroub vyroben, má při teplotě $T = 400^{\circ}\text{C}$ tvar $\dot{\epsilon} = A\sigma^n$, kde A je konstanta a $n = 3$. Šroub je při výrobě spoje zatížen tahovým napětím $\sigma_0 = 70\text{ MPa}$. Jaké je napětí σ_1 ve šroubu po jednom roce provozu, když ocel ze které je šroub vyroben, vykazuje v laboratorních podmínkách při napětí $\sigma = 30\text{ MPa}$ a teplotě 400°C rychlost deformace $\dot{\epsilon} = 2,8 \cdot 10^{-8}\text{ hod}^{-1}$.

Literatura

- [1] KRATOCHVÍL,P., LUKÁČ,P., SPRUŠIL,B., Úvod do fyziky kovů I, SNTL, Alfa, Praha 1984, 243 s.
- [2] VELES,P., Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, ALFA, SNTL, Bratislava 1985, 345 s.
- [3] The Basics of Testing Plastics, ed. S.B. Drickoll, ASTM Manual Series ML 35, ISBN 0-8031-2079-6; 1998, 64 s.
- [4] Mechanical Testing, Metals Handbook, Vol.8; ASM 1985, 778 s.