

2 ZÁKLADY SKÚŠOBNÍCTVA MATERIÁLOV

Výber materiálu pre výrobu rôznych súčastí a zariadení je založený na znalosti mechanických, Technologických, fyzikálnych i chemických vlastností materiálov. Pre vlastný výber materiálu však potrebujeme vyjadriť požadované vlastnosti číselne. Vyjadrenie vlastností materiálov číselnými hodnotami, materiálovými charakteristikami, je úlohou odboru nazývaného skúšanie materiálov. Materiálová charakteristika je teda číselná hodnota, ktorá kvantifikuje určitú vlastnosť a ktorá sa určuje experimentálne.

Vlastnosti materiálov sa najčastejšie rozdeľujú do týchto štyroch základných skupín:

- a) fyzikálne vlastnosti,
- b) chemické vlastnosti,
- c) mechanické vlastnosti,
- d) technologické vlastnosti.

Pre funkčné materiály sú dôležité predovšetkým ich fyzikálne (napr. merná hmotnosť, elektrická vodivosť) a chemické (napr. odolnosť voči korózii) vlastnosti. Pre materiály konštrukčné v prevádzke sú významné vlastnosti súvisiace s porušovaním povrchu súčiastok, t.j. ich odolnosť voči korózii a opotrebeniu. Zásadný význam pre aplikáciu konštrukčných materiálov majú ich mechanické vlastnosti (napr. pevnosť, tvrdosť). Vhodnosť použitia daného materiálu pre danú technológiu spracovania charakterizujú technologické vlastnosti (zvariteľnosť, tvárnosť, zlievateľnosť, obrobiteľnosť).

Fyzikálne vlastnosti materiálov sú priamym prejavom vnútornej stavby materiálu bez pôsobenia vonkajšieho mechanického namáhania. Medzi základné fyzikálne vlastnosti patrí:

- elektrická vodivosť (schopnosť viesť elektrický prúd – pohyb nosičov elektrického náboja),
- elektrická supravodivosť (pri teplote v blízkosti absolútnej nuly sa merný elektrický odpor znižuje skokom na veľmi nízku, takmer nulovú hodnotu,
- tepelná vodivosť (schopnosť prenášať tepelnú energiu),
- pružno-tepelne vlastnosti (teplotná rozťažnosť - zmena rozmerov s teplotou, merná tepelná kapacita - množstvo tepla potrebné na zohriatie jednotkového množstva hmoty o 1 K, teplota tavenia - realizuje sa pri nej reverzibilná zmena tuhého skupenstva na kvapalné, modul pružnosti - vyjadruje vzťah medzi napätím a deformáciou v oblasti pružných deformácií),
- magnetické vlastnosti (diamagnetizmus - látka je magnetická, iba ak sa nachádza v magnetickom poli magnetu, paramagnetizmus - materiál sa navonok javí ako nemagnetický, feromagnetizmus - materiál sa ľahko zmagnetizuje),
- hustota (hmotnosť objemovej jednotky homogénnej látky pri určitej teplote),

- akustické vlastnosti (šírenie zvukových vln v materiáli a vnútorné tlmenie materiálu),
- termoelektrické vlastnosti (schopnosť indukovať elektrické napätie pri rozdieli teplôt na jeho koncoch),
- optické vlastnosti (odrazivosť, index lomu pre transparentné materiály, priehľadnosť).

Chemické vlastnosti materiálov - medzi chemické vlastnosti možno zaradiť napríklad:

- hygroskopia (schopnosť materiálov pohlcovať vlhkosť),
- povrchová energia (rozdiel vnútornej potenciálnej energie stavebnej častice na povrchu a vo vnútri materiálu) a povrchové napätie (energia potrebná na vznik nového povrchu),
- korózna odolnosť (odolnosť materiálu v rôznych korózných prostrediach).

Mechanické vlastnosti materiálov sú určované pri pôsobení vonkajších síl a ich hodnoty súvisia s kryštálovou štruktúrou a poruchovosťou materiálov.

Medzi základné mechanické vlastnosti možno zaradiť:

- pevnosť - schopnosť materiálu zachovať si celistvosť pri pôsobení vonkajších síl,
- pružnosť - schopnosť materiálu elasticky sa deformovať,
- plastičnosť - schopnosť materiálu plasticky sa deformovať,
- húževnatosť - práca potrebná na porušenie materiálu, vyjadruje mieru odporu proti krehkému porušeniu materiálu.

Medzi odvodené vlastnosti patrí:

- tvrdosť - miera odporu materiálu proti vnikaniu telesa definovaného tvaru, ktorý sa vtláča do povrchu materiálu spravidla statickým zaťažením,
- pevnosť pri nízkych teplotách,
- odolnosť proti únave – schopnosť materiálu odolávať cyklickému namáhaniu,
- odolnosť proti tečeniu – schopnosť materiálu znášať zaťaženie pri vysokých teplotách.

Technologické vlastnosti materiálov určujú vhodnosť materiálu na určité technologické operácie a spresňujú technologické podmienky spracovania. V porovnaní s fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami sú rozdielne v tom, že sa nezisťujú ich hodnoty v presne definovaných základných veličinách, ale zvyčajne len porovnávacie hodnoty vhodných veličín. Podmienky technologických skúšok sa približujú reálnym podmienkam spracovania materiálu a výrobným technológiám.

Medzi základné technologické vlastnosti materiálov patria:

- zlievateľnosť - vhodnosť materiálu na výrobu tvarových súčiastok odlievaním,

- tvárniteľnosť za tepla a za studena - schopnosť materiálu dosiahnuť veľkú plastickú deformáciu bez porušenia celistvosti nad a pod teplotou rekryštalizácie,
- zvariteľnosť - schopnosť materiálu vytvoriť za určitých technologických podmienok a konštrukčnom riešení zvarový spoj požadovanej kvality,
- spájkovateľnosť - určuje vhodnosť materiálu na spájkovanie,
- obrobiteľnosť - vhodnosť materiálu na trieskové obrábanie.

2.1 Hodnotenie mechanických vlastností materiálov

Mechanické vlastnosti materiálov hodnotíme pomocou **mechanických skúšok**, ktorými získavame pre skúšaný materiál charakteristiky (mechanické vlastnosti), ktoré sú podkladom pre pevnostný výpočet strojných súčastí a overenie ich vhodnosti k ďalšiemu spracovaniu. Tvar a rozmery skúšobných vzoriek, postup pri realizácii skúšky, požiadavky na skúšobné zariadenia ako aj ďalšie podmienky skúšok sú predpísané normami.

Skutočný materiál nie je dokonale homogénny (napr. anizotropia materiálu, textúra a pod.), výsledky skúšok preto výrazne závisia od miesta a spôsobu odberu skúšobných vzoriek. Vzorky z daného materiálu je preto potrebné odobrať tak, aby žiaducim spôsobom charakterizovali skúmané vlastnosti materiálu. Pri odbere vzoriek nie je dovolené ovplyvnenie skúšanej vlastnosti (napr. tepelným ovplyvnením pri odrezávaní vzorky a pod.). Miesta odberu v mnohých prípadoch definujú normy, v opačnom prípade je potrebné tieto miesta zreteľne vyznačiť.

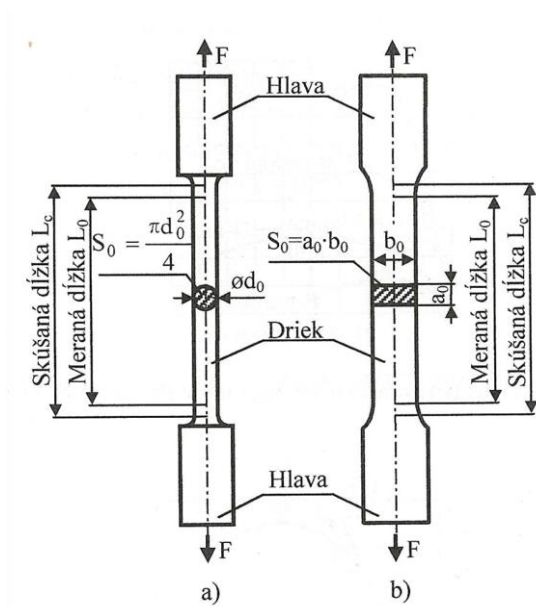
Mechanické skúšky rozdeľujeme:

1. podľa charakteru vonkajšej pôsobiacej sily na vzorky:
 - **statické skúšky** – určujú chovanie materiálu pri pôsobení kludných spojitých síl, zaťažovanie sa v priebehu skúšky pôsobí od nuly, zväčšuje sa pomaly, bez rázov. Získané výsledky statických skúšok sa bežne využívajú v technickej praxi, napr. hodnoty sú dôležité na dimenzovanie, hodnotenie únosnosti, pevnostné výpočty súčiastok a konštrukcií, na výpočet tvárniacich síl pri valcovaní, kovaní, redukcii prierezu a pri ťahaní drôtov, plechov.
 - **dynamické skúšky** – charakterizujú chovanie sa materiálu pri pôsobení rázového alebo cyklického zaťažovania.
2. podľa teploty počas zaťažovania vzoriek:
 - pri nízkych (kryogénnych) teplotách,
 - obvyklých teplotách (pri teplote miestnosti),
 - pri vysokých teplotách.

2.1.1 Statická skúška ťahom (STN EN ISO 6892-1)

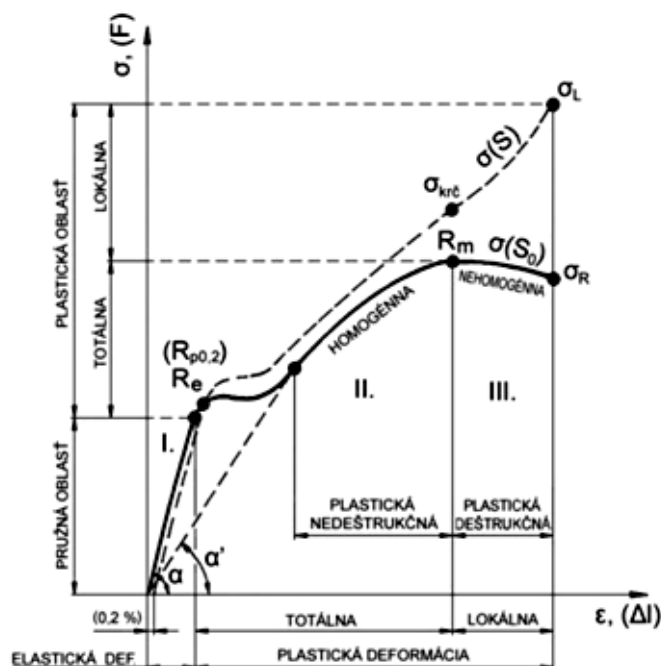
Patrí medzi najrozšírenejšie statické mechanické skúšky materiálov a to hlavne pre svoju jednoduchosť a množstvo výsledkov, ktoré poskytuje. Princíp skúšky spočíva v statickom zaťažovaní skúšobnej tyče predpísaných tvarov a rozmerov. Vzorka je upnutá do čelustí skúšobného stroja tak, aby sa os vzorky zhodovala s osou pôsobiacej sily, Obr.2.1. Pre ťahovú skúšku sa používajú tzv. trhacie stroje, ktoré sú koncipované na mechanickom alebo hydraulickom princípe. Musia byť vybavené zariadením na meranie zaťažujúcej sily, na meranie deformácie a záznamovým zariadením závislosti deformácie od zaťažujúcej sily.

Sila F postupne plynulo vzrastá až do porušenia vzorky, pričom sa skúšobná tyč predlžuje. V prvej fáze sa tyč predlžuje pružne a predĺženie je priamo úmerné sile F . V ďalšej fáze sa tyč predlžuje plasticky – nevratne. V bode m sa na tyči prejaví výrazné zúženie priemeru tyče a vytvorí sa zúžené miesto tzv. krčok, ktorý sa predlžuje až dôjde k pretrhnutiu skúšobnej tyče. Celkové predĺženie tyče pri pretrhnutí sa potom rovná súčtu elastického predĺženia a plastického predĺženia.



Obr.2.1 Skúšobné tyče pre statickú skúšku ťahom: a – skúšobná tyč kruhového prierezu, b – plochá skúšobná tyč obdĺžnikového prierezu

Počas skúšky sa zaznamenáva závislosť predĺženia skúšobnej tyče od pôsobiaceho zaťaženia, tzv. ťahový diagram, ktorý je registrovaný skúšobným strojom. Pracovný diagram skúšky ťahom znázorňuje priebeh odporu skúšaného materiálu vyjadrený napätím R [MPa] proti jeho deformácii ε [%] a porušeniu, Obr.2.2. Skúšobný stroj zaznamenáva pracovný diagram skúšky ťahom v súradniciach: zaťaženie F [N, kN] – absolútne predĺženie meranej dĺžky Δl [mm]. Priebeh krivky F - Δl je totožný s priebehom krivky R - ε .



Obr.2.2 Pracovný diagram skúšky ťahom
 $\sigma(S_0)$ - konvenčná závislosť, $\sigma(S)$ - skutočná závislosť

Z ťahového diagramu je možné určiť materiálové charakteristiky ako napr.:

Medza klzu R_e – je napätie, pri ktorom sa materiál plasticke (trvalo) deformuje bez prírastku zaťaženia, ak materiál vykazuje klzový jav.

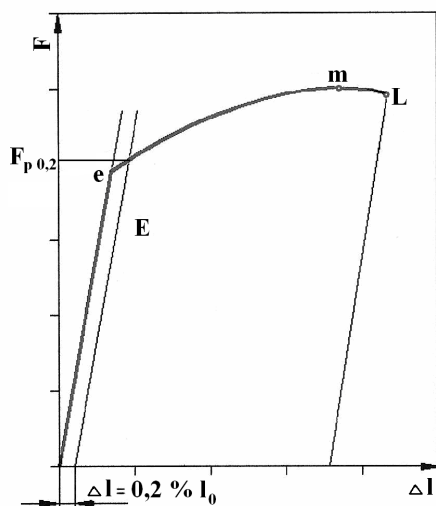
Dohovorená medza klzu $R_{p0.2}$ - napätie, pri ktorom plasticke deformácia dosiahne predpísanú hodnotu vyjadrenú v percentách začiatočnej meranej dĺžky. Vyjadruje sa symbolom doplneným indexom, ktorý označuje hodnotu plastickej deformácie napr. 0,2 % ($R_{p0.2}$). Stanovuje sa z ťahového diagramu pomocou priamky rovnobežnej s lineárnou časťou diagramu vo vzdialenosti, ktorá zodpovedá predpísanej hodnote plastickej deformácie. Priesečník, v ktorom priamka pretína krivku, udáva zaťaženie zodpovedajúce požadovanej dohovorenej medzi klzu, Obr.2.3. Dohovorená medza klzu sa vypočíta ako pomer tohto zaťaženia k ploche začiatočného priečneho prierezu skúšobnej tyče S_0 .

Pevnosť v ťahu R_m – je zmluvné napätie, zodpovedajúce najväčšiemu zaťaženiu F_m .

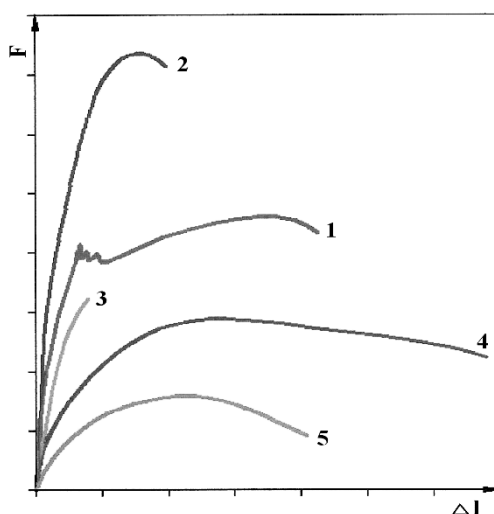
Ťažnosť A – je to trvalé predĺženie meranej dĺžky po roztrhnutí vyjadrené v percentách začiatočnej meranej dĺžky.

Zúženie Z – je to najväčšia zmena priečneho prierezu po roztrhnutí skúšobnej tyče vyjadrená v percentách začiatočného priečneho prierezu.

Každý materiál a jeho stav má charakteristický tvar diagramu skúšky ťahom. Základné typy ťahových diagramov pre rôzne materiály sú na Obr.2.4.



Obr.2.3 Princíp výpočtu $R_{p0,2}$



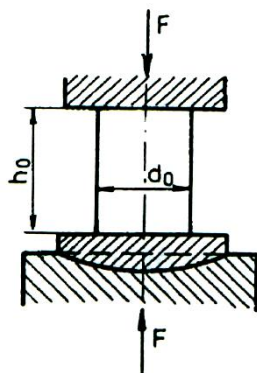
Obr.2.4 Základné typy ťahových diagramov:
1-mäkká oceľ, 2-tvrdá oceľ, 3-sivá liatina,
4-tvárne materiály (Cu), 5-tvárne materiály (Al)

2.1.2 Statická skúška tlakom

Skúšobným telesom je spravidla valček. Skúšobné teleso sa položí medzi dve podložky, z ktorých jedna je uložená v sedle, Obr.2.5. Sedlo zaisťuje zaťaženie v osi valčeka. Pri skúške sa zaznamenáva tlaková sila v závislosti od veľkosti stlačenia výšky valčeka.

Tlakovou skúškou sa hodnotí pevnosť v tlaku hlavne krehkých materiálov – liatina s lupienkovým grafitom, stavebné materiály a pod., t.j. materiálov, ktoré slúžia pre výrobu súčiastok a konštrukcií namáhaných v prevádzke tlakovým zaťažovaním.

Pre hodnotenie mechanických vlastností tvárných materiálov sa bežne používa skúška ťahom. Tlaková skúška u týchto materiálov má však veľký význam pre hodnotenie objemovej tvárnosti. Podobne ako u skúšky ťahom i v prípade tlakovej skúšky sa zisťuje závislosť skutočného napätia na skutočnej tlakovej deformácii.

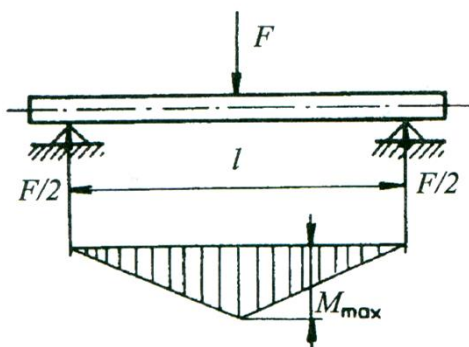


Obr.2.5 Schéma zaťažovania skúšobného telesa tvaru valčeka pri skúške tlakom

2.1.3 Statická skúška ohybom

Vykonáva sa prevažne na krehkých materiáloch, najmä pri sivej liatine, konštrukčnej keramike a pod., nakoľko pri húževnatých materiáloch porušenie skúšobnej vzorky nenastane.

Pri skúške sa skúšobná tyč obdĺžnikového alebo kruhového prierezu položí na dve opory, (spravidla valčeky), Obr.2.6. Skúšobný stroj pracuje v režime tlakového zaťažovania. Hornú časť prípravku pre ohybovú skúšku tvorí jeden tŕň, ktorý pôsobí silou v prostriedku skúšobnej tyče – skúška trojbodovým ohybom, alebo dva tŕne umiestnené symetricky vzhľadom k stredu tyče - skúška štvorbodovým ohybom. Účelom skúšky je získať závislosť sila – priehyb tyče. Priehyb sa meria snímačom premiestnenie stredu tyče vzhľadom k najbližším oporám.



Obr.2.6 Schéma skúšky trojbodovým ohybom

Pri priehybe nie je napätie v priereze tyče konštantné, ale mení sa. Na povrchu vzorky proti zaťažovaciemu trŕňu pôsobí maximálne ťahové napätie. Smerom ku stredu tyče napätie klesá na nulovú hodnotu a ďalej nadobúda záporné hodnoty, t.j. je tlakové.

Skúšky ohybom tvárných materiálov využívajú väčšinou technológovia k odhaleniu existencie povrchových trhlín v okolí zvaru, k zisťovaniu medznej deformácie pri ohýbaní plechov a pod.

2.1.4 Skúšky tvrdosti

Tvrdosť ako jedna z mechanických vlastností má hlavne u kovových materiálov mimoriadnu dôležitosť. **Tvrdosť materiálu** je odpor proti deformácii jeho povrchu vyvolanej pôsobením geometricky definovaného telesa.

Podľa rýchlosti zaťaženia možno skúšky tvrdosti rozdeliť *na statické a dynamické*. Princípom týchto skúšok je posudzovanie tvrdosti materiálu podľa jeho odporu proti deformácii povrchu vyvolaného mechanickým účinkom tvrdšieho telesa (indentora) stanovených rozmerov.

Na meranie tvrdosti sa vyvinulo veľa skúšobných metód, ktoré podľa princípu je možné rozdeliť *na metódy vtlačacie, vrypové, odrazové a kyvadlové*.

Tvrdosť materiálu sa v technickej praxi meria najmä **vtlačacími skúškami**, u ktorých je merítkom tvrdosti veľkosť plastickej deformácie (metódy Brinell, Vickers, Knoop), alebo metódy, u ktorých je merítkom tvrdosti veľkosť elasticko-plastickej deformácie (metódy Rockwell). Vtláčacie telieska sú obvykle jednoduchého geometrického tvaru (guľa, kužeľ, ihlan) alebo tvaru, ktorý sa týmto tvarom približuje – napr. kužeľ s malým zaoblením vrcholu u niektorých metód Rockwell. Zvolením týchto tvarov sa sledovala jednoduchosť a reprodukovateľnosť ich výroby, optimálne využitie vlastností materiálu vtláčacieho telieska (napr. tvar vnikajúceho telieska Vickers rešpektuje tvar kryštálu diamantu a tak i jeho maximálnu tvrdosť. Voľbou tvaru kužeľa a ihlanu sa sledovala možnosť stanovovania tvrdosti nezávisle na veľkosti použitej sily (podobnosť vtiskov).

Tvrdosť u vtláčacích metód je definovaná ako pomer medzi použitým zaťažením a plochou vtlačku (metódy Brinell, Vickers), alebo pomerom medzi použitým zaťažením a plochou priemetu vtlačku (Knoop). Pri metódach Rockwell je tvrdosť určovaná priamo z trvalej hĺbky vtlačku. K ďalším skúškam patrí dynamická skúška pomocou Poldi kladivka, skúšky mikrotvrdosti a dynamická Shoreho metóda, ktorá patrí medzi dynamicko – elastické skúšky. Jedná sa o skúšku odrazom skúšobného telesa (gulička, diamantový hrot) a zisťuje sa výška jeho odskoku od meranej plochy.

Skúška tvrdosti podľa Brinella (STN EN ISO 6506-1) - princíp skúšky spočíva vo vtláčaní guľôčky o priemere D do povrchu skúšaného materiálu pôsobením konštantnej sily F [N], čím vznikne vtlačok s plochou povrchu S [mm²], Obr.2.7a. Tvrdosť sa definuje ako pomer F/S .

Označenie tvrdosti podľa Brinella:

Výsledok merania tvrdosti podľa Brinella sa označuje písmenami HBW (kde W označuje guľôčku zo spekaného karbidu), resp. HBS (kde S označuje guľôčku z kalenej ocele), nasleduje index, ktorý charakterizuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí: priemer guľôčky [mm], veľkosť skúšobného zaťaženia [kp], čas pôsobenia skúšobného zaťaženia [s], ak sa líši od stanoveného času (stanovený čas od začiatku zaťaženia do jeho plnej hodnoty nesmie byť menší ako 2 s a väčší ako 8 s, čas plného zaťaženia je potom od 10 do 15 s).

Príklad: 350 HBW 5/750 je označenie pre tvrdosť podľa Brinella s hodnotou 350 stanovenou guľôčkou zo spekaného karbidu (W) s priemerom 5 mm pri skúšobnom zaťažení 7,355 kN a časom zaťaženia od 10 s do 15 s.

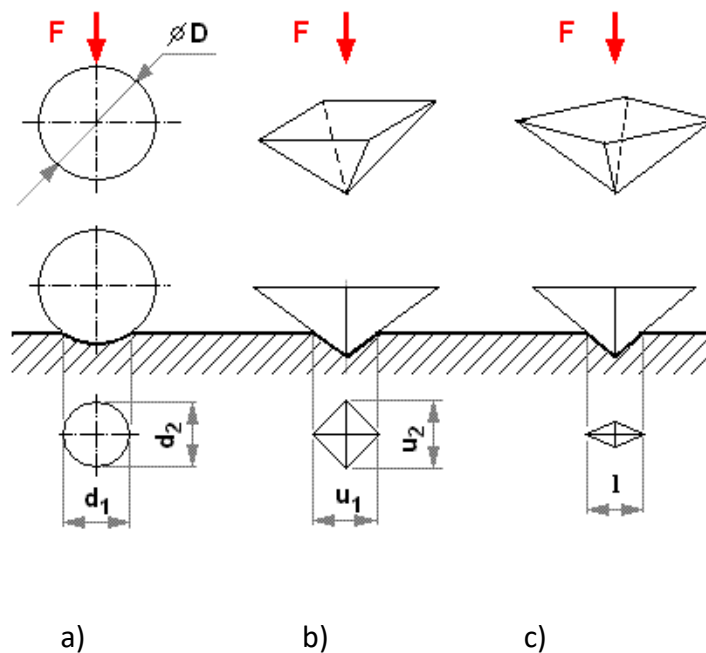
Skúška tvrdosti podľa Vickersa (STN EN ISO 6507-1) - do povrchu skúšaného materiálu sa vtláča indenter (štvorboký ihlan) z diamantu zaťažujúcou silou F . Po odľahčení sa zmerajú uhlopriečky u_1 a u_2 a vypočíta sa stredná hodnota u , Obr.2.7b. Tvrdosť podľa Vickersa je daná podielom zaťažujúcej sily F a povrchu vtlačku A .

Označenie tvrdosti podľa Vickersa:

Výsledok merania tvrdosti podľa Vickersa sa označuje písmenami HV a indexom, ktorý charakterizuje podmienky skúšky v nasledujúcom poradí: veľkosť skúšobného zaťaženia [kp], čas pôsobenia skúšobného zaťaženia [s], ak sa líši od stanoveného času (stanovený čas od začiatku zaťaženia do jeho plnej hodnoty nesmie byť menší ako 2 s a väčší ako 8 s, čas plného zaťaženia je potom od 10 do 15 s).

Príklad: 185 HV 30 je označenie pre tvrdosť podľa Vickersa s hodnotou 185, stanovenou skúšobným zaťažením 294,2 N a časom zaťaženia od 10 s do 15 s.

Skúška tvrdosti podľa Knoopu (STN EN ISO 4545) – metóda je určená pre meranie veľmi tenkých (napr. nitridových) vrstiev, nakoľko pri tejto metóde je pomer dĺžky uhlopriečky k hĺbke vtlačku 30 (napr. u metódy Vickers je 7). Metóda je založená na vtláčaní diamantového štvorbokého ihlanu do skúšaného materiálu definovanou silou. Vtlačok má tvar pretiahleho kosoštvorca a na rozdiel od metódy Vickers sa meria iba dlhšia uhlopriečka, Obr.2.7c.



Obr.2.7 Skúška tvrdosti

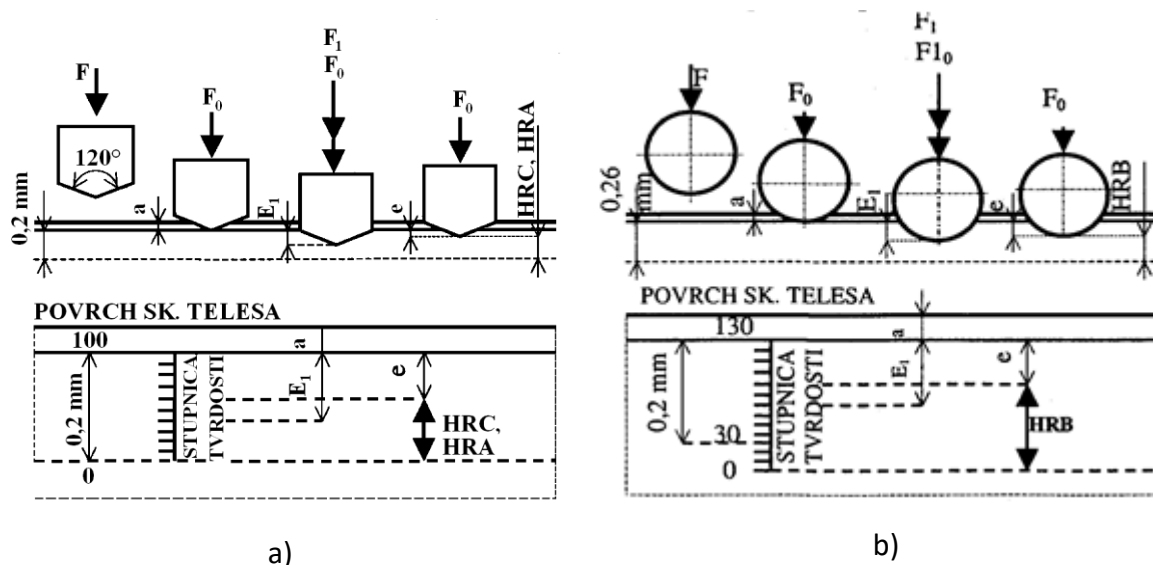
a) Brinell, b) Vickers, c) Knoop

Porovnanie vtlačkov, vytvorených metódou Knoop a Vickers pri danej záťaži a materiáli:

- vtlačok Knoop má približne polovičnú hĺbku ako Vickers, čo túto metódu robí vhodnou pre meranie keramiky a krehkých materiálov,
- z rovnakého dôvodu je ale Knoop citlivejšia metóda na kvalitu prípravy povrchu pred meraním,
- hlavná diagonála u Knoopa je trikrát dlhšia ako pri metóde Vickers, čím sa minimalizuje chyba pri meraní dĺžky tejto diagonály, čo je veľmi dôležité pri meraní tvrdých materiálov s malými vtlačkami,
- z hľadiska tvaru vtlačku je Vickers vhodnejší pre malé kruhové plochy a Knoop je vhodnejší pre tenké vrstvy.

Skúška tvrdosti podľa Rockwella (STN EN ISO 6508-1) - princíp skúšky spočíva vo vtlačaní diamantového kužeľa, alebo oceleovej guľôčky do skúšaného materiálu a tvrdosť je vyjadrená rozdielom medzi zmluvnou hĺbkou a hĺbkou trvalého vtlačku. Pri Rockwellovej skúške je možné použiť stupnice A až K, najčastejšie sa používajú stupnice A, B a C, pričom pre stupnice A a C sa používa diamantový kužeľ s vrcholovým uhlom 120° a pre stupnicu B kalená oceleová guľôčka s priemerom $D = 1,587 \text{ mm}$, Obr.2.8. Tvrdosť podľa Rockwella sa

označuje hodnotou tvrdosti a písmenami udávajúcimi označenie metódy a stupnice, napr. 28 HRC.



Obr.2.8 Princíp skúšky tvrdosti podľa Rockwella a - podľa stupnice HRC a HRA,
b – podľa stupnice HRB

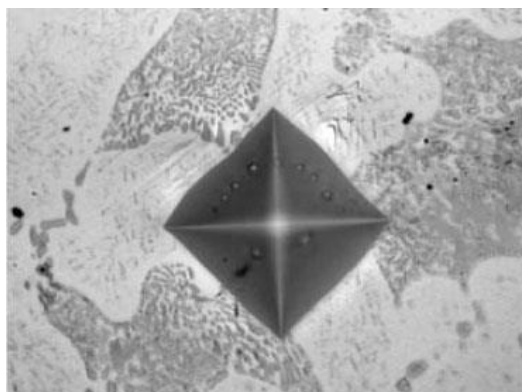
Skúška tvrdosti komparačnou metódou - skúška tvrdosti pomocou *Poldi kladivka* je rýchla dynamická skúška na určenie tvrdosti podľa Brinella porovnávacou metódou. Súčasne do skúšaného materiálu a porovnávacej tyčinky (referenčného materiálu) so známou tvrdosťou dynamicky (rázom) vtláčame kalenú oceľovú guľôčku s priemerom $D = 10 \text{ mm}$. Guľôčka zanechá vtláčok v skúšanom materiáli a vtláčok v porovnávacej tyčinke. V tabuľkách, zostavených na základe veľkého počtu porovnávacích meraní pre dané materiály, nájdeme príslušnú tvrdosť skúšaného materiálu HB_M .

Skúška tvrdosti podľa Shoreho – patrí medzi dynamické skúšky a je najpoužívanejšou odrazovou skúškou. Tvrdosť meriame veľkosťou odrazu závažia s guľovito vybrúseným diamantovým hrotom, ktoré dopadá z určitej výšky na skúšaný materiál. Pri náraze sa malá časť kinetickej energie spotrebuje na nevratnú plastickú deformáciu povrchu skúšobného telesa a zostávajúca energia sa prejaví odrazom telesa. Z dosiahnutej výšky po odraze sa vypočíta hodnota tvrdosti, ktorá ale u dynamických metód skúšania tvrdosti nedosahuje presnosť metód statických.

Skúška mikrotvrdosti - je skúškou na určenie tvrdosti jednotlivých zložiek štruktúry materiálu (na metalografických výbrusoch) ako aj na stanovenie tvrdosti tenkých vrstiev povlakov, vytvorených rôznymi technológiami naprašovania (napr. povlaky nástrojov TiN).

Mikrotvrdosť je možné merať pomocou Vickersovej metódy alebo Knoopovej metódy. Ich výhodou je použitie veľmi malých zaťažení (od 0,0098 N do 4,905 N). Mikrotvrdomery sú buď samostatné prístroje alebo tvoria súčasť metalografického mikroskopu. Nakoľko sú

používané veľmi malé zaťaženia, vzniknuté vtlačky majú mikroskopickú veľkosť a je ich potrebné vyhodnotiť s použitím dostatočného zväčšenia. Vpich identora pri meraní mikrotvrlosti Vickersovou metódou je na Obr.2.9.



Obr.2.9 Vpich identora pri meraní mikrotvrlosti Vickersovou metódou
zliatiny Ni-Cr-Mo-Ti (zv. 400x)

Pri porovnaní skúšok tvrdosti (Tab.2.1) možno konštatovať, že Brinellova metóda je vhodná pre hodnotenie tvrdosti mäkkých a stredne tvrdých materiálov s heterogénnou štruktúrou, napr. grafitické liatiny, mäkké ocele v pôvodnom stave, v žíhanom stave, neželezných kovov a ich zliatin.

Skúška tvrdosti Poldi kladivkom je iba orientačnou prevádzkovou skúškou bez porušenia skúšaného materiálu odberom vzorky a bez transportu materiálu do laboratória.

Vickersova metóda je považovaná za najpresnejšiu a najcitlivejšiu metódu a používa sa pri výskumných a vývojových prácach, pri kontrole výrobkov, ale vzhľadom na malú veľkosť vtlačku nie je vhodná pre meranie tvrdosti hrubozrnných materiálov a materiálov s nehomegénnou štruktúrou (napr. grafitické liatiny). Uplatňuje sa pri meraní tvrdosti zliatin tvárnených za studena, k meraniu tvrdosti cementovaných a nitridovaných vrstiev, je dobre použiteľná aj pre kalené ocele.

Rockwellova metóda je rýchla a jednoduchá (priamo sa odčíta hodnota tvrdosti na stupnici hĺbkomera) a využíva sa na bežnú a automatickú kontrolu tvrdosti po kalení, cementovaní, nitridovaní a pod. Skúškami mikrotvrlosti sa meria tvrdosť jednotlivých štruktúrnych zložiek. Shoreho metóda je pomerne málo presná a je určená na porovnávanie tvrdosti veľkých kalených predmetov, napr. valcov na valcovanie trate.

Tab.2.1 Prehľad používaných rozsahov a vhodnosť jednotlivých metód

Metóda	Použitý rozsah	Vhodnosť použitia
HBS	do 400	Pre mäkké a stredne tvrdé materiály.
HV	do 2000	Univerzálna metóda vhodná pre mäkké aj tvrdé materiály. nie je vhodná pre meranie hrubozrnných a heterogénnych materiálov.
HRC HRA	20 – 67	Pre meranie tvrdých materiálov, najmä ako kontrolná metóda pri tepelnom spracovaní.
HRB	25 – 100	Pre meranie mäkkých materiálov.
Poldi kladivko	do 400	Pre mäkké materiály. Orientačná prevádzková skúška vhodná pre meranie tvrdosti rozmerovo veľkých súčiastok priamo v prevádzke. Komparačná metóda.

2.1.5 Skúšky rázom v ohybe

Húževnatosť materiálu je vyjadrená ako jeho schopnosť pohlcovať mechanickú energiu do porušenia. Vzhľadom na to, že jav prechodu (tranzitné správanie) je z praktického hľadiska veľmi nepriaznivá vlastnosť materiálu, bolo potrebné nájsť vhodné skúšobné metódy a kritériá na jej posúdenie.

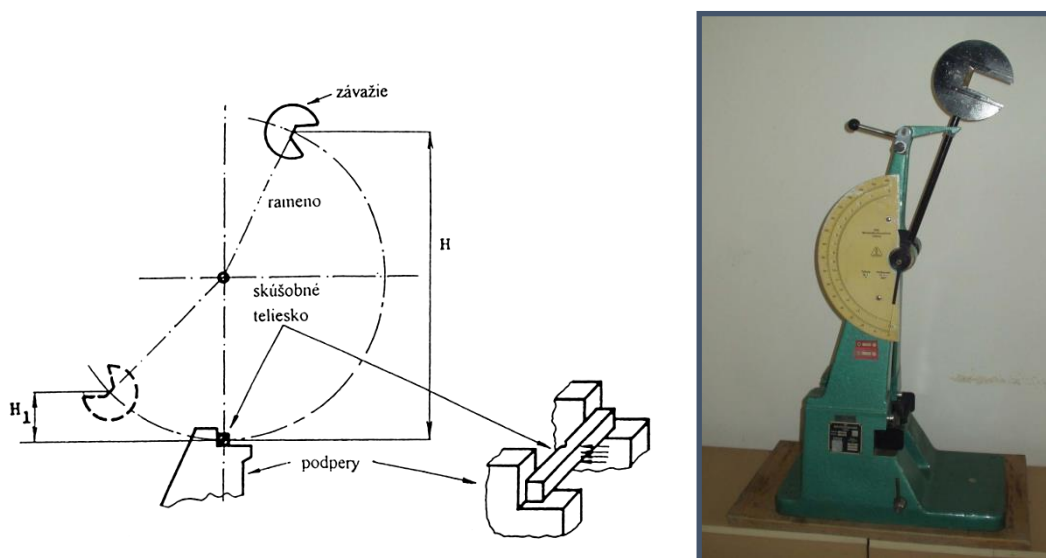
Najpoužívanějšími skúšobnými metódami **hodnotenia tranzitného správania materiálov** sú skúšky rázom v ohybe, skúšky teploty nulovej húževnatosti TNDT, skúšky veľkých telies na rázový ohyb DWTT, skúška teploty zastavenia trhliny TZT a tzv. ESSO skúška. Tieto skúšky, ktorými hodnotíme odolnosť voči vzniku nežiaduceho krehkého lomu, uskutočňujeme v podstate z týchto dôvodov:

- určenie pravdepodobnosti výskytu lomu daného materiálu, zaťažovaného za určitých podmienok,
- výber najvhodnejšieho materiálu z materiálov, ktoré sú k dispozícii pre určité použitie
- kontrola kvality pre výrobu materiálov a pri odovzdávaní,
- rozbor lomov, ktoré sa vyskytli v prevádzke,
- získanie dát, ktoré môžu byť priamo použité pre potreby konštrukcie (max. prevádzkové napätie, max. prípustná dĺžka trhliny, min. prevádzková teplota).

Skúška rázovej húževnatosti podľa Charpyho (STN EN ISO 148-1), je najpoužívanějšía skúšobná metóda hodnotenia tranzitného správania materiálov. Jej cieľom je zistiť hodnotu húževnatosti, ktorá je definovaná ako práca spotrebovaná na zlomenie skúšobného telieska s vrubom pri stanovených podmienkach skúšky. Pri skúške sa určuje rázová húževnatosť KCV [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$], ktorá je daná podielom absorbovanej energie pri zlomení skúšobnej tyče KV [J] a plochy priečného prierezu skúšobnej tyče S0 pred skúškou v mieste vrubu [cm^2]:

$$KCV = \frac{KV}{S_0} \quad [\text{J.cm}^{-2}]$$

Princíp skúšky spočíva v prerazení skúšobnej tyče s vrubo. Tyč predpísaných tvarov a rozmerov (obvykle 10 x 10 x 55 mm), ktorá je umiestnená na dvoch podperách skúšobného stroja (vrub je na odvrátenej strane úderu) sa prerazí jediným úderom kyvadlového kladiva. Údaje odčítané zo skúšobného kladiva (systém Charpy), Obr.2.10, ako aj rozmery a tvar skúšobnej tyče pred a po skúške, sú podkladom na vyhodnotenie skúšky, t.j. podkladom na určenie rázovej húževnatosti KC a stanovenie charakteru lomovej plochy.



Obr.2.10 Schéma a vzhľad skúšobného kladiva

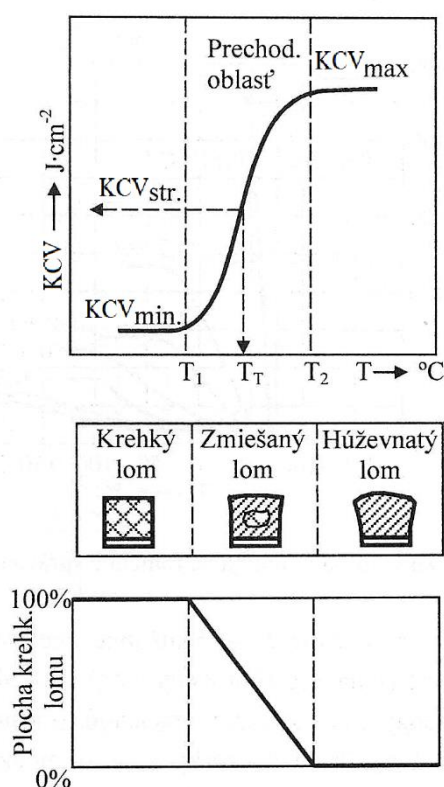
Rázová húževnatosť ako kritérium odolnosti proti krehkému lomu má praktický význam v podobe tranzitnej (prechodovej) krivky, ktorá vyjadruje závislosť vrubovej húževnatosti od teploty. Znižovaním skúšobnej teploty v určitom teplotnom intervale poklesne húževnatosť z maximálnej hodnoty KCV_{max} na minimálnu hodnotu. Tento interval sa nazýva prechodová oblasť a krivka, pri ktorej je tento pokles výrazný, prechodovou alebo tranzitnou krivkou, Obr.2.11.

Pri nízkych teplotách vzniká krehký lom s veľmi malou húževnatosťou KCV_{min} a pri vyšších teplotách húževnatý lom s veľkou húževnatosťou. V strmej časti krivky sa vyskytujú zmiešané lomy s určitým podielom húževnatého aj krehkého lomu.

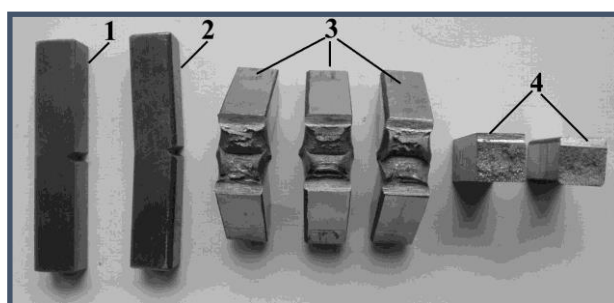
Konstrukčný materiál je potom charakteristický tranzitným správaním. Na strmej časti krivky sa nachádza charakteristický bod, ktorého súradnica na osi teplôt udáva tranzitnú teplotu TT. Tranzitná teplota TT sa potom stanoví ako teplota, pri ktorej hodnota vrubovej

húževnatosti zodpovedá jej strednej hodnote alebo KCV má stanovenú dohodnutú absolútnu hodnotu (napr. $KCV = 35 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$), resp. ako teplota, pri ktorej podiel krehkého lomu PKL = 50%.

Okrem energetického hľadiska je možné pre stanovenie tranzitnej teploty použiť aj faktografické hľadisko, založené na posudzovaní a vyhodnotení vzhľadu lomovej plochy skúšobnej tyče, Obr.2.12.



Obr.2.11 Tranzitná krivka



Obr.2.12 Vzhľad skúšobnej vzorky pred a po skúške

Pre technickú prax, z hľadiska úžitkových vlastností, je dôležité, aby konštrukčný materiál bol zaťažovaný pri teplotách nad tranzitnou oblasťou. Tranzitná oblasť (jej poloha) je ovplyvňovaná množstvom metalurgických a vonkajších faktorov, ako sú technologické a tepelné spracovanie, chemické zloženie, veľkosť zrna, starnutie, ožiarenie neutrónmi, zváranie, teplota, rýchlosť zaťažovania, konštrukčné vruby, hrúbka telesa, vnútorné napätia.

2.2 Hodnotenie technologických vlastností materiálov

Konštrukčné materiály sa vo výrobnom procese spracúvajú rôznymi technologickými operáciami a postupmi (napr. tvárnením, zváraním, zlievaním, obrábaním a pod.). Musia

mať preto zaručené aj technologické vlastnosti, ktoré podmieňujú úspešné vykonanie danej technologickej operácie, resp. postupu.

Medzi najdôležitejšie technologické vlastnosti patria:

- tvárniteľnosť - schopnosť pretvorenia materiálu do daného stupňa a tvaru bez porušenia celistvosti počas pôsobenia vonkajších síl,
- zvariteľnosť - spôsobilosť materiálu vytvoriť zváraním pri určitých technologických podmienkach zvarové spoje požadovaných vlastností.
- zlievateľnosť - predstavuje súhrn zlievárenských vlastností, ako sú tavitelnosť, tekutosť, zabiehavosť, zmrašťovanie, odmiešavanie, pohlcovanie plynov,
- obrábateľnosť - ako ľahko a s akým výsledkom sa daný materiál obrába, resp. s akou intenzitou sa opotrebuje nástroj, akú prácu musíme vynaložiť na oddelenie triesky, aký stupeň drsnosti dosiahneme.

Technologické vlastnosti nie je možné vyjadriť v presne definovateľných fyzikálnych veličinách. Preto sa musia zisťovať technologickými skúškami, ktoré do určitej miery napodobňujú praktické podmienky, ktorým bude konštrukčný materiál pri spracovaní alebo používaní vystavený. Na vylúčenie subjektivity pri hodnotení výsledkov a na zabezpečenie reprodukovateľnosti výsledkov je postup väčšiny technologických skúšok normalizovaný.

Charakteristickými predstaviteľmi technologických skúšok sú skúšky lámavosti (na overenie tvárniteľnosti, zvarateľnosti), hlbokotažnosti (na overenie tvárniteľnosti tenkých plechov - skúška hĺbením podľa Erichsena, skúška hĺbením podľa Engelhardta, skúšky zabiehavosti (na overenie zlievárenských vlastností) a skúška na stanovenie stupňa obrábateľnosti (na porovnaní obrábateľnosti v materiáloch).

Okrem vyššie uvedených skúšok sa používajú ďalšie technologické skúšky, napr. skúšky lámavosti za tepla, skúšky rúrok, skúšky drôtov atď.

2.2.1 Skúška lámavosti (STN EN ISO 7438)

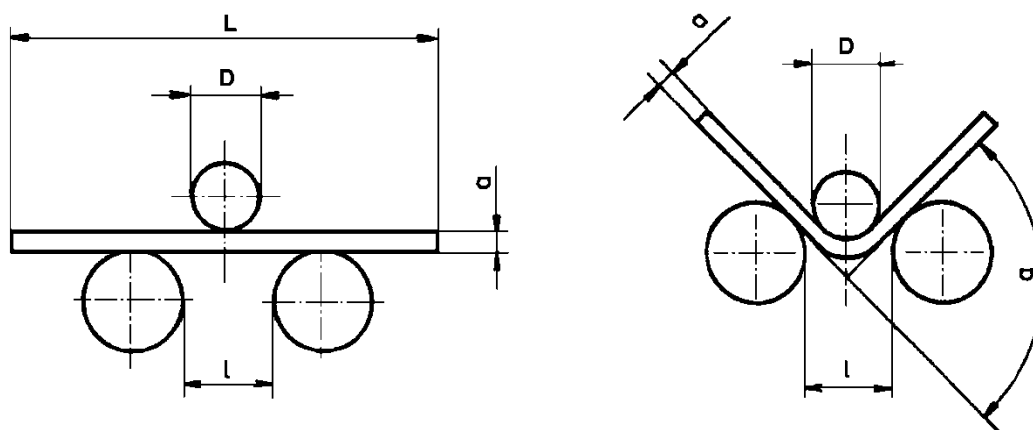
Cieľom skúšky je zistiť schopnosť kovových materiálov plasticky sa deformovať pri namáhaní statickým ohybom. Skúšobná tyč obdĺžnikového, kruhového, štvorcového alebo mnohouholníkového prierezu sa podrobí plastickej deformácii ohybom až do predpísaného uhlu. Neopracovaná plocha pri ohybe je na ťahanej strane. Všetky oblasti materiálu ovplyvnené strihaním alebo rezaním plameňom sa musia odstrániť. Hrany pravouhlých tyčí sa musia zaobliť. Dĺžka skúšobného telesa sa určuje podľa jeho hrúbky a použitého skúšobného zariadenia.

Skúška lámavosti sa robí na skúšobnom stroji alebo lise, ktorý je vybavený obvykle ohýbacím zariadením s dvoma podperami a tŕňom. Skúška lámavosti sa vykonáva pri teplote okolia jednou z nasledujúcich metód:

1. ohybom do predpísaného uhla pod zaťažením, Obr.2.13,
2. ohybom do rovnobežnej polohy ramien pri ich stanovenej vzdialenosti pod zaťažením, s použitím vložky alebo bez vložky,
3. ohybom do dosiahnutia ramien na seba pod zaťažením.

Zaťažovanie v ohybe musí pôsobiť pomaly, aby bol možný voľný plastický tok materiálu. Ohyb do predpísaného uhla sa môže ukončiť pôsobením zaťaženia priamo na voľné konce skúšobného telesa.

Skúška sa vyhodnotí v súlade s požiadavkami na výrobok. Pokiaľ pri predpísanom uhle nevznikli na ťahanej strane trhliny, skúška vyhovela. Protokol o skúške obsahuje odkaz na normu, metódu skúšania, tvar a rozmery skúšobnej tyče, údaje pre identifikáciu tyče (materiál, číslo tavby, smer osi telesa k výrobku) a samotný výsledok skúšky.



Obr.2.13 Skúška lámavosti trojbodovým ohybom

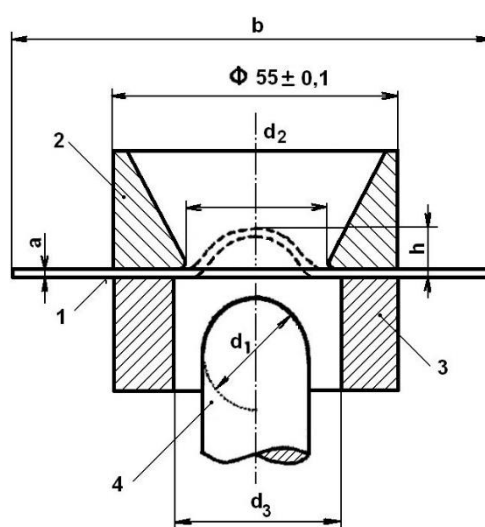
α - uhol ohybu, l – vzdialenosť podpier, L – dĺžka skúšobnej tyče,

D – priemer tŕňa, a – hrúbka plechu

Skúška lámavosti sa tiež využíva aj pri hodnotení zvarových spojov. Technické podmienky a rozmerové kritériá stanovuje STN EN ISO 5173. Cieľom skúšky je určiť ťažnosť a prítomnosť chýb na povrchu spoja alebo blízko neho. Skúška je ukončená, keď uhol ohybu α dosiahne hodnotu uvedenú v príslušnej norme na výrobok.

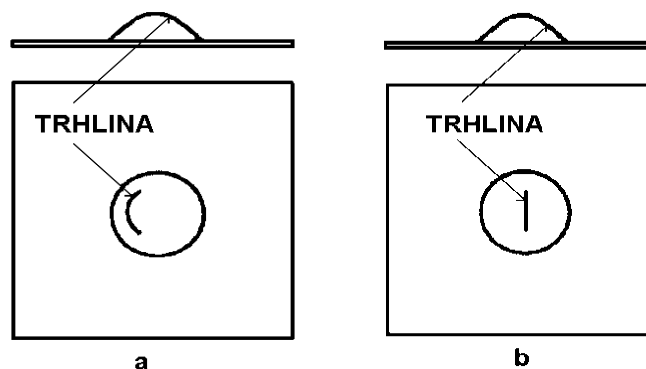
2.2.2 Skúška hĺbením podľa ERICHSENA (STN EN ISO 20482)

Skúška patrí k skúškam tenkých plechov do hrúbky 2 mm a používa sa na zistenie ich hlbokotažnosti – vhodnosti k hlbokému ťahaniu, opätovnému ohýbaniu a pod. Princíp skúšky, Obr.2.14, spočíva v zatlačení ťažníka (4) s guľovým zakončením do skúšaného plechu (1), ktorý je stlačený medzi ťažnicou (2) a pridržiavačom (3) silou 10 kN. Vtláčanie ťažníka sa zastaví v okamihu vzniku trhliny po celej hrúbke plechu. Odčíta sa veľkosť prehĺbenia h , ktorá je charakteristikou materiálu pri Erichsenovej skúške a označuje sa IE.



Obr.2.14 Princíp skúšky podľa Erichsena

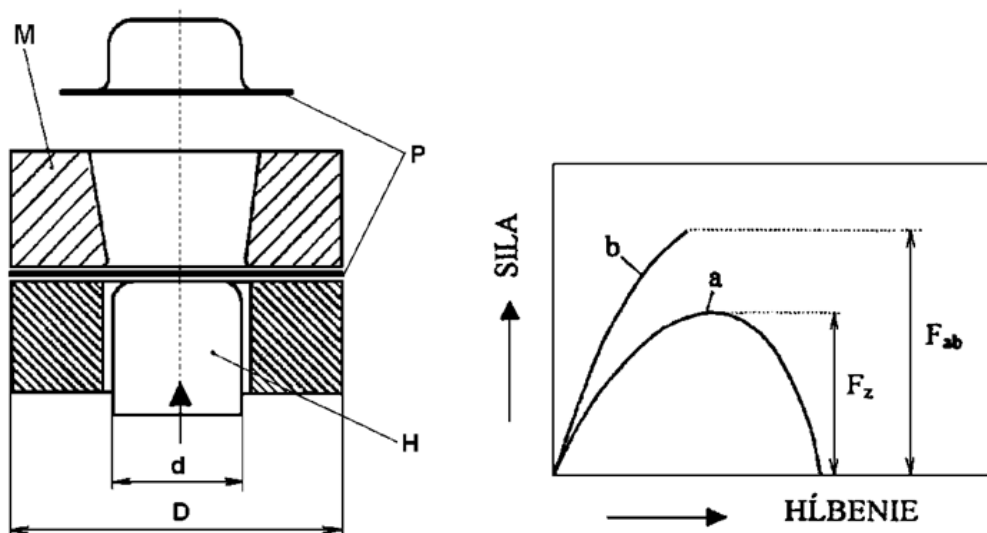
Ako doplňujúce kritérium sa môže použiť vzhľad povrchu skúšobnej vzorky v mieste prehĺbenia a tvar trhliny. Pre hlbokotažné plechy je typický tvar trhliny vo vrstevniciach okrúhleho tvaru - Obr.2.15.a, tvar trhliny vychádzajúci zo stredu je typický pre vláknité materiály nevhodné pre ťahanie – Obr.2.15.b. Skúška je vyhovujúca ak prehĺbenie IE je väčšie alebo sa rovná predpísanému prehĺbeniu podľa materiálového listu.



Obr.2.15 Tvar trhliny a vzhľad vzoriek po skúške hĺbením podľa Erichsena, plechu
a - vhodného pre hlboký ťah, b - nevhodného pre hlboký ťah

2.2.3 Skúška hĺbením podľa ENGELHARDTA

Tento typ skúšky patrí taktiež k skúškam hlbokoťažnosti tenkých plechov do hrúbky 2 mm. Princíp skúšky, Obr.2.16, spočíva vo vtláčaní skúšaného plechu (P) vo forme kotúča s priemerom D do ťažnice M pomocou ťažníka H o priemere d . Pri vtláčaní ťažníka do skúšobnej vzorky rastie sila s hĺbkou výlisku h (krivka a). Po prekročení maximálnej sily (ťažná sila F_z) táto opäť klesá. Pri zväčšovaní pôvodného priemeru vzorky rastie aj veľkosť ťažnej sily F_z . Po prekročení kritického priemeru vzorky ťažná sila dosiahne takú hodnotu, že sa prekročí medza pevnosti skúšaného materiálu na obvode výlisku a vzorka sa poruší, Obr.2.17. Priebeh sily v tomto prípade znázorňuje krivka b. Sila, pri ktorej dochádza k porušeniu, tzv. prenosná sila F_{ab} pri rovnakých podmienkach (priemer výlisku, hrúbka plechu) má pre daný materiál vždy rovnakú hodnotu.



Obr.2.16 Princíp skúšky

Pre každý plech je teda možné porovnať dve sily, a to silu F_z na vytvorenie štandardného výlisku a silu potrebnú na porušenie výlisku F_{ab} . Hlbokoťažnosť sa potom vyjadrí:

$$T = \frac{F_{ab} - F_z}{F_{ab}} \cdot 100\%$$

Veľkosť sily F_{ab} je možné určiť aj použitím jednej vzorky tak, že po určení sily F_z sa zablokuje okraj výlisku pridržiavačom a pri ďalšom ťahaní sa vzorka poruší.



Obr.2.17 Vzhľad vzoriek po skúške hĺbením podľa Engelhardta

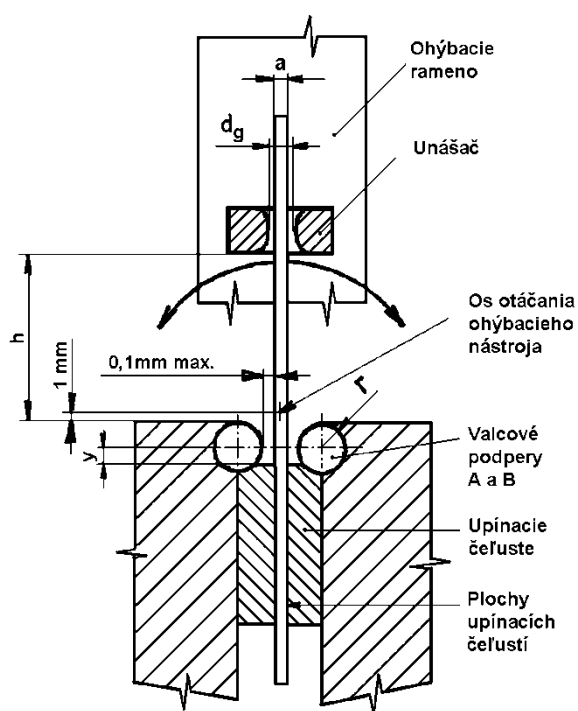
2.2.4 Skúška lámavosti plechov striedavým ohybom (STN EN ISO 7799)

Stanovuje schopnosť plechov a pásov s hrúbkou 3 mm a menej plasticky sa deformovať striedavým ohybom.

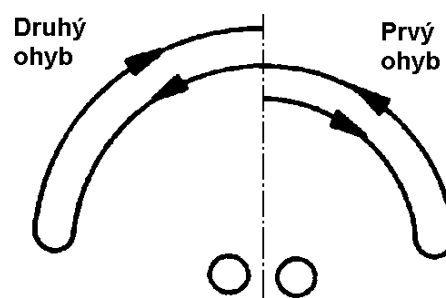
Podstata skúšky spočíva v opakovanom ohýbaní skúšobnej vzorky z východzej polohy na obe strany o 90°. Skúšobné zariadenie je schematicky znázornené na Obr.2.18. Polomer valcových podper r závisí od hrúbky skúšobného telesa a pohybuje sa v rozmedzí 1-10 mm. Vzdialenosť h musí byť od 25 do 50 mm. Šírka skúšobného telesa je 20-25 mm. Pásky menšej šírky ako 20 mm môžu byť skúšané v pôvodnej šírke.

Skúšobné teleso sa ohýba striedavo vpravo a vľavo o 90° . Jeden ohyb je definovaný ako ohnutie voľného konca skúšobného telesa o 90° a jeho vrátenie do východzej polohy. Ďalší ohyb sa robí v opačnom smere, Obr.2.19. Medzi jednotlivými ohybmi sa skúška neprerušuje. Rýchlosť ohýbania je rovnomerná a nesmie byť vyššia ako jeden ohyb za sekundu. Skúška je ukončená po dosiahnutí počtu ohybov stanovených v príslušných normách alebo do objavenia viditeľnej trhliny, prípadne až do úplného lomu.

Skúšobný protokol obsahuje údaje ako odkaz na normu, údaje pre identifikáciu skúšobného telesa, rozmery skúšobného telesa, podmienky pri skúške (r, h), spôsob ukončenia skúšky, smaotný výsledok skúšky.



Obr.2.18 Princíp skúšky lámavosti plechov
striedavým ohybom



Obr.2.19 Postup pri skúške plechov
striedavým ohybom

2.3 Nedeštruktívne skúšanie materiálov

Význam skúšobníctva v strojárstve

Na prvé miesto sa vo výrobe kladie kvalita, bezpečnosť spoľahlivosť a životnosť vyrábaných výrobkov. Pre ich zabezpečenie je nevyhnutné investovať do kontroly a testovania. Kontrolou a skúšaním je možné predísť nepodarkovosti výroby a tak zabrániť ekonomických škodám, dopadu na ekológiu a tiež ohrozeniu ľudských životov. Kontrola výrobkov sa realizuje vo všetkých odvetviach strojárskej výroby. Kontrolované sú vstupné suroviny a polotovary. Realizuje sa počas výroby ako tzv. medzioperačná kontrola a následne sú kontrolované hotové výrobky. V procesoch odlievania sa aplikuje napr. pri identifikácii, pórov, bublín, riedenín, stiahnutí, nezabehnutia, presadenia, zatečení, vybúlenia, výronkov, nárastov, zálupov, odmiešania odlievaných kovov, inklúzií z formovacích materiálov a grafitu, trhliny, štruktúrne a chemické nehomogenity, chyby akosti povrchov a pod. V technologických procesoch objemového a plošného tvárnenia sa realizuje kontrola za účelom odhaliť prítomnosť povrchových a vnútorných trhlín, zavalcovaných nekovových vtrúsenín, zaoxidovaných okují na povrchu, prítomnosť korózných splodín, heterogenity v štruktúrach, zdvojenie stien resp. nežiadúce zmeny hrúbok po tvárnení a pod. U obrobkov je primárne sledovaná akosť obrobených povrchov, prítomnosť trhlín, negatívne zmeny štruktúr vplyvom vneseného tepla pri obrábaní a pod. V procesoch tepelného spracovania sú skúšky zamerané na prítomnosť vonkajších a vnútorných chýb spracovaných povrchov, najmä prítomnosť trhlín, heterogenitu štruktúr a výskyt nežiaducich napr. (oduhličených) povrchových vrstiev. Najpodrobnejšie sú chyby definované pre oblasť zvarovania. Ich členenie a označovanie definuje STN EN ISO 6520-1. Norma člení chyby do šiestich základných skupín a to trhliny, dutiny, vtrúseniny, studené spoje, tiež neprievary (chyby odtavovania a závaru u tavného zvarovania), chyby tvaru-rozmerov a iné typy chýb. Všeobecne je možné chyby rozčleniť na chyby povrchové, chyby vnútorné a tesne podpovrchové a vnútorné. Včasným zistením a opravením chyby možno zvýšiť spoľahlivosť a životnosť zariadenia a zároveň sa vyhnúť nečakaným haváriám. Kontrola kvality môže prebiehať pomocou nedeštruktívnych ale tiež aj deštruktívnych skúšok.

Odhaliť kritické miesta umožňuje **defektoskopia**. Jedná sa o vedný odbor, ktorý pomocou nedeštruktívnych metód skúma defekty v materiáloch a výrobkoch resp. predpovedá vznik možností materiálových porúch v prevádzke.

Defekt je definovaný ako porušenie materiálu alebo výrobku, ktorého povaha, tvar, rozmery a priestorová orientácia má negatívny vplyv na jeho funkčné vlastnosti. Prítomnosť defektov má zásadný vplyv na vlastnosti materiálov. Ich identifikácia a lokalizácia pomocou nedeštruktívnych skúšok umožňuje predchádzať často katastrofálnym následkom porušení z pohľadu veľkých hospodárskych strát, ohrození zdravia a životov ľudí. Metódu nedeštruktívneho hodnotenia je potrebné voliť s ohľadom na vlastnosti skúmaných materiálov ako sú: elektrická vodivosť, bezporéznosť povrchov, feromagnetizmus a iné. Pri

nedeštruktívnych skúškach (NDT - non destructive testing) sú využívané fyzikálne princípy, ktoré na skúmané materiály nevplyvajú mechanicky, ani tepelne.

Konštrukčné materiály používané pri stavbe strojov a zariadení nie sú takmer nikdy bez chýb, čo vyplýva zo zákonitosti tvorby štruktúry, nedokonalosti výroby (mechanického a tepelného spracovania), v nemalej miere vplyvu ľudského faktora a nedodržiavania stanovených technologických postupov a pod. To či bude na základe realizovaných skúšok kvality materiál, polotovaru alebo výrobkov vyradený závisí od konkrétnej klasifikácie identifikovaných chýb.

Chyby a ich členenie

Za chybu materiálu, odliatku, výkovku, zvarku, obrobku, čiže výrobku sa rozumie každá odchýlka rozmerov, tvaru, hmotnosti, vzhľadu, makroštruktúry, mikroštruktúry a mechanických alebo fyzikálnych vlastností od vlastností prepísaných technickými podmienkami, normami resp. dohodami medzi zmluvnými stranami, prípadne určenými zmluvnou vzorkou. Na základe technických noriem, alebo dohodnutých technických podmienok môžu byť chyby klasifikované ako:

Chyby prípustné – sú odchýlky, ktoré normy a technické podmienky dovoľujú bez toho, aby ich bolo potrebné odstrániť.

Chyby opraviteľné – sú odchýlky, ktoré je možné vhodným zásahom (pokiaľ to dovoľuje norma alebo výslovné nezakazuje, technické podmienky alebo dohoda medzi zmluvnými stranami) buď opraviť na prípustnú mieru alebo celkom odstrániť.

Chyby neprípustné – sú odchýlky od príslušných noriem, technických podmienok, prípadne zmluvného vzorku, ktoré nie je možné odstrániť opravou, pretože je podľa daných kritérií neprípustná.

Chyby odstrániteľné – sú odchýlky od stanovených podmienok, ktoré je možné odstrániť len po vzájomnej dohode so spotrebiteľom, len zvláštnymi úpravami, technickým postupom, napr. tepelným spracovaním a pod.

Identifikácia polohy chyby

Zjavná (vonkajšia – povrchová) chyba – je chyba identifikovateľná voľným okom resp. pomocou jednoduchých pomocných zariadení (lupa, boroskop, fibroskop a pod.) a meradiel prehliadkou povrchu výrobku (odliatku, zvaru, výkovku a pod.).

Skrytá (vnútorná – podpovrchová) chyba – je chyba, ktorú nie je možné identifikovať voľným okom, ale až po úprave povrchu obrábaním, pomocou vhodných prístrojov napr. mikroskop, vhodné určenou defektoskopiou, alebo laboratórnymi skúškami.

Podľa tvaru chyby členíme na:

Rovinné chyby: trhliny, studené spoje, neprevarené korene, zápaly a pod..

Priestorové chyby: bubliny, póry, vmestky a pod..

Osobitnú skupinu tvoria **chyby rovinné** - rovnobežné s povrchom konštrukčnej časti (dvojitosť plechu, odlúpnutie návaru...).

2.3.1 Vizuálna kontrola materiálov (VT)

Postupy vizuálnej kontroly (VT – Visual Testing) materiálov sú normalizované podľa STN EN 13018 a STN EN 13927. Je prvotnou a najjednoduchšou nedeštruktívnou skúškou, ktorou sa zisťujú zjavné povrchové chyby výrobkov ako sú trhliny, pórovitosť, odkryté stiahnutiny, záluhy, deformácie, neprievary, zápaly, kvaple, korózia a pod. Rozlišovacia schopnosť vizuálnej skúšky pre trhliny je 0,1 mm. Overuje sa splnenie podmienok stavu povrchu pre ďalšiu predpísanú nedeštruktívnu kontrolu.

Pred vizuálnou kontrolou musia byť hodnotené povrchy očistené od zvyškov trosky, masťnôt a oxidických zlúčenín mechanicky, chemicky alebo elektrochemicky. Osvetlenie kontrolovaného miesta musí byť dostatočné presahujúce 350 luxov, na odhalenie chýb je doporučené (cca 500 luxov).

Metódy vizuálnej kontroly

Podľa prístupnosti kontrolovaných miest a použitých kontrolných prostriedkov sa vizuálna kontrola rozlišuje na:

- a) **priamu** – kontrola okom alebo pomocou lupy (max. 7 násobným zv.) prípadne mikroskopu s 20 – 30 násobným zv. Na vykonanie priamej kontroly má byť dostatočný priestor na pozorovanie voľným okom zo vzdialenosti do 600 mm od pozorovaného povrchu a pod uhlom nie menším ako približne 30°. Pre priamo blízko pozorované objekty má byť vzdialenosť oka od povrchu max. 250 mm. Pri kontrole sa používajú posuvné meradlá, oceľové pravítka, mierky na zvary (obr.2.20 a .2.21), etalóny a pod.



Obr.2.20 Kontrola geometrie



Obr.2.21 Kontrola prevýšenia V zvaru

kútového tavného zvaru

- b) **nepriamu** – využíva dokonalejšie optické alebo optoelektronické prístroje a zariadenia ako endoskopy (pevné alebo vláknové), periskopy, boroskopy, fibroskopy. Pre dokumentáciu neprístupných miest sú používané televízne kamery a pod. (obr.2.22).



Obr.2.22 Nepriama vizuálna kontrola pomocou boroskopu

Pevné endoskopy (boroskopy) sú optické prístroje rúrkovitého tvaru s objektívom na jednom konci a okulárom na druhom. V trubici spolu s optickým systémom šošoviek a zrkadiel je vystavený svetelný zdroj na osvetlenie zorného poľa endoskopu. Vzhľadom na ich malé rozmery sú používané napr. na kontrolu, dutín potrubných systémov malých priemerov, mazacích kanálikov, spaľovacích komôr motorov a pod.

Podľa druhu optického systému sa endoskopy rozdeľujú na:

- **endoskopy priame** – zorný uhol je v smere pozdĺžne s osou endoskopu,
- **endoskopy šikmé** – zorný uhol je odklonený od pozdĺžnej osi prístrojov o 15 až 30°,
- **endoskopy pravouhlé** – zorný uhol je od pozdĺžnej osi odklonený o 45°,
- **endoskopy spätné** – zorný uhol je od pozdĺžnej osi prístroja odklonený o 60 až 70°.

Vláknové endoskopy (fibroskopy). Obraz je prenášaný pomocou ohybných svetelných vlákien – svetlovodov ktoré vyúsťujú do okuláru v ktorom je obraz pozorovaný. Vplyvom rastrovania obrazu a obmedzenej ostrosti systému obraz nie je tak kvalitný ako u pevných endoskopov. Ich výhodou je možnosť kontroly tenkých dutín (od cca. 3,5 mm). Vzhľadom na možnosť osvetlenia pozorovaných objektov pomocou svetelných vlákien, je tento typ zariadenia vhodný aj pre kontrolu zariadení s vyšším rizikom výbuchu. Pozorovanie je možné

realizovať v reálnom čase avšak v súčasnosti sa kvôli dokumentácii a dokazovania prítomnosti chýb v materiáloch tieto zaznamenávajú pomocou kamier.

Vizuálnu kontrolu môže zabezpečovať iba certifikovaný personál. Rozsah vizuálnej kontroly sa má definovať pred jej vykonaním aplikačnou normou alebo dohodou medzi zmluvnými stranami.

2.3.2 Kapilárna metóda (PT)

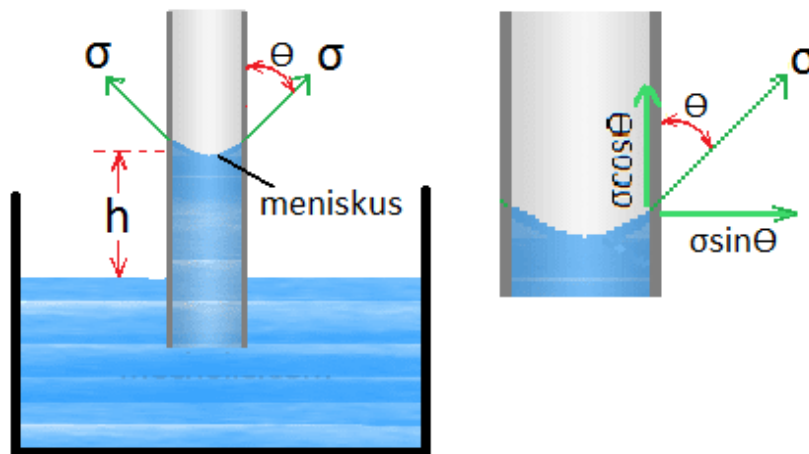
Kapilárne metódy (PT – Penetrant Testing) sa používajú na zisťovanie chýb - porúch, ktoré vyúsťujú na povrch kontrolovaného objektu. Všeobecné postupy skúšania definuje STN EN ISO 3452-1:2013. Zisťovanie vnútorných alebo uzavretých chýb týmito metódami nie je možné. Sú založené na využití kapilárnych javov, schopnosti kapilárne aktívnych kvapalín prenikať do necelistvostí a následne zviditeľniť miesta chýb vplyvom vztlakovosti. Vhodné sú pri detekcii plošných chýb typu jemných trhlín o šírke 10^{-2} až 10^{-5} mm, studených spojov, zdvojenín, pórov, odkrytých riedenín, prípadne stiahnutí a netesností zvarových spojov. Úroveň prípustnosti chýb u zvarových spojov definuje STN EN ISO 23277: 2015. Penetračné metódy sú použiteľné pre kontrolu kovových a tiež nekovových materiálov, ako sú keramika, sklo a tiež niektoré druhy plastov. Nie je možné nimi skúšať pórovité materiály a materiály, ktoré by sa detekčnými prostriedkami narušovali.

Podstatou kapilárnych metód je použitie kvapaliny s nízkym povrchovým napätím, ktorá vnikne do necelistvostí a po odstránení jej prebytku z povrchu skúšaného predmetu vystupuje vplyvom kapilárnych síl, takže necelistvosť (chybu) zviditeľní. Ku kapilárnym vlastnostiam kvapalín patrí:

Povrchové napätie σ je sila pôsobiaca k jednotke dĺžky povrchu kvapaliny (N.m⁻¹). Vo všetkých smeroch a vo všetkých miestach povrchu je rovnako veľké. Pôsobením povrchového napätia sa kvapalina snaží zaujať čo najmenší povrch vzhľadom na objem, t.j. guľový tvar.

Okrajový uhol θ zvierá povrch kvapaliny so stenou pevného telesa. Veľkosť uhla ovplyvňuje tzv. adhézna konštanta, čo je rozdiel povrchového napätia steny tuhého telesa vzhľadom k vzduchu a vzhľadom ku kvapaline. Dobrá zmáčavosť povrchu je dosahovaná ak je adhézna konštanta kladná tak je okrajový uhol ostrý. Ak je konštanta záporná, je okrajový uhol tupý a kvapalina povrchy nezmáča.

Kapilárna elevácia h v kapiláre ponorenej kolmo do zmáčavej kvapaliny, stúpajú v dôsledku priľnavých (adhézných) síl molekuly kvapaliny nahor po stenách trubice, takže je kvapalinami vtáňovaná do určitej výšky (h), kde vytvára zakrivený konkávny povrch (meniskus). Toto zakrivenie vzniká tým, že proti povrchovým silám pôsobí gravitačná sila stĺpca zdvihnutej kvapaliny. Tento stav sa nazýva kapilárna elevácia. Pre detekciu necelistvostí materiálu má kapilárna elevácia dôležitosť v tom, že povrchová chyba sa správa ako kapilárna.



Obr.2.23 Kapilárna elevácia

Kapilárny tlak – pri zakrivení povrchu, ktoré nastane v kapiláre, je možné pozorovať v povrchovej vrstve zníženie kohézneho tlaku o tzv. tlak kapilárny, ktorého veľkosť je priamo úmerná povrchovému napätiu a nepriamo úmerná polomeru zakrivenia povrchu. Ide o tlak vyvolaný len vzájomným pôsobením molekúl. V prípade vydatého povrchu je smer kapilárneho tlaku do prostredia nad kvapalinou, povrchová vrstva sa snaží skrútiť a tým rozťahuje stĺpec kvapaliny. Preto kapilárny tlak výrazne ovplyvňuje penetráciu a vzlínanie detekčnej tekutiny z nečistostí.

Kinematická viskozita ν - je podielom dynamickej viskozity a hustoty kvapaliny. Ma primárny vplyv na rýchlosť prieniku penetrantu do nečistosti skúmaných materiálov a následnom vystupovaní z chýb na povrch. Je dôležitým faktorom pri voľbe druhu penetrantu vzhľadom na podmienky skúšania, ktoré sa môžu realizovať pri záporných teplotách ako aj pri teplotách nad 50 °C.

Penetrant musí mať vyššie povrchové napätie, malý okrajový uhol a nízku viskozitu. Tieto veličiny musia byť vo vzájomnom súlade.

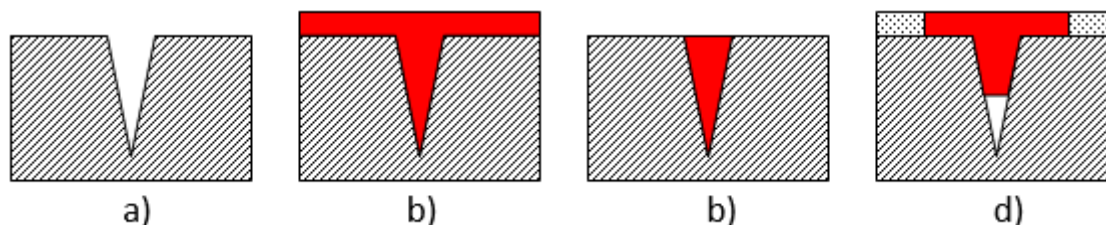
Realizácia kapilárnej skúšky spočíva :

- v príprave hodnoteného povrchu s cieľom očistiť a odmastiť skúmané povrchy po predchádzajúcich technologických operáciách. Mechanické čistenie zabezpečí odstránenie pevných nečistôt z povrchu (okuje, oxidické splodiny, strusku, tavivá a pod.). Pomocou chemických rozpúšťadiel (acetón, chlórované rozpúšťadla, technický benzín) sa odstránia tuky a oleje z povrchov. Silno znečistené povrchy je možné čistiť roztokmi kyselín a lúhov. Čistiace prostriedky sú používané prevažne vo forme aerosólov.
- v pokrytí kontrolovaného povrchu penetračnou kvapalinou nástrekom aerosólov, náterom, štetcom resp. ponorom. Penetrantom je napr. petrolej zafarbený organickým farbivom zväčša červenej farby (sudanová červen). Penetračný čas pre

zmáčanie povrchov a vniknutie penetrantu do povrchových chýb závisí od druhu hodnoteného materiálu, teploty, druhu kvapaliny, typu hodnotených chýb. Čas penetrácie býva v rozsahu 5 až 20 min.

- v odstránení nanesej penetračnej látky. Po výdrži (penetračnom čase) bude nasledovať odstránenie jej prebytku z kontrolovaného povrchu utretím suchou dobre nasiakavou látkou, prípadne rozpúšťadlom, čo ale zvyšuje nebezpečenstvo odstránenia penetrantu a povrchových chýb. Povrchy je možné opláchnuť vodou pri aplikácii emulgačných penetrantov. Emulgátory sa aplikujú v tenkej vrstve po uplynutí penetračného času na povrch pokrytý penetrantom. Po stanovenom čase pôsobenia sa zemulgovaná detekčná kvapalina opláčne vodou. Penetračná látka vo vnútri necelistvostí ostáva zachovaná.
- v nanesení vývojky na očistené povrchy. Na hodnotené povrchy sa nanesie farebná kontrastná látka - vývojka, ktorou je napr. jemnozrnná prášková forma uhličitanu vápenatého, uhličitanu horečnatého, oxidov kovov prípadne amorfných kovov v suchej forme alebo ako suspenzia prezentovaných zlúčenín v prchavej kvapaline ktorou je lieh, acetón a pod. Na vývojke vytvára buď farebnú alebo fluoreskujúcu indikáciu chyby podľa použitého penetrantu a vývojky. Indikácie sa pozorujú pri dobrom osvetlení (podobne ako pri VT) obvykle dva krát. Po nanesení vývojky pre identifikáciu veľkých chýb a po cca 15 až 20 minútach, kedy sú detegované aj jemné chyby.

Postup realizácie PT je na obr.2.24.

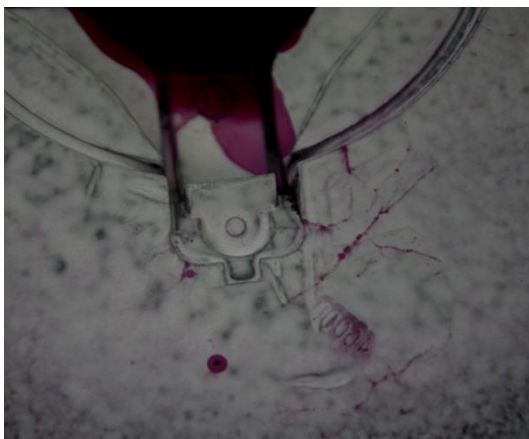


Obr.2.24 Schéma realizácie kapilárnej skúšky

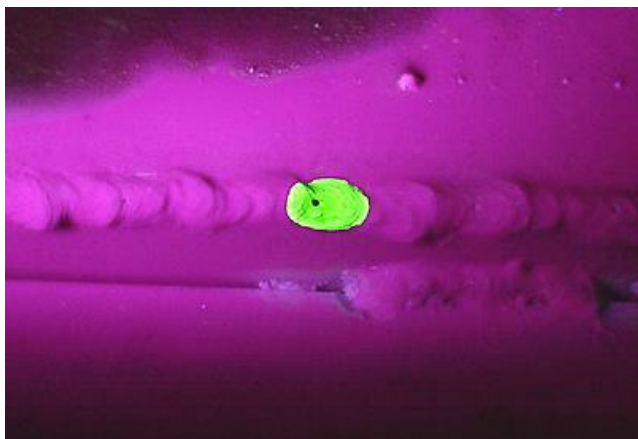
- a) príprava povrchu - jeho očistenie, b) nanesenie penetrantu, c) odstránenie nadbytku penetrantu z povrchu, d) nanesenie vývojky a indikácia chýb

Vzhľadom na druh použitého penetrantu je možné penetračnú skúšku realizovať:

- metódu farebnej indikácie (obr.2.25),
- metódu fluorescenčnej indikácie (obr.2.26).



Obr.2.25 Chyby zvýraznené farebnou penetračnou skúškou (trhliny, póry)



Obr.2.26 Chyba v povrchu tavného zvaru zviditeľnená fluorescenčnou indikáciou

Pri metóde fluorescenčnej indikácie penetrant (napr. fluorescenčný olej) obsahuje luminofor, ktorý po ožiarení ultrafialovým žiarením (s vlnovou dĺžkou 320 až 400 nm) fluoreskuje. Táto metóda sa prednostne uplatňuje pri kontrole náročných výrobkov z neželezných kovov.

Citlivosť a rýchlosť kapilárnych skúšok závisí od teploty prostredia v ktorom sa realizujú. Pri teplotách nad 50 °C a pod 4 °C je nevyhnutné použiť špeciálne kvapaliny. V súčasnosti sú indikačné schopnosti kapilárnych metód pri použití špeciálnych kvapalín v rozsahu teplôt od – 12 °C do 175 °C).

2.3.3 Magnetická prášková metóda (MT)

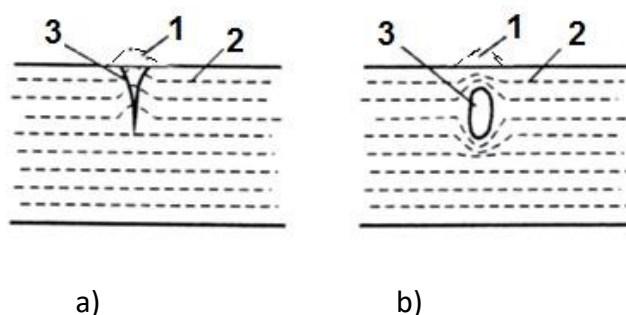
Magnetické metódy realizované podľa EN ISO 9934-1 sú vhodné pre detekciu **povrchových a podpovrchových chýb** vo **feromagnetických** materiáloch, ako sú napr. vlasové trhliny, preložky, trhliny, studené spoje vo zvaroch a póry. Metódy sú založené na indikácii rozptylového magnetického indukčného toku, ktorý v magnetovanom materiáli vzniká v mieste chyby ako dôsledok zvýšeného magnetického odporu. Chyby v skúšaných materiáloch deformujú magnetický tok. Siločiar sa vychýľujú od smeru najkratšej cesty od pólu k pólu. Ak sú chyby v blízkosti povrchu alebo ústia na povrch, vystupuje aj magnetický tok na povrch a vytvorí na povrchu magnetické póly. Veľkosť rozptylového toku závisí od veľkosti, polohy a orientácie chyby ku smeru magnetujúceho poľa. Maximálne hodnoty sa dosahujú pri chybách spojených s povrchom a orientovaným kolmo na smer magnetického poľa. Identifikovať je možné tiež chyby nachádzajúce sa tesne pod povrchom skúšaného materiálu. Preto sa vždy pri kontrole používajú dva základné spôsoby magnetovania – pozdĺžne a priečne, ich kombinácia umožňuje indikáciu všetkých chýb v jednej operácii.

Magnetické pole je možné v mieste defektu indikovať:

- magnetickou práškovou metódou,
- magnetografickým záznamom,

- indikáciou pomocou ferosondy.

Magnetická prášková metóda (obr.2.27) je najpoužívanejšou podľa spôsobu aplikácie magnetického prášku. Rozdeľuje sa na **polievaciu**, **naprašovaciu** a **magnetofluorescenčnú** metódu. Pri **polievacej metóde** sa skúšaný predmet polieva detekčnou kvapalinou (olejom alebo petrolejom) v ktorom je rozptýlený jemný magnetický prášok Fe resp. Fe_2O_3 a Fe_3O_4 zrnitosti 1 až 40 μm . V miestach vystupujúceho rozptylového toku sa feromagnetické čiastočky zachytia a zviditeľnia polohu, veľkosť a tvar povrchovej chyby. Pri **naprašovacej metóde** sa používa suchý magnetický detekčný prášok s veľkosťou zrna od 40 do 400 μm . Princíp zviditeľnenia defektov je rovnaký ako pri polievacej metóde.



Obr.2.27 Princíp magnetickej práškovej metódy

a – indikácia povrchových chýb (spoľahlivá), b – indikácia povrchových chýb (nespoľahlivá),
1 – feromagnetický prášok, 2 – siločiarly magnetického toku, 3 – chyba v materiáli

Magnetofluorescenčná metóda využíva detekčný magnetický prášok, ktorého čiastočky sú navyše pokryté **luminoforom**. Skúšaný predmet sa vyhodnocuje pod ultrafialovým žiarením. Pri ožiarení ultrafialovými lúčmi (s vlnovou dĺžkou 320 až 400 nm) luminofor zachytený v mieste trhlín fluoreskuje a umožňuje objaviť aj jemné trhliny. Magnetoinдукtívne metódy umožňujú identifikáciu aj tenkých trhlín kalených súčiastok. V hodnotených súčiastkach môže ostať remanentný magnetizmus, ktorý môže byť nežiadúci.

Magnetografická metóda je bezdotyková a je určená predovšetkým na plynulú kontrolu súčiastok konštantného prierezu. Namiesto magnetického prášku sa používa **magnetofónová páska**. Rozptylové pole trhliny magnetizuje magnetickú vrstvu magnetofónovej pásky. Páska sa potom vyhodnocuje elektronicky, prípadne akusticky.

Indikácia pomocou ferosondy je veľmi dôležitá pri plynulej kontrole predmetov alebo súčiastok s konštantným priečnym prierezom (rúrky, tyče, laná alebo koľajnice). Rozptylové magnetické pole sa v mieste trhliny indikuje elektomagnetickou indukciou vyvolanou v snímačej cievke obopínajúcej skúšaný predmet. Metóda je bezdotyková, veľmi citlivá umožňujúca detegovať chyby aj v hĺbke 20 mm pod povrchom. Napätie, ktoré sa v mieste trhlín indikuje do cievky, vyvoláva prúd merateľný citlivým galvanometrom. Tento prúd

môžeme zosilniť a ovládať ním signalizačné značkovacie, resp. aj triediace zariadenie, ktoré chybné miesta označí, prípadne celú súčiastku vyradí.

Magnetická prášková metóda pri kontrole zvarov sa realizuje v zmysle STN EN ISO 17638 (Obr.2.28), pričom úrovne prípustnosti pri magnetickej práškovej metódy hodnotenia zvarových spojov definuje STN EN ISO 23278.



Obr.2.28 Magnetická prášková kontrola zvaru

K magnetoinduktívnym skúšobným metódam patrí aj **skúšanie vírivými prúdmi (ET)**

Metóda vírivých prúdov je založená na nepriamom sledovaní kvality skúšaného materiálu. Jedná sa o bezdotykový spôsob, ktorý je vhodný aj pre neferomagnetické materiály (obr. 3.10). Skúšané objekty ako napr. profily, rúry sú vystavené toku elektrického prúdu indukovaného striedavým magnetickým poľom, ktoré v nich indukuje vírivé prúdy. Intenzita týchto prúdov je najväčšia na povrchu súčiastok a závisí od ich elektrickej vodivosti. Vírivé prúdy vytvárajú vlastné magnetické pole, ktoré spätne pôsobí na budiace pole cievky. Obidve magnetické polia sa vektorovo skladajú. Výsledné magnetické pole závisí od elektrickej vodivosti povrchu, čiže jeho veľkosť sa vplyvom povrchových defektov bude meniť (zmenšovať). Tieto zmeny umožňujú detegovať aj veľmi jemné povrchové trhliny dlhé 0,1 až 0,4 mm.

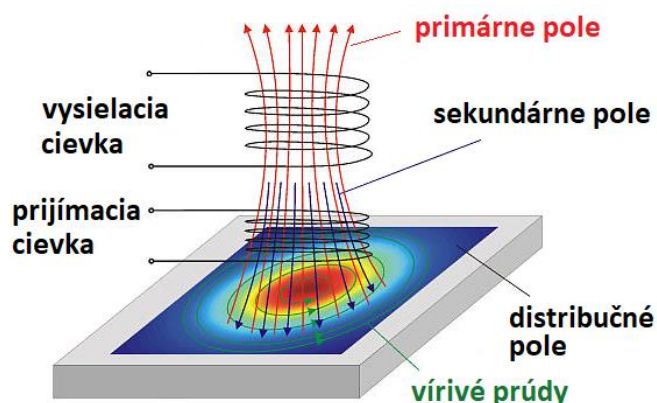
Vyhodnotenie sa vykonáva prostredníctvom napätia:

- **priamo v cievke**, ktorá budí elektromagnetické pole (cievkový systém má iba jedno vinutie a meria sa impedancia tohto vinutia čo do veľkosti a fázy),
- **alebo v druhej meracej cievke**. Cievkový systém má dve vinutia (budiace a meracie) a meria sa amplitúda a fáza napätia na meracom vinutí.

Cievkové systémy môžu byť:

- **priechodzie**, kde skúšaný výrobok prechádza dutinou cievky (tyče, rúrky),

- **príložné**, kde sa cievka prikladá na povrch hodnoteného výrobku (Obr.2.29).



Obr.2.29 Skúšanie povrchov vírivými prúdmi

Zariadenia pre kontrolu vírivými prúdmi (ET) pracujú vo frekvenčných rozsahoch od 1 kHz do 1 MHz a môžu byť:

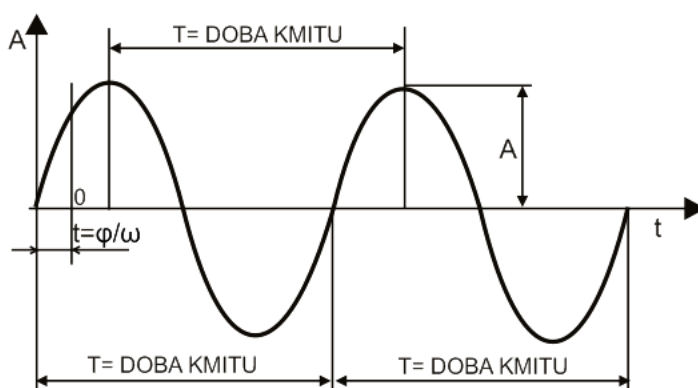
- jednofrekvenčné,
- viacfrekvenčné,
- impulzné.

Prednosťou metódy je vysoká rýchlosť skúšania, najmä pri priechodnej metóde. Skúška vírivými prúdmi je závislá od tesného kontaktu medzi sondou a skúšaným povrchom. Netesnosti môžu spôsobovať falošné odozvy. Metódou vírivých prúdov (štruktúroskopiou) môžeme stanoviť aj odchýlky v chemickom zložení alebo štruktúre materiálu napr. po tepelnom spracovaní a vzhľadom k väzbe mechanických vlastností na štruktúru je možné sledovať aj odchýlky vlastností. Zariadenie pre štruktúroskopiou funguje na princípe merania zmien permeability, koercivity alebo remanencie.

2.3.4 Ultrazvuková defektoskopia (UT)

Ultrazvuk je mechanické kmitanie častíc prostredia s frekvenciou vyššou ako 20 kHz. V laboratórnych podmienkach do 30 kHz a v praxi do 15 kHz.

Vlnením nazývame pohyb, ktorý vznikol v pružnom prostredí pôsobením kmitajúceho telesa (Obr.2.30). V defektoskopii sa na vytvorenie ultrazvukových vĺn používa piezoelektrický menič. Jeho základom je piezoelektrická doštička (piezo-kryštál) opatrená tenkými kovovými elektródami na ktoré privedieme striedavé elektrické napätie. Doštička bude periodicky meniť svoju hrúbku (resp. aj tvar). Bude vibrovať. Frekvencia platničky je totožná s frekvenciou vysokofrekvenčného napätia. Ak ide o dostatočne vysokú frekvenciu, bude zdrojom ultrazvuku. Ak takúto vibrujúcu doštičku pritlačíme k povrchu nejakej vrstvy, bude doštička vysilať do vrstvy ultrazvukové vlnenie. Najznámejšou piezoelektrickou látkou je kremeň. Piezoelektrický jav vykazuje však aj turmalín, báriumtitanát a iné. Na povrch kremenného, resp. báriumtitanátového výbrusu sa nanášajú tenké elektródy a to buď pokovovaním vo vákuu, alebo nanosením koloidu striebra a následným vypálením.



Obr.2.30 Schéma kmitajúceho pohybu častíc

Charakteristickou veličinou vlnenia je **vlnová dĺžka** „ λ “ dávaná v [m], ktorá vyjadruje vzdialenosť, ktorú prebehne vlna v dobe jednej periódy a vypočíta sa podľa vzorca :

$$\lambda = \frac{c}{f} = c \cdot T \quad (1)$$

kde: c – rýchlosť ultrazvuku,

f – frekvencia,

T – doba kmitu (perióda) v sekundách.

Podstatou ultrazvukovej defektoskopie je odraz ultrazvukových vĺn na rozhraní necelistvosti v kontrolovanom materiáli (dutiny, vtrúseniny, trhliny, studené spoje atď.).

Ak dopadne UZ vlna kolmo (Obr. 3.12) na rozhranie dvoch prostredí 1 a 2 s akustickými vlnovými odpormi $\rho_1 c_1$ a $\rho_2 c_2$, je súčiniteľ odrazu R určený ako pomer odrazeného akustického tlaku P_1 k tlaku dopadajúcemu P :

$$R = \frac{P_1}{P} = \frac{(1-m)}{(1+m)} \quad (2)$$

kde:

$$m = \frac{\rho_1 \cdot c_1}{\rho_2 \cdot c_2} \quad (3)$$

Časť dopadajúceho akustického tlaku P prechádza do prostredia 2 a súčiniteľ prechodu D je určený vzťahom:

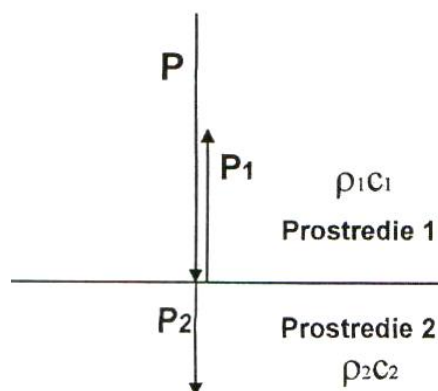
$$D = \frac{P_2}{P} = 1 + R \quad (4)$$

Akustické rozhranie tvorí nielen koncová plocha materiálu, ale aj rozhranie materiál – chýba.

Pri šikmom dopade UZ vlny na rozhranie dvoch prostredí dochádza k jej odrazu, lomu, prípadne aj k transformácii, ak jedno z prostredí je schopné prenášať UZ priečne vlny. Ak dopadne pozdĺžna UZ vlna na rozhranie dvoch prostredí 1 a 2, v každom z nich môžu všeobecne vzniknúť dve zložky, t. j. pozdĺžna a priečna vlna. Vzájomný vzťah uhlov všetkých zložiek meraných od normály k rozhraniu a ich rýchlosť šírenia je daný Snellovým zákonom:

$$\frac{\sin \alpha}{c_{L1}} = \frac{\sin \beta}{c_{T2}} = \frac{\sin \chi}{c_{T1}} = \frac{\sin \delta}{c_{L2}} \quad (5)$$

kde c_{L1} , c_{T1} , c_{L2} , c_{T2} sú rýchlosti šírenia pozdĺžnej alebo priečnej vlny v prostredí 1 resp. 2.



Obr.2.31 Kolmý dopad a šikmý dopad na rozhranie dvoch rôznych materiálov

Ultrazvukové vlny šírené v prostredí môžu byť:

Pozdĺžne (longitudinálne) – častice kmitajúce po priamkovej dráhe v smere šírenia vlny. Pozdĺžne vlny sa môžu šíriť tuhým, kvapalným aj plynným prostredím. Rýchlosť šírenia pozdĺžnej vlny v neohraničenom prostredí sa označuje c_L a vyjadrí sa vzťahom:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (6)$$

kde: E – modul pružnosti,

ρ – hustota prostredia,

μ – poissonove číslo.

Priečne (transverzálne) – tieto vlny sa môžu šíriť v takom prostredí, ktoré kladie odpor namáhaniu šmykom - iba v tuhom prostredí. Častice prostredia kmitajú po priamkovej dráhe, avšak kolmo na smer šírenia. Pri šírení priečných vln nevzniká zahustenie a zriedenie prostredia, ale častice sa navzájom iba posúvajú. Preto sa pri šírení priečnej vlny nemení objem prostredia. Rýchlosť šírenia priečnej vlny v neohraničenom prostredí sa označuje c_T a vyjadrí sa vzťahom:

$$C_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1+\mu)}} \quad (7)$$

kde: E – modul pružnosti,

ρ – hustota prostredia,

μ – poissonove číslo (oceľ $\mu = 0,28$).

Povrchové (Rayleighove) – patria k priečnym vlnám, ktorých častice kmitajú okolo rovnovážnej polohy po eliptickej dráhe na povrchu tuhých látok. Pôsobí na nich sila kolmá na smer šírenia, ktorá prevyšuje silu pôsobiacu v smere šírenia. V hĺbke rovnajúcej sa dĺžke priečnej vlny povrchová vlna zaniká.

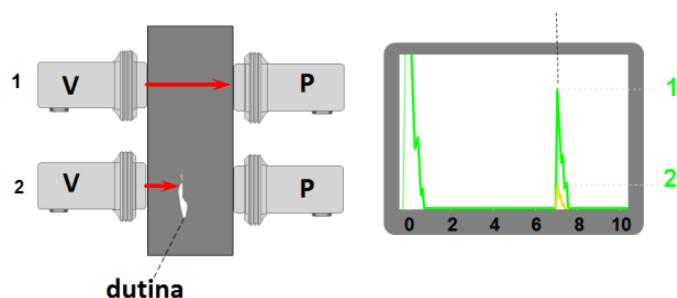
Doskové (lambove) – používajú sa na skúšanie dosiek a drôtov. Vyskytujú sa ako vlny ohybové a dilatačné.

Vzhľadom na krátke vlnové dĺžky možno ultrazvuk vysielateľ, podobne ako svetlo, v ostro ohraničených zväzkoch, pričom preň platia zákony dopadu, odrazu, ohybu, lomu a absorpcie. Prechodom vlnenia prostredím dochádza k absorpcii vlnenia vnútorným trením (zmena energie na tepelnú), na rozhraní dvoch prostredí sa časť vlnenia odráža späť a časť preniká do druhého prostredia a mení svoj smer – láme sa, ak bol uhol dopadu iný než 90°. K odrazu a k lomu príde iba vtedy, ak má rozhranie väčší rozmer ako je vlnová dĺžka vlnenia, v opačnom prípade príde k ohybu. Odraz na rozhraní závisí na akustickom odpore oboch prostredí.

Rozhranie kov – vzduch odráža 100% vlnenia, preto sa medzi vysielacou sondou a materiálom používa akustická **väzobná látka** – olej, vazelína, voda a pod.

Ultrazvuková defektoskopia má tri základné skúšobné metódy:

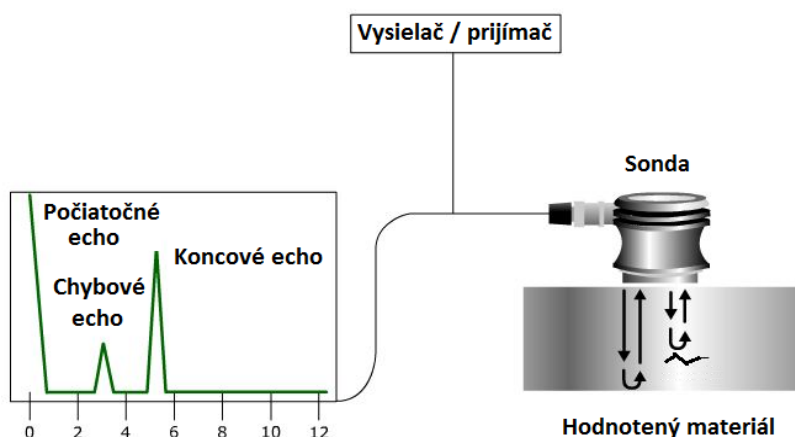
Prechodovú metódu, ktorá je založená na princípe vysielania ultrazvukových vln z jednej strany kontrolovaného predmetu vysielacou sondou a zachytávania úbytku v dôsledku poruchy ultrazvukovej energie na druhej strane súsovo umiestnenou prijímacou sondou. Metóda sa dá použiť na kontrolu tých objektov, ktoré sú z oboch strán prístupné (Obr.2.32). Chyba v materiáli vytvorí zmenu (pokles) akustického tlaku a vytvorí tzv. ultrazvukový tieň. Metóda sa aplikuje iba na súčiastkach s konštantnou hrúbkou. Skúšanie sa realizuje pomocou impulzných ultrazvukových defektoskopov.



Obr.2.32 Princíp prechodovej metódy

V – vysielacia sonda, P – prijímacia sonda, vpravo chybové echo

Odrazovú metódu, ktorá sa používa na kontrolu súčiastok prístupných len z jednej strany. Je najpoužívanejšou metódou pri ultrazvukovej defektoskopii (Obr.2.33). Odrazová metóda umožňuje určiť hĺbku resp. vzdialenosť necelistvosti. Podľa výšky echa, veľkosť chyby. Umožňuje automatizáciu a mechanizáciu skúšania. Skúšaním z viacerých smerov je možné určiť charakter nehomogenity. Používajú sa dve alebo len jedna sonda (táto pracuje súčasne ako vysielateľ i prijímač). Vysielacia sonda vysiela krátke impulzy vlnenia, ktoré sa odrážajú od rozhraní a vracajú sa do prijímača.



Obr.2.33 Princíp odrazovej metódy

Časový priebeh impulzov sa zaznamenáva na obrazovke osciloskopu. Časová vzdialenosť medzi počiatočným a koncovým echom zodpovedá dvojnásobnej hrúbke materiálu. V prípade, že porucha sa vyskytuje tesne pod povrchom (bližšie než je časová šírka E_P), poruchové echo by sa dostalo do tzv. mŕtvej zóny a nedá sa zaregistrovať.

Rezonančnú metódu, ktorá sa využíva prevažne na meranie hrúbok materiálov od 0,1 do 100 mm pomocou ultrazvukových impulzov, ktorých frekvencia sa plynulo mení. Keď sa hrúbka predmetu rovná celému násobku $\lambda/2$ vznikne v predmete stojaté vlnenie, predmet sa dostáva do vlastnej rezonancie (základnej alebo vyššej harmonickej). Táto metóda bola nahradená odrazovou metódou.

Rozhranie **kov – vzduch** odráža 100 % vlnenia, preto sa medzi vysielacou sondou a materiálom používa akustická **väzobná látka** – olej, vazelína, voda a pod.

Drsnosť povrchu nemá byť väčšia než 10 % vlnovej dĺžky.

Kalibrácia defektoskopov sa realizuje podľa mierok (Obr.2.34)



Obr.2.34 Kalibračné mierky pre kalibráciu defektoskopov

Podľa konštrukcie sa sondy delia na :

- priame (vysielaajúce pozdĺžne vlny kolmé na povrch) (Obr.2.35 a),
- uhlové (vysielaajúce pozdĺžne vlny) (Obr.2.35 b),
- jednoduché (obsahujú iba jeden menič, ktorý je vysielateľom aj prijímačom),
- dvojité.



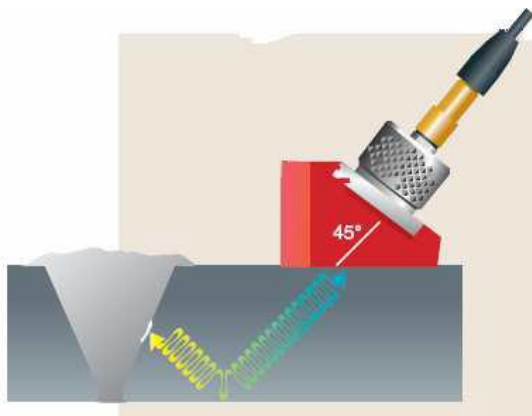
a)

b)

Obr.2.35 Sondy pre ultrazvukovú defektoskopiú

a) priame sondy, b) uhlové sondy

Princíp hodnotenia akosti zvarov pomocou uhlovej sondy je dokumentovaný na obr.2.36 a obr.2.37.



Obr.2.36 Aplikácia odrazovej metódy pri hodnotení zvarov



Obr.2.37 Kontrola tupého zvarového spoja

Skúšanie austenitických materiálov

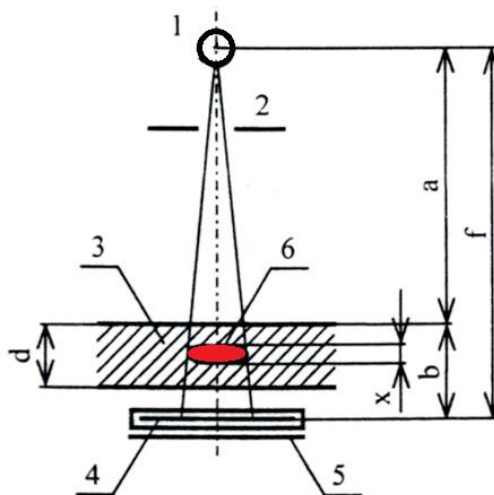
Ich skúšanie je komplikované z dôvodu veľkého rozptylu ultrazvuku v štruktúre austenitu. Metódy používané pri hodnotení feritických ocelí sa využiť nedajú, nakoľko dochádza k rozdielom v rozptyle ultrazvukových vln a lomu na hraniciach zŕn. Austenitické ocele výrazne vplývajú na útlm a rýchlosť šírenia vln. Pri hodnotení austenitických materiálov sa používajú pozdĺžne ultrazvukové vlny do 4 MHz vysielané dvojitémi uhlovými sondami s vyšším fokusačným účinkom ako u jednoduchých sond a používaný je uhol šírenia vln 45° . Veľkosť nehomogenity závisí na dosiahnutom pomere veľkosti chybového signálu a šumu vyvolaného štruktúrou.

Ultrazvuková defektoskopia poskytuje veľmi presnú, rýchlu a pomerne jednoduchú kontrolu materiálov bez obmedzenia kontrolovaných hrúbok. Aplikuje sa pri kontrole, odliatkov, výkovkov, zvarov, tepelne spracovaných materiálov a pod.

2.3.5 Prežarovacie metódy hodnotenia materiálov (RT)

Prežarovacie defektoskopické metódy realizované v zmysle STN EN 13068-3 využívajú fyzikálne vlastnosti ionizujúceho elektromagnetického žiarenia. Sú založené **na zoslabení intenzity elektromagnetického žiarenia** (s vhodnou vlnovou dĺžkou) **pri prechode skúšaným materiálom**. Elektromagnetické žiarenie (radiácia) je také šírenie, ktoré sa uskutočňuje nezávisle od hmotnosti prostredia. Radiácia sa šíri aj vo vákuu. Elektromagnetické žiarenie má z fyzikálneho hľadiska vlnový aj korpuskulárny charakter a jeho vlnové dĺžky λ má rozsah od 10^5 po 10^{-15}m , zahrňujúce všetky druhy žiarenia. Pomocou tohto žiarenia sa dajú zviditeľniť a dokumentačne zaznamenať vnútorné defekty v ich reálnej podobe.

Princíp prežarovacej metódy je na obr.2.38. Zo zdroja žiarenia (röntgen, betatrón, gama žiarič) sa cez clonu vysiela zväzok lúčov na skúšaný materiál alebo súčiastku, ktoré sú v určenej vzdialenosti od ohniska zdroja.



Obr.2.38 Princíp prežarovacej rádiografickej metódy

- 1 – zdroj žiarenia, 2 – filter, 3 – vzorka, 4 – film, 5 – olovená platňa, 6 – vnútorný defekt,
a – vzdialenosť vzorky od zdroja, x – veľkosť chyby, b – vzdialenosť filmu od vzorky,
d – hrúbka vzorky, f – ohnisková vzdialenosť,

Ohnisková vzdialenosť f je vzdialenosť filmu od ohniska zdroja. Film je umiestnený za skúšaným predmetom v kazete, ktorá ho chráni pred osvetlením. Po exponovaní a vyvolaní sa na filme objaví konkrétny obraz defektu. Citlivosť a ostrosť obrazu sa zvyšuje rôznymi zosilňovacími fóliami, ktoré môžu byť fluorescenčné alebo fluorometalické.

Zdrojom žiarenia môžu byť **röntgenky** (mäkšie röntgenové žiarenie energie 5 až 500 keV podľa druhu röntgenky a urýchľovacieho napätia), **betatróny** (príp. iné urýchľovače – dávajú tvrdé röntgenové žiarenie s energiou 0,5 až 35 MeV), **radioizotopy** ^{60}Co , ^{126}Ir , ^{137}Cs , ^{170}Tm ,

prípadne ^{222}Ra alebo **zmes solí** ^{226}Ra a mezothória, ^{169}Yb , ^{75}Se (žiarenie γ s energiou desiatok až jednotiek MeV).

Pri vyhodnocovaní vnútorných chýb sa používa:

- **röntgenová defektoskopia**, využívajúca volfrámovú katódu, ktorá je zdrojom elektrónov, pričom ich urýchlenie sa vykonáva pripojením vysokého napätia (od 5 do 400kV) medzi katódu a anódu. Na anóde je umiestnený terčik (obyčajne z volfrámu alebo platiny) zalisovaný do medenej anódy pre zabezpečenie dobrého odvodu vznikajúceho tepla. Zabrzdením urýchlených elektrónov na povrchu terčika anódy vzniká X žiarenie rôznych vlnových dĺžok ako superpozícia charakteristického žiarenia X (závislého na materiáli terčika) a brzdného žiarenia. Z týchto dôvodov má X žiarenie vznikajúce v röntgenke spojité spektrum energií podobne ako viditeľné spektrum. Röntgenovou defektoskopiou je možné kontrolovať oceľové plech do hrúbky cca. 75mm
- **gama defektoskopia** využíva žiarenie rádioaktívnych izotopov, ktoré vzniká pri rozpade ich jadier. Používané je ^{137}Cs , ^{175}Tm , ^{192}Ir , ^{60}Co a iné. Vlnové dĺžky žiarenia sú 10^{-11} m až 10^{-13} m. Výhodou je jednoduchosť obsluhy, mobilnosť a nezávislosť na elektrickej energii avšak intenzitu žiarenia nie je možné regulovať. Zariadenia pre gama defektoskopiou majú komoru žiariča - izotopu vyrobenú s vysokoabsorbčných materiálov (olova, zliatin volfrámu s uránom a pod. - izotopu (Obr.2.39). Gama defektoskopiou je možné prežiariť oceľové výrobky do hrúbky cca. 150 mm.
- **betatrónová defektoskopia** využíva žiarenie vznikajúce v betatróne, čo je urýchľovač elektrónov emitovaných z katódy, ktoré sú účinkom premenného magnetického poľa elektromagnetov napájaných striedavým prúdom o frekvencii 500 Hz urýchľované na kruhovej dráhe konštantného polomeru. Pri dopade týchto elektrónov na anódu (podobne ako v röntgenke), vzniká žiarenie veľmi malej vlnovej dĺžky (vysokej energie). Betatrónová defektoskopia sa využíva na výrobky s vysokými prevádzkovými parametrami ako sú rotory turbín, parogenerátorov, hrubostenných tlakových nádob jadrových reaktorov a pod. Betatróny s energiou $49,7 \cdot 10^{-13}$ umožňujú prežiariť oceľové výrobky do hrúbky 500 a u lineárnych urýchľovačoch až do až 600 mm pri krátkom čase expozície.
- **neutrónová defektoskopia** využíva pre vznik zväzkov termálnych (pomalých) neutrónov statické jadrové reaktory alebo izotopy (napr. ^{252}Cf) s možnosťou ľahkého prenosu. V porovnaní s RTG a gama žiarením je absorpcia neutrónov práve opačná (vodík spôsobuje vysokú absorpciu). Pre neutróny sú účinné prierezy látok obsahujúcich vodík ďaleko väčšie ako pre X a gama žiarenie. Dokonca väčšie ako pre olovo a iné ťažké kovy.



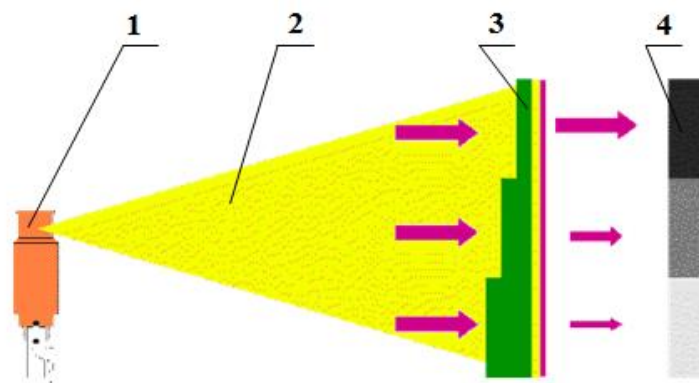
Obr.2.39 Gama defektoskop DUAL 120 (Se-75 + Ir-192)

Vo všetkých uvedených skupinách sa podľa spôsobu indikácie intenzity prechádzajúceho žiarenia cez skúšaný materiál používajú tri základné spôsoby prežarovania:

- **rádiografia** je snímkovácia prežarovacia metóda (Obr. 3.20). Je v praxi najpoužívanejšou metódou. Využíva fotochemické účinky elektromagnetického žiarenia, pričom na fotografickom filme s vrstvou Ag asi 14 gm^{-2} vzniká latentný obraz defektu (obr.2.40). Miesta s najmenšou absorpciou sú na filme najtmavšie. Výhodou metódy je trvalý záznam kontrolovaného materiálu na rádiograme. Podľa použitého zdroja žiarenia potom v praxi hovoríme o röntgenograme (pri použití röntgenového prístroja) alebo gamagrame (pri použití žiaričov) alebo o betatronograme (pri použití betatronu). Obor prežiariteľných hrúbok ionizujúcim žiarením je v súčasnosti pri oceli do 500 mm. Na veľkosť najmenšej zistiteľnej chyby na rádiograme majú vplyv predovšetkým tieto faktory:

- energia ionizujúceho žiarenia,
- neostrosť zobrazenia chyby,
- rozptýlené žiarenie,
- zrnitosť detektora,
- nevhodné pozorovacie podmienky pri vyhodnotení rádiogramu.

Rádiografia neumožňuje priebežnú kontrolu počas pohybu súčiastky.



Obr.2.40 Rádiografická metóda

1 – zdroj žiarenia, 2 – žiarenie, 3 – hodnotený materiál, 4 – fotografický film

Prechodom žiarenia cez materiál dochádza k zoslabeniu jeho intenzity z I_0 na I_d žiarenia absorpciou. Absorpcia je dej, pri ktorom sa celá energia fotónov alebo časť žiarenia odovzdá atómom absorbujúcej látky, pričom dochádza k transformácii energie fotónov a časti žiarenia na iné formy energie.

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu h_0} \quad (8)$$

kde: I_d – je hustota toku častíc ionizujúceho žiarenia, ktoré prešli hrúbkou materiálu h_0 skúšaného objektu,

I_0 – hustota toku častíc dopadajúcich na skúšaný objekt,

μ – lineárny súčiniteľ zoslabenia,

h_0 – hrúbka materiálu.

Súčiniteľ zoslabenia μ udáva celkové zoslabenie pozostávajúce zo zoslabenia fotoefektom τ , Comptonovým rozptylom σ , prípadne tvorbou tzv. párov γ . Celkový lineárny súčiniteľ zoslabenia bude:

$$\mu = \tau + \sigma + \gamma \quad (9)$$

Hodnota tohto súčiniteľa závisí od parametra žiarenia a od druhu prežarovaného materiálu v zmysle vzťahu:

$$\frac{\mu}{\rho} = C \cdot \lambda^3 Z^4 \quad (10)$$

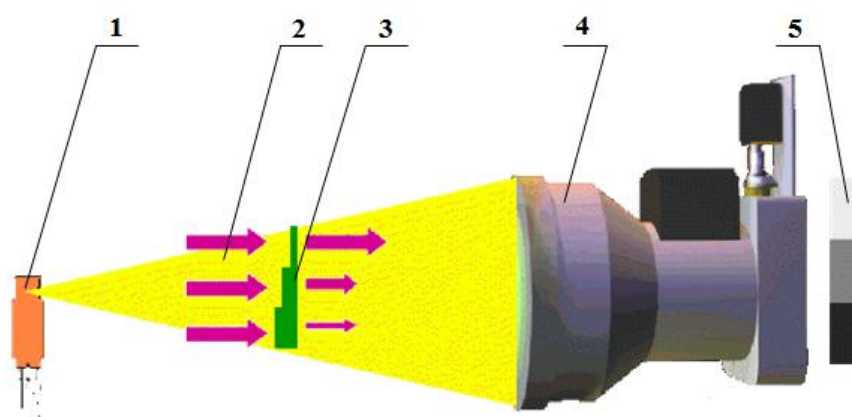
kde: C – konštanta vplyvu zmien absorpčného žiarenia na hranách,

λ – vlnová dĺžka,

Z – atómové číslo prežarovaného materiálu.

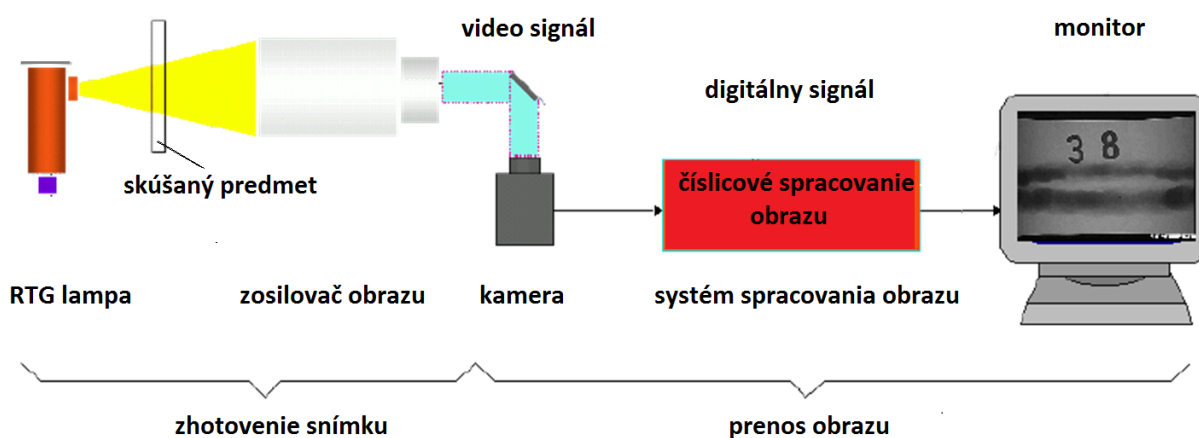
Citlivosť rádiografie je možné zvýšiť použitím zosilňovačov alebo zvýrazňujúcich fluorescenčných, kovových alebo fluorometalických fólií.

- **rádioskopia** je metódou prežarovacieho hodnotenia prítomnosti vnútorných chýb pri ktorej sa využívajú fluorescenčné účinky elektromagnetického žiarenia pomocou vizualizačných zariadení zachytené fluorescenčným štítom obr.2.41 resp. pomocou röntgentelevízneho systému obr.2.42. Pracuje so zväčšením, miesta s najmenšou absorpciou sú na filme najsvetlejšie. Umožňuje hodnotenie a zaznamenávanie výsledkov skúšok v reálnom čase a zmenu podmienok prežarovania. Využívaná je v sériovej výrobe napr. pri kontrole kvality zvarov špirálovo zváraných rúr, štúdiu dynamiky procesov liatia, tuhnutia a pod.



Obr.2.41 Rádioskopická metóda

Je potrebné malé ohnisko zdroja; 1 – zdroj žiarenia, 2 – žiarenie, 3 – materiál, 4 – optické zariadenie pre zväčšenie obrazu, 5 – film



Obr.2.42 Röntgenotelevízny systém

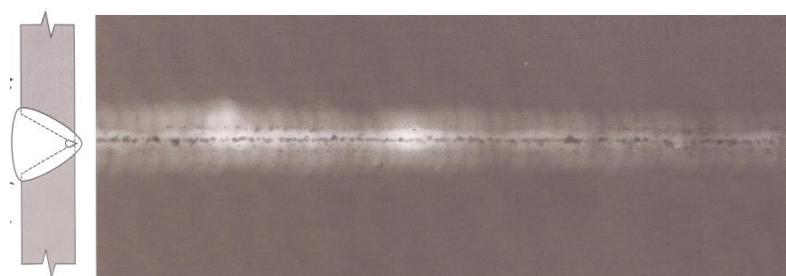
- **rádiometria** využíva meranie lokálnych zmien intenzity žiarenia. Intenzitou žiarenia sa indikujú defekty žiarenia a zaznamenávajú pomocou dozimetrických prístrojov (plynových počítačov, Geiger-Mullerovej trubice proporcionálnych počítačov, scintilačných detektorov, polovodičových detektorov, gama kamery a pod.) Princíp identifikácie chýb materiálov je založený na meraní intenzity lúčov žiarenia, ktoré prešli skúmaným objektom a ich intenzitu je možné merať pomocou ionizačného prúdu v tzv. ionizačnej komôrke.

Z hľadiska interakcie ionizujúceho žiarenia s hmotou je možné rádiometrické metódy rozdeliť na:

- **absorbčnú prechodovú metódu** (využívajúcu žiarenie gama, X beta a neutróny). Používaná je najmä na meranie hrúbok materiálov. Na rozdiel od rádiografických metód nie je potrebné uvažovať s rozptylovým faktorom vo vyjadrení zákona zoslabenia, lebo je volená „dobrá geometria“, alebo geometria úzkeho zväzku, ktorá zaručuje odstránenie rozptýlených častíc z meraného zväzku žiarenia.
- **rozptylovú metódu** (žiarenie gama, X beta a neutróny). Využíva rozptyl ionizujúceho žiarenia pri interakcii s materiálom naspäť do polroviny zdroja žiarenia (napr. pri žiarení gama ide o Comptonov rozptyl). Metóda je vhodná pre meranie hrúbok povrchových vrstiev (povlakov, návarov, žiarových nástrekov, plátovaných vrstiev, tepelne spracovaných vrstiev, náterov a pod.), hrúbok objektov prístupných len z jednej strany a detekciu podpovrchových objemových chýb.
- **moderačnú metódu** (využívajúcu neutróny). Metóda býva aplikovaná pri meraní vlhkosti, resp. na detekciu vodík obsahujúcich materiálov. Je založená na moderácii (znížení energie) neutrónov pri rozptyle na jadrách vodíka. Mierou zmeny vlhkosti je potom zmena energetického spektra zväzku neutrónov vysielaných do materiálu (zvýraznenie nízkoenergetických zložiek v spektre).

Rádiometrická metóda je vhodná pre kontrolu v sériovej výrobe, avšak druh a rozmer defektu sa dá stanoviť iba približne.

V praxi je najpoužívanejším spôsobom prežarovacích skúšok kontrola zvarových spojov pomocou je rádiografickej metódy. Výsledkom hodnotenia rádiogramu je stanovenie druhu, veľkosti, množstva, eventuálne polohy skrytých defektov. Pri kontrole zvarových spojov je vyhodnotenie rádiogramu spojené s pridelením klasifikačného stupňa (obr.2.43). Rádiogramy sú vyhodnocované podľa STN EN 25580. Kvalita zobrazenia sa hodnotí pomocou drôtenej alebo dierovej mierky v súlade s STN EN ISO 19232-1 alebo STN EN ISO 19232-2.



Obr.2.43 Rádiogram V zvaru s identifikovanými pórmí v koreni zvaru

Prežarovacími metódami je možné detegovať vnútorné chyby materiálov ako póry, plynové dutiny, červovité a pretiahnuté dutiny, kovové a nekovové vtrúseniny, trhliny v závislosti od ich výšky, vetvenia, šírky roztvorenia a jej orientácia vzhľadom na smer a techniku prežarovania. Obmedzene je možnosť identifikácie studeného spoja a neprevareného koreňa u zvarov. Identifikácie týchto chýb si vyžadujú dlhoročné skúsenosti a zručnosti certifikovaného personálu v rozsahu min. RT2. Skúšanie pomocou prežarovacích metód musí prebiehať v zmysle platných predpisov pri dodržaní prísnych predpisov BOZP, vzhľadom k rizikám spojených so žiarením.

2.3.7 Rozsah použitia defektoskopických metód

V tab. 3.1 je spracovaný prehľad použiteľnosti jednotlivých defektoskopických metód pri hodnotení chýb zvarových spojov.

Tab. 3.1 Prehľad vybraných typov chýb a možnosti ich identifikácie

Defektoskopické skúšky	Dutiny					Inklúzie			Porušenie súvislosti			Defekty štruktúry		
	bubliny	stiahnutiny	mikrostiahnutiny	mikrobubliny	neprevarený koreň zvaru	troskovitosť	nekovové inklúzie	kovové inklúzie	povrchové trhliny	vnútorné trhliny	studené spoje	chemická nerovnorodosť	miestne hrubé zrno	štruktúrne vruby
vizuálne	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	-	-	-	-
kapilárne	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	+	-	-	-
ultrazvukové	●	+	●	●	●	●	●	-	-	●	●	-	+	+
prežarovacie	●	●	+	+	●	●	●	+	-	-	-	-	-	-
magnetické	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	●	-	-	-
indukčné	-	-	-	-	-	-	-	-	●	-	+	+	-	●

Indikácia chýb: ● spoľahlivá, + obmedzená, - neúčinná

Z prezentovaného prehľadu vyplýva, že neexistuje univerzálna nedeštruktívna defektoskopická metóda, ktorou by bolo možné odhaliť všetky typy chýb. Pri NDT kontrole sa akosť zvarových spojov hodnotí vždy kombináciou min. dvoch metód.

2.4 Štruktúrna analýza materiálov

Analýza štruktúry materiálov má veľký význam pri kontrole materiálov. Štruktúru materiálov, teda prejavy ich kryštalickej stavby, skúmame na vhodne pripravenom rovinnom reze alebo lomovej ploche. Metódy skúmania štruktúry kovových materiálov sa označujú pojmom metalografické metódy. Tieto metódy slúžia na komplexný popis štruktúry, t.j. na identifikovanie a definovanie všetkých jej fáz.

Rozdeľujeme ich na:

- makroskopickú analýzu
- mikroskopickú analýzu.

2.4.1 Makroskopická analýza

Ak prejavy vnútornej stavby kovov a zliatin sú viditeľné okom alebo lupou ide o makroštruktúru (pojem makroštruktúra zvyčajne zahŕňa aj štruktúru pozorovanú mikroskopicky pri zväčšeniach maximálne 50 x). Typické makroskopické pozorovania sa vykonávajú priamo na povrchu skúmaného materiálu (napr. na lomovej ploche), alebo sa z tohto materiálu vyhotoví rovinný výbrus, ktorý sa chemicky upravuje. Môžeme ich rozdeliť do týchto skupín:

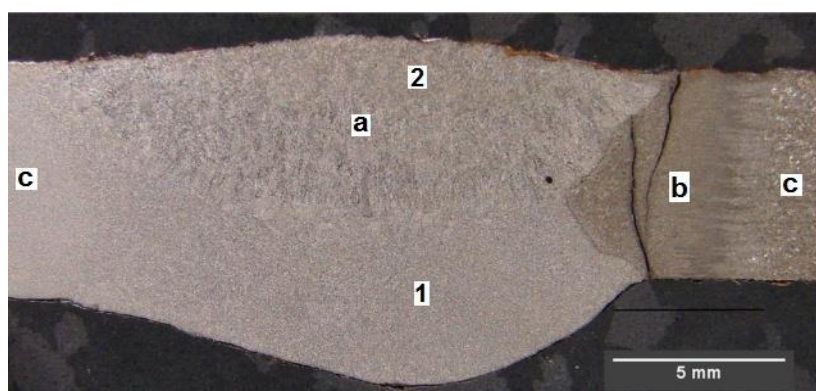
- **Makrofraktografické rozbor**y, pri ktorých sa hodnotia lomové plochy. Zväčša sa skúmajú čerstvé lomy (ihneď po porušení). Najčastejšie sa určuje *charakter lomu* (krehký, húževnatý, únavový a pri zmiešaných lomoch stupeň kryštalickosti, t.j. pomer plochy s kryštalickými časticami k celkovej ploche lomu), pričom sa vychádza z charakteristických štruktúrnych znakov alebo z tvaru lomovej plochy (napr. tvar krátera po statickej skúške ťahom).
- **Kontrola celistvosti materiálu** na zisťovanie povrchových trhlín a vnútorných riedín a pórov. Kým v prvom prípade ide o vizuálnu kontrolu neupraveného povrchu, v druhom prípade zvyčajne treba zhotoviť výbrus a použiť leptanie (pôsobenie vhodne zvoleným chemickým činidlom na povrch skúšanej vzorky). Leptaním sa zafarbia pórovité miesta.
- **Kontrola chemickej nerovnomernosti**, čiže kontrola nerovnomerného rozloženia niektorých prvkov alebo štruktúrnych súčastí v makroskopickom meradle. Všetky

tieto skúšky sú založené na použití vhodného leptadla. Najmä pri kontrole liatej ocele možno vyvolať (zviditeľniť) dendritickú štruktúru.

- **Makroštruktúra zvarov a povrchovo tvrdených vrstiev** sa kontroluje opäť na vhodne leptaných výbrusoch. Makroskopické pozorovania umožňujú aj kontrolu rovnomernosti a hrúbky povrchovo kalených a chemicko-tepelne upravovaných vrstiev.

Na Obr.2.44 je makroskopický pohľad na zvarový spoj, kde môžeme rozlíšiť tri oblasti:

a - oblasť zvarového kovu, ktorá vzniká natavením prídavného a časti základného materiálu v procese zvárania, b - tepelne ovplyvnenú oblasť základného materiálu, v ktorej dochádza v dôsledku tepla pri zváraní ku zmenám štruktúry, c - oblasť základného materiálu, ktorá si zachováva svoju pôvodnú štruktúru počas zvárania. Zvar bol vyhotovený ako dvojvrstvový, pozostáva z koreňovej húsenice 1 a z krycej húsenice 2, v ktorej môžeme pozorovať vysokú orientovanosť štruktúry. Z obrázku je vidieť, že v dôsledku namáhania došlo k porušeniu zvarového spoja. Lomová plocha prebieha cez tepelne ovplyvnenú oblasť.



Obr.2.44 Makroštruktúra zvarového spoja

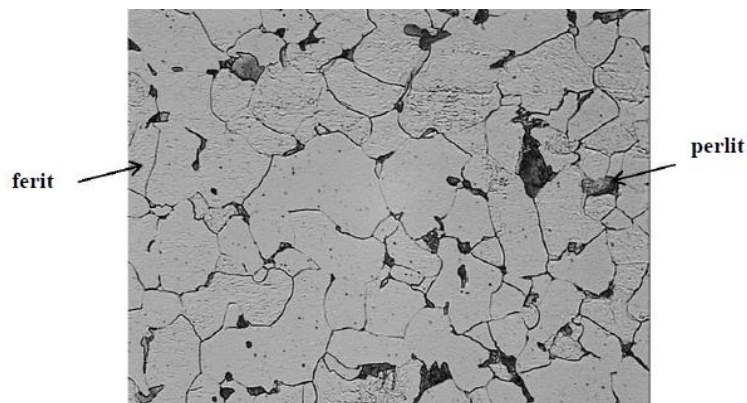
2.4.2 Mikroskopická analýza

Mikroštruktúru materiálov pozorujeme na vzorkách pomocou svetelného alebo elektrónového mikroskopu pri zväčšeniach väčších ako 50 - násobných. Príprava vzorky, ktorú nazývame **metalografický výbrus**, zahŕňa nasledujúce operácie:

- odber a úprava vzorky,
- brúsenie,
- leštenie vzorky a
- leptanie vzorky (vyvolanie štruktúry materiálu).

Metalografický výbrus sa pripravuje brúsením ručne alebo mechanicky na brúsnych papieroch (s rozličnou zrnitosťou) za mokra. Ďalšou operáciou je leštenie ručne alebo

mechanicky, buď na rotujúcich textilných kotúčoch napustených vhodnými leštiacimi prostriedkami - mechanické leštenie, alebo anódovým rozpúšťaním vzorky - elektrolytické leštenie, resp. pôsobením vhodných činidiel, rozpúšťajúcich vystupujúce nerovnosti povrchu - chemické leštenie (používa sa na Cu, Pb, Al).



Obr.2.45 Feriticko – perlitická oceľ s obsahom uhlíka 0,06% C (leptené Nitalom, zv. 350x)

Vyvolanie štruktúry materiálu - leptanie, je dej, pri ktorom na povrchu výbrusu vzniká priestorový reliéf, a to buď rozpúšťaním materiálu v miestach s najnižšou väzbovou energiou iónov pôsobením vhodných chemikálií - chemické leptanie, alebo rozpúšťaním povrchových vrstiev v potenciálnom poli vo vhodnom elektrolyte - elektrolytické leptanie. Podstatou procesu je zviditeľnenie štruktúry a jej jednotlivých fáz. Na Obr.2.45 je feriticko perlitická štruktúra ocele s obsahom uhlíka 0,06% C po naleptaní.