



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Teorie v praxi



CZ.1.07/1.1.22/02.0006

Destruktivní a nedestruktivní zkoušení materiálů

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

Obsah

1. Úvod – základní vlastnosti materiálů a jejich zjišťování	3
2. Destruktivní zkoušky	4
2.1. Zkoušky mechanických vlastností	4
2.1.1. Zkoušky tvrdosti	5
2.1.2. Zkoušky pevnosti	14
2.1.3. Zkoušky houževnatosti	26
2.1.5. Zkoušky mechanických vlastností za nízkých a vysokých teplot	32
2.2. Zkoušky technologických vlastností	34
2.2.1. Zkoušky tvařitelnosti	34
2.2.2. Zkoušky svařitelnosti	52
2.2.3. Zkoušky slévateľnosti	53
2.2.4. Zkoušky obrobitelnosti	54
2.2.5. Zkoušky prokalitelnosti	54
2.2.6. Zkoušky klimatické a korozní odolnosti	56
2.2.7. Zkoušky odolnosti proti opotřebení	56
3. Nedestruktivní zkoušky	57
3.1. Nedestruktivní defektoskopie	57
3.3. Nedestruktivní strukturoskopie	68
4. Ostatní zkoušky	68
5. Literatura	70

1. Úvod – základní vlastnosti materiálů a jejich zjišťování

Materiály mají **nejrozmanitější vlastnosti**, které jsou **dány** především jejich **chemickým složením a strukturou**. V praxi se dělí na vlastnosti:

- **fyzikální** (souvisí hlavně s krystalickou stavbou - hustota, elektrická a tepelná vodivost, magnetické vlastnosti ap.)
- **chemické** (elektrochemické, korozní ap.)
- **mechanické** (nejdůležitější u konstrukčních materiálů; pružnost, pevnost, houževnatost, tvrdost, plasticita, tečení, únava ap.)
- **technologické** (tvárnost, slévatelnost, obrobitelnost, svařitelnost ap.)

Výběr materiálu pro výrobu různých součástí, konstrukcí a zařízení je **založen na znalosti těchto vlastností**. Potřebujeme materiál pevný nebo tvárný? Bude na součást působit velká síla? V jakém prostředí bude použita? Jaká bude cena součásti? Po zjištění nejdůležitějších vlastností lze vybrat vhodný materiál.

Vlastnosti se číselně vyjadřují materiálovými charakteristikami. Ty získáváme při zkouškách materiálu. Zkoušky se dělí do mnoha oborů podle druhu vlastností, které chceme zjistit - mechanické zkoušky, zkoušky fyzikálních vlastností, technologické zkoušky, zkoumání struktury a chemického složení. K tomu se určeno nepřeberné množství metod a postupů měření, které využívají známé závislosti mezi strukturou, vnitřní stavbou či chemickým složením a vlastnostmi – např. zatěžování součástí různými druhy namáhání, odraz/lom různých druhů vlnění, chování v magnetickém poli atd. Metody mohou být destruktivní (vzorek/součást se zkoušením poškodí nebo zničí) i nedestruktivní (bez porušení materiálu – tedy např. na fungujících součástech).



Obr.1. Schema znázorňující oblasti využití materiálových zkoušek.

Význam zkoušení:

- 1) **pro konstrukci a výpočty** součástí – dimenzování, volba materiálu ...
- 2) **pro výrobu a provoz** součástí – kontrola kvality materiálu, kontrola výrobní a provozní degradace materiálu, analýza materiálu při havárii.

2. Destruktivní zkoušky

V průběhu destruktivních zkoušek dochází zpravidla nějakým způsobem k poškození nebo zničení (destrukci) zkoušeného předmětu. Pro destruktivní zkoušky se zpravidla používají normalizované vzorky (často s daným tvarem a rozměry), aby bylo možné následně vypočítat z naměřených veličin další hodnoty (např. při zkoušce tahem se z maximální naměřené síly a průřezu vzorku určuje pevnost v tahu). Při použití normalizovaných vzorků je také možné mezi sebou porovnávat různé materiály. Destruktivně se zkoušejí především vlastnosti mechanické a technologické.

2.1. Zkoušky mechanických vlastností

Mechanickými vlastnostmi se hodnotí chování materiálu při působení vnějších mechanických sil. Mezi základní mechanické vlastnosti patří pružnost, pevnost, tvárnost (plasticita) či houževnatost, zatímco další vlastnosti jako tvrdost, odolnost proti únavě či odolnost proti tečení jsou považovány za odvozené od těchto základních při určitých podmínkách namáhání.

Pružnost je schopnost materiálu vykazovat před porušením pružnou deformaci. K jejímu vyhodnocení se obvykle používá modul pružnosti, mez pružnosti a energie elastické napjatosti.

Pevnost je odpor materiálu proti deformaci a porušení vnějšími silami. Podle způsobu namáhání se rozlišuje pevnost v tahu, tlaku, ohybu, krutu, střihu, ale uvádí se i pevnost v tečení nebo při únavě. Podle fyzikální povahy veličin, kterými pevnost definujeme, rozlišujeme tři druhy pevnosti:

- *Smluvní pevnost* je dána podílem maximální síly a počáteční plochy průřezu. Sice nemá fyzikální podstatu, ale je výhodná především při konstrukčních výpočtech a zkoušení materiálu.

- *Skutečná pevnost* je skutečné napětí v okamžiku lomu a vyjadřuje odolnost materiálu proti porušení.

- *Teoretická (ideální) lomová pevnost* závisí na krystalografické stavbě a určuje odolnost proti porušení odtržením v pružném stavu.

Plasticita (tvárnost) je schopnost materiálu zachovat trvalé deformace vyvolané účinkem vnějších sil. Měřítkem plasticity bývá velikost poměrné trvalé deformace před porušením.

Houževnatost je schopnost materiálu odolávat bez porušení velkým napětím a je tedy závislá na pevnosti a plasticitě. Měřítkem houževnatosti bývá nejčastěji práce spotřebovaná na deformaci a porušení, ale také např. hodnota lomové houževnatosti. [1], [3], [8]

2.1.1. Zkoušky tvrdosti

Tvrdość patří mezi mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálu při působení vnějších sil. Tvrdość je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností, charakterizujících materiál - s určitým omezením lze podle tvrdosti posuzovat chování materiálu při jiném způsobu namáhání. Pro konstrukční materiály má tedy tvrdost obrovský technický i praktický význam. Je však obtížné tvrdost přesně a jednoduše popsat, protože závisí na komplexních vlastnostech zkoušeného vzorku a také na zkušebních podmínkách, při kterých je měření prováděno. Tvrdość je nejčastěji definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Aby se dala hodnota tvrdosti vyjádřit číselně a tvrdosti jednotlivých materiálů se tak daly mezi sebou porovnávat, má vnikací těleso (indentor) při zkouškách tvrdosti danou geometrii (tvar a rozměry) a dána je i teplota zkoušky, použité zatížení a další podmínky. [2], [8], [9]

V principu existují 3 typy zkoušek tvrdosti:

- vnikací
- vrypové
- odrazové

Zkoušky vnikací (indentační) jsou používány především u kovů a keramiky, jejich princip spočívá v tom, že vnikací tělísko – tzv. indentor je zamáčknut do materiálu tak, aby došlo k plastické (trvalé) deformaci materiálu. Následně se měří plocha nebo hloubka vtisku a podle ní se posuzuje tvrdost materiálu. V praxi se používají metody podle Brinella, Vickerse, Rockwella, Knoop a či Berkoviche, lišící se od sebe především tvarem indentoru. [2], [8], [9]

Zkoušky vrypové jsou založeny na myšlence Mohsovy stupnice pro zkoušení minerálů. V této stupnici je seřazeno 10 nerostů, z nichž každý následující je schopen vyrýt do všech předcházejících vryp. Citlivost této stupnice je však velmi malá, proto se u technických materiálů určuje jejich tvrdost na základě šířky vytvořeného vrypu. V praxi se používá metoda podle Martense. Protože způsob zjišťování tvrdosti vrypovou metodou je velmi nepřesný, dnes se už využívá jen pro tvrdé a křehké materiály (sklo, porcelán aj.), příp. s menší úpravou pro zkoušení adheze velmi tvrdých a tenkých povlaků kovů (př. TiC, TiN), jako tzv. *scratch test*. [2], [8], [9]

Zkoušky odrazové jsou založeny na principu pružného odrazu zkušebního tělíska od povrchu materiálu. Zkušební tělísko (závaží) které je spuštěno z dané výšky a posuzuje se výška odskoku od materiálu. Tyto zkoušky jsou určeny především pro hodnocení pryží a plastů, či např. kalených vrstev a také pro velké výrobky a konstrukce, protože měřící zařízení založená na tomto principu mohou být i velmi malá, tudíž přenosná. V praxi se používá tzv. Shoreho metoda. [2], [8], [9]

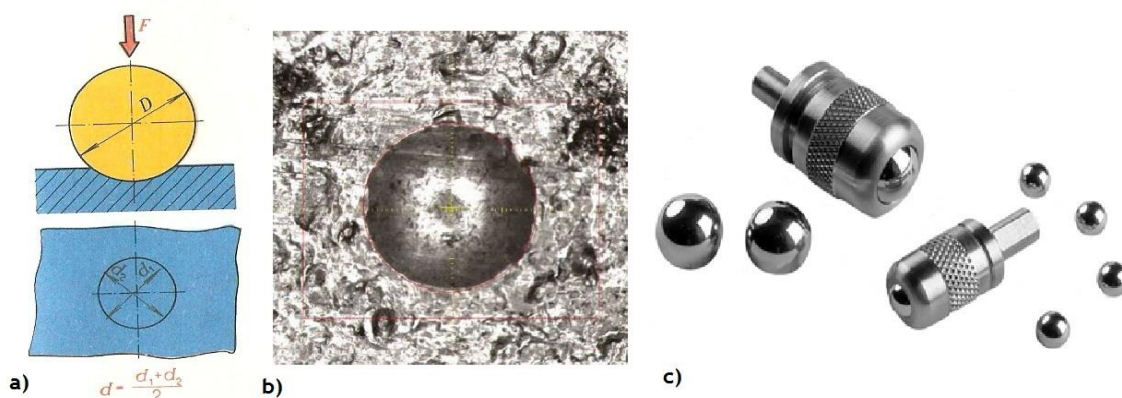
Zkouška podle Brinella (ČSN 42 0371)

Tvrдост podle Brinella [HB] se zjišťuje vtlačováním kuličky o průměru $D[mm]$ zvětšující se silou $F[N]$ po čas $t[s]$ do povrchu zkušebního vzorku nebo zkoušené součásti. Mírou tvrdosti je průměr vtisku $d[mm]$ po odlehčení, který se změří dvakrát (kolmo na sebe), aby se vyloučily chyby v nepřesnosti vtisku.

Tvrдост HB se pak počítá jako poměr zatěžující síly a plochy vtisku:

$$HB = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \left[kp.mm^{-2} \right] \quad (1)$$

Pro praktickou potřebu jsou však sestaveny **tabulky**, ve kterých lze podle průměru vtisku a velikosti použité síly odpovídající tvrdost odečíst. [1], [2]



Obr.2. Zkouška tvrdosti podle Brinella; a) princip [2], b) vtisk [8], c) Brinellovy indentory [12].

Pro materiály do 450 HB se jako vnikací těleso používají kalené ocelové kuličky, pro materiály s předpokládanou vyšší tvrdostí do 650 HB pak kuličky ze slinutých karbidů. Průměr kuličky závisí na tloušťce t měřeného materiálu, je to zpravidla 1, 2, 2,5, 5 nebo 10 mm. Platí, že minimální tloušťka materiálu by měla být desetinásobkem hloubky vtisku. V opačném případě by se mohla projevit tvrdost podložky.

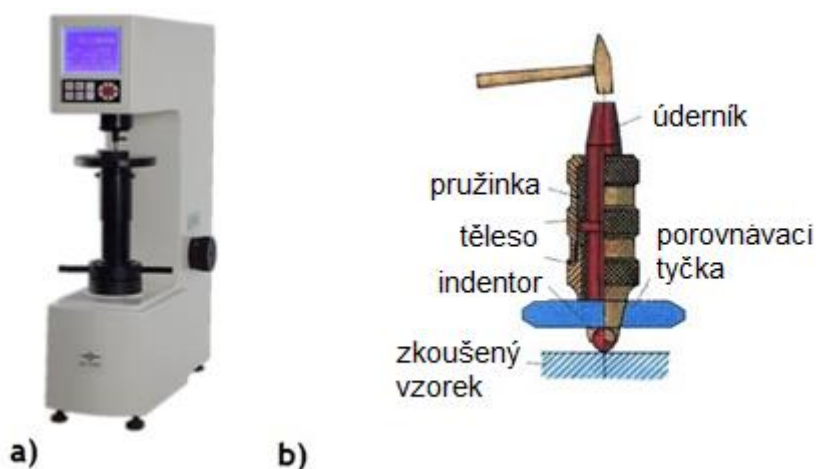
Doba působení síly závisí na struktuře materiálu. Měkčí materiály se zatěžují delší dobu. U slitin železa je zatížení od 10 do 15 s. U neželezných kovů od 10 do 180 s.

Označení tvrdosti se skládá ze značky tvrdosti HB a údajů o podmínkách zkoušky, tj. průměru kuličky, zatížení a době zatížení. Tyto údaje jsou od sebe odděleny lomítky (např. HB 10/29 430/30=400). Pro běžné podmínky (10/29 430/10) se používá jen označení HB (např. HB=210, resp. 210 HB).

Přesnost zkoušky závisí na na správném změření průměru vtisku. U zkoušky podle Brinella je přesné proměření obtížné. Další nepřesnosti způsobuje deformace indentoru (proto je potřeba použít pro tvrdší materiály tvrdší kuličku, příp. volit metodu s větším rozsahem měřených tvrdostí). U kovových materiálů existuje vztah mezi tvrdostí HB a pevností v tahu R_m :

$$R_m \approx (3,1 \div 4,1)HB \quad (2)$$

Brinellův tvrdoměr má různou velikost a provedení. V laboratořích existují velké stabilní přístroje, často umožňující použít další typy indentorů (viz obr. 3a). Pro malé dílny, sklady, montáže nebo pro zkušební účely na stavbách byly zkonstruovány malé jednoduché přístroje. Nejpoužívanější z nich je ruční přenosný (kapesní) **tvrdoměr Poldi (viz obr. 3b)**. Principem tohoto tvrdoměru je porovnání známé pevnosti materiálu porovnávací tyčinky s pevností zkoušeného materiálu. Pracuje se s ním tak, že tvrdoměr přiložíme ke zkoušenému předmětu a kladívkem udeříme na úderník. Ocelová kulička se úderem kladívka zatlačí do zkoušeného materiálu a vytvoří v něm vtisk. Zároveň se však kulička vtiskne i do porovnávací tyčinky. Lupou se změří průměry vtisků na zkoušeném materiálu i na porovnávací tyči. V tabulkách, které jsou ke každému tvrdoměru přiloženy, vyhledáme příslušné číslo tvrdosti podle velikosti vtisku. [1], [2], [3], [4]



Obr.3. Brinellovy tvrdoměry; a) stabilní [8], b) přenosný [2].

Zkouška podle Vickerse (ČSN 42 0374)

Tvrdost podle Vickerse [HV] se zjišťuje vtlačováním diamantového čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136° zvětšující se silou $F[N]$ po dobu $t[s]$ do lesklé rovné plochy zkušebního vzorku nebo zkoušené součásti. Měřítkem tvrdosti je střední délka úhlopříčky vtisku $u[mm]$ po odlehčení, které se odečítají pod mikroskopem.

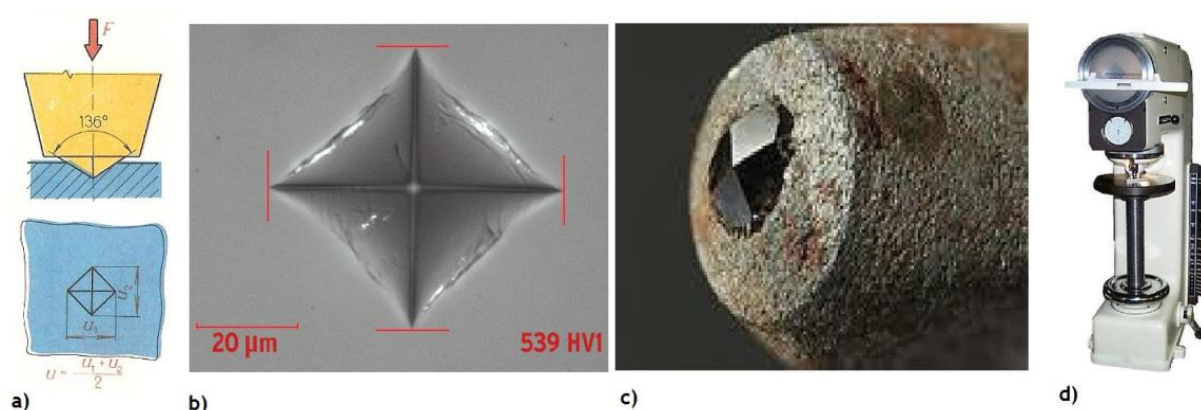
Tvrdość HV se pak počítá jako poměr zátěžné síly a plochy vtisku:

$$HV = \frac{1,854F}{u^2} [kp.mm^{-2}] \quad (3)$$

Pro praktickou potřebu jsou však sestaveny tabulky, ve kterých lze podle úhlopříčky vtisku a velikosti použité síly odpovídající tvrdość odečíst. [1], [2]

Zkušební zatěžující síla bývá od 10 do 1000 N. Doba zatížení se volí od 10 do 180 s. Použité zatížení píšeme do označení, např. HV_{100} ($HV_{100} = 215$). Pro běžně zkušební zatížení 294 N a dobu od 10 do 15 s se používá označení pouze HV.

Metodu měření tvrdości podle Vickerse lze použít pro všechny rozsahy tvrdości. Metoda je velmi přesná a je minimálně závislá na zatížení. Využívá se tedy i pro měření tzv. mikrotvrdości.

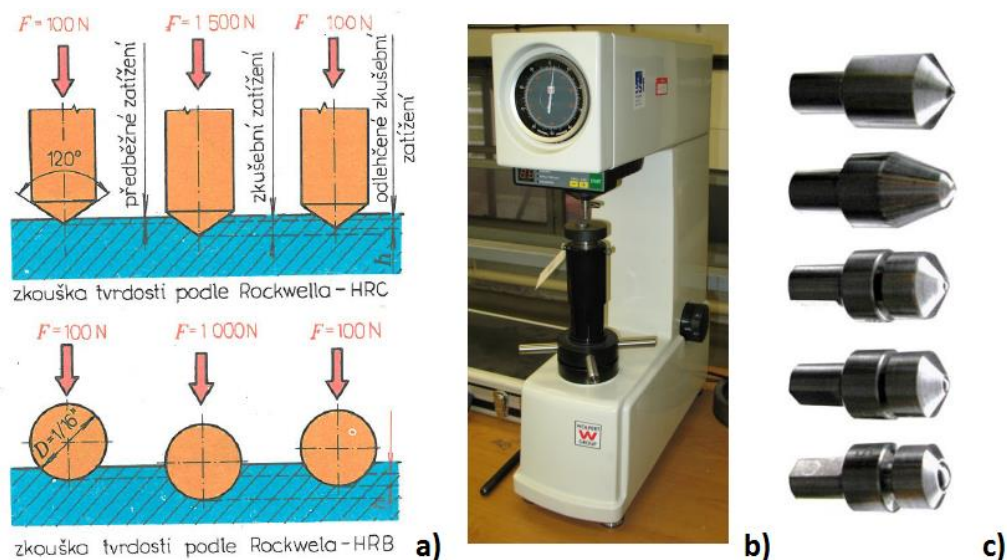


Obr.4. Zkouška tvrdości podle Vickerse;
a) princip [2], b) vtisk, c) Vickersův indentor, d) Vickersův tvrdoměr [12].

Pro kontrolování tvrdości po celou pracovní dobu se používá ve velkých závodech zdokonalených Vickersových tvrdoměrů, tzv. **diatestorů** (viz obr. 4d). Obraz čtvercového vtisku je promítán ve zvětšeném měřítku na matnici. To umožňuje pohodlné a rychlé čtení délky úhlopříčky u . [1], [2], [3]

Zkouška podle Rockwella (ČSN 42 0373)

Tvrdość podle Rockwella [HR] se zjišťuje na Rockwellově tvrdoměru jako **rozdíel hloubky vtisku vnikacího tělesa** (ocelová kulička, diamantový kužel) **mezi dvěma stupni zatížení** (předběžného a celkového). Účelem předběžného zatížení je vyloučit z měřené hloubky nepřesnosti povrchových ploch. **Kužel** má vrcholový úhel **120°** a poloměr kulové části 0,2 mm (HRA, HRC). **Kulička** má průměr **1,5875 mm** (HRB).



Obr.5. Zkouška tvrdosti podle Rockwella;

a) princip [2], b) tvrdoměr Wolpert-Rockwell, c) Rockwellovy indentory [2], [12].

Diamantový kužel nebo ocelová kulička, dotýkající se povrchu zkoušeného předmětu, se nejprve **předběžně zatíží silou 100 N** (výchozí poloha pro měření hloubky vtisku). Potom se **pozvolna zvětšuje zatěžovací síla** tak, aby se za 3 až 6 sekund dosáhlo zatížení předepsané normou (např. předběžné zatížení silou 100 N + zkušební zatížení silou 1400 N = celkové zatížení silou 1500 N). Pak se zatěžující síla **opět zmenšuje až na 100 N** a v tomto stavu se **zjistí přírůstek h hloubky vtisku**, který nastal proti výchozí poloze při 100 N.

Zkouška tvrdosti podle Rockwella je rychlá, snadná a vpichy (důlky) jsou velmi malé (max. hloubka 0,2 mm). Je vhodná pro běžnou kontrolu velkých sérií výrobků (jako dílenské měření) a tam, kde HB již není použitelná.

V ČR jsou normalizovány tři zkoušky tvrdosti podle Rockwella. Tvrdost zjištěnou při těchto zkouškách označujeme **HRA, HRB, HRC**. **Volba Rockwellovy stupnice** (tj. druhu vnikacího tělíska) **závisí hlavně na předpokládané tvrdosti** zkoušeného materiálu.

HRA - Tvrdost určená diamantovým kuželem při celkovém zatížení 600 N.

Pro slinuté karbidy a tenké povrchové vrstvy.

HRB - Tvrdost určená ocelovou kuličkou (B = ball) při celkovém zatížení 1000 N.

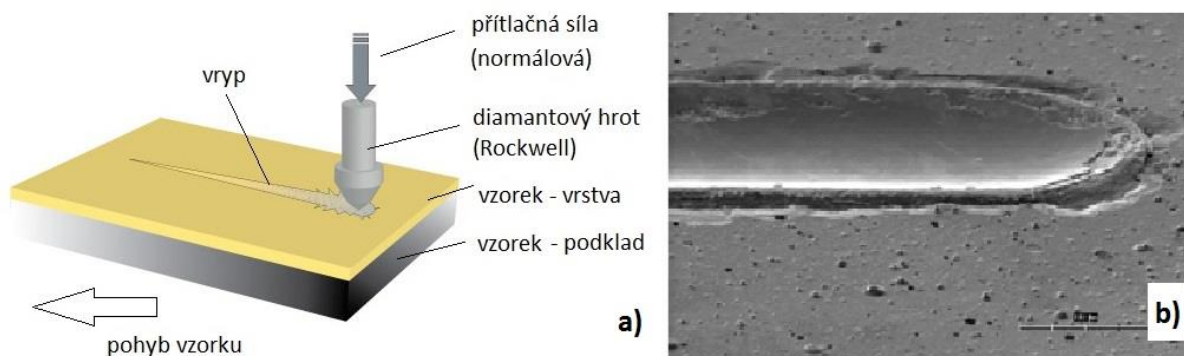
Pro měkké kovy (25 - 100 HRB).

HRC - Tvrdost určená diamantovým kuželem (C = cone) při celkovém zatížení

1500 N. Doporučuje se používat pro rozsah HRC = 20 - 67. Nejběžnější metoda. [1], [2], [3], [9]

Zkouška podle Martense

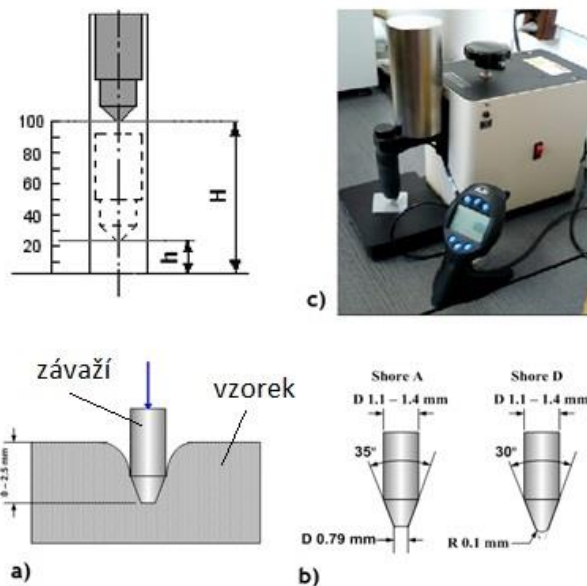
Vrypová tvrdost podle Martense [HMa] se zjišťuje **přítlačováním kuželového diamantového hrotu** s vrcholovým úhlem 90° měnitelným tlakem na leštěný povrch zkušebního předmětu, který se pohybuje danou rychlostí. Kužel lze zatížit silou až 19,8 N. Vytvořený vryp se měří pomocí optického mikroskopu. **Mírou tvrdosti** je pak **síla F** , potřebná ke vzniku **vrypu širokého 0,01 mm**. Jak již bylo uvedeno výše, zkouška se dnes již téměř nepoužívá, jsou však od ní odvozeny zkoušky pro tenké vrstvy – např. tzv. Scratch test (viz obr. 6). [5]



Obr.6. Vrypová zkouška; a) schema uspořádání [11], b) snímek vrypu ze skenovacího elektronového mikroskopu [11], [5].

Shoreho zkouška (ČSN EN ISO 868)

Tvrdost podle Shoreho [HSh] patří mezi dynamické zkoušky, kdy se tvrdost zjišťuje z **velikosti odskoku závaží** (na obr.7a označ. jako h) s vnikacím tělískem (kulička – Shore D, diamantový hrot – Shore A – viz obr. 7b) spuštěného na povrch vzorku z určité výše (na obr.7a označ. jako H). Působením závaží dojde k trvalé deformaci zkoušeného materiálu a ke spotřebování části energie dopadajícího závaží. To se pak neodrazí do původní výšky. **Přístroj pro stanovení tvrdosti podle Shoreho je tzv. Shoreho skleroskop (viz obr. 7c)**. Stupnice skleroskopu udává přímo hodnotu tvrdosti (byla sestavena empiricky). Tvrdost podle Shoreho je značena jako **HSh** za hodnotou tvrdosti (př. 80 HSh). [1], [9]



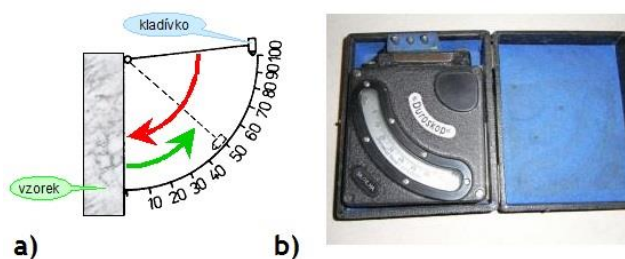
Obr.7. Shoreho metoda; a) princip [8], b) Shoreho skleroskop a tělíska [12], [5]

Tato metoda je oproti jiným způsobům zjišťování tvrdosti značně nepřesná a nespolehlivá.

[1], [9]

Duroskop

Tento přístroj se používá na **měření tvrdosti svislých ploch**. Velikost tvrdosti je vyjádřena pomocí **úhlu odrazu zkušebního tělesa** (kladívka). Výhodou je vyloučení vlivu tření kladívka ve vedení, ke kterému dochází například u Shoreho skleroskopu.



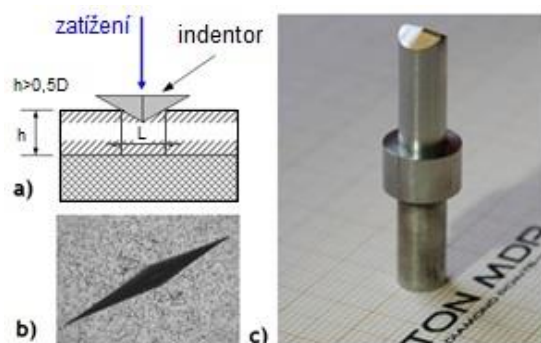
Obr. 8. Duroskop; a) princip [12], b) přístroj [12].

Přístroj (viz obr. 8.) se skládá z kladívka nesoucího na jednom konci ocelovou kuličku, které je umístěno na otočném rameni. Kladívko padá z určitého úhlu na zkoušený předmět a při zpětném odrazu vezme s sebou vlečnou ručičku, která ukáže úhel odrazu kladívka. Dosažená hodnota tvrdosti se obvykle odečítá přímo na stupnici přístroje. Nepřesnost měření tvrdosti duroskopem je (podobně jako u Shoreho skleroskopu) velká. [8], [9]

Zkouška podle Knoop

Tato metoda je **podobná Vickersově**, liší se ale **tvarem indentoru**. Byla vyvinuta v USA v r. 1939. Zkušební tělísko je rovněž **diamantový jehlan**, jeho základnu však není čtverec ale poněkud **protáhlý kosočtverec** - **vtisk má tvar kosočtverce** s poměrem úhlopříček asi 1:7 (viz obr. 9b). U tohoto vtisku se **proměřuje pouze delší úhlopříčka l [mm]**. Tvrdost se určuje podle vztahu:

$$HK = \frac{1,451F}{l^2} [kp.mm^{-2}] \quad (4)$$

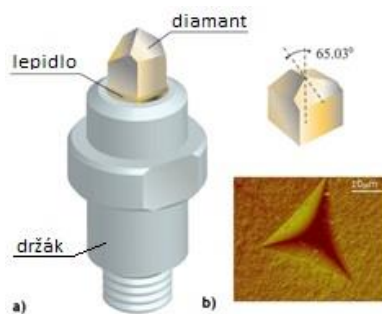


Obr. 9. Zkouška podle Knoop; a) princip [8], b) vtisk [12], c) indentor [12].

Zatížení se volí 1,96, 2,94, 4,9 nebo 9,8 N. Tvrdost podle Knoop se značí jako $HK_{0,2}$, $HK_{0,3}$, $HK_{0,5}$ nebo HK_1 . Výhodou Knoopova indentoru je, že deformace je zdaleka největší u krátké úhlopříčky a v tomto směru je také největší odpružení při odlehčení. Ve směru dlouhé úhlopříčky je naopak zanedbatelné – roste tedy přesnost měření. Další výhodou je, že vtisky lze vytvořit tak, že je možné s velkou přesností změřit tvrdost u úzkých součástí, např. drátů či např. cementovaných vrstev. Vhodná je i pro zaoblené povrchy. [9]

Zkouška podle Berkoviche

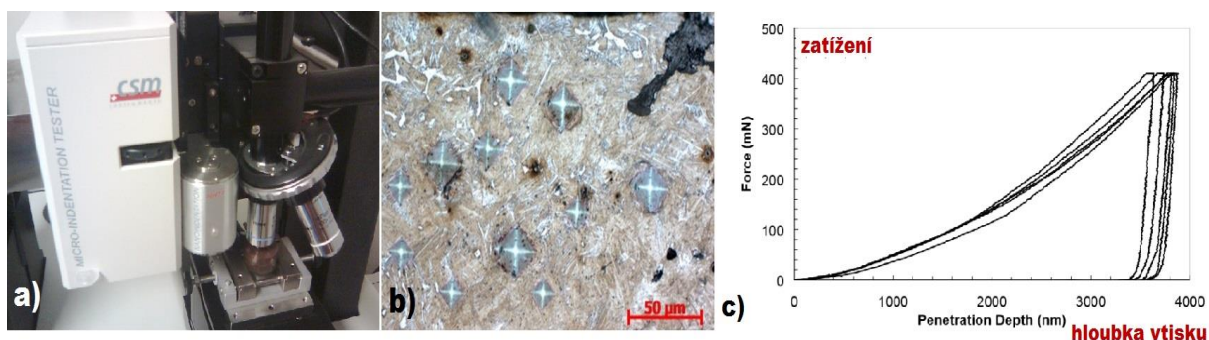
Zkouška podle Berkoviche je další metoda v principu shodná se zkouškou podle Vickerse. Indentorem je v tomto případě pravidelný **diamantový jehlan**, jehož základnu tvoří **rovnostranný trojúhelník**. Vrcholový úhel jehlanu je **65°**. Tato metoda má uplatnění hlavně u **velmi tvrdých materiálů**, např. slinutých karbidů a při měření **nanotvrdosti** – např. v případě tenkých vrstev, kde nesmí hloubka vtisku přesáhnout 10% tloušťky vrstvy. Princip měření mikro a nanotvrdosti je popsán níže. [8], [10]



Obr.10. Berkovichova zkouška; a) indentor [8], b) vtisk [8].

Měření mikro a nanotvrdosti

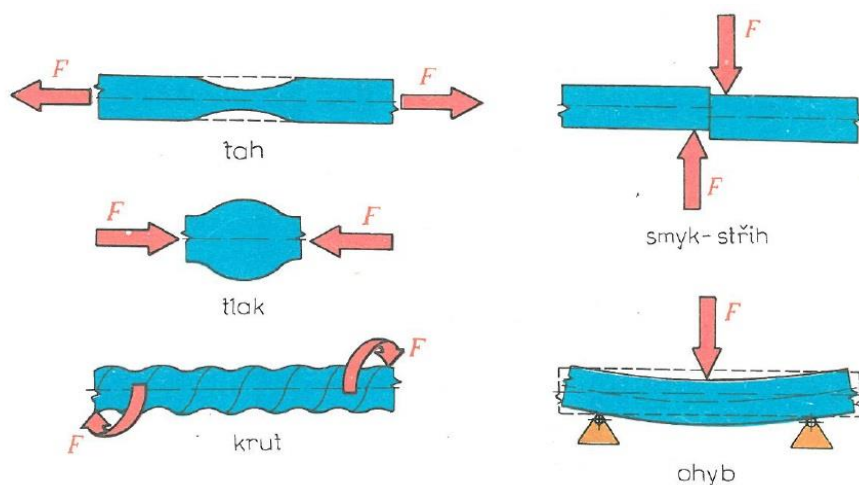
Zkouškou **mikrotvrdosti** se rozumí **měření tvrdosti při velmi malých zatíženích** tak, aby vznikly **vtisky nepatrné velikosti**. Lze tak např. měřit jednotlivé fáze ve struktuře, tenké vrstvy apod. Jako hranice mezi makro a mikrotvrdostí se uvádí zatížení 19,8 N (odp. 1kg). **Nanotvrdost** je termín pro hodnoty tvrdosti zjištěné **při extrémně malých hodnotách zatížení** – až 0,01 gramu. Takto vytvořené vtisky mají často rozměry menší než 100 nm. Mikro a nanotvrdost **nelze měřit obvyklými tvrdoměry**, neboť **vyžaduje** nesrovnatelně **větší přesnost** jak při zatěžování, tak i při proměřování vtisku. K **proměřování vtisku** po mikrotvrdoměru slouží **přesná optika** (v podstatě mikroskop), v případě nanotvrdosti se již úhlopříčky neměří - z hloubky průniku se stanovuje veličina, která se označuje jako tzv. dynamická tvrdost DHV. Ta se určuje ze záznamu zkoušky (síla/hloubka průniku), kterým je tzv. **nanoindentační křivka** (viz obr. 11c). V řadě případů je získaný záznam **využíván k měření dalších mechanických veličin**, např. základních mechanických vlastností včetně modulu pružnosti v tahu, lomové houževnatosti křehkých materiálů atd. Pro měření mikrotvrdosti se mohou použít metody Vickersova, Knoopova či Berkovichova, pro měření nanotvrdosti se využívá obvykle metoda Berkovichova. Podle použitého zatížení se mikro/nanotvrdost značí např. $HV_{0,05}$ ($F=0,49\text{ N} = 50\text{g}$). [1], [8], [10]



Obr. 11. Měření mikrotvrdosti; a) mikro-nanotvrdoměr, b) vtisky po měření mikrotvrdosti, c) nanoindentační křivka.

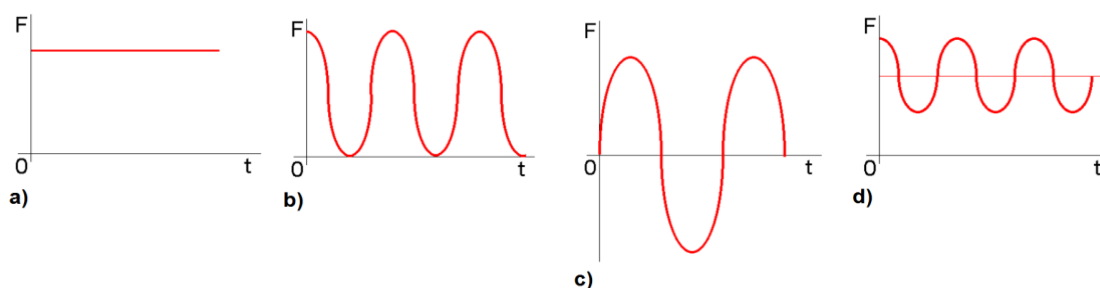
2.1.2. Zkoušky pevnosti

Při zpracovávání i při použití jsou materiály vystaveny různým způsobům namáhání, jako je tah, tlak, krut, střih a ohyb (viz obr. 12). Tato namáhání obvykle nepůsobí jednotlivě, ale naopak působí většinou současně jako kombinace dvou i více druhů namáhání. Aby jim materiál mohl odolávat, musí mít určité vlastnosti, z nichž nejdůležitější je bezesporu pevnost, která patří mezi mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti vyjadřují chování materiálu právě při působení vnějších sil (namáhání). [1]



Obr.12. Základní druhy mechanického namáhání; a) tah, b) tlak, c) krut, d) střih, e) ohyb. [2]

Kromě velikosti a druhu namáhání je nutné brát v úvahu i tzv. časový průběh namáhání, tj. zda je součást zatěžována pozvolna bez rázu - staticky, nebo dynamicky (zatěžování střídavé, mívivé, tepavé...) – viz obr. 13. Proto se zkoušky mechanických vlastností dělí mj. i na statické a dynamické právě podle tohoto časového průběhu namáhání.



Obr.13. Časové průběhy mechanického namáhání; a) namáhání statické, b) namáhání dynamické – mívivé, dynamické – střídavé (cyklické), c) dynamické - tepavé. [8]

Dále má na mechanické vlastnosti a tedy i na pevnost vliv teplota – při určitých teplotách se totiž mění krystalická struktura materiálů (před. za vysokých teplot) nebo se skokově mění

vlastnosti (viz tzv. houževnato-křehký přechod, většinou za nízkých teplot). Při zkoušení jednotlivých mechanických vlastností, zvláště pak pevnosti, je tedy velmi důležité brát v potaz teplotu, za které byla zkouška prováděna – rozlišují se zkoušky za normálních teplot, za nízkých teplot a za vysokých teplot. Napodobuje se tak např. namáhání součástí pracujících v mrazu (př. potrubí...) nebo naopak při vysokých teplotách (př. součásti motorů...). [1]

Zkouška tahem

Statická zkouška tahem spočívá v deformaci zkušební tyče tahovým zatížením na univerzálním trhačím stroji, obvykle do přetržení. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí od 10 do 35 °C, ale výjimkou nejsou ani zkoušky za vysokých, popř. za nízkých teplot, prováděné s pomocí teplotní komory. Z výsledků zkoušky tahem jsou stanoveny dvě tzv. napěťové a dvě deformační charakteristiky – celkem tedy čtyři základní normované mechanické vlastnosti:

- Smluvní mez pevnosti v tahu R_m [MPa] – smluvní napětí, odpovídající největšímu zatížení $F_{max}=F_m$ které předchází přetržení zkušební tyče.
- Smluvní mez kluzu v tahu R_e [MPa] nebo $R_{p0,2}$ [MPa] – nejmenší napětí, které způsobí počátek výrazných trvalých deformací zkušební tyče (u houževnatých materiál je překročení meze kluzu doprovázeno tvorbou tzv. krčku). V tahovém diagram $F-\Delta L$ ($R-\epsilon$) se projevuje buď jako výrazný skok (houževnaté materiály – R_e , R_{eH} , R_{eD}) nebo nevýrazný sklon křivky (křehké materiály – $R_{p0,2}$).
- Tažnost A [%] – poměrné prodloužení délky v %.
- Kontrakce Z [%] – poměrné zúžení průřezu v %.

Napěťovými charakteristikami jsou mez pevnosti a mez kluzu, deformačními charakteristikami tažnost a kontrakce. Výpočet z výchozích a naměřených parametrů:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [\text{MPa}] \quad (1) \quad R_e = \frac{F_e}{S_0} [\text{MPa}] \quad (5)$$

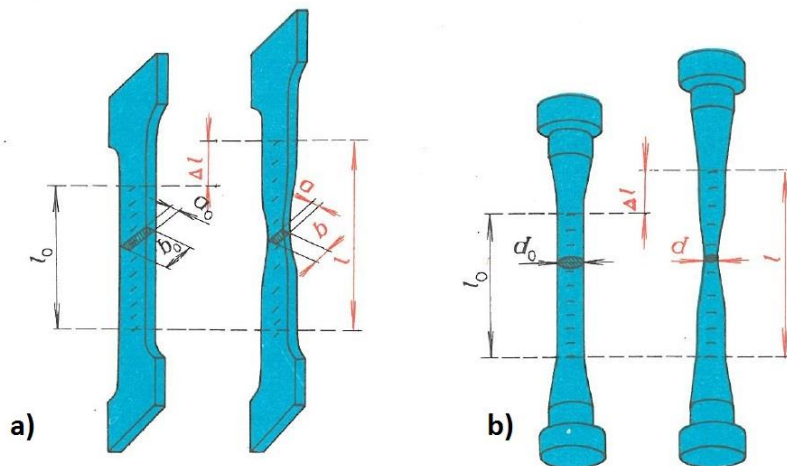
$$A = \epsilon_u = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (6)$$

$$Z = \psi_u = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 [\%] \quad (7)$$

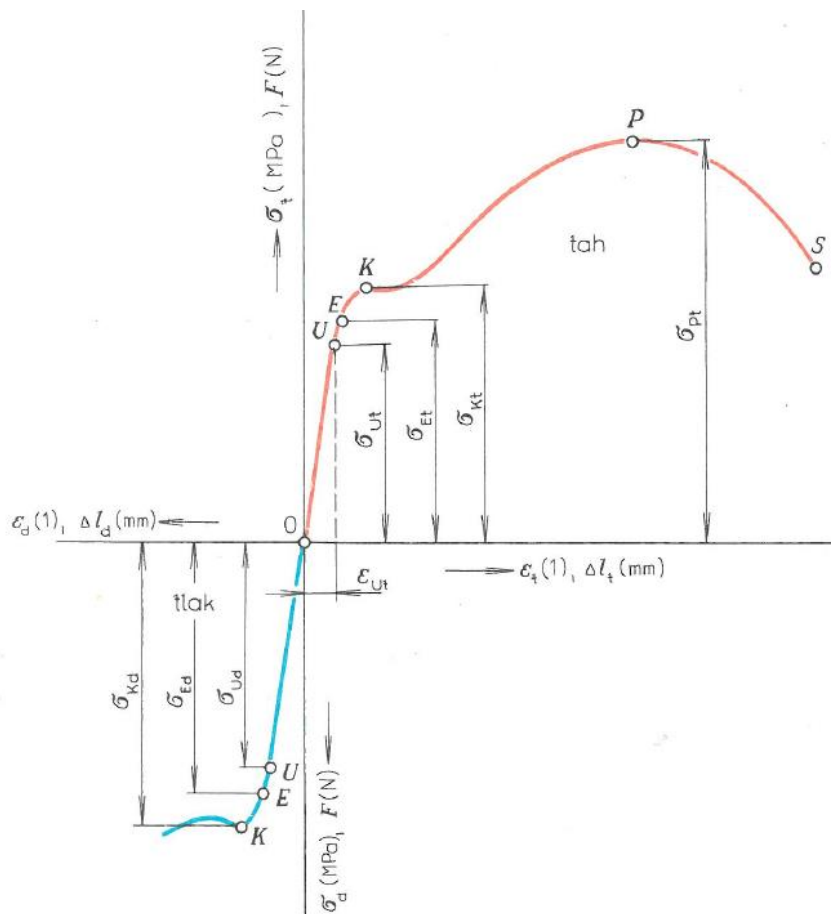
Kde je:

F_m	<i>síla na mezi pevnosti [N]</i>
F_e	<i>síla na mezi kluzu [N]</i>
S_0	<i>počáteční plocha průřezu zkušební tyče [mm²]</i>
S	<i>plocha průřezu zkušební tyče po přetržení [mm²]</i>
L_0	<i>počáteční délka zkušební tyče [mm]</i>
L_u	<i>délka zkušební tyče po přetržení [mm]</i>

Zkušební tyče pro zkoušku tahem mohou být ploché nebo kruhové, s válcovou nebo závitovou hlavou, krátké nebo dlouhé. Na tyčích se vždy vyznačuje počáteční délka L_0 a zjišťuje se počáteční průřez S_0 . Po přetržení se obě poloviny tyče přiloží k sobě a měří se délka a průřez tyče po přetržení (L , S). Přetrhne-li se tyč mimo vyznačenou počáteční délku, zkouška je neplatná. [1], [2], [5], [8], [9]



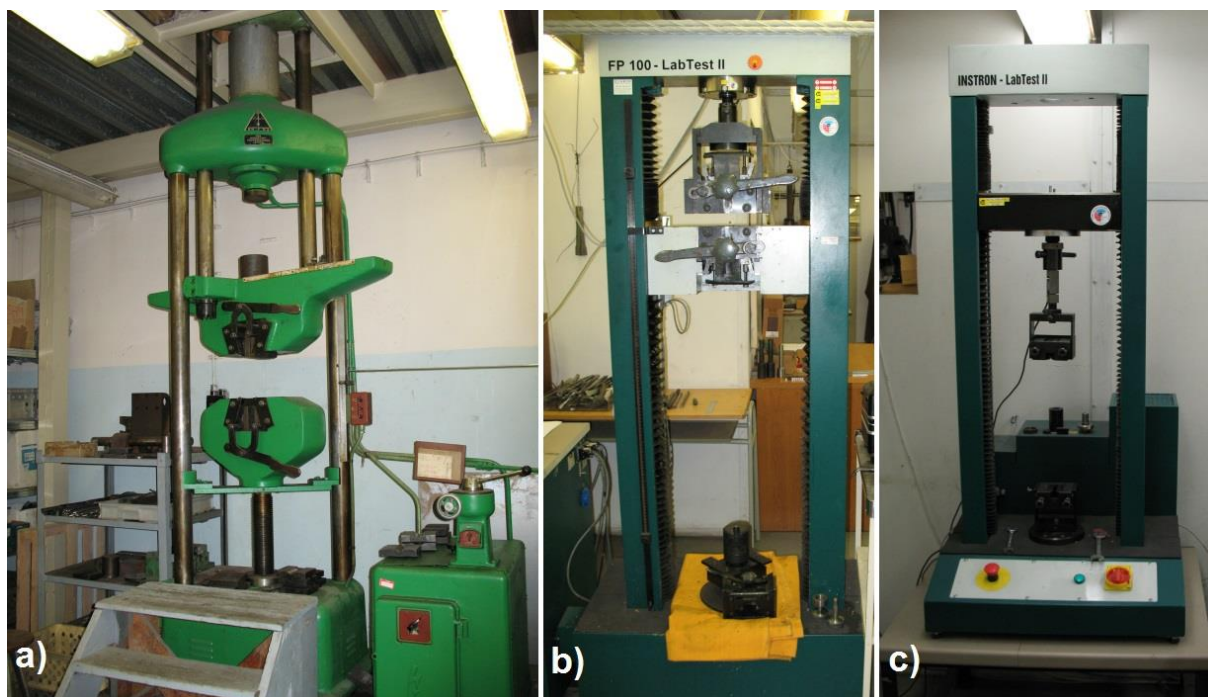
Obr.14. Zkušební tyče pro zkoušku tahem; a) ploché, b) kruhové. [2]



Obr.15. Smluvní diagram zkoušky tahem/tlakem. [2]

Diagramy ze zkoušky tahem jsou tři – pracovní, smluvní a skutečný. Pracovní diagram je diagram, který kreslí v průběhu zkoušky zkušební zařízení. Jedná se o závislost absolutního prodloužení měřené délky zkušebního tělesa na zátěžné síle. Smluvní diagram je závislostí smluvního napětí na poměrném prodloužení. Skutečný diagram je diagram závislosti skutečného napětí na logaritmickém prodloužení.

Zkouší se na univerzálních trhacích strojích (viz obr.16) s různými rozsahy zátěžných sil – dle druhu materiálu. Pro upnutí různých typů vzorků lze použít mnoha druhů čelistí – ploché, vroubkované, vlnité, závitové apod. Čelisti jsou umístěny vždy proti sobě na pevné části stroje a na tzv. příčníku, který je pohyblivý.



Obr.16. Univerzální trhačí stroje pro zkoušky tahem, tlakem a ohybem (zleva): a) pro max. zatížení 500 kN, b) pro max zatížení 100 kN, pro maximální zatížení 5 kN.

Pro měření malých deformací, většinou při určování smluvní meze pružnosti $Rp_{0,005}$ [MPa], smluvní meze kluzu $Rp_{0,2}$ či modulu pružnosti v tahu E [MPa] je nutné využít tzv. průtahoměrů (extenzometrů). Jsou to přesné přístroje, které se upínají přímo na zkušební tyč a zaznamenávají okamžité prodloužení, které vzniká při jejím zatěžování. Smluvní mez pružnosti $Rp_{0,005}$ je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti $0,005\%L_0$. Smluvní mez kluzu $Rp_{0,2}$ je napětí, které způsobí trvalou deformaci o velikosti $0,2\%L_0$. Modul pružnosti v tahu E geometricky odpovídá směrnici přímkové části diagramu. Tento počáteční přímkový úsek diagramu přísluší pružné deformaci a vyjadřuje úměrnost mezi napětím a deformací podle Hookova zákona $R=E*\epsilon_{el}$ [MPa]. [2], [5], [8]

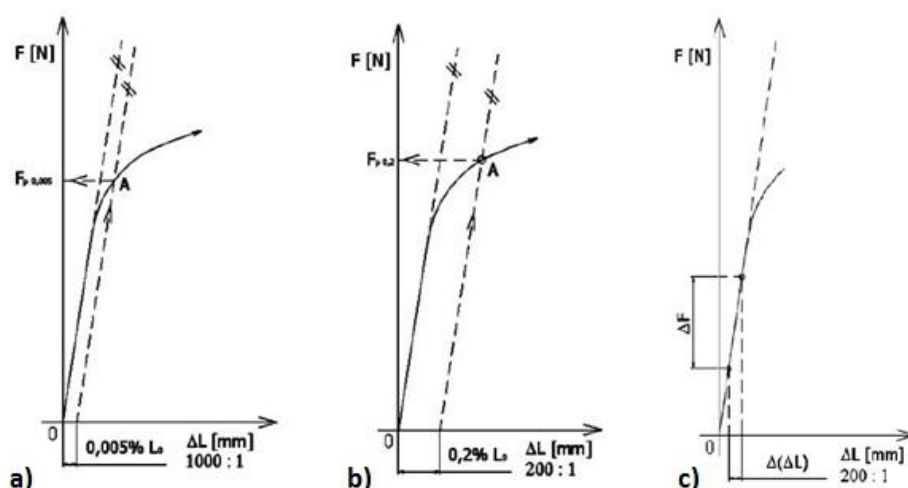
$$Rp_{0,005} = \frac{Fp_{0,005}}{S_0} [MPa] \quad (8)$$

$$Rp_{0,2} = \frac{Fp_{0,2}}{S_0} [MPa] \quad (9)$$

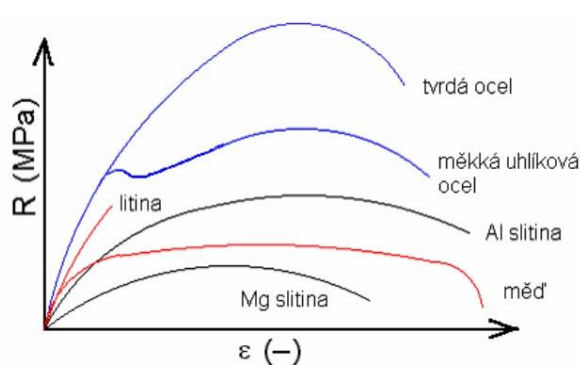
$$E = \tan \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta \epsilon_{el}} = \frac{\frac{\Delta F}{S_0}}{\frac{\Delta(\Delta L)}{L_0}} [MPa] \quad (10)$$

Kde je:

$F_{p0,005}$	<i>síla na mezi pružnosti $R_{p0,005}$</i>
$F_{p0,02}$	<i>síla na mezi kluzu $R_{p0,2}$</i>
ΔL	<i>změna délky zkušební tyče</i>
ΔF	<i>změna zatěžující síly</i>
ΔR	<i>změna napětí</i>
$\Delta \varepsilon_{el}$	<i>změn elastické deformace</i>



Obr.17. Určení a) smluvní meze pružnosti $R_{p0,005}$, b) smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ a c) modulu pružnosti v tahu E . [8]



Obr.18. Smluvní diagramy ze zkoušky tahem různých kovů a slitin. [8]

Zkouška tlakem

Při tlakové zkoušce působí síla v ose zkušebního tělesa, ale má opačný smysl než při zkoušce tahem, viz obr. 15 dole. [1], [4]

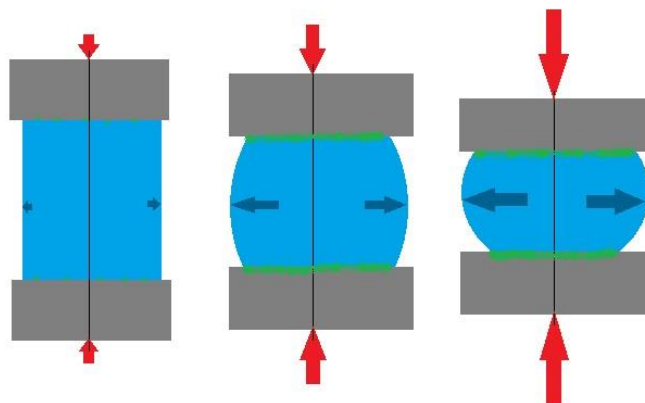
Tato zkouška má význam hlavně pro hodnocení křehkých materiálů a materiálů namáhaných na tlak, jako jsou např. stavební hmoty, ložiskové kovy, litiny, vrstvené tvrzené hmoty,

keramika atd. U ocelí obvykle zkouška nebývá nutná, neboť hodnoty meze kluzu a meze úměrnosti jsou v tahu i tlaku přibližně stejné. Až po mez pružnosti je stlačení pružné a po odlehčení nabývá zkušební těleso své původní velikosti. Tyto pružné změny jsou obdobné jako u zkoušky tahem a měří se přesnými průtahoměry. Až po mez úměrnosti platí (v případě houževnatého materiálu) Hookův zákon, z něhož lze stanovit modul pružnosti v tlaku. Po překročení meze kluzu v tlaku nastává, vlivem zpevnění po plastické deformaci, vzrůst odolnosti materiálu proti tlaku, které se projeví na průběhu křivky napětí. U měkkých a tvárných materiálů je zpevnění nepatrné, takže se zkušební těleso stlačí, aniž by bylo možno určit okamžik, kdy nastalo porušení. U těchto materiálů se zkouška provádí jen po napětí přesahující jen málo mez kluzu. Pevnost v tlaku lze tedy určit jen pro křehké materiály, neboť u měkkých a tvárných nelze určit okamžik porušení. [1], [4]

U křehkých materiálů lze zjistit pevnost v tlaku dle vztahu (11). V tomto vztahu je průřez považován za konstantní veličinu, ve skutečnosti se však průřez během zatěžování zvětšuje. Jedná se tedy pouze o smluvní, nikoli o skutečné napětí. [1], [4]

$$Rm_d = \frac{F_{\max}}{S_0} [\text{MPa}] \quad (11)$$

Zkušební tělesa mívají obvykle tvar válečku. Pro zkoušení kamene, betonu, dřeva apod. pak mají tvar krychle. Při zkoušce tlakem musí být zajištěno, aby síla procházela osou zkušebního tělesa. Při stlačování mezi rovnými plochami síla není rovnoměrně rozložena po celém průřezu - třením mezi čely vzorku a tlačnými deskami je zabráněno bočnímu roztahování vzorku a zkušební těleso nabývá soudkovitého tvaru – viz obr. 19. [8]

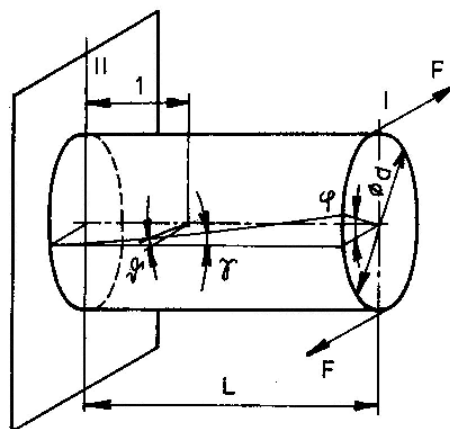


Obr.19. Ilustrace postupné deformace zkušebního tělesa při zkoušce tlakem, vznik soudkovitosti.

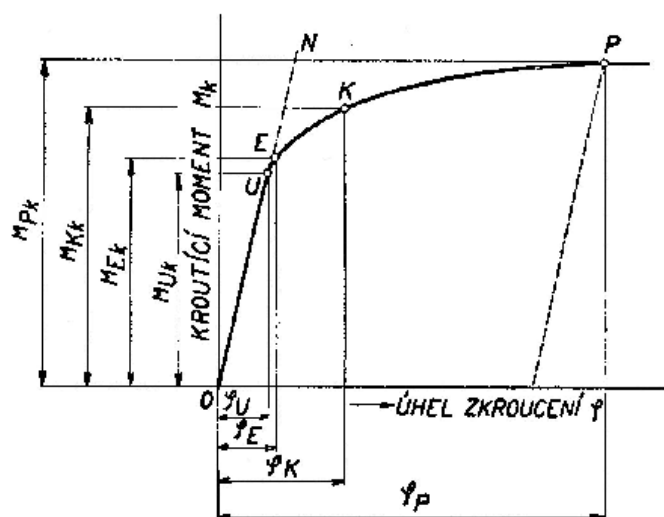
Zkouška krutem

Zkouška krutem odpovídá namáhání, kterému je v praxi vystavena řada strojních součástí jako jsou hřídele, torzní tyče, dráty apod. Podmínky zkoušky a její vyhodnocení nejsou předepsány českými normami. Zkouška krutem se provádí na zvláštních strojích, kde se

kruhová zkušební tyč na jednom konci pevně upne a na druhém, volném konci se zatěžuje dvojicí sil (kroutícím momentem) až do porušení. Schéma zkoušky krutem je na obr. 20.



Obr.20. Schéma zkoušky krutem. [8]



Obr.21. Diagram zkoušky v krutu (houževnatý materiál). [8]

V průřezu tyče vznikají při tomto namáhání smyková napětí R_k . Osa tyče je neutrální osou, na níž je smykové napětí nulové. Největšího napětí se dosáhne v okrajových vláknech zkušební tyče kruhového průřezu. Pevnost v krutu R_{mk} odpovídá největšímu dosaženému napětí povrchových vláken:

$$R_{mk} = \frac{M_k}{W_k} [\text{MPa}] \quad (12)$$

$$M_k = F \cdot d [\text{N} \cdot \text{mm}] \quad (13)$$

kde W_k je průřezový modul v krutu; pro kruhový průřez je $W_k = \pi d^3/16$. M_k je maximální kroutící moment, F je síla vyvolávající kroutící moment a d je průměr zkušební tyče. [1], [2], [9]

Při zkrucování tyče se natočí průřez I. na délce L vůči průřezu II. o tzv. *úhel zkroucení* φ . Poměrné zkroucení na jednotku délky tyče je tzv. *zkrut* ϑ a poměrné posunutí povrchového vlákna na válcové tyči o poloměru r je tzv. *zkos* γ .

$$\vartheta = \frac{\varphi}{L} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot r}{L} \quad (15)$$

V oblasti pružných deformací musí platit, že smykové napětí τ odpovídá součinu zkosu γ a *modulu pružnosti ve smyku (v krutu)* G – Hookeův zákon pro krut:

$$\tau = \gamma \cdot G \rightarrow G = \frac{\tau}{\gamma} [\text{MPa}] \quad (16)$$

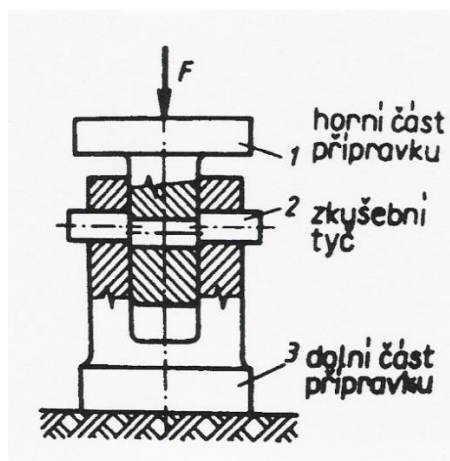
Vztah mezi modulem pružnosti v tahu a v krutu je:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} [\text{MPa}] \quad (17)$$

kde μ je Poissonovo číslo. [1], [2], [9]

Zkouška stříhem

Většina strojních součástí je namáhána současně normálovými (tah, tlak) i smykovými napětími. V některých případech jako jsou např. nýty či šrouby převládá napětí smykové a je proto vhodné ověřovat jejich odolnost zkouškou ve stříhu. Zkouška stříhem není příliš běžná. Zkouší se pomocí přípravků (viz obr. 22), vkládaných do univerzálního trhačího stroje, kde se vyvozuje rovnoměrné smykové napětí ležící v průřezu. Zjišťuje se mez pevnosti ve smyku Rm_s , která bývá cca 0,8-1 meze pevnosti v tahu Rm . Je to napětí potřebné k přestřižení zkušební tyče. [1], [8]



Obr.22. Uspořádání zkoušky stříhem. [8]

Zkušební válcová tyč je zasunuta do děr přípravku a na horní část přípravku se působí postupně se zvětšující tlakovou silou F – pevnost ve stříhu se pak vypočte ze síly, která přestříhla tyč o průřezu S :

$$R_{m_s} = \frac{F}{S} [\text{MPa}] \quad (18)$$

Zkouška ohybem

Zkouška ohybem se používá především při zkoušení křehkých materiálů, zejména litiny, stavebních hmot aj. U houževnatých, tvárných materiálů nemá význam, neboť k porušení zkušebního tělesa ohybem nedojde – používá se pouze jako zkouška technologická. Cílem zkoušky je zjistit pevnost v ohybu R_{m_o} , která se vypočítává z maximálního ohybového momentu $M_{o_{\max}}$ a z průřezového modulu v ohybu W_o . Charakteristikou houževnatosti v ohybu je maximální průhyb $y_{\max}$, který se měří v okamžiku porušení tyče. K tomuto porušení dochází při síle $F_{\max}$. [4], [6], [7]

$$R_{m_o} = \frac{M_{o_{\max}}}{W_o} [\text{MPa}] \quad (19)$$

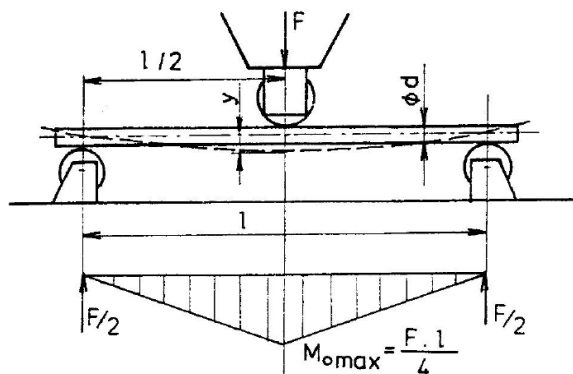
$$M_{o_{\max}} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} [N \cdot mm] \quad (20)$$

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} = \frac{a^3}{6} = \frac{b \cdot h^2}{6} [mm^3] \quad (21)$$

Kde je:

R_{m_o}	mez pevnosti v ohybu
$M_{o_{\max}}$	maximální ohybový moment
W_o	modul průřezu v ohybu
$F_{\max}$	maximální ohybová síla

l vzdálenost podpor
d,a,b,h rozměry průřezů zkušebních tyčí

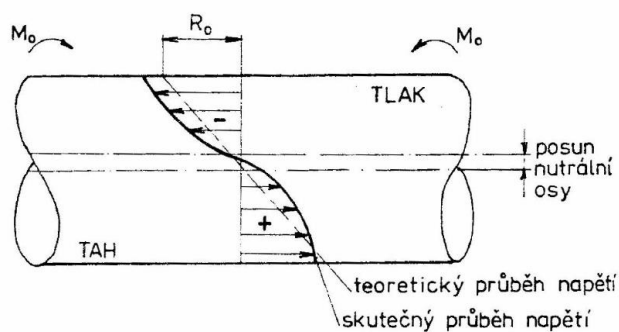


Obr.23. Schéma zatěžování při zkoušce ohybem. [8]

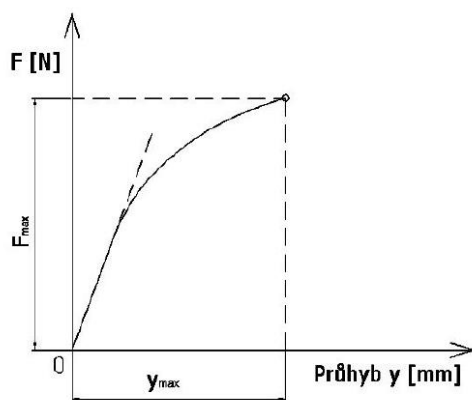
V oblasti platnosti zákona úměrnosti je možno z hodnoty průhybu vypočítat modul pružnosti v tahu E:

$$E = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot J \cdot y} [\text{MPa}] \quad (22)$$

kde J je moment setrvačnosti namáhaného průřezu v $[\text{mm}^4]$ a y je průhyb v $[\text{mm}]$. [4]



Obr.24. Rozdělení napětí v průřezu tyče nad mezí úměrnosti pro materiál s nelineárními vlastnostmi v tahu a tlaku. [8]



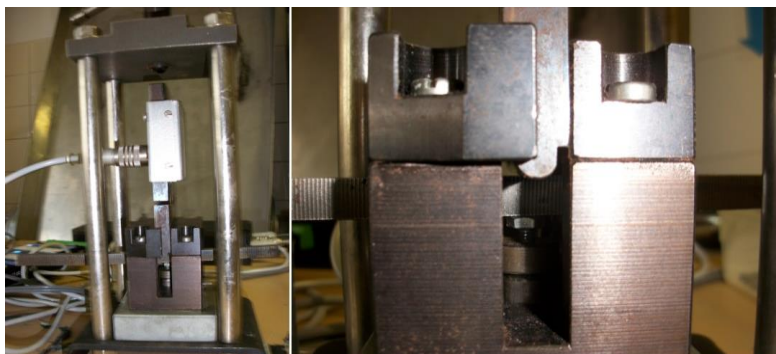
Obr.25. Pracovní diagram zkoušky ohybem (litina s lupínkovým grafitem). [6]

Zkouška mikroohybem

Mikroohybová zkouška ve srovnání se standardní ohybovou zkouškou využívá podstatně menší vzorek materiálu. K měření se využívá speciálního přípravku. Vzorek obvykle obdélníkového průřezu je umístěn na tvrdých podložkách, které rozkládají tlak a brání boření vzorku do podpor pod podložkami. [7]

Zatěžovací trn – ohybník – působí na vzorek uprostřed silou P , vyvozovanou buď univerzálním trhacím strojem nebo jiným zdrojem rovnoměrně rostoucí síly (lis, svěrák). Tenzometry přilepen na ohybníku snímají zatěžovací sílu a tenzometry na ocelové planžetě pod průhybovým čípkem snímají průhyb. Elektronické výstupy přípravku pro mikroohybovou zkoušku jsou propojeny s počítačem. Data ve formě excelovské tabulky pak umožňují další zpracování – grafický záznam, výpočty modulu pružnosti a dalších mezí materiálu. [7]

Vzdálenost podpor l je 10, 25 nebo 40 mm a maximální průřez vzorku $b \cdot h$ je omezen napětovými poměry ($\sigma_{red.} \cong \sigma_{oh}$) a maximální zatížitelností ohybníku (cca 50 kN). Rozměry přípravku jsou malé – viz obr.26.



Obr.26. Přípravek pro mikroohybovou zkoušku.

Parametry, jež lze z grafického záznamu zkoušky určit jsou:

- mez pevnosti v ohybu R_{m_o}
- mez kluzu v ohybu R_{p_o} , případně i mez úměrnosti R_{E_o} u tvárných litin
- podíl nelineárního a lineárního průhybu y_p

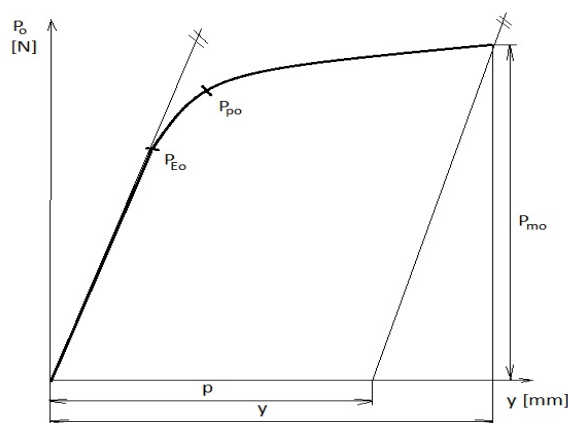
$$R_{m_o} = \frac{M_{o_{max}}}{W_o} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P_{m_o} \cdot l}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (23)$$

$$y_p = \frac{p}{y - p} [-] \quad (24)$$

Kde je:

$M_{o_{max}}$	maximální ohybový moment
W_o	modul průřezu v ohybu
P_{m_o}	síla na mezi pevnosti v ohybu
l	vzdálenost podpor
b, h	rozměry průřezu vzorku
p	lineární (pružný) průhyb
y	celkový průhyb

Hodnoty R_{p_o} a y_p nejsou zatím obecně definovány, pro tento případ je R_{p_o} definována jako napětí odpovídající bodu záznamu s maximální křivostí – představuje mezní stav přechodu z převážně pružných deformací materiálu vzorku při namáhání. Šedé litiny běžných jakostí nemají tento stav běžně vyhodnotitelný. Hodnota y_p je do jisté míry obdobou tažnosti A_x u zkoušky pevnosti v tahu. Nezávisí na absolutních rozměrech vzorku (v rozsahu provedených zkoušek). [6]



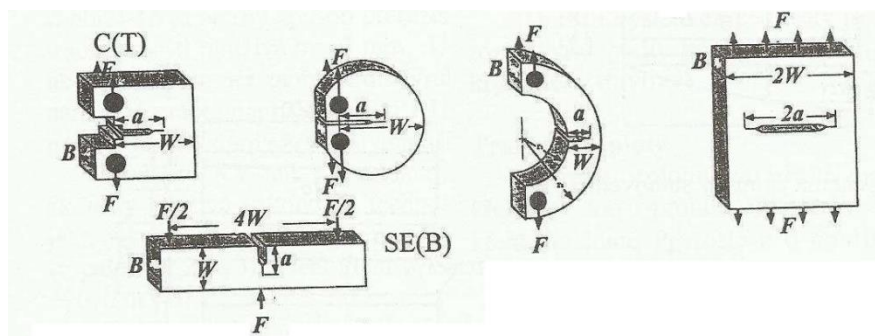
Obr.27. Vyhodnocení grafického záznamu mikroohybové zkoušky. [6]

2.1.3. Zkoušky houževnatosti

Zkouška lomové houževnatosti

Lomová houževnatost se určuje tam, kde se předpokládá nebezpečí vzniku křehkého lomu. Křehký lom nejsnáze vznikne např. u rozměrných tlustostěnných konstrukcí, kde vzniká nebezpečná prostorová napjatost, označovaná jako rovinná deformace – při splnění

podmínek $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$, $\varepsilon_z = 0$. [] Lomová houževnatost je definována jako kritická hodnota faktoru intenzity napětí při stavu rovinné deformace, při které nastane významný nárůst trhliny (ČSN EN ISO 12737) a označuje se K_{IC} . Pro určení tohoto kritického stavu se vychází ze zkoušek normovaných těles s trhlinou. Nejčastěji jsou používána zkušební tělesa pro zkoušku ohybem, ty se značí SE(B) (Single Edge Bend) nebo tělesa pro zkoušku excentrickým tahem, značené C(T) (Compact Test) – viz obr.28. V případě kulatiny, potrubí či plechů mohou být použita i další zobrazená tělesa. [1], [4], [9]



Obr.28. Normovaná tělesa pro lomové zkoušky typu SE(B) nebo C(T). [9]

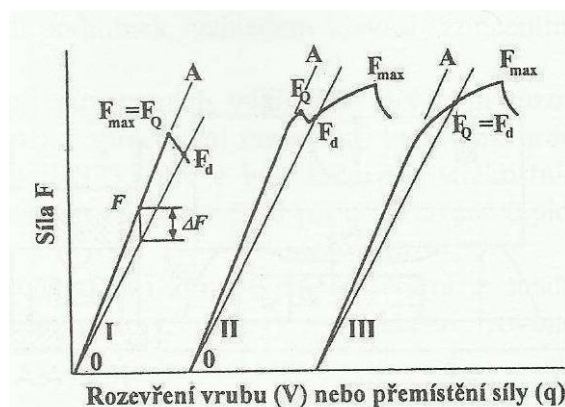
Pro těleso SE(B) je provizorní lomová houževnatost K_Q určena vztahem:

$$K_Q = \frac{F_Q}{B\sqrt{W} \cdot Y} \left[\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (24) \quad Y = f_i \left(\frac{a}{w} \right) \quad (25)$$

Kde Y je tvarový součinitel závislý na tvaru tělesa, F_Q síla, působící na těleso v mezním okamžiku a B , W jsou rozměry zkušebního tělesa, viz obr.19. Mezní okamžik je určen silou F_Q , jejíž určení je patrné z obr. 29. Směrnice sečny je o 5 % snížena, proto odpovídá hodnotě tangenty pro lineární část grafu. Provizorní hodnota K_Q se stává platnou hodnotou K_{IC} splněním řady podmínek, z nichž nejdůležitější je platnost stavu rovinné deformace. Podmínka rovinné deformace pro $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ je splněna při platnosti obou podmínek (26) a (27):

$$a \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\text{Re}} \right)^2 [m] \quad (26) \quad B \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\text{Re}} \right)^2 [m] \quad (27)$$

Materiály středních a nižších pevností vykazují na čele trhliny rozsáhlou plasticky deformovanou zónu. Zátěžné diagramy odpovídají typům II a III na obr.20. Odolností proti lomu se v těchto případech zabývá elasticko-plastická lomová mechanika. Materiálovými charakteristikami pak jsou buď lomová houževnatost určená z kritického rozevření vrcholu trhliny, označená δ_{IC} nebo lomová houževnatost J_{IC} určená z J-integrálu. [1], [4], [9]



Obr.29. Různé typy zatěžovacích diagramů. [9]

Charakteristiky lomové houževnatosti v oblasti elastických deformací vzájemně souvisí dle vztahu (28), kde platí pro rovinnou deformaci (29), pro rovinnou napjatost (30).

$$K_{IC}^2 = E' \cdot J_{IC} = 2 \cdot E' \cdot Re \cdot \delta_{IC} \quad (28)$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (29) \quad E' = E \quad (30)$$

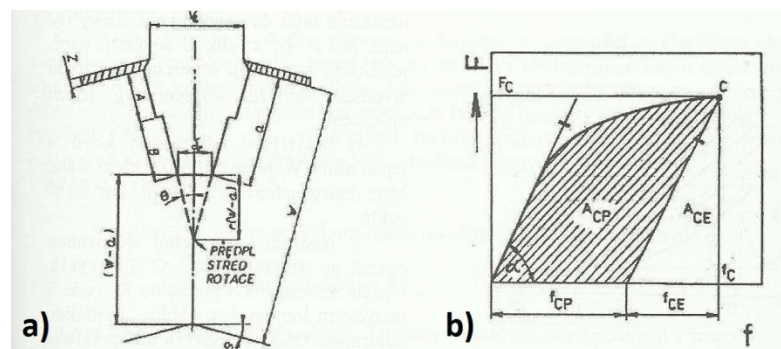
Měření δ_{IC} a J_{IC} se provádí na stejných zkušebních tělesech jako měření K_{IC} . K přesnému stanovení okamžiku iniciace šíření trhliny se využívá metod postupného zatěžování vzorku nebo akustické emise či potenciometrické metody. Kritické rozevření trhliny δ_{IC} se vypočítá z hodnoty rozevření snímače V_c dle obr.21a. Pro celkové rozevření, sestávající z elastické a plastické složky, platí:

$$\delta_c = \delta_{CE} + \delta_{CP} \quad (31)$$

Elastická složka δ_{CE} se vyjádří ze vztahu (28) a plastická složka δ_{CP} jako funkce V_{cp} dle geometrického vztahu na obr. 21. Vypočtená hodnota je platnou hodnotou δ_{IC} při splnění podmínky:

$$\min[a, (W-a)] \leq 50 \cdot \delta_c \quad (32)$$

Pro měření J-integrálu se musí stanovit zátěžný diagram $F-f$, kde f je posunutí v místě působící síly. Dle obr.21b se určí plocha diagramu pod zatěžovací křivkou A_c a rozdělí se na pružnou a plastickou část $A_{CE} + A_{CP}$. Hodnota J_c se vypočítá ze vztahu (33). [9]



Obr.30. a) schéma pro výpočet δ_{CP} , b) diagram zatěžování F-f. [9]

$$J_c = J_{CE} + J_{CP} = \frac{1-\nu^2}{E} \cdot K_c^2 + \frac{x_i \cdot A_{CP}}{B(W-a)} [J \cdot mm^{-2}] \quad (33)$$

Vypočítaná hodnota je hodnotou J_{IC} při splnění podmínky:

$$\min[a, (W-a)] \leq 50 \cdot \frac{J_c}{Re + Rm} \quad (34)$$

Lomovou houževnatost lze dále vypočítat ze vztahu:

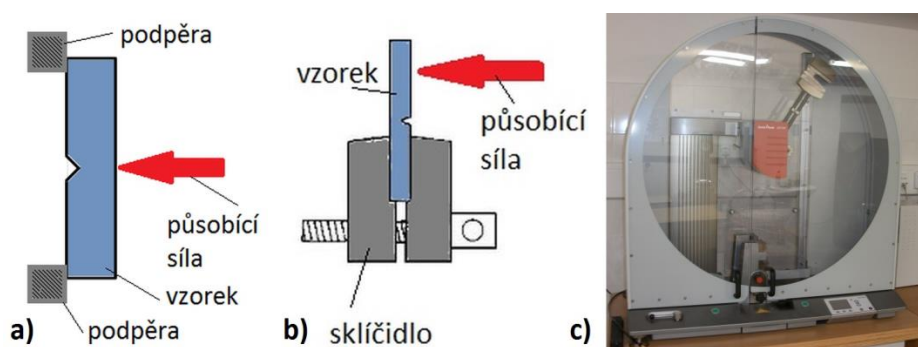
$$K_{CJ}^2 = E' \cdot J_{IC} \quad (35)$$

Zkoušky rázové/vrubové houževnatosti

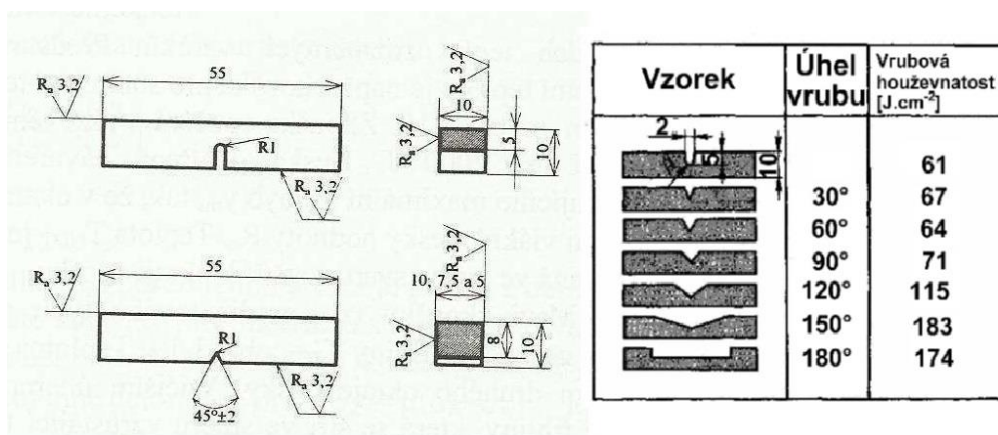
Všechny výše uvedené zkoušky patří do skupiny zkoušek statických – tzn. takových, kdy je zatěžující síla konstantní nebo se zvětšuje rovnoměrně. V praxi jsou většinou strojní součásti namáhány zatížením, jehož velikost a smysl se prudce, popřípadě opakovaně mění. Potřebné údaje o chování takto namáhaného materiálu nemůžeme zjistit statickými, ale dynamickými zkouškami. Při tomto namáhání dochází často k náhlému porušení materiálu, i když zatěžující síla ještě nedosáhla statické pevnosti materiálu. Tzv. rázové zkoušky slouží k zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení zkušební tyče. Zkouší se nejčastěji jedním rázem, kdy na porušení zkušební tyčky se použije najednou dostatečného množství energie. Rázem lze zkoušet pevnost v tahu, tlaku, ohybu nebo krutu. [1], [2], [9]

Rázová houževnatost materiálu se nejčastěji zjišťuje zkouškou rázem v ohybu **podle Charpyho** (ČSN ISO 148-1), kdy je vzorek umístěn na dvou podporách a přerážen kladivem uprostřed – viz obr.22a. Jinou metodou zjištění rázové houževnatosti je zkouška **podle Izoda**, kdy je vzorek uchycen letmo a kladivo dopadá na jeho volný konec. Charpyho metoda je nejrozšířenější, obě zkoušky jsou pak dobrými ukazateli houževnatosti nebo křehkosti materiálů. Při zkouškách se zjišťuje množství absorbované energie při přeražení zkušebního tělesa daného (normovaného) tvaru. Zkušební těleso je opatřeno zpravidla ostrým vrubem

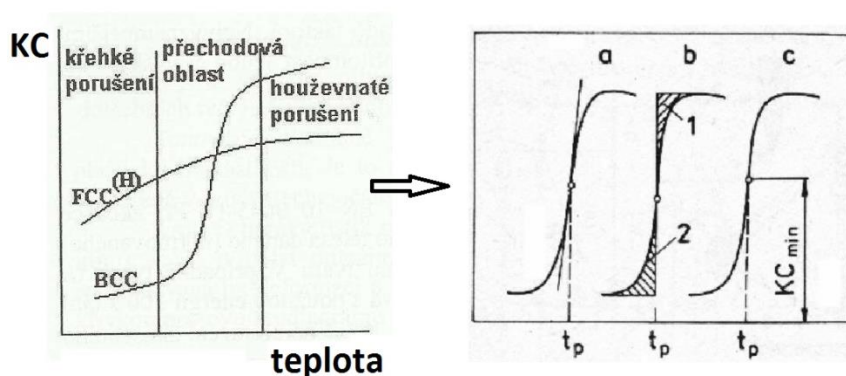
tvaru V, případně tvaru U. Rychlost zatěžování je relativně vysoká, u standardního kladiva s použitou energií 300 J činí ≈ 5 m/s. Při zkoušce je hodnoceno množství energie nutné na přeražení zkušebního tělesa (absorbované energie, nárazové práce), často v závislosti na teplotě – existují určité hraniční teploty, jimž se říká přechodové (tranzitní), při kterých jinak houževnatý materiál přechází do křehkého stavu. Většinou se jedná o teploty pod bodem mrazu. Především u součástí konstrukcí, pracujících ve venkovních podmínkách se jedná o velmi důležitý údaj. Grafický záznam této závislosti označujeme pojmem tranzitní (přechodová) křivka (viz obr. 24). [1], [2], [9]



Obr.31. Uspořádání zkoušek rázem v ohybu; a) Charpy, b) Izod, c) zkušební zařízení – Charpy kladivo Zwick/Roell HIT 50P. [8]



Obr.32. Zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu. [9], [10]



Obr.33. Závislost vrubové houževnatosti na teplotě; a) tvary přechodových křivek, b) způsob určení přechodové teploty t_p – proložení křivky přechodovou oblastí (rovnost ploch 1 a 2). [9]

Z obr. 32 a 33 je patrný způsob přerážení a rozměry zkušebních těles. U vzorku s U vrubem je hloubka vrubu $h = 5 \text{ mm}$, v příloze národní normy (ČSN) je však uvedeno, že v České republice se provádí zkoušky na vzorcích s hloubkou vrubu 2 a 3 mm. U ostrého V vrubu je hloubka vrubu jen 2 mm, vrcholový úhel je 45° a poloměr zaoblení dna vrubu 0,25 mm. Dle tvaru vrubu se pak označuje nárazová práce, např. KCV nebo KCU . Za stejných podmínek, vzhledem k vyšší koncentraci napětí ve V -vrubu, jsou hodnoty KCV vždy menší než KCU . Spotřebovaná práce na přerážení vzorku se stanoví z rozdílu výšek kladiva před spuštěním a po přerážení (tzn. kam až se kladivo přehoupne). V podstatě jde o rozdíl kinetických energií, které se promítnou do polohové energie kladiva po přerážení. Z nárazové práce potřebné na přerážení vzorku se stanoví tzv. **vrubová houževnatost**:

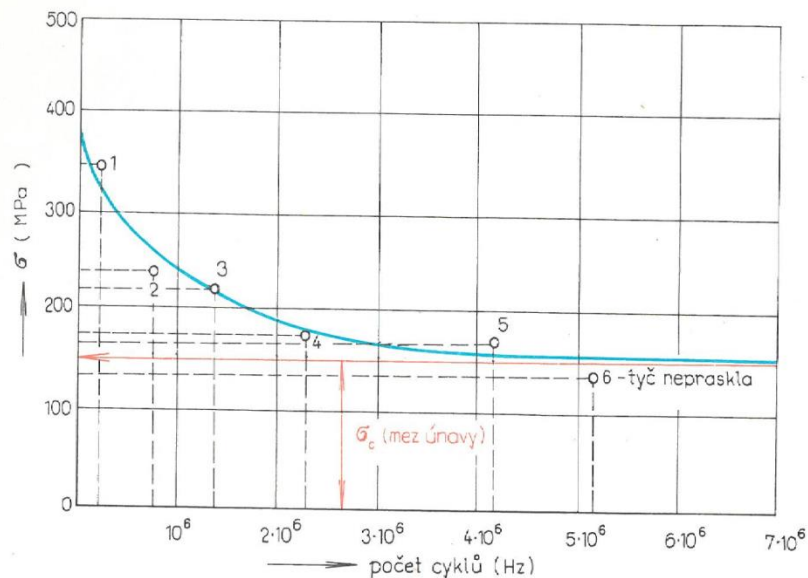
$$KC(U,V) = \frac{K(U,V)}{S_0} [J \cdot m^{-2}] \quad (36)$$

V případě použití vzorku bez vrubu se hodnota KC označuje jako tzv. **rázová houževnatost**. Význam rázové zkoušky spočívá především v kontrole technologie a tepelného zpracování materiálu, které pak určují jeho jakost. Dalším výsledkem zkoušky je zhodnocení charakteru lomové plochy. Na ní je snadno rozlišitelný podíl lomu tvárného (plasticky deformovaný, matný) a křehkého (rovinný, krystalicky třpytivý) – viz obr. 25. [1], [2], [10]

2.1.4. Zkoušky únavové

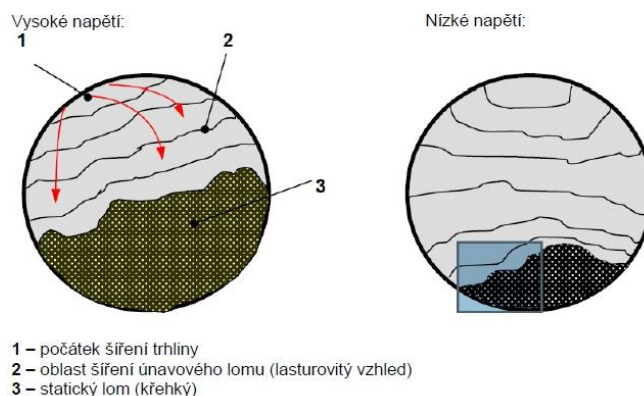
Říká se jim také zkoušky opětovným namáháním, resp. zkoušky cyklické. Při namáhání součástí vznikají často poruchy dříve (tj. i při značně nižším napětí), než odpovídá jeho statické pevnosti. Tomuto jevu říkáme únava materiálu. Při zkoumání se ukázalo, že nebezpečí lomu z únavy je jen při překročení určité hranice, kterou nazýváme mez únavy. Mez únavy zjišťujeme na speciálních zkušebních strojích. Pro střídavé napětí souměrné a nesouměrné stanovíme mez v kombinaci tah - tlak (σ_c), v ohybu (σ_{co}) a v krutu (σ_{kc}). Při napětí pulsujícím a míjivém určujeme mez únavy v tahu, tlaku, ohybu a krutu. Provedení těchto zkoušek, velikost a tvar zkušebních tyčí určuje ČSN 42 03 63. [1], [2], [9]

Dle ČSN 42 03 63 se používá několika stejných zkušebních tyčí ze zkoušeného materiálu a zatěžují se jedním z uvedených způsobů. První tyč se zatíží něco málo pod mezí kluzu a po porušení tyče se odečte příslušný počet cyklů změn zatížení. Tím získáme bod 1. Další tyče se zatíží menším napětím, čímž se dosáhne většího počtu cyklů před porušením bod 2. Tak se postupuje i u ostatních tyčí a získají se další body. Tím vzniká **Wöhlerova křivka**, která nám udává závislost mezi napětím a počtem cyklů. [1], [2], [9]



Obr.34. Konstrukce Wöhlerovy křivky – zjišťování meze únavy. [2]

Mez únavy σ_c [MPa] je definována jako největší napětí, při kterém součást zhotovená z tohoto materiálu vydrží teoreticky neomezený počet cyklů změn zatížení. Únava materiálu souvisí nejen s jeho vlastnostmi, ale i se stavem jeho povrchu (drsnost, vruby, povrchová koroze atd.) snižují mez únavy. Leštění, povrchové tvrzení nebo mechanické zpevnění povrchu naopak mez únavy zvyšují. Na základě únavového lomu můžeme zjistit způsob zatěžování, houževnatost, velikost napětí atd. [1], [2], [9]



Obr.35. Vzhled únavových lomů. [8]

2.1.5. Zkoušky mechanických vlastností za nízkých a vysokých teplot

Mechanické vlastnosti kovů jsou dány silami, kterými na sebe vzájemně působí atomy v krystalové mřížce a stupněm nedokonalosti této mřížky – tj. druhem, množstvím a rozložením mřížkových vad (bodové, čarové...). Protože i meziatomové síly i vady jsou závislé na teplotě, jsou na ní závislé i mechanické vlastnosti (jak již bylo zmíněno např. v případě

přechodových teplot). Většina zkoušek výše uvedených je krátkodobého charakteru a jejich výsledky nemusí platit při jiných než běžných teplotách a při dlouhodobém zatěžování. Proto se materiály pro součásti, vystavené extrémním podmínkám zkoušejí při dlouhodobých zkouškách za příslušných nestandardních teplot. Závislosti jednotlivých vlastností na teplotách jsou různé pro různé skupiny materiálů, zde budou pro názornost zmíněny oceli. Při poklesu teploty u ocelí obecně klesají hodnoty veličin, charakterizujících tvárnost (plasticitu), jako je např. tažnost či vrubová houževnatost a naopak rostou hodnoty pevnostních charakteristik. Při zvyšování teploty je trend opačný. [2], [9]

Zkoušky za nízkých teplot

Mechanické zkoušky za nízkých teplot se provádějí např. v případě zařízení na zkapalňování plynů (zkapalněné plyny mají teploty řádově v -100°C), vozidel a strojních (př. těžních) zařízení pro polární kraje apod. Zkoušky se principiem neliší od běžných zkoušek, používají se i stejná zkušební zařízení, pouze se doplňují vhodným chladícím zařízením (např. teplotní komory chlazené kapalným dusíkem apod.). Zařízení musí umožnit rovnoměrné ochlazení zkušební vzorku na předepsanou teplotu a musí dokázat tuto teplotu udržet i během zkoušky. Nejčastější využití je např. u již zmíněných rázových zkoušek při zjišťování teploty přechodu ke křehkému lomu, či se např. provádí statická zkouška tahem za nízkých teplot. [2], [9]

Zkoušky za vysokých teplot

Mnohé strojní součásti musí zase dlouhodobě pracovat za zvýšených teplot za současného působení namáhání. Jsou to např. různé součásti motorů, horká potrubí, parní či spalovací turbíny apod. Při těchto podmínkách roste plastická deformace a nastává tzv. **creep**, čili tečení materiálu*. Důležitou charakteristikou pro takové materiály je tzv. *mez tečení* σ_T [MPa], což je napětí, které při dané teplotě T způsobí za danou dobu předem stanovenou (povolenou) deformaci, dále *mez pevnosti při tečení* σ_{Tpt} [MPa] – napětí, které při dané teplotě za danou dobu způsobí lom a nakonec *rychlost tečení* τ [%/h] – rychlost sekundárního tečení (v přímkové části creepové křivky). Mez tečení je důležitým údajem např. pro dimenzování součástí, jejichž deformace nad určitou míru je nepřípustná (př. lopatky turbín), pro jiné strojní součásti bude důležité pouze, aby jejich namáhání nevedlo k lomu při tečení, přičemž pouhá deformace k lomu nevede (např. potrubí) – zde je hlavním kritériem mez tečení. Mez pevnosti při tečení je zpravidla pouze zlomkem pevnosti, určené krátkodobou zkouškou při stejné teplotě! Schopnost materiálu přenášet dlouhodobě za podmínek tešení vnější namáhání, se nazývá **žáropevnost**.

Pro chování materiálu za podmínek tečení je důležitá i celková deformace v okamžiku lomu, která charakterizuje plasticitu a je určitým měřítkem nebezpečí výskytu předčasných lomů. Studuje se také tzv. strukturní stálost, neboť řada materiálů za zvýšených teplot prodělává strukturní změny (viz např. popouštění, stárnutí apod.). Nebezpečná je např. precipitace

karbidů po hranicích zrn, která může způsobit značný pokles vrubové houževnatosti materiálu v průběhu provozu.

Hodnoty mezí tečení se určují zkouškami na speciálních strojích, kdy bývá vzorek zatížen nejčastěji tahem po dlouhou dobu a při stálé teplotě (v peci). Deformace vzorku se měří obvykle průtahoměrem vně pece. [2], [9]

**Vysvětlení pojmu tečení, jeho průběhu a chování materiálu v jednotlivých fázích není náplní této publikace. Podrobná vysvětlení tohoto jevu lze nalézt v každé učebnici Nauky o materiálu, příp. titulech uvedených v referencích této publikace.*

2.2. Zkoušky technologických vlastností

Technologické vlastnosti úzce souvisejí se zpracováním materiálu na výrobek. Tyto vlastnosti jsou významné pro strojírenskou výrobu a jsou běžnou součástí charakteristik strojírenských materiálů, nelze je však vyjádřit fyzikálními veličinami. Od mechanických zkoušek se technologické zkoušky liší tím, že neměří sledovanou veličinu, ale zahrnují vliv všech činitelů působících během zpracování materiálu.

Technologické zkoušky se snaží co nejvíce přiblížit podmínkám, za jakých bude materiál zpracováván (tvařitelnost, svařitelnost, obrobitelnost...), popř. jakým podmínkám bude při provozu vystaven (odolnost proti opotřebení, odolnost proti korozi...). Jsou to dílenské zkoušky, při kterých se až na výjimky nevyužívají normalizované vzorky, ale běžné polotovary. Odlišný je nejen způsob zkoušení, ale i způsob vyjadřování vlastností. Nezjišťují se hodnoty v přesně definovaných základních veličinách, ale získávají se porovnávací hodnoty nebo jen rozlišení dobrého a špatného materiálu. Srovnání výsledků je možné jen při stejných podmínkách zkoušek a pro podobné materiály. Komplexní vliv různých provozních podmínek se také obtížně zjišťuje jednou zkouškou, proto se často musí volit více zkoušek, které se doplňují. Výsledky technologických zkoušek mohou být zatíženy i značným rozptylem a chybami, a to i když je provedení zkoušek normované, protože jen obtížně lze předepsat všechny parametry.

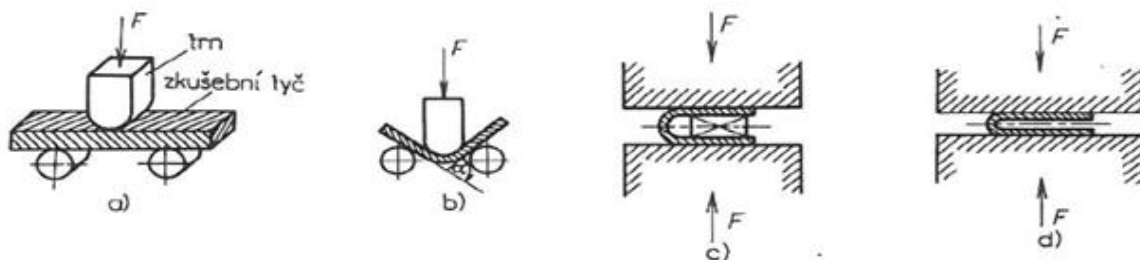
Stejně jako existuje nepřeberné množství různých výrobních technologií, tak existuje i stejný počet technologických zkoušek. Prakticky každý výrobní závod má své vlastní technologické zkoušky, pomocí nichž kontroluje vhodnost materiálu či polotovaru pro svoje technologické postupy ve výrobě. Tato kapitola je proto věnována především zkouškám, které jsou ve většině případů normovány a všeobecně známé. Také se bude jednat vesměs o zkoušky kovů.

2.2.1. Zkoušky tvařitelnosti

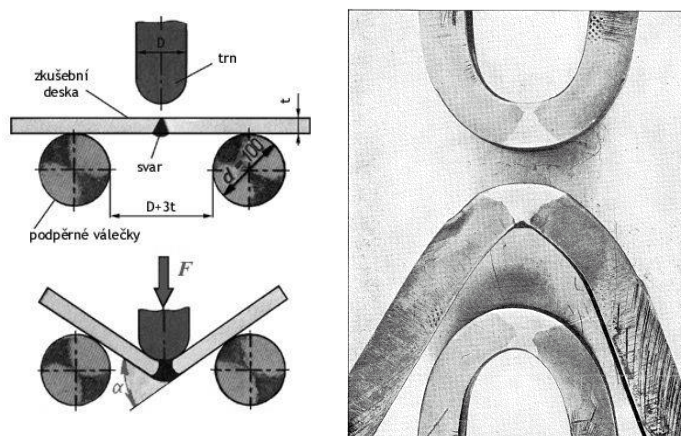
Tvařitelnost (tvárnost) je vlastnost, kterou musí mít materiál určený ke kování, válcování, lisování apod. Tvárný materiál si zachová tvar, daný působením vnějších mechanických sil, a to i když přestanou působit. Tvárnost se stanovuje za studena či za tepla.

Zkoušky lámavosti za studena

Zkouška lámavosti za studena je vhodná pro zkoušení plechů, tyčového materiálu a těles zhotovených z litých nebo tvářených polotovarů různých průřezů. Zkouškou se zjišťuje způsobilost materiálu k deformaci. Je upravena normou ČSN 42 0401. Na lisu nebo zkušební stroji se ohýbá zkušební tyč kolem trnu – viz obr.36. Rozměry trnu, opěrných válečků i vzdálenost podpor se předepisuje materiálovým listem nebo dodacími podmínkami, závisí na tloušťce a šířce vzorku. Zkouška probíhá za teploty $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Vzorek musí být zatěžován plynule a zkouška je ukončena tehdy, dosáhne-li se požadovaného úhlu ohybu, nebo objeví-li se v místě ohybu trhliny. [8], [16], [18]



Obr.36. Zkouška lámavosti za studena; a) uspořádání, b) ohyb přes trn pod určitým úhlem, c) ohyb o 180° - do rovnoběžnosti ramen (s vložkou), d) ohyb o 180° - do dolehnutí ramen (bez vložky). [8]



Obr.37. Zkouška lámavosti tupých svarů. [8], [18]

Při zkoušce se obvykle určuje:

- ohyb do úhlu α
- ohyb do rovnoběžnosti ramen
- ohyb po dolehnutí ramen

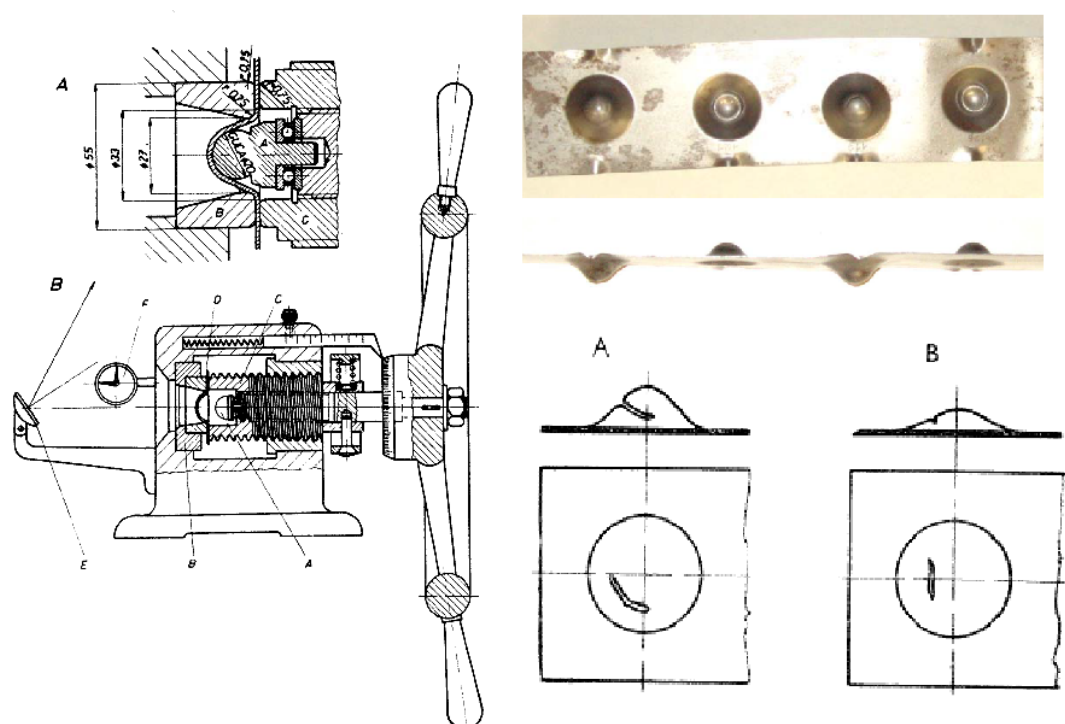
S podobným principem funguje i zkouška lámavosti tupých svarových spojů. Používá se pro zkoušení pevnosti svarů. Tyč odebraná ze zkoušeného materiálu se ohýbá trnem určeného průměru a zjišťuje se úhel ohybu, kterého se dosáhne, aniž by na straně tahu vznikly trhliny – viz obr.37. [8], [16], [18]

Zkoušky plechů

a) zkoušky plošné tvařitelnosti

- zkouška hloubením podle Erichsena

Pomocí této zkoušky se ověřuje vhodnost plechů tloušťky do 2mm k ohýbání, hlubokému tažení či lisování. Při zkoušce se vtlačuje kulový průtažník do plechu upnutého přidržovačem na průtažnici tak dlouho, až se na vytažené kulové části objeví trhlina. Příslušné prohloubení plechu je měřítkem tažnosti materiálu. Důležitým vodítkem je i orientace vzniklé trhliny a hladkost vytlačeného kulového vrchlíku. Drsný a hrbolatý povrch ukazuje na hrubou strukturu, a tím na nevhodnost plechu k hlubokému tažení. [8], [16], [18]

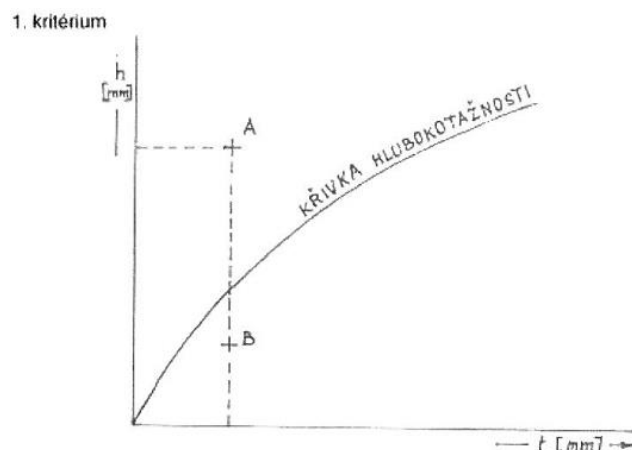


Obr.38. Zkouška plechů hloubením podle Erichsena; a) schema uspořádání, b) princip zkoušky, c) zkoušený plech s trhlinou. [8], [18]

Hlubokotažnost se pak vyhodnocuje podle dvou kritérií:

- podle hloubky tahu v závislosti na tloušťce plechu

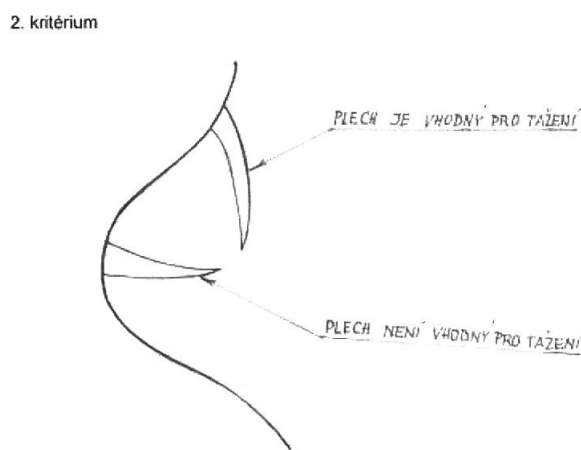
Pokud trhlina vznikne v určité hloubce tahu – viz všechny body nad křivkou hlubokotažnosti, pak je plech vhodný pro další technologické zpracování. Body pod křivkou hlubokotažnosti určují, že plech není vhodný pro technologické zpracování.



Obr.39. Zkouška plechů hloubením podle Erichsena – 1. kritérium. [8]

- podle polohy trhliny

Pokud trhlina vznikne podélně – plech je vhodný pro technologické zpracování. Pokud trhlina vznikne příčně – plech není vhodný pro technologické zpracování.



Obr.40. Zkouška plechů hloubením podle Erichsena – 2. kritérium. [8]

- zkouška Fukuiho

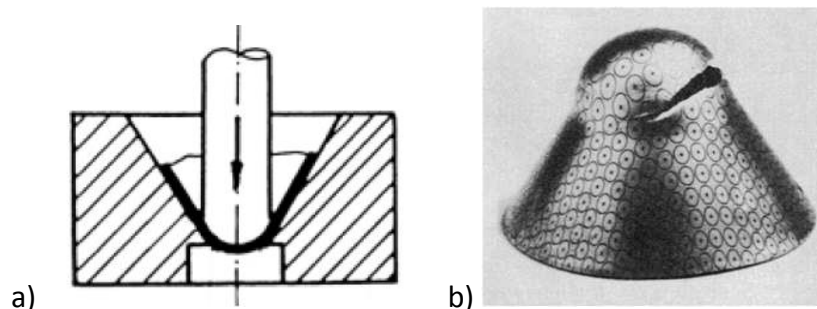
Také označována jako zkouška tažením v kuželové tažnici. Princip Fukuiho zkoušky spočívá v tažení kruhového rondelu s vyvrtaným otvorem, případně bez otvoru, v kuželové tažnici do okamžiku vzniku trhliny v otvoru, případně na dně kuželového výtažku. Tažení rondelu je bez užití přidržovače, což odstraňuje vliv přidržovací síly na proces tažení plechu. Poměr rozměrů má být přibližně $d_0/D_0 = 1/6$. Jako kritérium hlubokotažnosti plechů je součinitel tažení:

$$m = \frac{d_1}{D_0} [-] \quad (37)$$

Kde je:

D_0 - průměr přístřihu [mm]

d_1 - největší průměr kuželového výtažku v okamžiku vzniku trhliny [mm]



Obr.41. Fukuiho zkouška plošné tvařitelnosti; a) schema uspořádání, b) tvar trhliny po Fukuiho zkoušce. [8], [13]

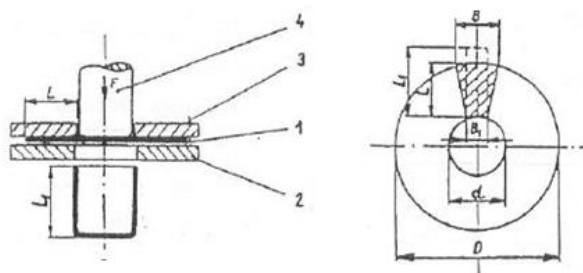
Z výsledků zkoušky tažením v kuželové tažnici vyplývá, že čím je hodnota m_F nižší, tím je zkoumaný plech vhodnější k hlubokému tažení.

- zkouška kalíškovací

Kalíškovací zkouška se používá zejména pro hodnocení hlubokotažnosti tenkých plechů. Zkouška je vhodná pro rotačně symetrické tvary výtažků. Je poměrně zdlouhavá, neboť se musí několikrát opakovat při postupném zvyšování průměru rondelu. Zkušební rondel o průměru $D = d + 2L$ se průměrem tažníku táhne na kalíšek jehož délka je $L_1 > L$. Princip kalíškovací zkoušky je zobrazen na obr. 42. Mírou hlubokotažnosti plechu je hodnota součinitele m :

$$m = \frac{d}{D} [-] \quad (38)$$

kde d je průměr tažníku [mm] a D je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu [mm]. [17]

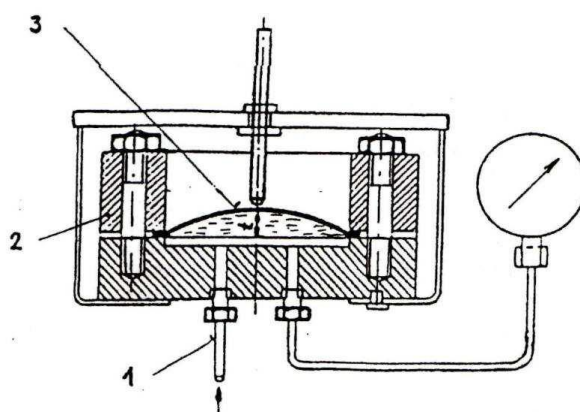


Obr.42. Kalíškovací zkouška; 1 – rondel, 2 – tažnice, 3 – přidržovač, 4 – tažník. [18]

Výhodou této zkoušky je, že simuluje podobné poměry, jaké vznikají při tažení válcového výtažku. Zkouška není normalizovaná.

- zkouška hydraulická vyboulováním

Také označována jako zkouška Tomlenova. Princip hydraulické zkoušky je zřejmý z obr. 34. Zkušební vzorek plechu je upnut svým okrajem přidržovačem, který současně zajišťuje nepropustnost pro tlakovou kapalinu. Zvyšováním tlaku kapaliny dochází k vyboulování vzorku plechu. Kvalita plechu je posuzována podle hodnoty prohloubení t' , při které dochází k porušení celistvosti a vzniku trhliny. Současně se posuzuje tvar trhliny i celkový vzhled povrchu prohloubeného vzorku plechu. V porovnání s Erichsenovou zkouškou je hydraulická zkouška objektivnější a rychlejší. Jistou nevýhodou je složitější zařízení v případě hydraulické zkoušky.



Obr.43. Zkouška hydraulická; 1 – přívod kapaliny, 2 – přidržovač, 3 – zkušební plech. [13]

b) zkouška tažnosti Engelhardt-Grossova

Při Engelhardt-Grossově zkoušce se posuzuje tažnost. Sleduje se průběh síly v závislosti na dráze při tažení kalíšku. Průběh zkoušky je následovný:

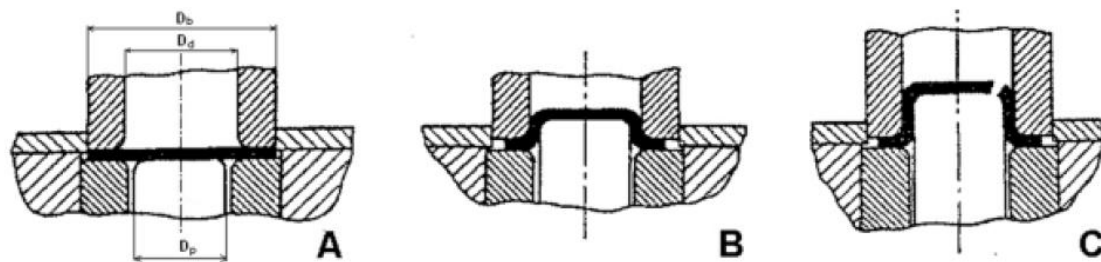
A – do přípravku se vloží plech, z nějž se vystříhne rondel předepsaných rozměrů.

B – výstřižek je vložen do zkušebního zařízení, v němž se táhne kalíšek až do překročení maximální tažné síly F_1 .

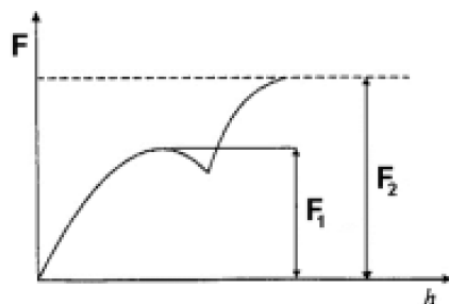
C – přidržovač pevně sevře zbývající část příruby a kalíšek se táhne až do utržení dna – síla F_2 .

Zkouška se vyhodnocuje tzv. **přirozeným stupněm hlubokotažnosti** T (3), má být $T > 0,4$. [8], [13]

$$T = \frac{F_2 - F_1}{F_2} \quad (39)$$



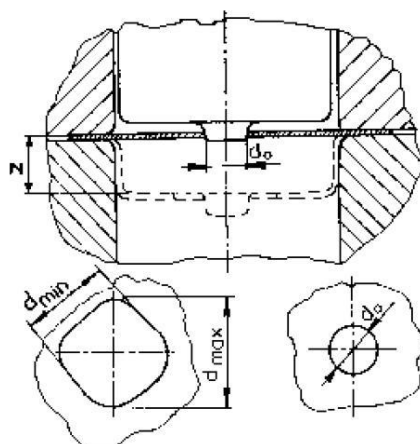
Obr.44. Zkouška Engelhardt-Grossova. [8]



Obr.45. Zkouška Engelhardt-Grossova – průběh síly a dráhy. [8]

c) klínová zkouška tažnosti podle Siebela

Také se označuje jako zkouška rozšiřováním otvoru podle **Siebela a Pompa**. Princip zkoušky rozšiřováním otvoru je zřejmý. Ke zkoušce se připraví čtvercový přístřih s otvorem o průměru d_0 , kde $d_0 = d/3$ [mm]. Přístřih je přidržován přidržovačem a tažen válcovým tažníkem s rovným čelem. Při tažení se rozšiřuje původní otvor v přístřihu. Kvalita zkoušeného plechu se posuzuje v okamžiku, kdy se v okolí otvoru vytvoří první radiální trhliny. Zkouška není normalizována.



Obr.46. Zkouška podle Siebela. [16]

Vyhodnocuje se:

- hloubka prohloubení z
- rozšíření otvoru $d' = (d'_{\max} + d'_{\min}) / 2$
- nerovnoměrnost deformace otvoru v důsledku anizotropie mechanických vlastností plechu vyjádřené vztahem $(d'_{\max} - d'_{\min}) / d'$

K souhrnnému vyjádření kvality plechu k hlubokému tažení se použije vztah:

$$q = \frac{t_0 \cdot (d'_{\max} + d'_{\min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{\max} - d'_{\min})} [-] \quad (40)$$

Kde je:

q - míra vhodnosti plechu k hlubokému tažení podle Siebela a Pompa [-]

z - hloubka prohloubení [mm]

$d'_{\max}$ - maximální rozšíření otvoru [mm]

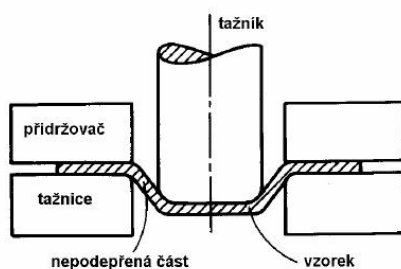
$d'_{\min}$ - minimální rozšíření otvoru [mm]

d_0 - průměr předstřiženého otvoru v přístřihu [mm]

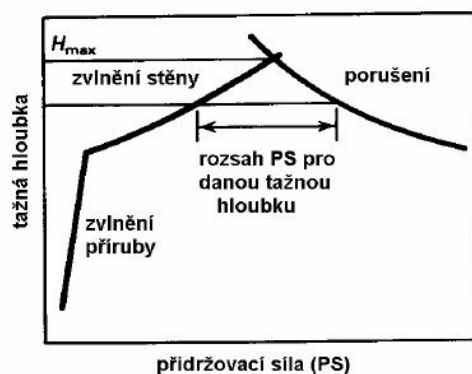
Z výsledku zkoušky lze vyvodit závěr: čím větší je prohloubení (z) a rozšíření otvoru (d') a čím je menší plošná anizotropie, tím je plech z hlediska hlubokotažnosti kvalitnější.

d) zkouška zvlněním (CCWT)

V originále **Conical Cup Wrinkling Test - CCWT**. Zkouška je podobná kalíškovací zkoušce s tím rozdílem, že tažník má asi 75% průměru tažnice, tedy je užší než při klasickém tažení (obr. 38.). Za nízkých hodnot přidržovací síly vznikají vlny na přírubě, při vyšších hodnotách přidržovací síly je zvlnění příruby potlačeno, začínají vznikat vlny ve stěně výtažku. Limitní diagram je uveden na obr. 48. [17] , [18]



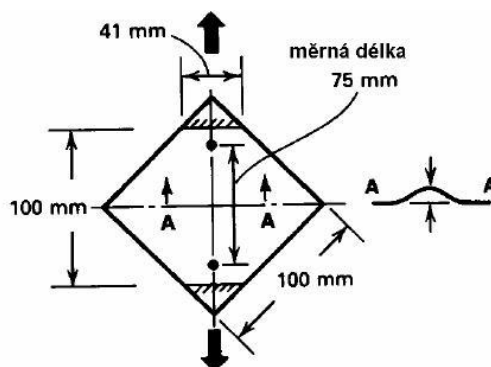
Obr.47. Zkouška CCWT. [17]



Obr.48. Limitní diagram zvlnění. [17]

e) zkouška vyboulením

V originále **Yoshida Buckling Test**. Při zkoušce je čtvercový vzorek sevřen v protilehlých rozích čelistmi a natahován v úhlopříčce. Vyboulení je měřeno v ose vzorku. [17]



Obr.49. Zkouška vyboulením. [17]

f) zkoušky ohybatelnosti plechů

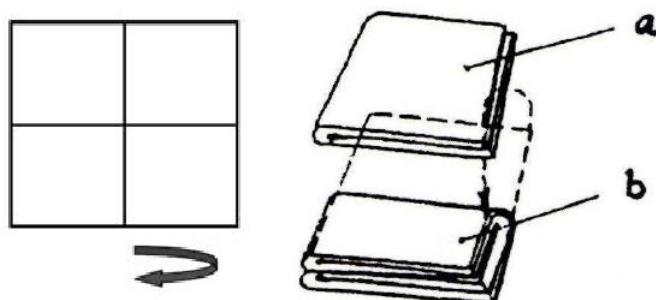
- zkouška lámavosti za studena

K vybraným zkouškám ohybatelnosti plechů lze kromě níže uvedených zařadit i již uvedenou zkoušku lámavosti za studena (viz 3.1).

- zkouška dvojitým ohybem

V případě tzv. „**kapesníkové zkoušky**“ se tenké plechy zkoušejí dvojitým přehybem, viz obr.50. Ke zkoušce plechu dvojitým ohybem se použije plech ve tvaru čtverce o straně 200

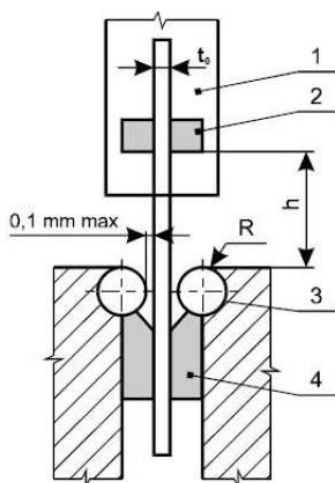
mm s odjehlenými hranami. U kvalitního plechu vhodného ke tváření ohybem nedojde při této zkoušce ke vzniku trhlin v nejvíce namáhaných místech. [8], [17]



Obr.50. „Kapesníková“ zkouška; a – první ohyb, b – druhý ohyb. [5], [17]

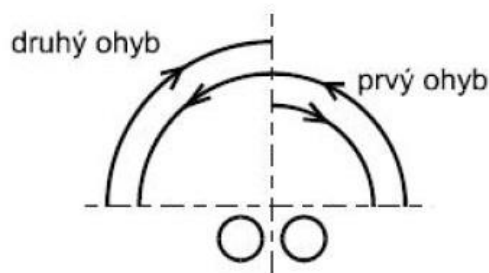
- zkouška střídavým ohybem

Princip zkoušky je zřejmý z obr.51. Schéma zkušebního zařízení obsahuje upínací část (1) s plochými čelistmi (2) a ohýbacími válcovými plochami (3). Dále unašeč (4) zkoušeného vzorku plechu, který je spojený s ohýbací pákou. [8], [17] , [18]



Obr.51. Zkouška plechů střídavým ohybem – uspořádání. [8], [17]

Cílem zkoušky je určení odolnosti zkoušeného plechu proti porušení střídavým ohýbáním o 90° kolem válcových ploch o předepsaném poloměru R. Postup zkoušky je normalizován ČSN 42 0405. Zkušebními vzorky jsou pásy plechu o šířce 20 mm a délce 100 mm. Užíjí vzorky se zkouší v celé šířce. Zkouší se ocelové plechy do tloušťky 3 mm a pásy plechu z neželezných kovů a slitin od 1 mm do 6 mm. Rychlost ohýbání je do 60 ohybů za minutu. Schéma pro sčítání ohybů je ukázáno na obr. 43. [8], [17] , [18]

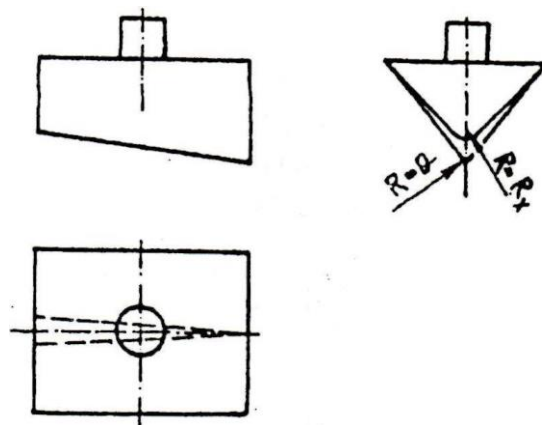


Obr.52. Zkouška plechů střídavým ohybem – počítání ohybů. [8], [17]

Při zkoušce se určuje počet ohybů do úplného zlomení vzorku zkoušeného plechu, přičemž se nezapočítává ohyb, při kterém došlo k poškození vzorku. U tenkých plechů je možné použít zkušební vzorek plechu s předpětím, které však nesmí překročit hodnotu 2 % jmenovité pevnosti materiálu plechu. [8], [17], [18]

- zkouška podle Gütha

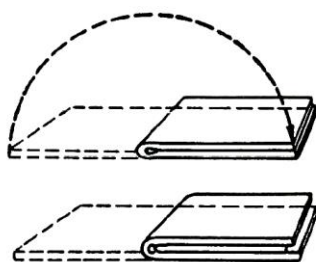
Používá se k určení minimálního poloměru ohybu plechu. Princip zkoušky spočívá v ohýbání vzorku plechu ve zkušební nástroji s proměnným poloměrem ohybu. Ohybník je konstrukčně řešen s poloměrem ohybu R od nuly po určitý poloměr R_x . Po provedené zkoušce je znám minimální poloměr, při kterém nevznikne trhlina ve zkoušeném vzorku plechu. [17], [18]



Obr.53. Ohybník pro Güthovu zkoušku. [8], [17]

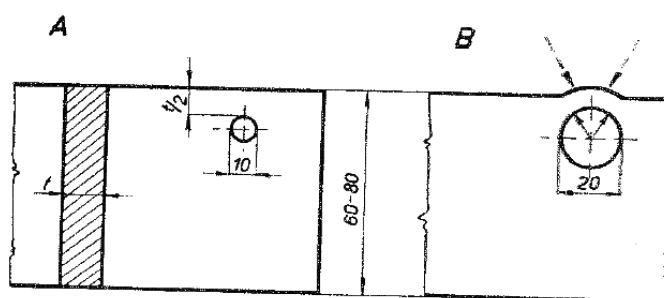
- zkouška tenkých plechů lemováním

Spočívá ve vytvoření „lemu“ neboli přehybu na plechu viz schema na obr. 53. Vyhodnocuje se případný vznik trhlín v místě ohybu.



Obr.54. Lemovací zkouška tenkých plechů. [8]

- zkouška plechů děrováním za tepla

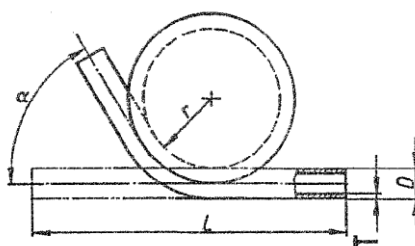


Obr.55. Zkouška plechů děrováním za tepla. [8]

Zkoušky trubek

a) zkouška ohybem

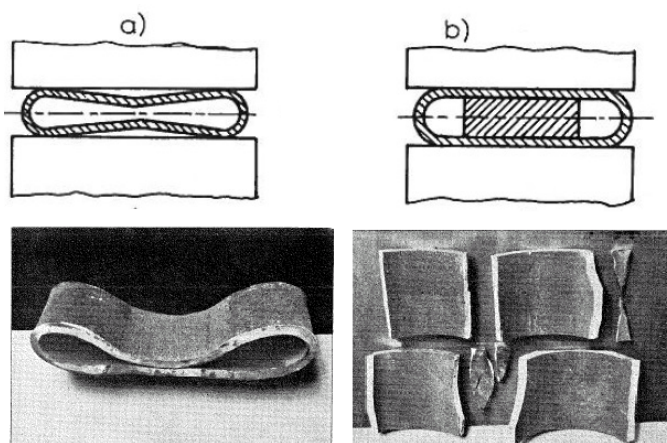
Zkouška je normalizována ČSN EN 10232. Zkouškou se zjišťuje deformační schopnost trubky při jejím ohybu na předepsaný úhel. Provádí se na trubkách z oceli a neželezných kovů. Při zkoušce se trubka ohýbá okolo ohýbacího trnu daného poloměru na předepsaný úhel. Před zkouškou se musí trubka naplnit vhodným materiálem (př. pískem), aby se zamezilo jejímu zploštění při ohybu. Ohybový trn má na obvodu žlábků stejného průměru, jako je vnější průměr trubky. Pokud se zkouší svařovaná trubka, svar se obvykle orientuje do roviny svírající s rovinou ohybu úhel 45°, přičemž by měl být svar na tlačené části trubky. Hodnoty úhlu a poloměru ohybu udávají pro jednotlivé materiály jejich materiálové listy. Zkouška je vyhovující, jestliže na vzorku po ohnutí nevzniknou trhliny nebo zvlnění vnitřního obvodu trubky. [18]



Obr.56. Zkouška trubek ohybem. [18]

b) zkouška smáčknutím

Normalizováno ČSN EN 10234. Princip zkoušky je patrný z obr. 57. Odříznutý vzorek z trubky o délce 20 až 50 mm je smáčknut mezi rovnoběžnými deskami. Buď na výšku h (v zatíženém stavu) nebo na dosednutí trubky tak, aby délk styku na vnitřních plochách byla minimálně $\frac{1}{2}$ délky. V případě neželezných kovů je dovnitř vkládána vložka a stěny jsou smáčknuty na dotyk s vložkou. Zkouška je platná, nevzniknou-li na povrchu trhliny. [18]



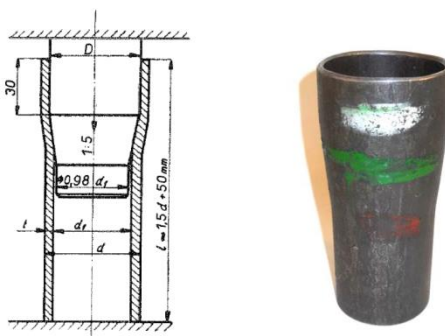
Obr.57. Zkouška trubek smáčknutím; a) slitiny železa, b) neželezné kovy. [8], [18]

c) zkouška rozháněním

Zkouška trubek rozháněním je stanovena normou ČSN 42 0410. Zkouška se provádí na zkušební stroji nebo jakémkoli lisu. Do zkušební vzorku, odříznutého z trubky v délce $1,5d + 50$ mm se zatlačuje klidným tlakem nebo úderem trn namazaný olejem nebo grafitem tak dlouho, až rozšířená část trnu vnikne do vzorku asi 30 mm hluboko. Požadovaný průměr D rozšířené části trnu je dán vztahem (41).

$$D = d_1 + d_1 \frac{x}{100} \quad (41)$$

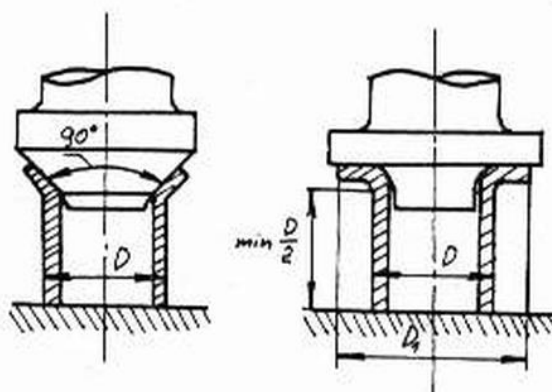
Hodnotu x [%] získáme z materiálového listu, d_1 je vnitřní průměr trubky. Zkouška je považována za vyhovující, nevzniknou-li v místě rozšíření trubky trhliny. [8], [13], [18]



Obr.58. Zkouška trubek rozháněním. [8]

d) zkouška lemováním

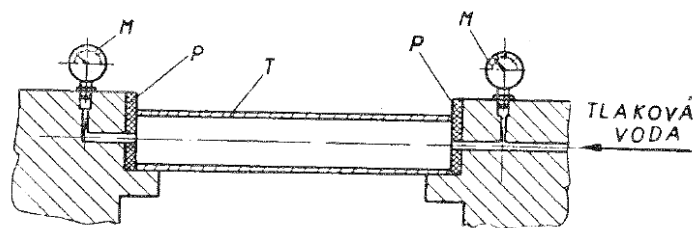
Zkouška je upravena normou ČSN 42 0411. Zkouška se provádí na obdobných strojích jako zkouška rozháněním. Zkušební vzorek získáme odříznutím z trubky tak, aby válcová část vzorku byla nejméně $\frac{1}{2}$ násobkem vnějšího průměru trubky. Lem se vytvoří pomocí dvou trnů (viz obr. 58). Prvním trnem se trubka nejdříve kuželovitě rozšíří a druhým se vytvoří lem. Nevzniknou-li v místě deformace trhliny, zkouška je považována za vyhovující. [8], [13], [18]



Obr.59. Zkouška trubek lemováním. [8]

e) zkouška vnitřním přetlakem

Zkouška je normalizována ČSN 42 0419. Základní hydraulické tlakové zkoušky slouží mimo jiné ke stanovení skutečného přetlaku na mezi kluzu a mezi pevnosti ocelového materiálu potrubí. Zatížení při zkouškách je vyvozeno vysokým přetlakem vody, při kterém je současně odečítána hodnota přetlaku a přičerpaného množství vody. Z funkční závislosti uvedených veličin vzniká graf analogický křivce trhacího diagramu ocelového vzorku. Takto stanovené hodnoty mechanických vlastností **odpovídají reálným podmínkám dvouosé napjatosti.** Tím se **eliminují rozdílné mechanické vlastnosti trubky v podélném a obvodovém směru a zohledňují se vnitřní pnutí obsažená v trubním materiálu.** [8], [18]

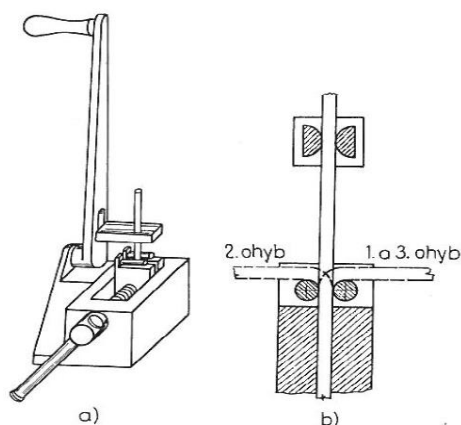


Obr.60. Zkouška trubek vnitřním přetlakem. [8]

Zkoušky drátů

a) zkouška střídavým ohybem

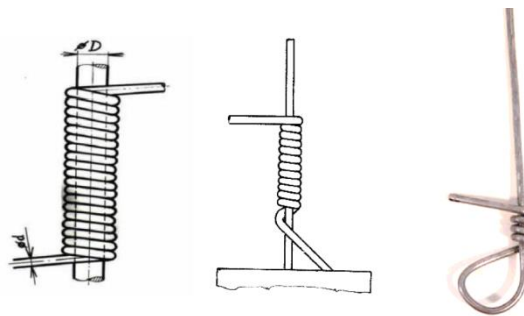
Zkouška je normalizována ČSN 42 0404. Zkušební vzorkem je drát o délce 100-150 mm. Upíná se do válcových čelistí a pak se v nich střídavě ohýbá (nejprve o 90°, poté o 180°) až do zlomení vzorku. Ke zkoušce se používá speciálních přístrojů s počítadlem ohybu. Ohyb, při kterém se drát zlomí, se do celkového počtu ohybů n_0 nezapočítává. Pro různé průměry drátů se volí dle normy určité zakřivení válcových čelistí. [18]



Obr.61. Zkouška drátů střídavým ohybem; a) uspořádání, b) princip zkoušky. [8]

b) zkouška navíjením

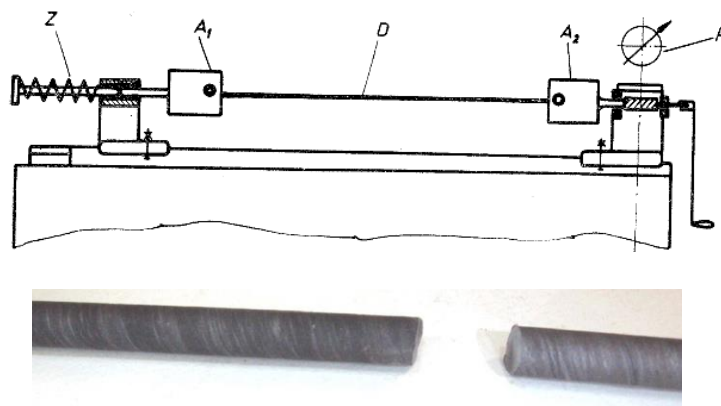
Zkouška je předepsána normou 42 0420. Tato zkouška umožňuje zjistit strukturní nehomogenitu a povrchové chyby drátů. U drátů s povrchovou vrstvou (př. pozink) se zjišťuje také přilnavost ochranného povlaku. Zkoušejí se ocelové dráty, ale i dráty z jiných kovů a slitin do průměru 6,3 mm navíjením na trn. Průměr trnu se stanovuje dle normy drátu. Pokud není průměr trnu předepsán, rovná se průměru zkoušeného drátu. Teplota zkoušky je 20°C. Navíjí se ve šroubovici s těsně přiléhajícími závity na přesně určený počet závitů (dle průměru drátu). Vzorek, který vyhověl zkoušce, nesmí mít po navinutí na povrchu viditelné praskliny, odloupenutí vrstvy, zlomeniny apod. [4]



Obr.62. Zkouška drátů navíjením; a) tenké dráty, b) tlusté dráty. [8], [18]

c) zkouška kroucením

Zkouška je upravena normou ČSN 42 0421. Je určena pro zkoušení tažených a válcovaných drátů do průměru 10 mm. Zkoušená délka drátu l závisí na jeho průměru. Do průměru $d=0,5$ mm je $l=50$ mm, od průměru 0,5 mm do 5 mm je $l=100d$ a od průměru 5 do 10 mm je $l=50d$.

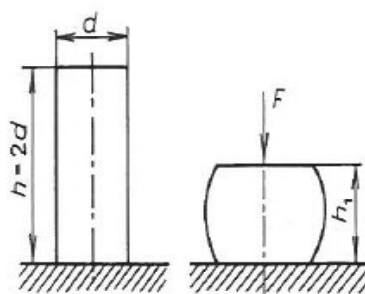


Obr.63. Zkouška drátů kroucením. [8]

Zkoušený drát je umístěn mezi dvě upínací hlavy přístroje. Jedna je otočná, druhá pevná. Drát musí být upnut souose a s předpětím přibližně rovným 2% statické pevnosti. Po upnutí drátem rovnoměrně otáčíme. Při zkoušce se zjišťuje počet krutů n_k , které drát vydrží až do lomu. Posuzuje se vzhled lomu a pravidelnost šroubovice. [18]

Zkouška pěchováním za studena

Zkouška se provádí kováním na kovadlině nebo pomocí bucharu nebo lisu. Zkoušený vzorek má válcovitý tvar, průměr d vzorku je roven průměru neopracovaného zkoušeného materiálu. Jeho výška je $h=2d$. Vzorek se kove bucharem nebo lisem na předepsanou výšku h_1 , je-li průměr vzorku max. 15 mm. Nad tento rozměr se váleček pěchuje lisem. Výšku h_1 předepisuje norma materiálu. Materiál vyhovuje zkoušce tehdy, nevzniknou-li na povrchu zkoušeného vzorku trhliny. [13], [18]



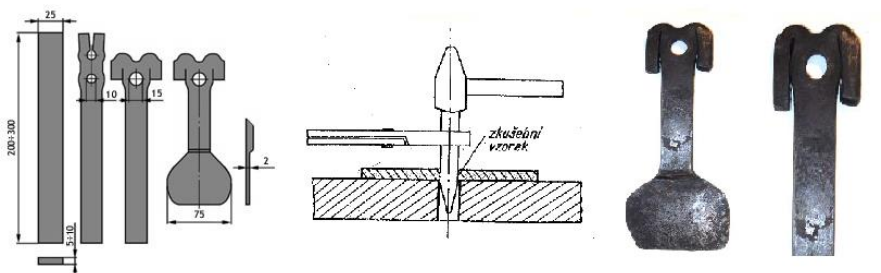
Obr.64. Zkouška pěchováním za studena. [8]

Zkouška slouží k posouzení vhodnosti materiálu do průměru 30mm pro nýty, šrouby a jiné spojovací součásti. Ověřuje se jí především tvárnost, popřípadě i dosažený stupeň zpevnění nebo křehkost po pěchování. [8], [9]

Zkoušky kovatelnosti a zpracovatelnosti za tepla

a) zkouška děrováním, rozštěpením, rozkováním

Touto zkouškou se zjišťuje **kujnost oceli**. Zkouška se provádí na předkované ocelové tyči – děrování, rozšiřování, rozštěpení a rozkování.



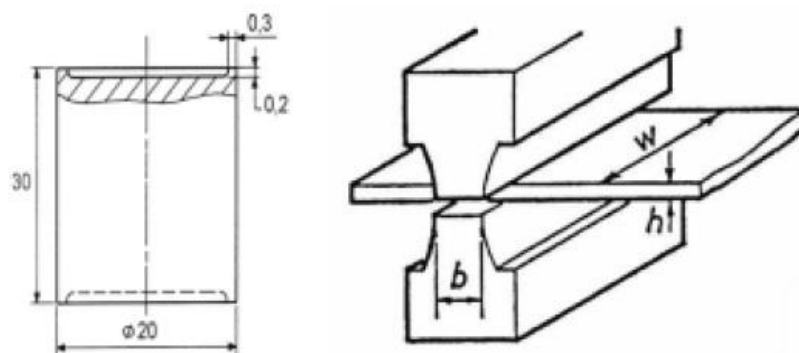
Obr.65. Zkouška tvárnosti plochého a tyčového materiálu za tepla. [8]

Úlohou všech těchto operací je zjistit zpracovatelnost oceli za tepla. Rozsah kujnosti oceli je tím větší, čím vzniknou větší deformace bez vzniku trhlin. Na dobré kovatelne oceli nesmějí po těchto zkouškách vzniknout na hranách ani plochách žádné trhliny. [8], [13]

b) zkoušky objemové tvařitelnosti

- zkoušky pěchovací

Posuzuje se osově-symetrická deformace s vlivem tření nebo bez tření a rovinná deformace. Upraveno normou ČSN 42 0415.



Obr.66. Zkoušky objemové tvařitelnosti - pěchovací; a) osově-symetrická deformace, b) rovinná deformace. [8]

- **zkouška tvařitelnosti za tepla**

Zkušební těleso ve tvaru válce ($H_0=60$, $D_0=40$ mm) se 4 podélnými vruby (úhel otevření 60° , hloubka vrubu 4 mm). Zkušební těleso se napěchuje na $1/3$ původní výšky a vyhodnotí se trhlinky ve vrubech. Oceli se pak dělí do 4 skupin podle střední hodnoty klasifikačního stupně K . [9], [16]

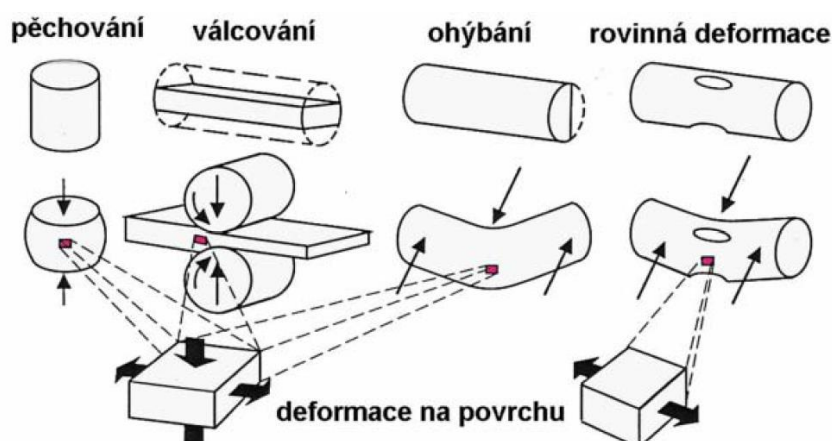
- **zkouška krutem za tepla**

Zkušební tyč je na jednom konci pevně uchycena a druhý upnutý konec v otočné hlavě se krotí kolem osy tyče. V průběhu zkoušení se zaznamenává závislost krouťicího momentu M_k na počtu otáček n , a to vždy pro danou teplotu. Zkouška končí překroucením tyče.

[8], [13]

c) zkoušky tvařitelnosti – stav napjatosti

Materiál se zpracuje požadovaným způsobem (pěchováním, válcováním, ohýbáním....), aby se vyvodila příslušná deformace. Poté se z osy deformace odebere vzorek, na kterém se měří stav napjatosti (např. pomocí XRD). [8], [13]



Obr.67. Zkoušky tvařitelnosti - napjatosti; schema přípravy vzorků pro vyvození požadované deformace na povrchu. Stav napjatosti a deformace lze částečně měnit poměrem šířka/tloušťka. [8]

2.2.2. Zkoušky svařitelnosti

Svařitelnost je materiálu je schopnost vytvořit ze dvou či více částí nerozebíratelný celek některým ze způsobů tavného, tlakového nebo jiného svařování. Obtížná svařitelnost materiálu se projevuje nečistým málo pevným svarem nebo křehnutím materiálu v okolí svaru. Svařitelnost se zkouší mnoha způsoby. Zkoušený materiál se svaří stejně jako v praxi a svar i jeho okolí se podrobí zkouškám pevnosti, vrubové houževnatosti apod. Podrobné údaje uvádí norma ČSN 42 0425.

Svařitelnost se vyjadřuje ve čtyřech stupních – *zaručená (1a)*, *podmíněně zaručená (1b)*, *dobrá (2)* a *obtížná (3)* – viz ČSN 05 1310.

Zkoušky odolnosti svarů proti vzniku trhlin

a) odolnost proti vzniku trhlin za tepla

Odolnost proti vzniku trhlin za tepla se zkouší při teplotách těsně pod solidem. Vzorky tupých svarů se zatěžují buď tahem, nebo ohybem s různou rychlostí deformace. Zatěžující síla působí proti smršťování svaru. Vznikající tzv. *horké trhliny* se hodnotí vizuálně. K této skupině zkoušek patří také zkoušky odolnosti austenitických ocelí proti vzniku tzv. *krystalizačních trhlin* (zk. DA) a zkoušky odolnosti svarových spojů proti vzniku tzv. *likvačních trhlin*. Podmínky těchto zkoušek uvádí jednotlivé normy ČSN EN ISO.

b) odolnost proti vzniku trhlin za studena

Zkoušky odolnosti svarových spojů proti vzniku trhlin za studena, také označované jako **zkoušky praskavosti** jsou také většinou normalizovány. Při těchto zkouškách se za daných svařovacích podmínek vytváří na vzorku svar nebo návar, výskyt trhlin se hodnotí následnou metalografií. V případě tenkých plechů se praskavost hodnotí na vzorcích, u kterých se mění tuhost podél osy svaru nebo návaru. Toho se docílí buď pomocí speciálních přípravků, nebo se na vzoru udělají zářezy o různé hloubce. Mírou praskavosti je pak délka vzniklé trhliny.

Zkoušky náchylnosti svarů ke zkřehnutí

Náchylnost svarů ke zkřehnutí je možné hodnotit dvěma způsoby:

1) *zkouškou vrubové houževnatosti ve svaru a v okolí svaru* – podmínkou zkoušky je, že houževnatost nesmí klesnout pod 50% hodnoty, kterou zaručuje norma základního materiálu.

2) *návarovou ohybovou zkouškou*, která má stejné uspořádání jako zkouška lámavosti plechů s tím, že se ohýbá vzorek s návarem nebo se svarem na tupo – viz obr.28. Měřítkem kvality návaru nebo svaru je dosažený úhel ohybu vzorku.

2.2.3. Zkoušky slévateľnosti

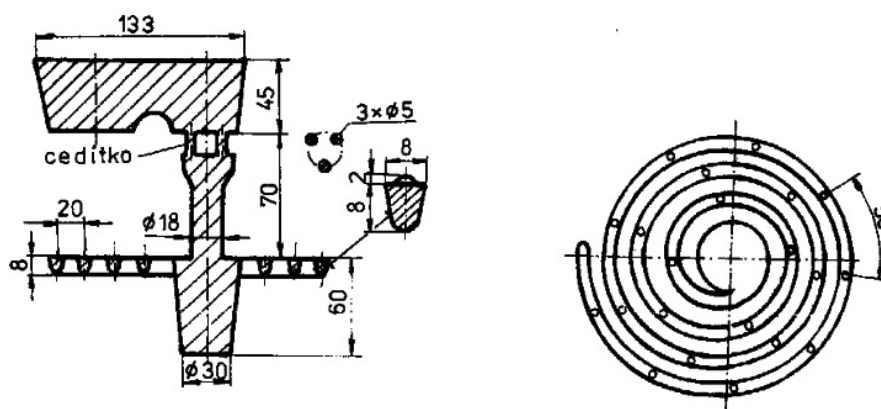
Slévateľnosť je vlastnosť vyjadrujúca súhrnnú vhodnosť materiálu k výrobe odlitkov, teda schopnosť kovů vytvoriť odlitky odpovídajících rozměrů a tvaru bez makro a mikro vad. Slévateľnosť závisí především na zabíhavosti (schopnosti vyplnit formu) a smrštění (zmenšení objemu odlitku vůči tavenině). Slévateľnosť spolu s vlastnostmi formy mají největší vliv na kvalitu výsledného odlitku.

Zkoušky zabíhavosti

Zabíhavost je schopnost materiálu dokonale vyplnit formu. Při zkouškách zabíhavosti se vyhotovují odlitky určitých tvarů za konstantních podmínek odlévání. Zkušební odlitky mají buď konstantní (spirálová zk.) nebo proměnný průřez:

a) zkoušky zabíhavosti s konstantním průřezem zkušebního odlitku

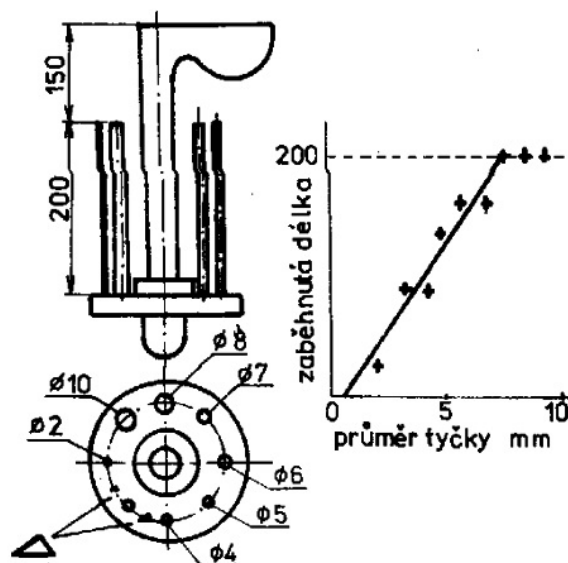
Do formy ve tvaru tzv. Curryho spirály se odlévá zkoušený kov za předem stanovených podmínek. Zabíhavost slitiny se určuje změřením délky její spirálovité části – hodnotí se, kam až kov zateče. Forma je umístěna ve vodorovné rovině, spirála má konstantní průřez.



Obr.68. Zkoušky zabíhavosti – spirálová zkouška. [13]

b) zkoušky zabíhavosti s proměnným průřezem zkušebního odlitku

Podle ČSN 42 083 se ve svislé rovině odlévají tenké tyčky nebo desky s proměnným průřezem. Měřítkem zabíhavosti je průměr nejtenčí plně zaběhlé tyčky a zaoblení hran tyček trojúhelníkového průřezu. Tyto zkoušky dovolují posoudit vliv rovnoměrného metalostatického tlaku a jsou tedy více podobné reálnému odlévání.



Obr.69. Zkoušky zabíhavosti – proměnné průřezy. [13]

Zkoušky smrštění

Důsledkem smrštění při tuhnutí odlitku je vznik staženin, zborcení tvaru, vznik vnitřních napětí či vznik trhlin. Ve slévárnách se smrštění posuzuje většinou na standardizovaných odlitcích (tyče, Y bloky), jejichž délka se po odlití porovnává s délkou modelu. Během zkoušky může být také graficky zaznamenávána změna vzdálenosti dvou značek na odlitku (pomocí tzv. Keepova přístroje).

2.2.4. Zkoušky obrobitelnosti

Obrobitelnost vyjadřuje chování materiálu při obrábění řeznými nástroji (soustružení, frézování, hoblování, vrtání apod.). Nejčastěji se obrobitelnost hodnotí relativně – vzhledem k etalonovému materiálu a vyjadřuje se *koeficientem obrobitelnosti*. Posuzuje se nejen podle mechanických vlastností materiálu, ale i podle snadnosti oddělování třísky, podle chování třísky k materiálu nástroje (ulpívání třísky na nástroji apod.) a podle řezného odporu obráběného materiálu.

Nejčastěji je kritériem **otupení nástroje**, určuje se při zkoušce obrobitelnosti buď *řezná rychlost* $v_T [m/s]$ pro stanovenou trvanlivost ostří nástroje, nebo naopak *trvanlivost* $T_v [min]$ pro stanovenou řeznou rychlost.

2.2.5. Zkoušky prokalitelnosti

Kalitelnost je schopnost oceli dosáhnout kalením zvýšení tvrdosti.

Prokalitelnost je schopnost materiálu dosáhnout po kalení v určité hloubce pod povrchem zvýšení tvrdosti odpovídající kalitelnosti dané oceli při 50% obsahu martenzitu ve struktuře.

Zkoušky prokalitelnosti se podle způsobu ochlazování a podle tvaru zkušebního tělesa dělí na 3 skupiny:

a) zkoušky příčné (podle Grossmanna)

Při této zkoušce se válcové zkušební těleso ohřáté na austenitizační teplotu ponoří do ochlazovacího prostředí celým svým objemem.

b) zkoušky čelní (podle Jominiho)

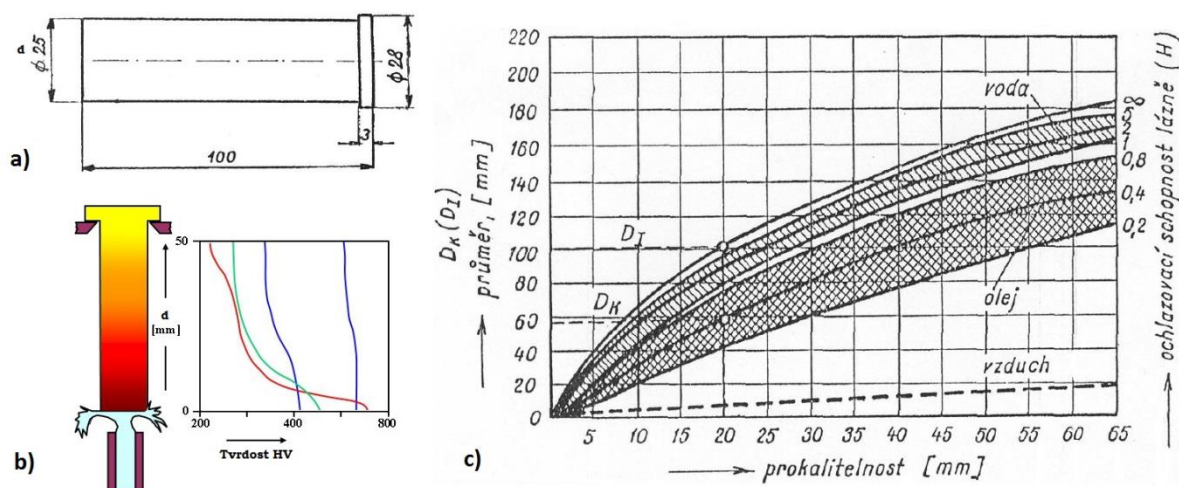
Při této zkoušce se válcové zkušební těleso ohřáté na austenitizační teplotu ochlazuje vodou pouze na čele – simuluje se tak jednosměrný odvod tepla ze součásti.

c) zkoušky klínové (podle Shepherda)

Při této zkoušce se válcové zkušební těleso ohřáté na austenitizační teplotu ochlazuje na klínovém čele.

Hloubka prokalení se určuje nejčastěji proměřením gradientu tvrdosti – hledá se vzdálenost od ochlazovaného povrchu zkušebního tělesa, kde byla naměřena smluvní hodnota tvrdosti. Pro oceli se za prokalený považuje takový materiál, kde tvrdost odpovídá alespoň 50% obsahu martenzitu ve struktuře. Charakteristikou prokalitelnosti jsou pak podle ČSN EN ISO:

- křivka prokalitelnosti, získaná měřením tvrdosti na jednom tělese
- pás prokalitelnosti, tvořený vícero křivkami prokalitelnosti
- index prokalitelnosti, který je smluvním vyjádřením hloubky prokalení na základě křivky nebo pásu prokalitelnosti.



Obr.70. Čelní zkouška prokalitelnosti podle Jominiho; a) normalizovaná zkušební tyč, b) uspořádání zkoušky, c) diagram pro stanovení ideálního prokalitelného průměru D_I a skutečného kritického průměru D_K podle hodnoty čelní zkoušky prokalitelnosti. [8], [19]

2.2.6. Zkoušky klimatické a korozní odolnosti

Zkoušky korozní odolnosti materiálů lze z jistého hlediska již považovat za zkoušky vlastností spadající mezi chemické vlastnosti, protože však jde o běžnou součást zkoušek konstrukcí a zařízení a navíc vysoce názornou ukázkou spojení vědy a praktických potřeb, bude zde systém těchto zkoušek alespoň nastíněn.

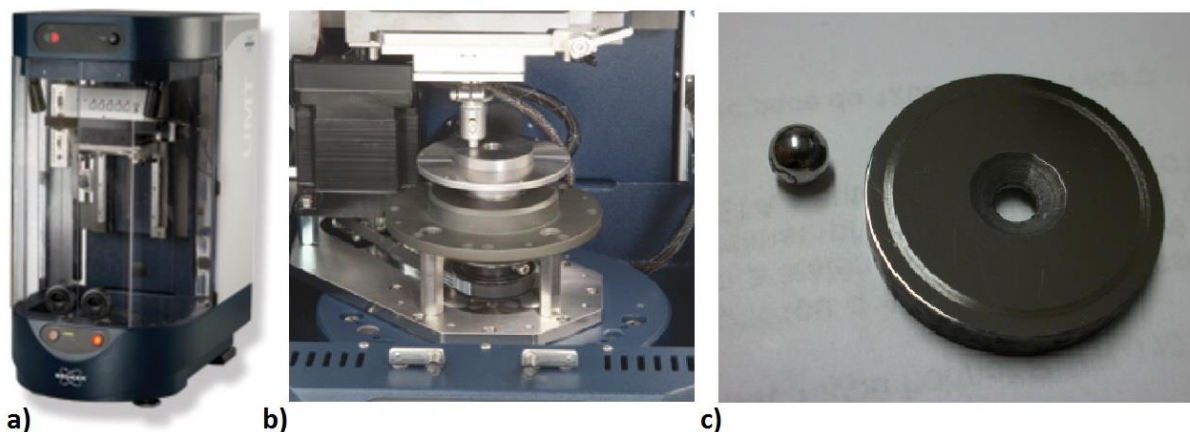
Hlavním účelem klimatických zkoušek je ověřit odolnost součástí a zařízení při použití, přepravě či skladování v extrémních povětrnostních podmínkách – za vysoké či nízké teploty, vysoké vzdušné vlhkosti, při nízkém atmosférickém tlaku a samozřejmě i při prudkých změnách těchto podmínek. Podmínky se simulují v tzv. klimatických komorách, kde lze nastavit libovolnou kombinaci teplot a vlhkosti. Zpravidla se jedná o zkoušky dlouhodobé

Hlavním účelem korozních zkoušek je prověřit odolnost součástí a zařízení při použití, přepravě či skladování ve vysoce korozním prostředí. Jako korozní prostředí většinou slouží solné mlhy a sledují se projevy koroze působením soli – tato zkouška se provádí u kovových i nekovových materiálů, různých typů povlaků apod. Pro korozivzdorné a především žáruvzdorné materiály se pak často ještě používají testy korozní odolnosti za vysokých teplot.

2.2.7. Zkoušky odolnosti proti opotřebení

Opotřebení je definováno jako trvalé, nežádoucí poškození povrchu součásti, většinou způsobené mechanickým namáháním. Dle způsobu interakce povrchu a mechanismu působení se opotřebení dělí na základní druhy – *adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové (kontaktní únava) a vibrační*. Zkoušek odolnosti proti opotřebení tedy existuje celá řada dle jednotlivých typů namáhání a jsou podloženy normami ČSN EN ISO nebo ASTM (americké normy).

Zkoušky odolnosti proti opotřebení jsou principiálně založeny na simulaci provozních podmínek, míra opotřebení se hodnotí hmotnostním či objemovým úbytkem. Např. *tribotest* – simuluje tření a následnou abrazi dvou součástí např. za sucha, s použitím maziv apod., kulička z materiálu odpovídajícího 1. členu třecí dvojice se v kružnici pohybuje danou rychlostí a přítlakem po podložce z materiálu odpovídajícího 2. členu třecí dvojice. Kulička musí po podložce „odjet“ určenou vzdálenost (většinou v řádu km), odpovídající životnosti součástí. Po skončení testu se hodnotí hmotnostní úbytek kuličky a měří se objem drážky vydržené v podložce. Tato zkouška samozřejmě neslouží pouze k testům opotřebení, častá aplikace je např. na zjištění koeficientu tření – spadá tedy i pod metody studia povrchů.



Obr.71.: Tribologická zkouška; a) tribometr Bruker MT-2, b) vnitřní uspořádání zkoušky, c) třecí dvojice po provedení zkoušky – kulička a podložka s vydřenou drážkou.

3. Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky se nazývají také zkouškami bez porušení materiálů – tím je vystižena podstata těchto zkoušek. Narozdíl od zkoušek destruktivních nedochází při měření k poškození nebo zničení vzorku – často se tedy měří na celých součástech, např. jako kontrola zpracování v průběhu výroby nebo kontrola již fungujících dílů v nějakém zařízení (hledá se třeba vada vzniklá opotřebením). Využití nedestruktivních zkoušek je známé především v oblasti tzv. **defektoskopie** - při hledání vad v materiálech a součástech (defekt = vada). Méně známé je pak využití tzv. nedestruktivní **strukturoskopie**, kdy lze pomocí naměřených parametrů nedestruktivních zkoušek (což jsou vesměs fyzikální veličiny - př. rychlost ultrazvuku, intenzita magnetického pole apod.) usuzovat na strukturu a mechanické vlastnosti materiálů.

3.1. Nedestruktivní defektoskopie

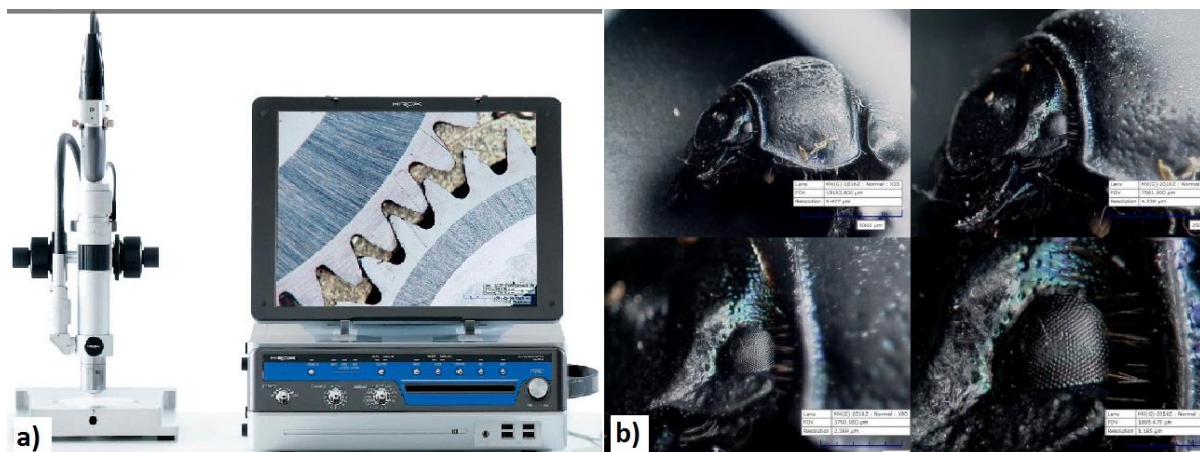
Jak již bylo uvedeno, defektoskopie je oborem zabývajícím se hledáním vad. Nedestruktivní defektoskopie využívá k hledání vad především optiku, různé druhy vlnění (akustické – zvukové a ultrazvukové zkoušky, elektromagnetické – RTG a Gama záření), či závislosti fyzikálních veličin (např. průběh magnetických siločar, tvorbu elektrických vířivých proudů apod.). Metody nedestruktivní defektoskopie lze organizačně rozdělit do dvou skupin:

- a) metody pro hledání vad na povrchu součástí
- b) metody pro hledání vad uvnitř součástí.

Zkoušky vizuální (VT)

Vizuální zkoušky jsou zkoušky určené k inspekci povrchových vad (trhlin, prasklin, dutin apod.). K vizuální inspekci povrchů je možné využít celou řadu optických zařízení – od

makroskopů s malým celkovým zvětšením (řádově max 200x) až po mikroskopy, často mobilního charakteru – např. videomikroskopy, které umožňují náhled na všechny plochy součásti, tvorbu 3D makrosnímků apod. (viz obr. 63). K vizuální kontrole nepřístupných ploch (např. uvnitř tlakových nádob, potrubí apod.) se používají boroskopy (pružné hadice s optickými vlákny a zdrojem světla) nebo endoskopy (elektronické pružné členy s kamerou).



Obr.72. Optická inspekce povrchů; a) videomikroskop Hirox KH-770, b) ukázka 3D snímkování povrchu objektu od makro po mikro zvětšení. [21]

Mezi vizuální zkoušky patří i různé metody hodnocení pomocí etalonů nebo měrek, viz např. zkoušky tupých svarů, kde se pomocí speciálního měřítka hodnotí tvar a rozměr housenky, aby se zjistilo přetečení, resp. propálení svaru, což může mít za následek sníženou pevnost svarového spoje.

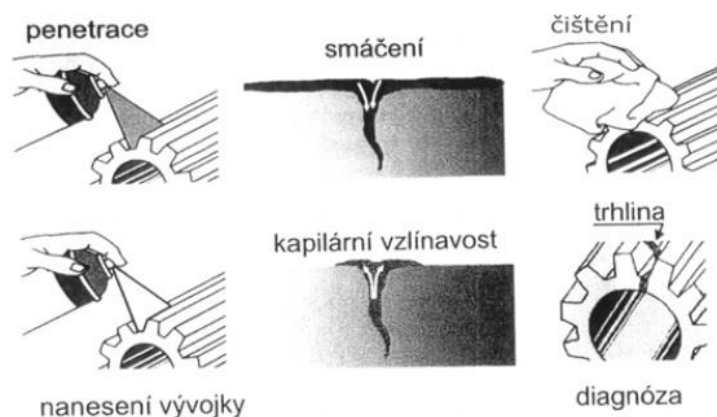


Obr.73. Vizuální kontrola tupých svarů.

Penetrační zkouška (PT)

Tato zkouška (také označovaná jako kapilární) se používá ke **zviditelnění jemných povrchových vad**. Na zkoušený předmět se nanese **indikační látka** – tmavá barva nebo fluorescenční kapalina, ponořením nebo nástřikem, která vyplní všechny trhliny na povrchu.

Potom se indikační látka setře. Následně se nanáší **detekční látka**, která do sebe nasákne indikační kapalinu. Ta vystoupí na povrch a zviditelní tak vadu. Barva je vidět přímo, na fluorescenční kapalinu je třeba použít UV lampu.



Obr.74. Princip kapilární zkoušky. [21]

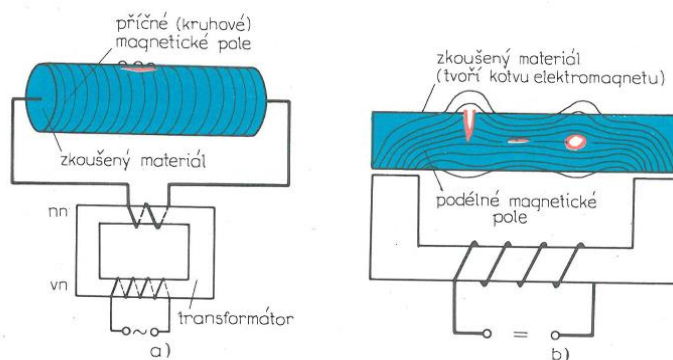


Obr.75. Ukázka použití kapilární zkoušky ke kontrole svarů; a) nanášení penetrantu, b) čištění od penetrantu před nanesením detekční látky, c) zvýraznění vady (trhlina) v detekční látce.

Zkoušky magnetické (MT)

Těmito zkouškami se zjišťují v materiálu především necelistvosti související s povrchem (trhliny, studené spoje), popř. i vnitřní vady, ležící v těsné blízkosti povrchu u feromagnetických materiálů. Nejpoužívanější metodou je **magnetická metoda prášková** (nebo také magnetická polévací metoda).

K indikaci vad se využívá změn magnetického toku, vyvolaných vadami ve zkoušeném předmětu, který je za tímto účelem zmagnetován.



Obr.76. Princip magnetické práškové metody; a) podélné vady zjistitelné kruhovou magnetizací, b) příčné vady zjistitelné podélnou magnetizací. [2]

Vady zvyšují podstatně magnetický odpor, takže v místě vady dochází ke zhuštění a zakřivení magnetických siločar, z nichž část vystupuje na povrch a vytvoří na obvodu vady magnetické póly. Ke zviditelnění vad se používá buď suchého feromagnetického prášku, nebo detekční kapaliny, ve které je prášek rozptýlen (kapalina může být i barevná nebo fluorescenční – obr.68). [2], [20], [23]



Obr.77. Detekční látky pro magnetickou práškovou metodu (vlevo), ukázka použití fluorescenční látky (vpravo). [21]

Podmínkou výrazné indikace povrchových vad je zmagnetování zkoušeného předmětu tak, aby ve zkoušené oblasti vznikl magnetický tok vhodně orientovaný k průběhu vady. Magnetování se provádí:

- průchodem proudu buď přímo zkoušeným předmětem, nebo pomocným vodičem. Vzniká tak kruhové magnetické pole, ve kterém lze indikovat vady rovnoběžné se směrem procházejícího proudu
- magnetizačním jhem, mezi jehož póly se zkoušený předmět vloží, magnetický tok prochází rovnoběžně se spojnici pólů jha a lze indikovat vady kolmo na směr magnetického pole
- magnetizační cívkou – zkoušený předmět se vkládá do cívky, kterou prochází proud, indikují se vady kolmé na osu cívky
- permanentním magnetem (podkovovým) – přiloží se na zkoušený předmět nebo jeho část, takže se zmagnetuje, indikace je jako u zkoušek magnetizačním jhem.

Po provedení zkoušky je třeba provést ještě následné odmagnetování, např. v tzv. odmagnetovacím tunelu, nebo zahřátím materiálu nad Curieho teplotu (u slitin Fe-C 769°C).

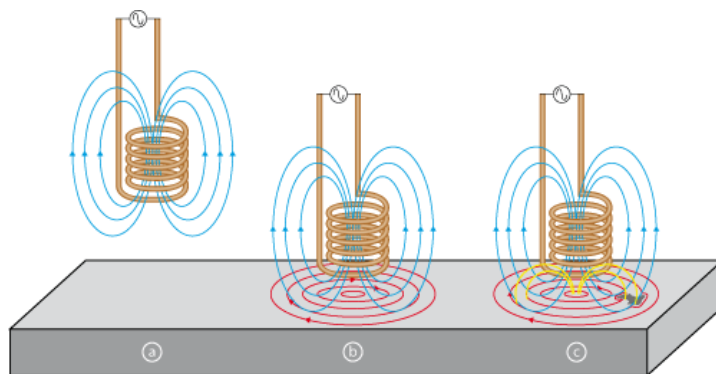


Obr.78. Zleva - magnetování ručním magnetem, sada ručního magnetu, magnetovací stroj, odmagnetovací tunel. [21]

K indikaci magnetického pole nad vadou ve zmagetovaném předmětu lze použít i elektromagnetické snímače, které se pohybují nad povrchem zkoušeného tělesa a převádějí změny magnetického pole na elektrické impulsy. Touto metodou se zjišťují zejména povrchové vady hutních výrobků kruhového průřezu, tj. tyčí a trubek, ale lze ji použít i pro kontrolu struktury zkoušeného materiálu. Magnetické vlastnosti jsou totiž na struktuře velmi závislé. V tomto případě se měření provádí ve slabých polích (v oblasti vysoké permeability), aby se rozdíly v magnetických vlastnostech citlivě odlišily – viz metody nedestruktivní strukturoskopie. [2], [20], [23], [24]

Zkoušky vířivými proudy (ET)

Metoda vířivých proudů (Eddy Current) se používá především pro měření vodivosti povrchových vrstev. Střídavé magnetické pole cívky zkušebního přístroje indukuje **v povrchu výrobku střídavé proudy**, jejichž hustota závisí mimo jiné na vodivosti materiálu výrobku. Vady vodivost zhoršují, což se projeví zpětně změnou elektrického napětí na cílce. Metoda je vhodná **i pro nemagnetické materiály**. Hlavní předností této metody jsou jednoduchost a rychlost kontroly, objektivnost hodnocení a možnost automatizace. [2], [20], [23], [24]



Obr.79. Princip měření metodou vířivých proudů. [21]

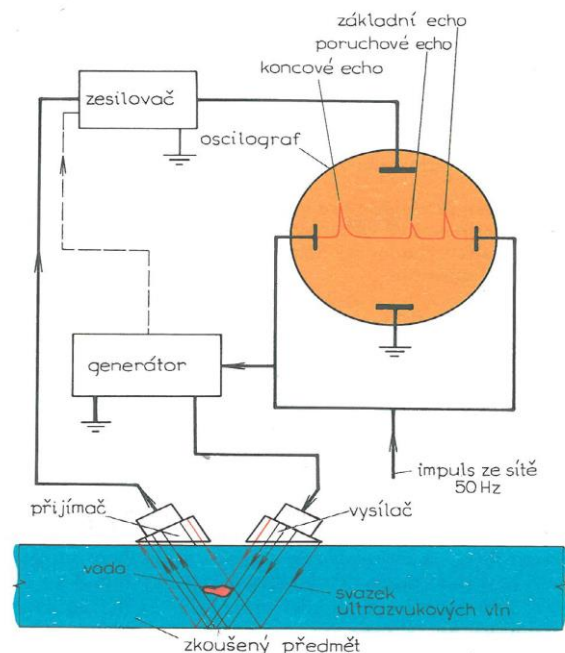


Obr.80. Ukázka měření povrchových vrstev metodou vířivých proudů. [21]

Zkoušky ultrazvukové (UT)

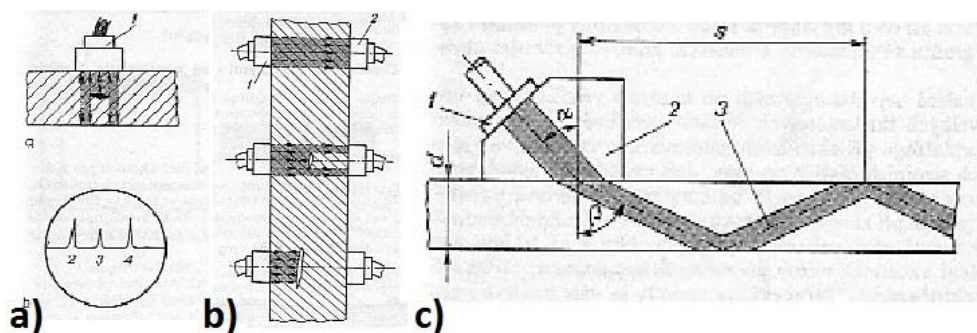
Při ultrazvukových zkouškách se používá **podélných a příčných ultrazvukových vln** o frekvenci cca 1-10 MHz. Podélné ultrazvukové vlny se mohou šířit v tuhých látkách, kapalinách i plynech. Naproti tomu příčné vlny se mohou šířit jen v tuhých látkách. V materiálu **lze prokázat jen tu vadu**, jejíž rozměr, kolmý na směr šíření UT vlnění, je **větší, než polovina vlnové délky**. Při menším rozměru vady dochází k ohybu UT vln a vada není zjistitelná. [2], [20], [23], [24]

Pro UZ defektoskopické zkoušky se používají *impulsní defektoskopy* (princip radaru), které mají buď jednu sondu (pracuje střídavě jako vysílač a přijímač), nebo dvě sondy (sonda vysílací a sonda přijímací).



Obr.81. Princip UZ defektoskopu – impulsní odrazová metoda. [2]

Nejrozšířenější je **metoda odrazová** s jednou sondou, při které se vlny odrazí od protilehlé stěny nebo od vady a na straně, z níž vysílač vyšle do zkoušeného materiálu svazek ultrazvukových vln. Část budícího impulsu se přitom zavede přes zesilovač do oscilografu, na kterém se objeví kmit – *základní echo*. Svazek vln prostupuje materiálem, narazí na protější stěnu a vrátí se zpět do přijímače a na oscilografu se objeví *koncové echo*. Je-li v materiálu vada, odrazí se od ní část vln a na oscilografu se to projeví jako *poruchové echo*. Podobnou metodou je **metoda průchodová**, se dvěma sondami. Obě tyto metody používají **podélné (longitudální)** ultrazvukové vlnění, které se od materiálu odráží kolmo. Tam, kde je přístupný jen jeden povrch, se používá **příčné (transverzální)** ultrazvukové vlnění, které je do materiálu vysíláno pod úhlem a střídavě se odráží od horního a dolního povrchu stěny se stejným úhlem a postupně projde celým průřezem (obr.73c).

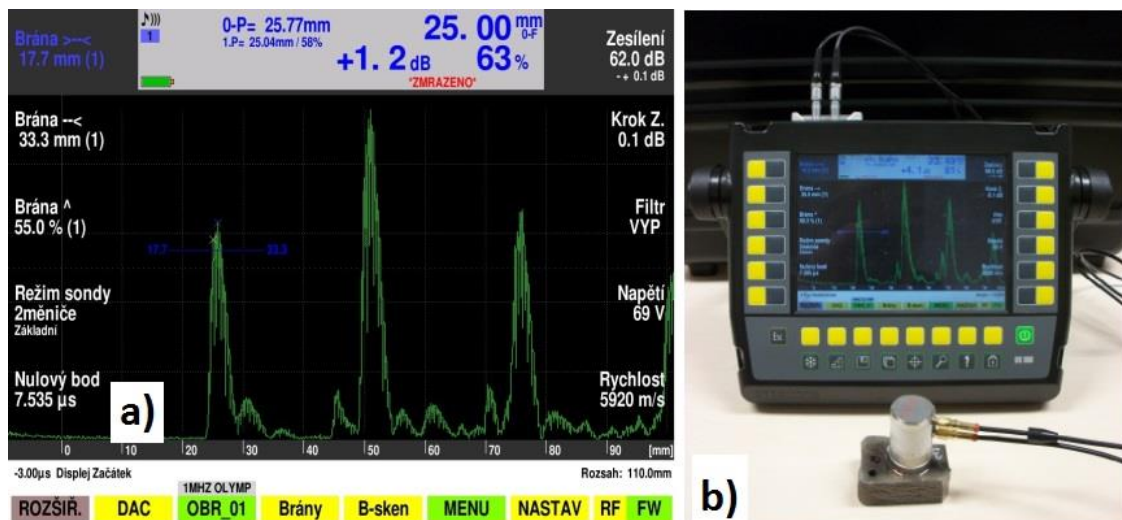


Obr.82. a) Impulsní odrazová metoda: a-uspořádání, b-výstup osciloskopu, 1-vysílací a přijímací sonda; b) průchodová metoda: a-materiál bez vad; b, c-materiál s vadou; 1-vysílací

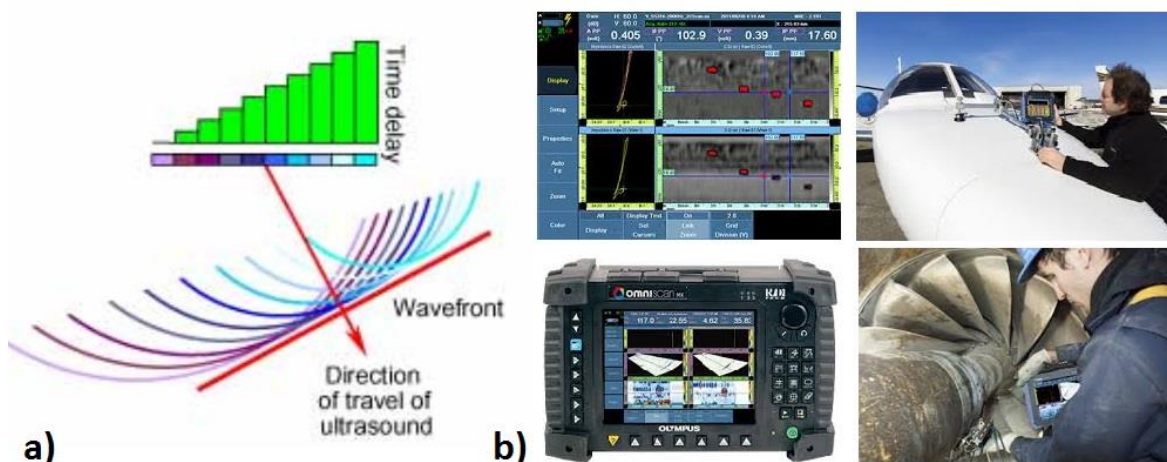
sonda, 2-přijímací sonda; c) použití příčného vlnění: 1-měníč, 2-nástavec z plexiskla, 3-svazek vln. [24]

Aby při přechodu rozhraní materiál-vzduch nedocházelo ke zkreslení údajů, používají se přípravky, vytvářející vhodnou **přechodovou vrstvu** mezi sondou a vzorkem (emulze, oleje, vazelíny). [22], [24]

V posledních cca 10 letech se v oboru UZ defektoskopie uplatňuje také dříve cenově nedostupná metoda **Phased Array**, což je v principu obdoba lékařského ultrazvuku. Využívá sondy s vícero měniči, takže lze u každého z nich nastavit jinou frekvenci a je tak možné tvarovat svazek. Díky pokročilé elektronice umožňuje zobrazení vnitřních vad vzorku nikoli jako sadu ech (tzv. A-sken), ale jako 2D, příp. i 3D obrázek, takže indikace vad je stejně snadná, jako např. z rentgenogramu. [22], [24]



Obr.83. Ukázka měření ultrazvukem, standardní A-sken, impulsní odrazová metoda, UZ defektoskop Starmans DIO 1000.

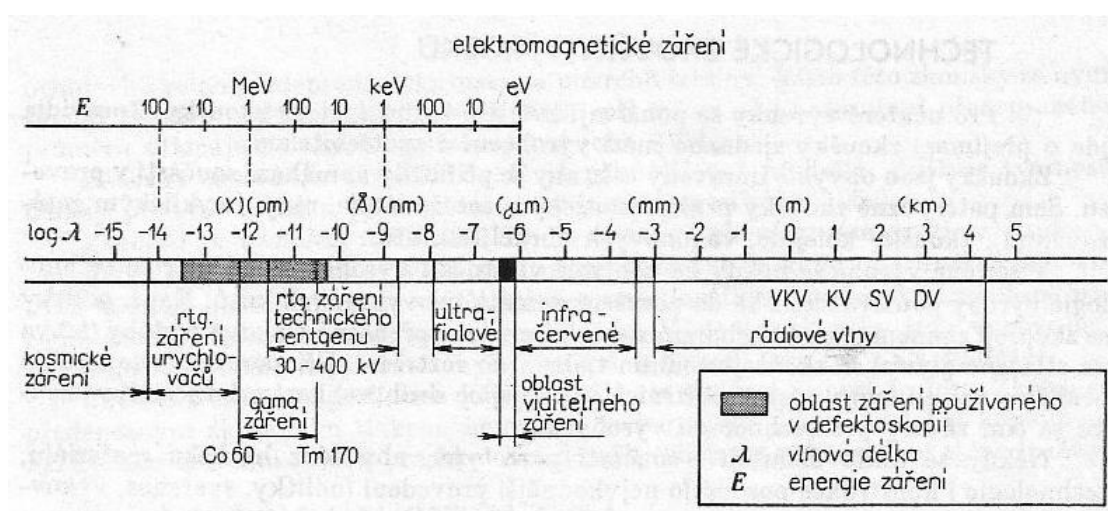


Obr.84. Měření ultrazvukem, metoda Phased Array; a) princip, b) ukázka – Olympus OmniScan. [21]

Ve srovnání s prozařovacími metodami umožňuje ultrazvuková metoda snadné a spolehlivé zjištění plošných rovinných vad, rovnoběžných s povrchem nebo šikmo orientovaných k povrchu materiálu. Nalézá uplatnění hlavně při kontrole velkých výkovků, vývalků a tlustostěnných odlitků. Výhodou je pohotovost, relativně nízké náklady a možnost automatizace. [22], [24]

Zkoušky prozařovací (RT)

Rentgenové i gama záření jsou **elektromagnetická vlnění** s velmi krátkými vlnovými délkami (obr.76.). **Rentgenové** záření vzniká při prudkém **zabrzdnění rychle letících elektronů**. Podle vlnové délky, popř. podle energie záření se rozlišuje na dlouhovlnné (o nízké energii-měkké), krátkovlnné (o střední energii) a velmi krátkovlnné (o vysoké energii). Vzniká ve zvláštní elektronce, zvané **rentgenka**. Naproti tomu **gama** záření vzniká při **rozpadu jader radioaktivního prvku**, jako Thulium, Iridium, Caesium, Kobalt a Radium.



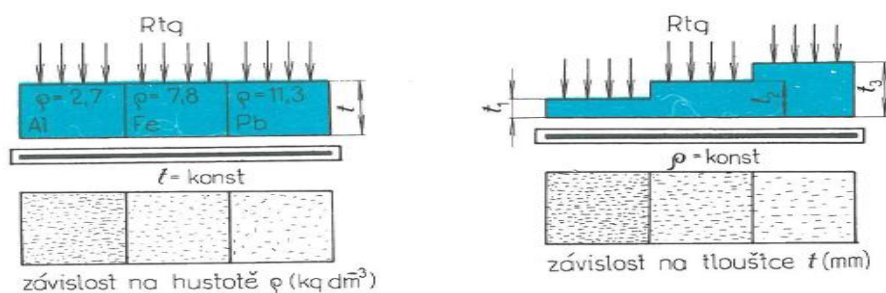
Obr.85. Vlnové délky různých druhů elektromagnetického vlnění. [2]

RTG i gama záření proniká materiálem, přičemž je **zeslabováno v závislosti na tloušťce a chemickém složení materiálu** a na vlnové délce záření. Záření krátkovlnnější, tj. o vyšších energiích, je při průchodu materiálem méně zeslabováno než záření dlouhovlnné.

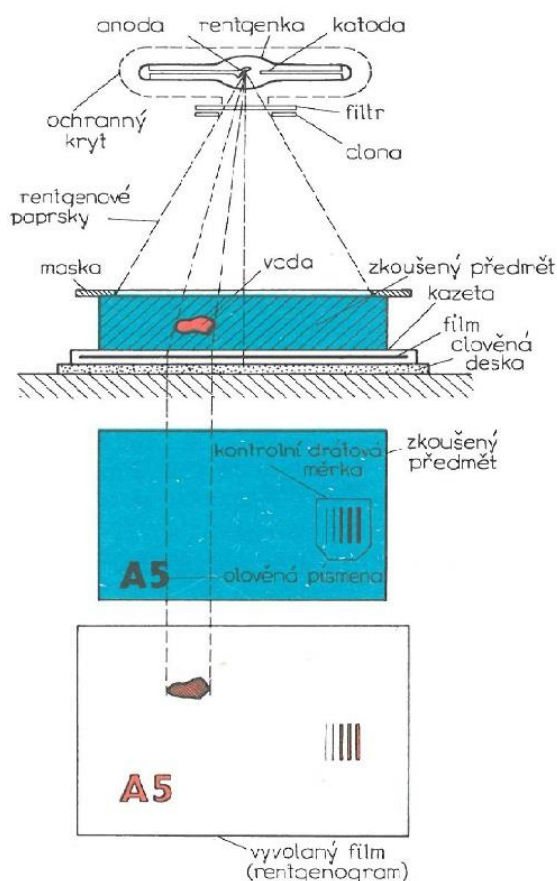
Intenzita záření, které prošlo materiálem, se zjišťuje několika způsoby:

- *fotochemicky* – záření působí na citlivou vrstvu fotografického filmu a vzniká tak fotografický záznam-rentgenogram
- *vizuálně přímo* – pozoruje se přímo stínový obraz na fluorescenčním štítu
- *vizuálně nepřímo* – pomocí elektrooptického převaděče-fluorescenční obraz na štítu se pozoruje optickým zařízením, nebo se přenáší na televizní obrazovku, přičemž je možné dosáhnout až 3000 násobného zvětšení
- *ionizačními metodami* – intenzita se měří ionizačními detektory a odečítá se nebo registruje na měřicích přístrojích.

Je-li **tloušťka materiálu zeslabena** ve směru záření **vadou** o určité tloušťce a vhodné orientaci, dopadne **v průmětu vady** na fotografický film **záření o větší intenzitě** než v ostatních místech. Proto se na filmu po vyvolání objeví **obraz vady**, který je **tmavší** než okolí (obr.79.). [2], [20], [23], [24]



Obr.86. Závislost prozáření na hustotě a tloušťce materiálu. [2]



Obr.87. Princip prozařování RTG paprsky. [2]



Obr.88. Rentgenogram. [21]

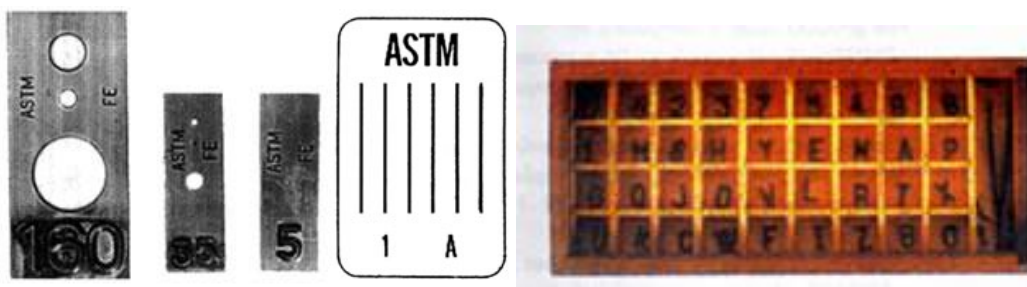
Prozařovací metody se používají převážně při kontrole prostorových vnitřních vad, které výrazně zeslabují tloušťku stěny ve směru záření, a to hlavně u složitých odlitků (např. blok motoru) nebo svarů. Na snímkování se používají buď **přenosné** nebo **stacionární** přístroje, umístěné z bezpečnostních důvodů ještě ve stíněných buňkách nebo speciálních místnostech. [2], [20], [23], [24]



Obr.89. Přenosné RTG přístroje. [21]



Obr.90. Stacionární RTG přístroje. [21]



Obr.91. Olověné měrky a písmena pro RTG. [21]

K prozařovacím metodám patří samozřejmě i **počítačová tomografie (CT)**, která je schopna v drobných (cca milimetrových) řezech zobrazit detailní 3D průřez vzorku – rentgenka se otáčí kolem osy a skenuje tak vzorek ze všech úhlů, zároveň se axiálně posouvá.

3.3. Nedestruktivní strukturoskopie

Moderní průmyslová výroba je úspěšná jen při 100% záruce kvality výrobku a minimálních výrobních nákladech. Přejímka výrobků podle atestu nebo vlastností materiálu u statistického vzorku výrobků z dodaného množství nemusí vést ke zdárným výsledkům. Nedestruktivní strukturoskopie umožňuje měření užitečných vlastností přímo na výrobcích. Metody nedestruktivní strukturoskopie měří vždy nějakou fyzikální veličinu (př. útlum, rychlost šíření ultrazvuku, zbytková magnetizace, elektrická vodivost...), která má známou návaznost na některou sledovanou vlastnost (př. pevnost, tvrdost, modul pružnosti, struktura, způsob vyloučení grafitu apod.). Tyto závislosti se obvykle získávají experimentálně, za daných podmínek (např. pro konkrétní výrobek), vycházejí ale z obecně známých principů (př. zákony šíření akustického nebo elektromagnetického vlnění, chování feromagnetického materiálu ve vnějším magnetickém poli aj.). Metod je opět celá řada, ovšem pro jejich pochopení je již třeba hlubších znalostí především nauky o materiálu a fyziky pevných látek, což se vymyká rozsahu středoškolského učiva a nemůže tedy být náplní této publikace.

4. Ostatní zkoušky

Výše uvedené destruktivní a nedestruktivní zkoušky představují v kostce to, co si běžně pod tímto pojmem představujeme v souvislosti se strojírenskou praxí, ačkoli kompletní škála zkoušení je nesmírně široká. Při dimenzování součástí a kontrole výroby nás skutečně nejvíce zajímají především mechanické vlastnosti jako tvrdost, pevnost či houževnatost, dále technologické zkoušky a ty destruktivní zkoušky, které nám umožňují odhalit skrytou vadu nebo bez porušení ověřit např. strukturu nebo některou z důležitých charakteristik materiálu. Také se ve většině případů jedná o zkoušky pro především kovové materiály. Materiály jako jsou polymery, keramika, sklo či textil mají svou vlastní, velmi specifickou sféru zkoušek, zaměřených na typické vlastnosti těchto materiálů (sklo – př. optické vlastnosti, keramika – př. pórovitost, pevnost v tlaku, plasty – př. reologické vlastnosti, textil

– př. odolnost proti otěru, prášivost aj.). Není v moci této publikace všechny tyto zkoušky pojmut, k jejich pochopení je navíc potřeba rozsáhlých multioborových znalostí.

Zcela samostatnou kapitolou zkoušení všech druhů materiálů jsou pak *metody studia struktury* (od krystalových mřížek přes zrna až po chemické složení), které jsou založeny na komplexních znalostech fyziky pevných látek a nejsou stravitelnou látkou pro středoškoláky. Zkoumání mikrostruktury bývá nedílnou součástí řetězce zkoušek materiálu, kdy se k údajům např. o nejdůležitějších mechanických vlastnostech přidávají právě poznatky o stavu mikrostruktury – typ krystalové mřížky., typ, tvar a velikost zrn či lokální i globální chemické složení.

I stanovováním fyzikálních a chemických vlastností se zabývají samostatná odvětví, soubor metod k určování těchto vlastností je velmi rozsáhlý a je založen na řadě rozdílných principů. K prozkoumání nejdůležitějších z nich je možné využít např. souhrnné výukové materiály pro vysokoškolské předměty typu *Fyzikální laboratoře* nebo *Technická měření*.

Do oboru zkoušení materiálu spadá také celá řada metod, které se v rámci projektu Teorie v Praxi prolínají s dalšími tématy:

- *zkoumání makro/mikrostruktury* – zabývají se jí obory Optická mikroskopie, Mikroskopie atomárních sil a Rastrovací elektronová mikroskopie, dále pak obory Rentgenová difrakce a Nanomateriály a nanotechnologie
- *zkoumání chemického složení* – především obory Rastrovací elektronová mikroskopie, Rentgenová difrakce
- *stanovení tepelných vlastností* – především obor Termické analýzy
- *zkoumání vlastností povrchů* – z hlediska struktury (před. obory Mikroskopie atomárních sil, Rastrovací elektronová mikroskopie) i odolnosti např. tenkých povrchových vrstev (obory Plasma a možnosti jejího využití, Nanomateriály a nanotechnologie)

5. Literatura

- [1] Ptáček, L. a kol: *Nauka o materiálu 1*; CERM, Brno, 2003; p. 371-511; ISBN 80-7204-284-1.
- [2] Hluchý, M., Beneš, J.: *Strojírenská technologie*; SNTL, Praha, 1990; p. 16-35; ISBN 80-03-00145-5.
- [3] Smallman, R.E.: *Moderní nauka o kovech*; SNTL, Praha, 1965, p. 54-78; 04-002-65.
- [4] Veleš, P.: *Mechanické vlastnosti a zkoušení kovů*; SNTL, Praha, 1989; p. 19-389; ISBN 80-227-2178-6.
- [5] ČSN EN 10002-1 (42 0310): *Kovové materiály – Zkouška tahem – Část 1: Zkouška tahem za okolní teploty*. Český normalizační institut, Praha, listopad 1994.
- [6] Skrbek, B.: *Mikroohybová zkouška litin*. CONMET 91: II. Celostátní seminář o metodách studia struktury a vlastností materiálů, transferu progresivních technologií, 9.-11.9. 1991, Brno.
- [7] Andršová, Z., Skrbek, B., Voleský, L.: *Aplikace mikroohybové zkoušky na izotermicky kalené litiny*. In JMO – Jemná mechanika a optika, vol. 11-12, roč. 2013, p. 313-317. ISSN 0447-6441.
- [8] [online] <http://www.ateam.zcu.cz/>; <http://www.fs.cvut.cz/web/>; <http://www.fme.vutbr.cz/>; <http://www.kmt.tul.cz/>; <http://extra.ivf.se/smartquench>; <http://ovmt.webnode.cz/>; <http://www.kmt.tul.cz/edu/>; www.tf.uni-kiel.de; citováno dne 9.7. 2013.
- [9] PLUHAŘ, J., KORITTA, J.: *Strojírenské materiály*. SNTL/Alfa, Praha, 1977. 04-212-77
- [10] MACEK, K., ZUNA, P. a kol.: *Strojírenské materiály*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 2003. ISBN 80-01-01507.
- [11] [online] <http://www.csm-instruments.com/scratch>; citováno dne 30.7.2013.
- [12] [online] <http://qualitest-inc.com/omnitest.htm>; citováno dne 30.7.2013.
- [13] NOVOTNÝ, J. a kol: *Technologie I (Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1999; ISBN 80-01-01420-7.
- [14] Kolektiv autorů Sandvik Coromant, technická redakce: *Příručka obrábění*. Scientia, Praha, 1997; ISBN 91-97-22 99-4-6.
- [15] ČERNÝ, M. a kol.: *Korozní vlastnosti kovových konstrukčních materiálů*. SNTL, Praha, 1984; 04-239-84.
- [16] SODOMKA, J.: *Zkoušení a zpracování kovů a slitin*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997; ISBN 80-01-01411-2.
- [17] PAGÁČ, A.: Použití technologických zkoušek tvařitelnosti při tváření. Bakalářská práce, FSI VUTBR, Brno, 2012.

- [18] VELEŠ, P.: *Mechanické vlastnosti a zkoušení kovů*. SNTL, Praha, 1989; p. 19-389; ISBN 80-227-2178-6.
- [19] KRAUS, V.: *Tepelné zpracování a slinování*. Skriptum ZČU, 2000, p.49-113. ISBN 80-7082-582-0.
- [20] KOPEC, B. a kol.: *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Brno, CERM, s.r.o., 2008. 570 s. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [21] [online] <http://www.ndt.net>; <http://www.xray.cz/>; <http://www.ultrazvuk.cz/>; www.karldeutsch.de/; <http://www.hirox-europe.com/>; <http://www.olympus-ims.com>; [citováno 10. 8. 2013]
- [22] SKRBK, B.: Nedestruktivní materiálová diagnostika litinových odlitků. Disertační práce, VŠST Liberec, 1988.
- [23] VĚCHET, M., KESL, J., ŠPIKA, L., EDER, V.: *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. SNTL, Praha, 1989. ISBN 80-03-00100-5.
- [24] OBRAZ, J.: *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. SNTL, Praha, 1989

Destruktivní a nedestruktivní zkoušení materiálů

Zuzana Andršová

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.