

1. Medzné stavy materiálov

Medzný stav je súbor nežiaducich zmien materiálu, vďaka ktorým sa tento materiál stáva pre danú aplikáciu nepoužiteľným.

Významní slovenskí odborníci definujú medzný stav nasledovne:

- Medzný stav je taký stav materiálu, pri ktorom v dôsledku pôsobenia externých či interných faktorov kritickej veľkosti alebo kombináciou pôsobenia externých a interných faktorov kritickej veľkosti materiál skokom stratí funkčné a úžitkové vlastnosti, prípadne postupná zmena funkčných a úžitkových vlastností dosiahne istú úroveň.
- Skokovitá zmena stavu materiálu.
- Medzný stav je stav systému vyjadrený podmienkami (parametrami) činnosti systému, pri prekročení ktorých dôjde k dočasnému alebo trvalému porušeniu (zlyhaniu) funkcie systému. Medzný stav systému je na rozhraní normálneho a poruchového stavu.

Pri popise medzného stavu používame nasledujúce základné pojmy:

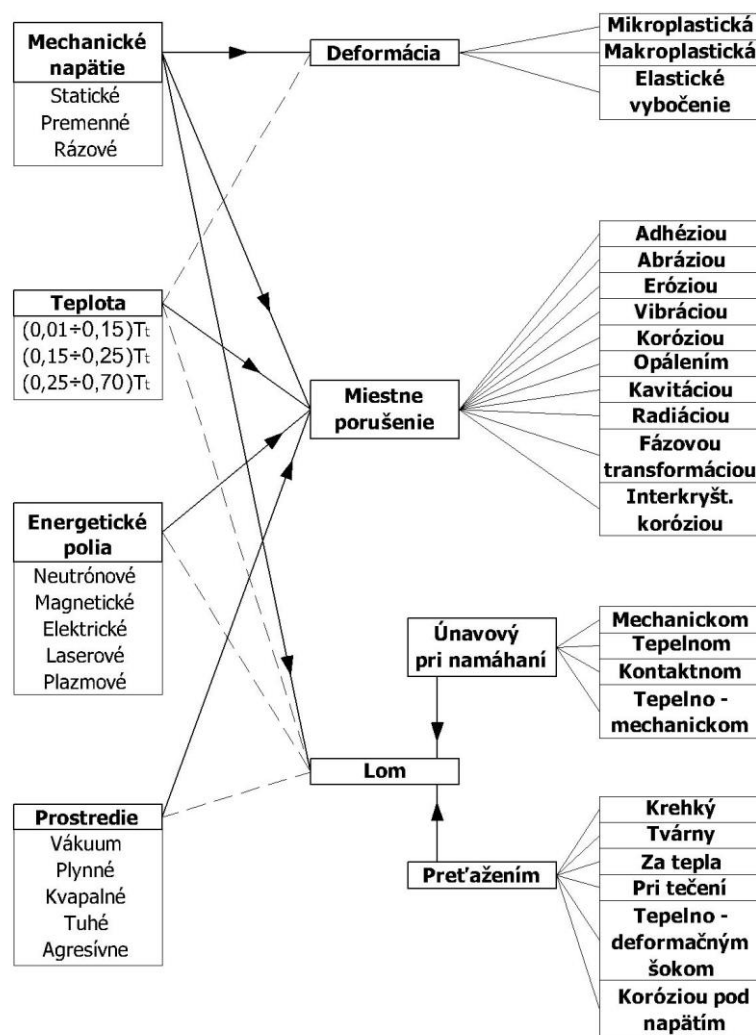
- *Úroveň poškodenia materiálu* je charakterizovaná hladinou vnútornej energie, najmä v miestach jej koncentrácie, alebo podielom oblastí s narušením kohézie materiálu v dôsledku pôsobenia externých alebo interných faktorov medzného stavu.
- *Plastická deformácia* je schopnosť materiálu meniť tvar a rozmery pri pôsobení dostatočne veľkého zaťaženia bez toho, aby menili svoju kryštalickú stavbu.
- *Miestne poškodenie* materiálu je nevratná, objemovo a miestne obmedzená strata kohézie, ktorej výsledkom je oddelenie istého objemu materiálu, vytvorenie trhliny alebo siete trhlín, prípadne vrstvy, ktorá má významne odlišné úžitkové vlastnosti ako okolitý materiál.
- *Lom* je nevratná strata kohézie častíc materiálu v časti alebo v celom priereze telesa.

Vznik medzného stavu ovplyvňujú nasledujúce faktory:

- Štruktúrny a subštruktúrny stav.
- Technológia výroby.
- Prevádzkové podmienky (prostredie).
- Veľkosť a druh zaťaženia.
- Chemické zloženie.

- Rýchlosť zaťaženia.
- Korózia.
- Čas.
- Teplota.
- Superpozícia viacerých faktorov.

Rozdelenie medzných stavov je možné vidieť na **obr. 1**.



Obr. 1 Základné rozdelenie medzných stavov [1].

Rozdelenie medzných stavov:

- ❖ Medzné stavy únosnosti
 - Deformácia
 - Medzný stav pružnej deformácie

- nadmerná pružná deformácia,
 - porušenie pružnej stability (vzper),
 - pokles pružnej deformácie (relaxácia).
- Medzný stav plastickej deformácie
 - nadmerná plastická deformácia (kritická),
 - porušenie plastickej stability.
- Medzný stav porušenia (lom)
 - Preťažéním
 - krehký,
 - tvárny,
 - tečením,
 - rázom,
 - tepelná deformácia šokom,
 - koróziou,
 - zabrzdzený,
 - predčasný.
 - Únavou
 - Mechanickou $\varepsilon = f(\sigma)$
 - Tepelnou $\varepsilon = f(T)$
 - tepelno-mechanickou $\varepsilon = f(T, \sigma)$
 - tečením $\varepsilon = f(T, \sigma, t)$
- Miestne poškodenia
 - Objemové
 - vodíkom,
 - interkryštalická korózia,
 - tekutým kovom,
 - zvarom,
 - radiačné,
 - napučaním,
 - energetickými poľami.
 - Povrchové
 - adhéziou,
 - abraziou,
 - eróziou,
 - kavitáciou,
 - vibráciami,
 - koróziou,
 - teplotou,
 - vytrhnutím,
 - energetickými lúčmi.

❖ Medzné stavy použiteľnosti

- Nadmerné priehyby.
- Veľkosť dynamickej odozvy (kmitanie).
- Strata stability polohy.
- Hluk.

1.1. Trvalá deformácia

Trvalá (plastická) deformácia kovov a zliatin nastáva pri pôsobení napätia nad medzou klzu. Plastickú deformáciu materiálu (súčiastky) počas prevádzky je možné považovať za jeho degradáciu, keďže pri nej dôjde k trvalej zmene tvaru a zdeformovaná súčiastka už zvyčajne nemôže plniť účel, na ktorý bola skonštruovaná, **obr. 2**. Konštrukčné časti musia byť preto navrhnuté tak, aby neboli pri prevádzkovom zaťažení preťažované a aby nebola prekročená medza klzu materiálu.



Obr. 2 Príklad medzného stavu – deformácie ventilu a ojnice motora

Medzu klzu najviac ovplyvňuje:

- štruktúra
- teplota
- rýchlosť zaťažovania

1.1.1. Vplyv štruktúry

Spomedzi štruktúrnych parametrov hrá významnú úlohu veľkosť zŕn, nakoľko hranice zŕn sú prekážkou pre pohyb dislokácií. Jemnozrnné materiály teda majú vyššiu medzu klzu ako hrubozrnné materiály. Túto závislosť popisuje Hall-Petchov vzťah:

$$R_e = K_1 + K_2 \cdot d^{-\frac{1}{2}}$$

kde R_e je medza klzu, K_1 , K_2 sú materiálové konštanty a d je stredná veľkosť zrna.

Viacfázové materiály majú medzu klzu ovplyvnenú typom a veľkosťou prítomných fáz. Tvrdé fázy (cementit, precipitáty a pod.) sú prekážkou v pohybe dislokácií, preto medzu klzu

zvyšujú. Ich účinnosť rastie tým viac, čím sú jemnejšie a rovnomernejšie rozložené v materiáli. Preto majú zliatiny vždy vyššie mechanické vlastnosti ako čisté kovy.

Medza klzu termoplastov sa zvyšuje plnivami, ktoré môžu čiastočne prenášať pôsobiace zaťaženie alebo priestorovo prekážať pohybu makromolekúl. V tomto zmysle sú veľmi účinné plnivá vo forme vlákien.

1.1.2. Vplyv teploty

Vplyv zvyšujúcej sa teploty na medzu klzu súvisí so zvýšenou pohyblivosťou atómov, molekúl a ich častí. Vďaka tomu je plastická deformácia ľahšia a medza klzu s rastúcou teplotou klesá. Táto závislosť je oveľa výraznejšia u termoplastov ako u kovových materiálov. Naopak, pri veľmi nízkych teplotách sa niektoré materiály (oceľ, termoplasty) stávajú krehkými.

1.1.3. Vplyv rýchlosti zaťažovania

Plastická deformácia je spojená s premiestňovaním štruktúrnych častí materiálu (atómov, molekúl), čo si vyžaduje určitý čas. Pri väčšej rýchlosti zaťažovania prebehne preskupenie v menšom rozsahu ako pri pomalom zaťažovaní. S rastúcou rýchlosťou zaťažovania sa preto zhoršuje plastická deformovateľnosť a teda rastie medza klzu. Pri veľmi veľkej rýchlosti zaťažovania sa materiály nestačia plasticky deformovať vôbec a správajú sa ako krehké.

Závislosť medze klzu R_e na rýchlosti zaťažovania $\dot{\epsilon}$ má tvar:

$$R_e = K \cdot \dot{\epsilon}^m$$

kde rýchlosť zaťažovania $\dot{\epsilon}$ (s^{-1}) je definovaná ako relatívna deformácia ϵ za čas τ :

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\tau} \epsilon$$

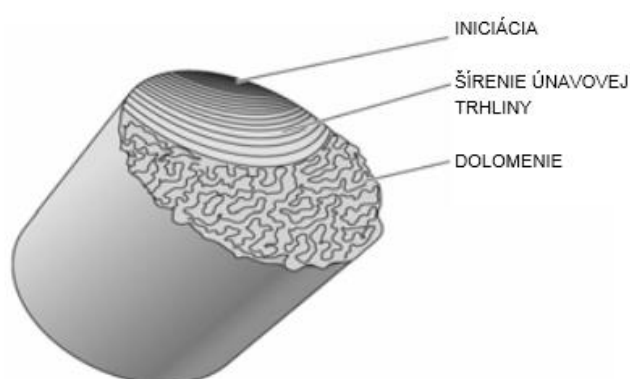
K je konštanta, m (má hodnotu medzi 0,01 a 0,5) je exponent vyjadrujúci citlivosť materiálu na rýchlosť zaťažovania. Táto citlivosť, a teda aj exponent m , rastie so zvyšujúcou sa teplotou. U niektorých kovových materiálov môže pri dostatočne vysokých teplotách hodnota exponentu m dosiahnuť až hodnotu 0,5 a kombinácia veľmi pomalej deformácie a vysokej teploty vedie k značne nízkej medzi klzu. Takéto materiály sú schopné obrovskej plastickej deformácie (rádovo až 1000%) a nazývajú sa superplastické. Podmienkou superplastického správania, ktoré je dôležité pri tvárnení kovových materiálov, je veľmi jemné zrno ($<10 \mu m$).

1.2. Lomy

Ak na teleso pôsobí vyššie mechanické napätie ako je medzná hodnota, začnú vznikať zárodky porušenia, ktoré rastú až do vytvorenia lomovej plochy. Teleso stratí kohéziu, vzniká párný počet nových povrchov – lom.

Fraktografia je vedný odbor, ktorý sa zaoberá štúdiom povrchov lomov materiálov. Sleduje charakteristické znaky lomov na povrchu. Na základe nich vieme identifikovať mechanizmus lomu. Cieľom štúdia lomových plôch je zistiť pôvod trhliny a príčiny jej iniciácie. Iniciátorom lomov sú najčastejšie koncentrátory napätí, ktoré sú geometrické (spojené s tvarom súčiastky), alebo metalurgické (inklúzie, riediny, dutiny).

Nástrojom pri štúdiu lomov je makroskopická a mikroskopická analýza. Výsledkom štúdia je mapa poškodenia zachytávajúca všetky štádiá rastu lomu, **obr. 3**.



Obr. 3 Schematický náčrt častí únavového lomu

Pod pojmom lomová plocha rozumieme systém plôšok (faziet). Lomy je možné klasifikovať podľa rôznych hľadísk:

- ❖ Podľa morfológie:
 - Húževnaté (vzniknuté tvárnym oddeľovaním)
 - Krehké (vzniknuté transkryštalickým štiepením, interkryštalickým oddeľovaním, dekohéziou hraníc)
- ❖ Podľa rozsahu plastickej deformácie predchádzajúcej a sprevádzajúcej rast trhliny:
 - Krehké (do 1‰)
 - Kvázikrehké (do 1%)
 - Kvázihúževnaté (do 5%)
 - Húževnaté (nad 10%)
- ❖ Podľa veľkosti objemu zasiahnutého plastickou deformáciou:
 - Húževnaté (rozsiahla plastická deformácia)
 - Krehké (nepozorujeme makrodeformáciu)
- ❖ Podľa potreby dodávania energie pri raste lomovej trhliny:
 - Stabilné (na rozvoj lomovej trhliny je potrebné sústavne dodávať energiu)
 - Nestabilné (nekontrolovateľný rast trhliny účinkom elastickej energie nahromadenej v telese – zvyškové napätia)

Ak vzhľad lomu indikuje prítomnosť vnútorných chýb, alebo výraznú textúru, označujeme lomy ako:

- vločkové (vnútorné nespojitosti vyvolané účinkom vodíka)
- lomy vo vycedeninách (v dôsledku segregácie alebo likvácie počas tuhnutia, alebo plynmi zabraňujúcimi zhutneniu počas tvárnenia)
- svetlé plôšky (rybie očka) spôsobené vodíkom v okolí inklúzií
- bublinaté (množstvo pórov a mikrostiahnutí vzniknutých počas tuhnutia)
- s riedinami (väčšie dutiny spôsobené zmrštením kovu počas tuhnutia)
- s vyššou koncentráciou inklúzií (napr. rozvalcované sulfidy – drevitý lom)

Charakteristické znaky lomu:

- **stopa**, ktorú zanechá lom v priereze komponentu (miesto iniciácie, orientácia lomu k povrchu komponentu, chevronové kontúry – ukazujú smer šírenia sa lomu...)
- **stupeň makroskopickej deformácie** komponentu
- **vzhľad štruktúry povrchu lomu** (makrovzhľad – jemná/drsná, lesklá/matná, mikrovzhľad: jamky, štiepne fazety, únavové striácie...)

1.2.1. Krehký lom

Krehký lom je nežiaduci, veľmi nebezpečný druh lomu. Snahou je maximálne predchádzať jeho vzniku.

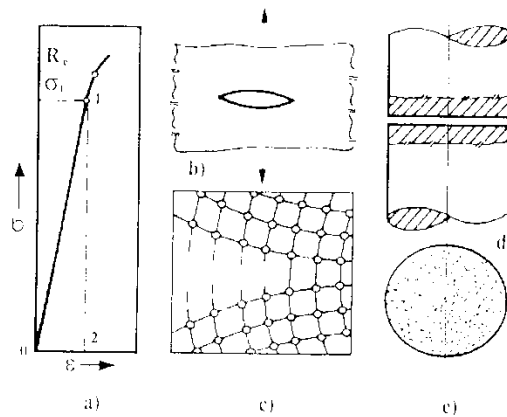
Charakteristiky krehkého lomu, obr. 4:

- Šíri sa vysokou rýchlosťou
- Je mechanicky neočakávaný – vzniká a prebieha bez väčšej plastickej deformácie
- Vzniká náhle pri napätí $\sigma < R_e$
- Lomová plocha je kolmá na smer pôsobenia najväčšieho napätia
- Energia potrebná na jeho vznik a šírenie je minimálna – v tom spočíva jeho najväčšie riziko
- Šíri sa štiepnym mechanizmom transkrýštalicky (**obr. 5**), alebo interkrýštalicky (**obr. 6**)

Faktory podporujúce vznik krehkého lomu

- Prítomnosť mikroskopických alebo makroskopických koncentrátorov napätia (trhliny, vruby, náhle zmeny prierezu)
- Veľké hrúbky materiálu (väčšia hrúbka = väčšia pravdepodobnosť prítomnosti vnútorných vád)
- Dynamické namáhanie

- Veľká energia elastickej deformácie v namáhanom telese (prítomnosť zvyškových napätí)
- Nízke teploty

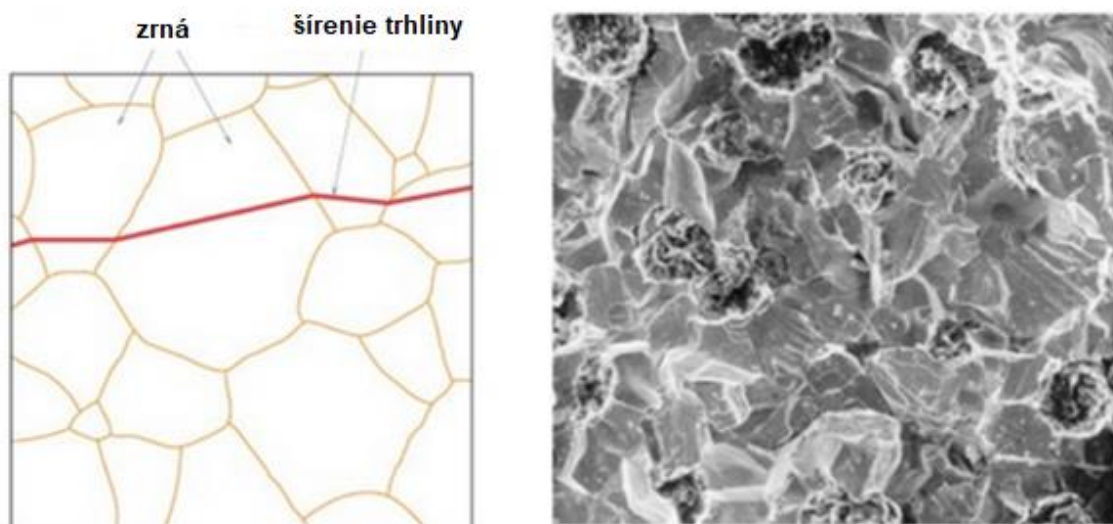


Obr. 4 Schematické znázornenie základných charakteristík krehkého lomu: a) vzniká pri $\sigma < R_e$, b) predpokladom je prítomnosť vnútorných defektov, c) dochádza k porušovaniu mediatómových väzieb, d) lomová plocha je kolmá na pôsobiace zaťaženie a nevykazuje známky plastickej deformácie v svojom okolí, e) lomová plocha je málo členitá

Krehký lom sa môže šíriť dvoma spôsobmi:

Krehký lom – transkryštalický (štíepny)

Je typický pre materiály s pevnými hranicami zŕn, so silnou adhézou zŕn. Štiepenie je dôsledkom opakovaného porušenia atómových väzieb pozdĺž špecifických rovín cez jednotlivé zŕná.



Obr. 5 Schéma transkryštalického šírenia lomu a skutočný vzhľad lomovej plochy, REM

Krehký lom – interkryštalický

Je typický pre prípady, kedy sú hranice zŕn z rôznych príčin oslabené napr. chemickým napadnutím, oxidáciou, skrehnutím a pod. Lom sa šíri po hraniciach zŕn.



Obr. 6 Schéma interkryštalického šírenia lomu a skutočný vzhľad lomovej plochy, REM

1.2.2. Húževnatý (tvárny) lom – znaky

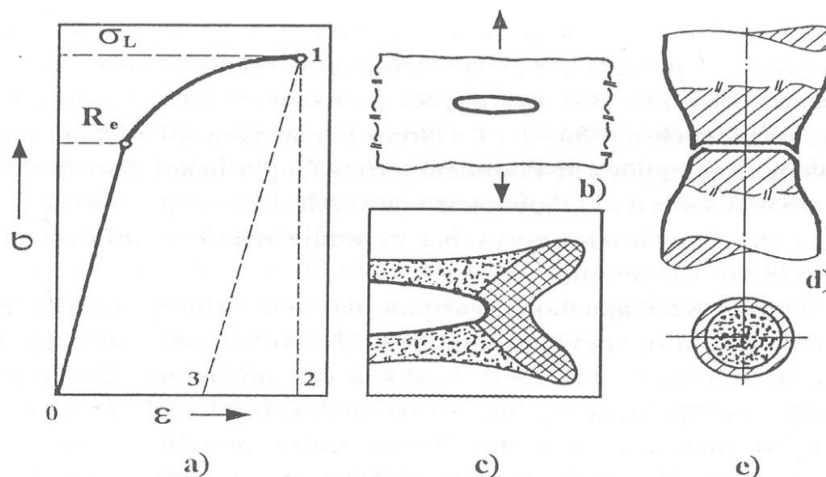
Charakteristiky húževnatého lomu, obr. 7:

- Je sprevádzaný relatívne veľkou plastickou deformáciou
- Na jeho vznik je potrebné relatívne veľké množstvo energie (preto je menej nebezpečný)
- Veľkosť deformácie pred vznikom porušenia závisí od druhu, čistoty, štruktúry a deformačného stavu materiálu

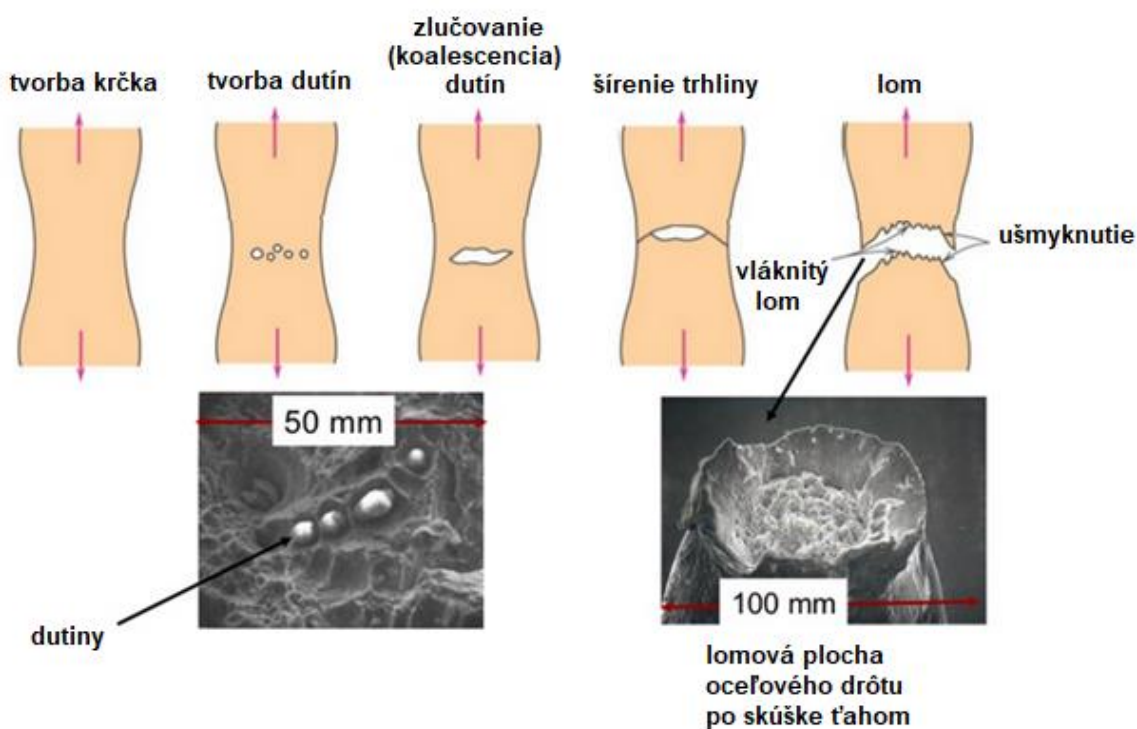
Priebeh vzniku húževnatého (tvárneho) lomu je možné zosumarizovať nasledovne, **obr. 8:**

- Mechanické namáhanie
- Plastická deformácia
- Zväčšenie kontrakcie
- Vznik dutín v mieste budúceho lomu
- Rast dutín – zmenšovanie mostíkov medzi dutinami
- Porušovanie mostíkov – spájanie (koalescencia) dutín do trhlín
- Konečná lomová plocha – jamková

V prípade materiálu s kruhovým prierezom má lomová plocha dve oblasti: jadro lomovej plochy má jamkový charakter a je kolmé na smer zaťažovania, okraje lomovej plochy sa porušia šmykom pod uhlom približne 45° voči pôsobeniu zaťaženia. Výsledná plocha má tvar „poháríka“ (angl. cup and cone), **obr. 9**.



Obr. 7 Schematické znázornenie základných charakteristík húževnatého (tvárneho) lomu: a) vzniká pri $\sigma > R_e$, b) predpokladom je prítomnosť vnútorných defektov, c) dochádza k vzniku plastickej zóny pred čelom trhliny, d) jadro lomovej plochy je jamkovitého charakteru a je kolmé na pôsobiace zaťaženie, okraj je porušený šmykom pod uhlom 45°, v blízkosti lomu je viditeľná plastická deformácia, e) lomová plocha má tvar poháríka

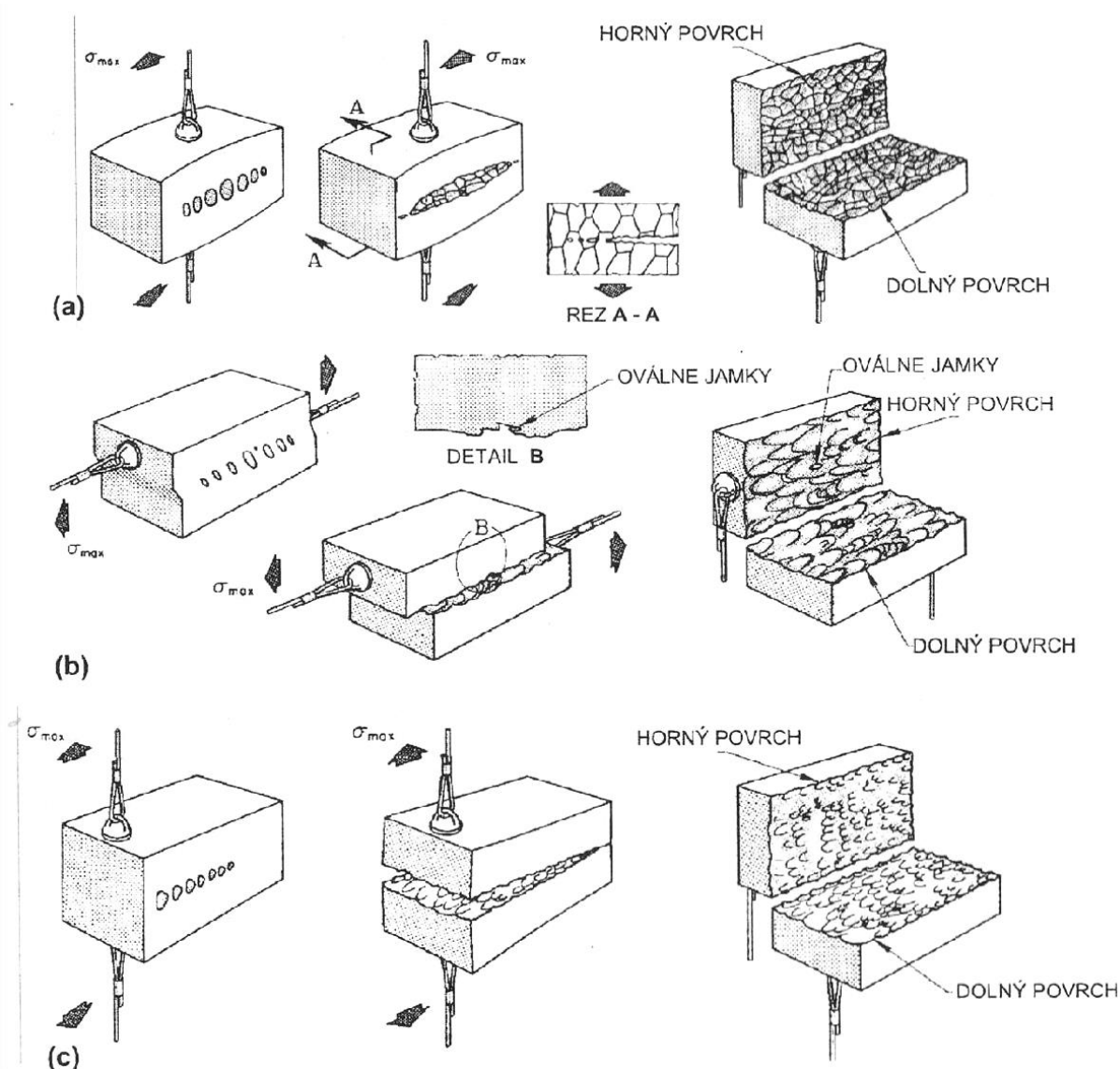


Obr. 8 Schéma vzniku tvárneho lomu



Obr. 9 Vzhľad húževnatého (vľavo) a krehkého (vpravo) lomu

Schéma vzniku tvárneho (jamkového) lomu pri troch spôsoboch zaťažovania uvádza **obr. 10**.



Obr. 10 Schéma vzniku tvárneho (jamkového) lomu pri troch spôsoboch zaťažovania: a) ťah, b) šmyk, c) excentrický ťah

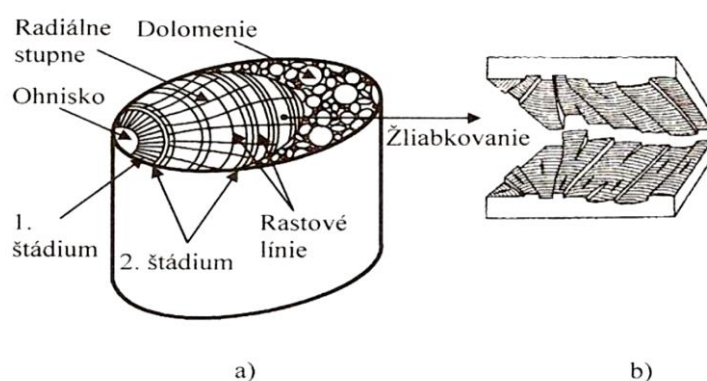
1.3. Únava

Pri únavovom procese dochádza k postupnému hromadeniu poškodenia pri cyklickom kmitavom mechanickom, tepelnom alebo mechanicko-tepelnom namáhaní, pri napätí $< R_m$ a často aj $< R_e$, ktoré sa v závere procesu prejaví rastom makroskopickej trhliny a únavovým lomom.

Únavový lom zvyčajne štartuje na povrchu v mieste koncentrácie napätia spôsobenej náhlou zmenou prierezu alebo rôznymi typmi povrchových defektov.

Má tri charakteristické časti, **obr. 11**:

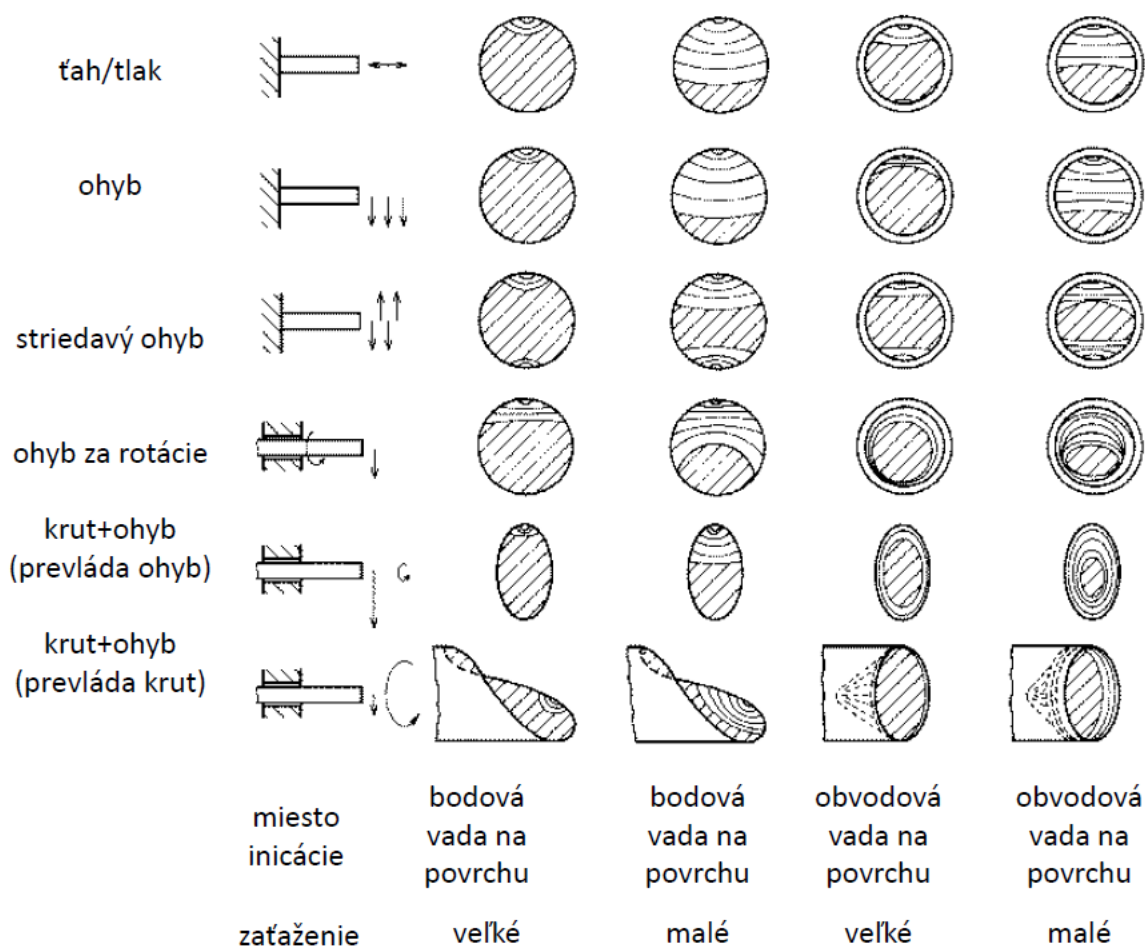
- miesto iniciácie,
- únavová zóna (zóna šírenia lomu, sú tam postupové čiary – striácie, málo členitá časť lomu),
- zóna dolomenia (členitý povrch lomu, bez známkov väčšej deformácie, väčšinou kolmá na smer hlavného napätia)



Obr. 11 Charakteristické časti únavového lomu, a) makroskopický vzhľad, b) mikroskopický vzhľad

Podľa tvaru jednotlivých oblastí únavového lomu a podľa pomeru ich veľkosti možno spätne usudzovať na podmienky namáhania, za ktorých ku vzniku únavového lomu došlo. Čím pomalší je rozvoj únavovej trhliny, tým viac sa únavová oblasť vyhladí až vyleští. Teda lomy s veľmi hladkým povrchom únavovej oblasti sa rozvíjali dlho. To svedčí tiež o malom zaťažení, popr. o dostatočnom dimenzovaní až predimenzovaní súčasti. Čím menšia časť celkovej lomovej plochy pripadá na únavovú oblasť, tým väčšie bolo zaťaženie súčasti, popr. tým menšie jej dimenzovanie.

Vzhľad lomových plôch pri rôznom type zaťažovania je uvedený na **obr. 12**.



Obr. 12 Vzhľad lomových plôch pri rôznom type zaťažovania

Únavová životnosť súčiastok má 4 štádiá:

1. zmena mechanických vlastností
2. nukleácia trhlín
3. šírenie trhlín
4. konečný lom

1.3.1. Štádiá únavového lomu

1.štádium - zmena mechanických vlastností

V prvom štádiu únavy materiálu dochádza k zmene hustoty a konfigurácie mriežkových porúch v celom objeme zaťažovaného kovu. Najväčšie zmeny nastávajú na začiatku cyklického zaťažovania, s rastúcim počtom cyklov ich intenzita klesá a po určitom počte cyklov sa už nemení.

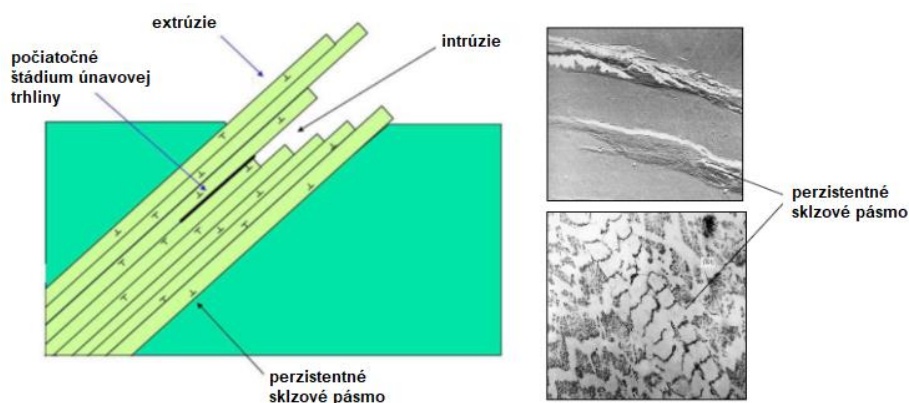
U materiálov vyžihávaných s pomerom $R_m/R_e > 1,4$ dochádza v tomto štádiu k tzv. cyklickému spevneniu; u materiálov s pomerom $R_m/R_e < 1,2$ spevnených deformačne, precipitačne,

disperznými časticami, martenzitickou transformáciou a pod., dochádza k tzv. cyklickému zmäkčeniu.

2. Štádium - nukleácia trhlín

Trhlina začína vždy na voľnom povrchu, v miestach koncentrácie cyklickej plastickej deformácie, po prekročení určitého medzného lokálneho napätia, pričom pod hodnotami tohto napätia nevznikne zárodok trhliny ani pri vysokom počte zaťažovacích cyklov.

Najskôr dochádza k vytváraniu sklzových pásiem v povrchových zrnách, ktorých sklzové roviny sú orientované v smere najväčších šmykových napätí. S rastúcim počtom cyklov narastá aj dĺžka, šírka a počet sklzových pásiem. Povrchový reliéf bude potom tvorený tzv. extrúziami a intrúziami, **obr. 13**. Mikrotrhlinou sa neskôr stáva intrúzia a jej rast sa vysvetľuje ako prehlbovanie intrúzie opakovaným sklzom v jednom sklzovom systéme.

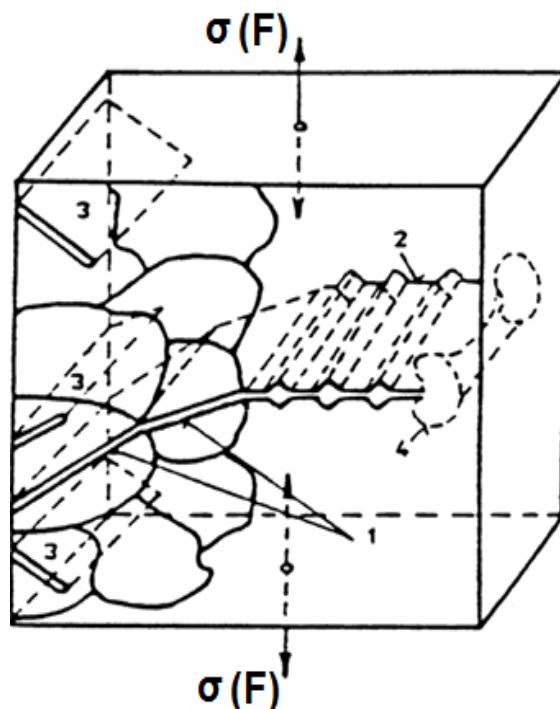


Obr. 13 Schéma a skutočný vzhľad vzniku sklzových pásiem na povrchu cyklicky zaťažovaného materiálu

3. Štádium – šírenie trhlín

Po ukončení nukleačného štádia obsahuje povrch kovu mikrotrhliny, orientované do smeru aktívnych sklzových rovín (I. štádium šírenia). Pri ďalšom cyklickom zaťažovaní sa tieto trhlinky navzájom prepájajú a rastú do hĺbky. Na základe energetických pomerov na čelách jednotlivých trhlín sa napokon bude šíriť len jedna, tzv. magistrálna únavová trhlina. Táto sa pri svojom šírení natáča do smeru kolmého na vektor vonkajšieho zaťaženia (II. štádium šírenia), **obr. 14**.

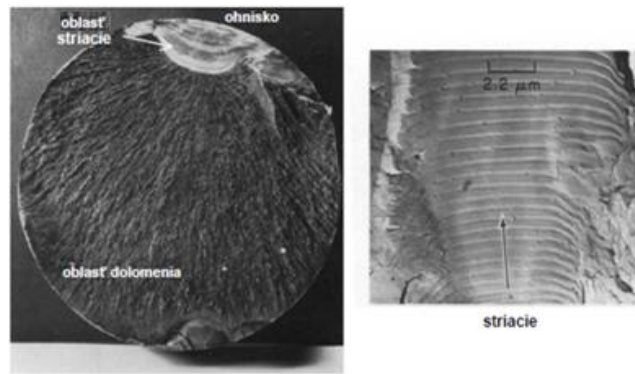
V prípade existencie ostrých vrubov (konštrukčných, technologických alebo metalurgických) je šírenie únavovej trhliny predstavované len II. štádiom. V oboch štádiách sa únavové trhliny šíria pri bežných teplotách transkrýštalicky (cez objem zrna), šírenie trhlín po hraniciach zrn sa až na niekoľko výnimiek vyskytuje len pri zvýšených teplotách.



Obr. 14 Schéma procesu šírenia trhliny, 3 – mikrotrhliny na povrchu kovu orientované do smeru aktívnych sklzových rovín (I. štádium šírenia), 1 – natáčanie hlavnej – magistrálnej trhliny do smeru kolmého na smer zaťaženia (II. štádium šírenia), 2 – postupovanie únavovej časti trhliny so striáciami, 4 – plastická zóna na čele trhliny

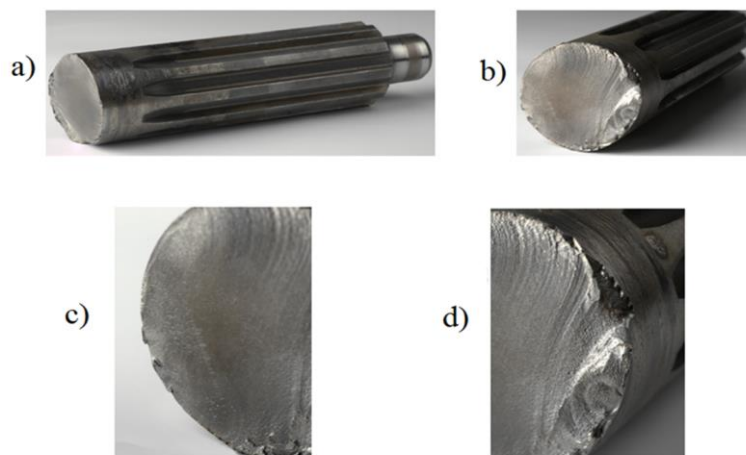
4. Štádium – konečný lom

Únavový lom vzniká **náhle**, bez predošlej makrodeformácie materiálu, aj v prípade húževnatých materiálov, ktoré sa pri statickej skúške porušia až po výraznej plastickej deformácii. Výsledkom šírenia únavovej trhliny je zoslabenie nosného prierezu súčasti. Ak dosiahne trhlina kritickú veľkosť, dôjde k náhlemu lomu zvyšného prierezu, ktorého veľkosť už nepostačuje na prenos zaťaženia. Preto má každý únavový lom **dve rozlíšiteľné oblasti: oblasť únavového poškodenia a zvyškový lom (oblasť dolomenia)**. Oblasť únavového poškodenia, v ktorej prebieha pozvoľný nárast trhliny, má vzhľad jemného lomu, ktorý je spôsobený opakovaným otváraním a zatváraním trhliny. Na lomovej ploche v tejto oblasti je viditeľné **východisko lomu (ohnisko)** a tzv. **rastové čiary (striácie)**. Zvyškový lom vzniká dolomením zvyšnej časti nosného prierezu, **obr. 15**.

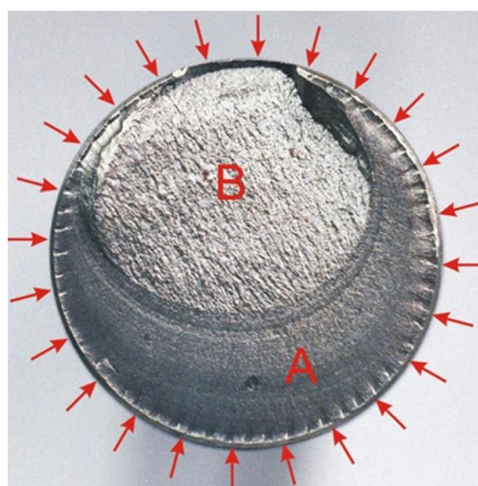


Obr. 15 Vzhľad typického únavového lomu a detail striácií

Príklady únavového poškodenia súčiastok, **obr. 16 a 17**.



Obr. 16 a)-d) Lom na spojkovom hriadeli, nastal v dôsledku jeho priehybu, ktorý v ňom vyvolal striedavé ohybové namáhanie. Toto namáhanie spolu s prenášaným premenlivým krútiacim momentom vyvolávalo v danom priereze kombinované namáhanie. Únavový lom vyvolaný kombinovaným namáhaním sa vyznačuje tým, že jeho postup profilom je v tvare krivky. Tieto sú tu celkom zrejmé a s ohľadom na ich zhodný tvar je zrejmé, že priebeh namáhania hriadeľa bol od začiatku až do konca veľmi podobný.

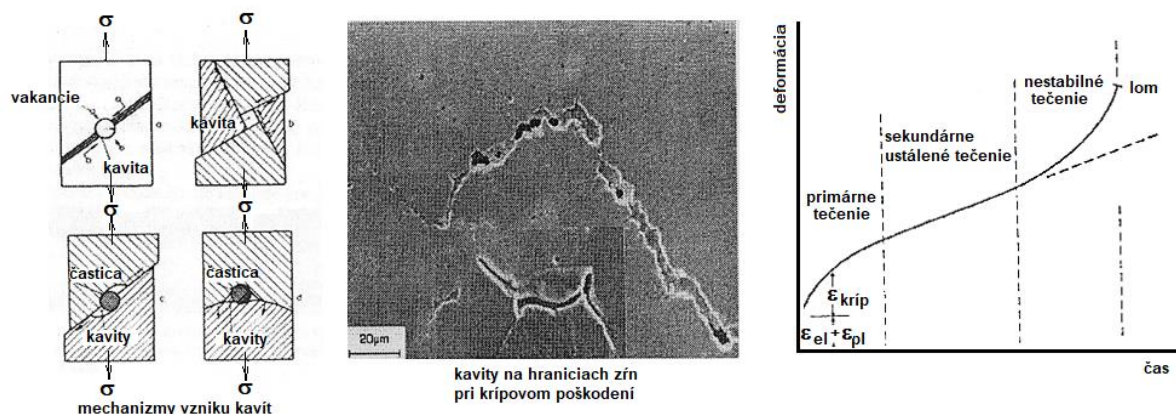


Obr. 17 Únavový lom hriadeľa poloosi vozidla - jedná sa o lom v oblasti vysokocyklovej únavy materiálu pri namáhaní ohybom za rotácie pri celoobvodovom vrubovom účinku osadenia hriadeľa pre valivé ložisko; časť A: únavová zóna lomu, časť B: oblasť dolomenia

1.4. Tečenie (kríp)

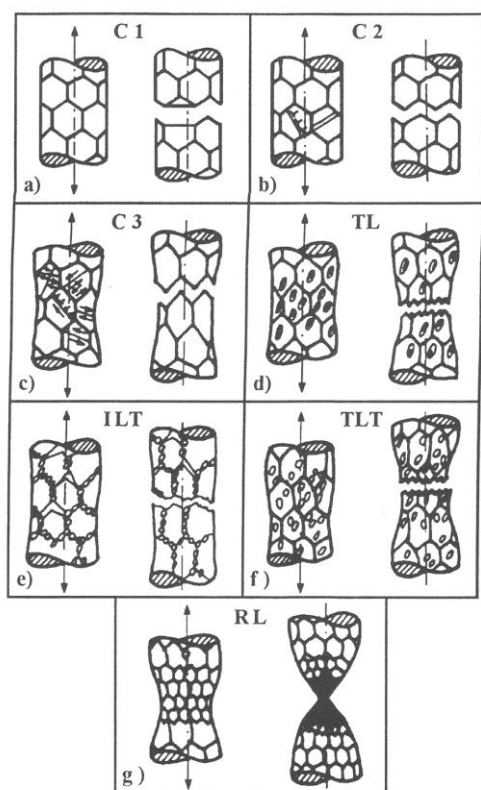
Tečenie alebo kríp (z angl. creep) je časovo závislá plastická deformácia materiálov, ktorá prebieha aj pod medzou klzu materiálov mechanicky zaťažených a súčasne pracujúcich pri zvýšenej teplote. Kríповé lomy vznikajú pri $T > 0,3.T_{\text{tav}}$ a dlhodobom mechanickom zaťažení pod R_m , resp. aj pod R_e . Vznikajú vo forme pórov situovaných v blízkosti hraníc zŕn. Počet pórov s časom rastie, následne sa póry kombinujú do súvislej čiary a nakoniec vzniká lom, **obr. 18**.

Kríповé lomy vznikajú ako dôsledok tepelne aktivovaného pohybu atómov, vakancií, dislokácií v pevnej fáze. Podľa tvaru dutín môžeme usudzovať na podmienky pri ich vzniku. Pretiahle póry indikujú vysoké napätia alebo nízke teploty. Kaverny/kavity, teda okrúhle dutiny indikujú malé napätia, dlhé časy expozície a vysoké teploty.



Obr. 18 Mechanizmy vzniku kavit pri tečení, skutočný tvar kavit pri kríповom poškodení, charakteristická krivka tečenia

Schému kríповého poškodenia v rôznych napäťovo-teplotných podmienkach uvádza **obr. 19**.



C1 – krehké štiepenie, bez pohybu dislokácií, bez výraznej kontrakcie telesa

C2 – trans- alebo interkryštalické tvárne štiepenie pri $T < 0,3 \cdot T_{\text{tav}}$, pohyb dislokácií v blízkosti štiepnej roviny, bez výraznej kontrakcie telesa

C3 – štiepenie sprevádzané výraznou plastickou deformáciou pri $T > 0,3 \cdot T_{\text{tav}}$, zaznamenaná menšia kontrakcia telesa

TL – tvárny lom vzniknutý dutinovým mechanizmom, výrazná kontrakcia telesa

ILT – interkryštalický lom pri tečení, pri $T > 0,3 \cdot T_{\text{tav}}$, vznik a spájanie dutín po hraniciach zŕn, rast trhlín po hraniciach zŕn, malá kontrakcia telesa

TLT - transkryštalický lom pri tečení, pri $T > 0,3 \cdot T_{\text{tav}}$, vznik a spájanie dutín vnútri zŕn, prepájanie dutín do konečnej lomovej plochy, relatívne veľká kontrakcia telesa

RL – lom sprevádzaný rekryštalizáciou, pri $T > 0,8 \cdot T_{\text{tav}}$ nastáva plastická deformácia so súčasným spevnením, vďaka vysokej teplote súčasne prebieha rekryštalizácia - obnovenie plasticity materiálu, ktorý je schopný dosiahnuť v okamihu lomu kontrakciu takmer 100%

Obr. 19 Schéma kríповého poškodenia v rôznych napäťovo-teplotných podmienkach

1.5. Opotrebenie

Ďalší druh poškodenia materiálov vzniká ako dôsledok vzájomného pôsobenia materiálov, alebo materiálu a určitého prúdiaceho média. Druhy opotrebenia charakterizuje norma STN 01 5050: Opotrebenie materiálu. Názvoslovie.

Tribológia sa zaoberá javmi ktoré sú spojené s trením, opotrebovaním a mazaním kontaktujúcich sa povrchov počas ich vzájomného relatívneho pohybu. Tribológia v historickej forme existovala už od prvopočiatkov ľudskej civilizácie - šmýkanie ťažkých predmetov. Až 1/3 energie vyrobená na svete sa stráca vplyvom trenia. Napr. parný stroj, turbíny, motory, železnice, atď.

Vzťah medzi normálovou (F_n) a trecou silou (F_t) je daný nasledujúcim vzťahom:

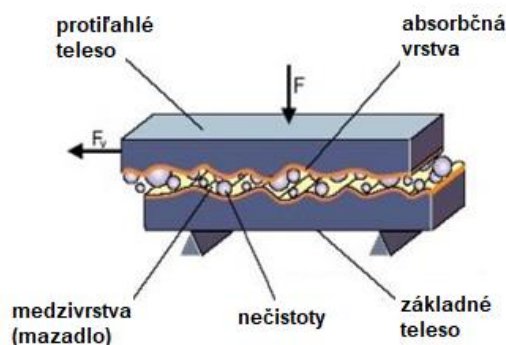
$$F_t = \mu \cdot F_n$$

kde μ je koeficient trenia.

Opotrebenie je nežiaduca zmena povrchu alebo rozmerov tuhých telies spôsobená buď vzájomným pôsobením funkčných povrchov alebo funkčného povrchu a média, ktoré opotrebenie vyvoláva. Prejavuje sa odstraňovaním alebo premiestňovaním častíc hmoty z funkčného povrchu mechanickými účinkami (niekedy sprevádzanými i inými vplyvmi, napr. chemickými, elektrochemickými).

Základný **tribologický systém** je tvorený nasledujúcimi členmi, **obr. 20**:

- **základné a protiľahlé teleso** - charakterizované mechanickými (tvrdosť, pevnosť), tepelnými (teplotná rozťažnosť) a chemickými (pH, afinita ku kyslíku) vlastnosťami a drsnosťou kontaktných plôch
- **medzivrstva**, s rôznymi nečistotami viazanými s povrchom telies určitým typom chemickej väzby (absorpčná vrstva)
- normálová (F_n) a posuvná (F_v) **sila** ako podmienky pre relatívny pohyb telies v kontakte, pričom je dôležitý druh (klzanie, odvaľovanie, narážanie, prúdenie) a typ (plynulý, prerušovaný, oscilačný a i.) tohto pohybu.
- obklopujúce **médium**, charakterizované určitou teplotou, agresivitou a pohybom, ktoré pôsobí na vonkajšie plochy telies, a ovplyvňuje aj vlastnosti kontaktných povrchov.



Obr. 20 Tribologický systém

Faktory vplývajúce na tribologický systém:

Vstupné:

- základné vlastnosti trecích telies,
- medzilatka (prostredie),
- podmienky zaťažovania (veľkosť, rýchlosť, teplota).

Vnútorne:

- drsnosť a stav povrchu,

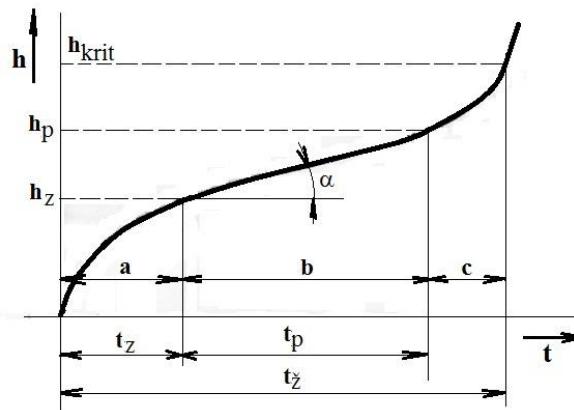
- vlastnosti mazacej vrstvy,
- vznik a prestup tepla,
- štruktúra podpovrchových vrstiev,
- mechanické vlastnosti telies,
- pohyb a sústreďovanie dislokácií.

Výstupné:

- trecia sila a trecí moment,
- intenzita opotrebenia.

Časový priebeh opotrebenia:

Na jeho základe je možné modelovať procesy, hodnotiť výsledky, spoľahlivosť, predpovedať priebeh opotrebenia súčiastky, stroja. Priebeh opotrebenia je možné rozdeliť na 3 časové úseky, v ktorých sú rôzne rýchlosti opotrebenia, **obr. 21**.



Obr. 21 Krivka časového priebehu opotrebenia: a – zábeh, b – prevádzka, c – dožívanie; havarijná situácia, h – hodnota opotrebenia, t – doba opotrebenia

Dôležitou charakteristikou je **rýchlosť opotrebenia** v sa vyjadruje: $v = tg \alpha$.

Intenzita opotrebenia sa vyjadruje najčastejšie nasledovne:

1. hmotnostnými úbytkami (oterom)

- lineárny [m/m , m/s , $m/ot.$],
- objemový [m^3/s , m^3/m , $m^3/ot.$]
- hmotnostný [kg/m , kg/s , $kg/ot.$],

2. koeficientom opotrebenia – pre trecie dvojice,

3. pomernou veľkosťou opotrebenia skúmaného materiálu oproti veľkosti opotrebenia referenčného materiálu ($W = W_{mat}/W_{ref}$)

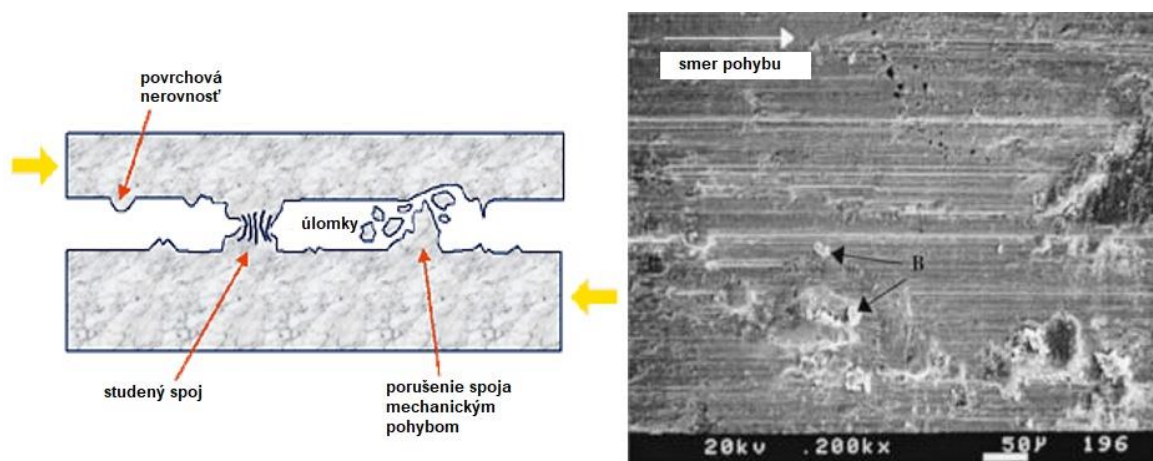
Najdôležitejšou časťou krivky je **doba prevádzky**, ktorá má byť čo najdlhšia s minimálnymi materiálovými úbytkami.

V prevádzkových podmienkach konkrétnych strojov a zariadení je možné súčasné pôsobenie viac druhov opotrebenia, alebo prechod od jedného druhu opotrebenia k inému. Opotrebenie vedie k postupnej strate požadovanej funkčnej spôsobilosti stroja či strojného zariadenia. V 80% prípadov primárnou príčinou vyradenia strojov a zariadení z prevádzky sú procesy opotrebenia.

Procesy opotrebenia môžeme rozdeliť na 6 základných druhov: adhezívne, abrazívne, erozívne, kavitačné, únavové a vibračné.

1.5.1. Poškodenie adhéziou

Adhézne poškodenie povrchu materiálov je dôsledkom periodického vzniku a zániku mikrospojov (mikrozvarov) medzi dvoma materiálmi pri ich vzájomnom relatívnom pohybe. Mikrozvary vznikajú v dôsledku vzájomného normálového silového pôsobenia dvoch povrchov, ktoré sa reálne stýkajú na oveľa menšej ploche ako je ich menovitá styčná plocha. Tým pádom je napätie na jednotlivých dotýkajúcich sa výstupkoch vysoké, materiály sa k sebe priblížia na medziatómovú vzdialenosť a dôjde k vzniku väzieb medzi nimi na podobnom princípe, ako pri spájaní materiálov trecím zvaraním. Keďže dotýkajúce sa materiály sú aj vo vzájomnom relatívnom pohybe, vzniknuté mikrospoje sa porušujú, zvyčajne nie v mieste zvaru, ale tesne pod zvarom, teda v jednom z materiálov. Tým dôjde k „odtrhnutiu“ malého objemu materiálu z jedného povrchu a k jeho „privareniu“ na druhý povrch. Povrch poškodený adhéznym opotrebením bude preto charakteristický oblasťami so známkami vytrhávania častíc z povrchu, **obr. 22 a 23**.



Obr. 22 Schéma princípu adhézneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného adhéznym opotrebením (vpravo)

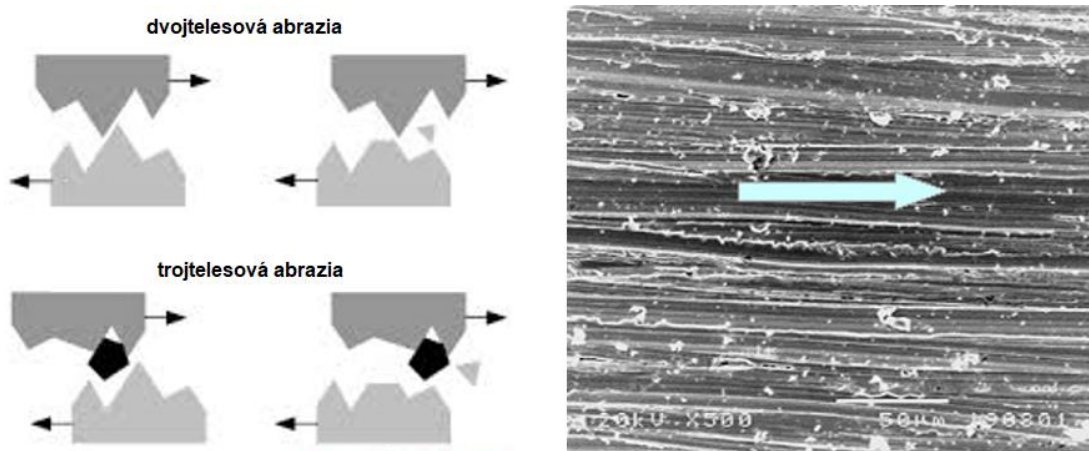


Obr. 23 Príklad adhezívne opotrebenej súčiastky – klzné ložiská

1.5.2. Poškodenie abraziou

Abrazívne poškodenie povrchu materiálov je dôsledkom vzájomného relatívneho pohybu dvoch materiálov, pričom dochádza k ryhovaniu mäkšieho materiálu tvrdším (dvojtelesová abrazia), alebo k ryhovaniu materiálov voľnými abrazívnymi časticami, nachádzajúcimi sa medzi nimi (trojtelesová abrazia).

Povrch poškodený abrazívnym opotrebením bude preto charakteristický súvislými ryhami väčšej dĺžky prítomnými na povrchoch materiálov, **obr. 24 a 25**.



Obr. 24 Schéma princípu abrazívneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného abrazívnym opotrebením (vpravo)

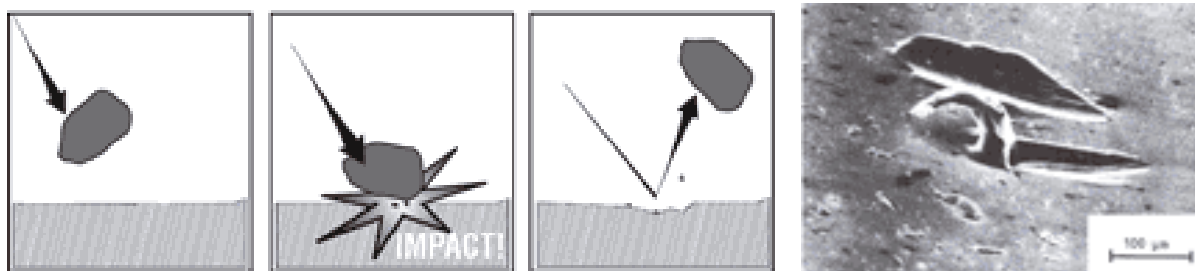


Obr. 25 Príklad abrazívne opotrebenej súčiastky – piest spaľovacieho motora

1.5.3. Poškodenie eróziou

Poškodenie povrchu materiálov eróziou vzniká v dôsledku kontaktu povrchu materiálu s pohybujúcimi sa časticami, nesenými určitým médium (plynným – erózia trysiek, ventilátorov, kvapalným – erózia potrubí, čerpadiel pri hydraulickej preprave rudy, uhlia), alebo samotným prúdiacim médium (funkčné povrchy armatúr, erózia kozmických lodí pri prechode atmosférou). Kontakt povrchu a častice je časovo obmedzený, nakoľko dochádza k dopadu častice, klzaniu častice po povrchu a jej odrazením a vzdialením od povrchu.

Povrch poškodený erozívnym opotrebením bude preto charakteristický krátkymi ryhami, ktorých dĺžka zodpovedá času kontaktu médium nesenej častice od momentu dopadu, po jej odrazenie z povrchu, **obr. 26 a 27**.



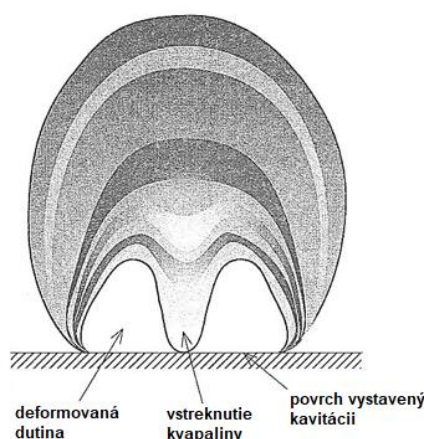
Obr. 26 Schéma princípu erozívneho opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného erozívnym opotrebením (vpravo)



Obr. 27 Príklad erozívne opotrebenej súčiastky – guľový ventil

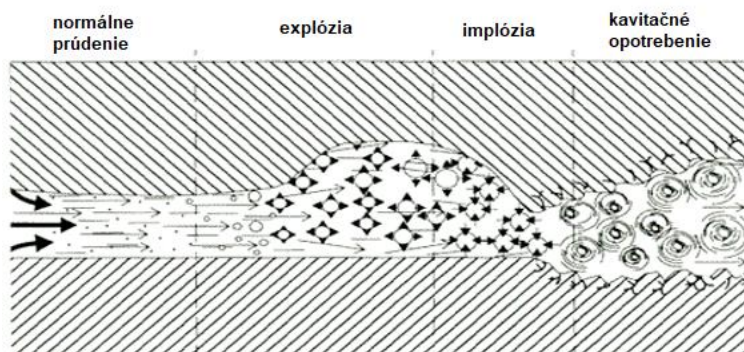
1.5.4. Poškodenie kavitáciou

Poškodenie povrchu materiálov kavitáciou vzniká v dôsledku opakovaného vzniku (explózie) a zániku (implózie) kavít – bublín, ktoré sa objavujú v prúdiacej kvapaline v dôsledku náhlej zmeny podmienok prúdenia. Kvapalinu považujeme z fyzikálneho hľadiska za nestlačiteľnú. Prudký lokálny pokles tlaku spôsobí odčerpanie mikroobjemu kvapaliny z určitého miesta – vzniká na krátky čas vákuová bublina. V dôsledku dynamického podtlaku začnú do nej difundovať pary okolitej kvapaliny. Zánik podtlaku spôsobí zánik (kolaps) bubliny (**obr. 28**) – kvapalina prudko vyplní prázdny priestor, pričom vznikne rázová vlna. Kolaps bubliny trvá 2-3 μs , rýchlosť vstreknutej kvapaliny pri kolapse je $500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tlak pri kolapse okolo 1,4 GPa. Ak sa v okolí kolabujúcej bubliny nachádza pevný materiál (stena rúrky, lopatka turbíny a pod.), má to naň deštruktívny účinok. Dochádza k opakovanej plastickej deformácii povrchovej vrstvy materiálu, postupnému vyčerpaniu jeho plasticity (únava) a následne vytrhávaniu mikročastočiek materiálu.



Obr. 28 Kolaps bubliny v blízkosti pevného povrchu pri kavitačnom poškodení

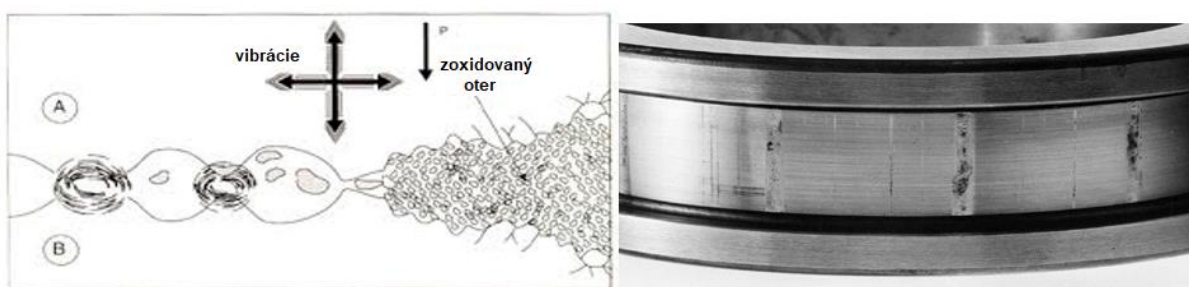
Kavitácia vytvára hluk, nestabilitu chodu, zvyšuje drsnosť povrchu a tým znižuje účinnosť zariadení. Kavitačne opotrebený povrch má charakteristický „hubovitý“ vzhľad, **obr. 29**.



Obr. 29 Schéma princípu kavitačného opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného kavitačným opotrebením (vpravo)

1.5.5. Poškodenie vibráciami

Je charakterizované oddeľovaním častíc a poškodzovaním povrchu vzájomnými oscilujúcimi tangenciálnymi posunmi stykových povrchov telies pri pôsobení normálového zaťaženia, **obr. 30**. Voľné častice, ktoré vznikajú v priebehu opotrebenia sa oxidujú vzdušným kysíkom, hromadia sa medzi stykovými plochami a poškadzujú povrch abrazívne. Vyskytuje sa u súčiastok s hybným uložením (valivé ložiská, čapy, hriadele), ale aj u zdanlivo nepohyblivých súčastí (lisované spoje, nity, skrutky), **obr. 31**.



Obr. 30 Schéma princípu vibračného opotrebenia (vľavo) a vzhľad povrchu poškodeného vibračným opotrebením (vpravo)



Obr. 31 Príklad vibračne opotrebenej súčiastky – krúžok valivého ložiska

3.1. Iné druhy poškodenia

Lom pri preťažení rázom

Napätia a deformácie, ktoré vznikajú pri vysokej rýchlosti pôsobenia zaťaženia sú podstatne vyššie, ako keď zaťaženie rastie pomaly, napr. prechod vozidla po moste, buchar, horenie v spaľovacom motore a pod. Pri rázovom preťažení dochádza k miestnej pružnej deformácii,

následne k vzniku únavovej trhliny, pospájaním trhlín pod povrchom dôjde k vydrobovaniu materiálu.

Poškodenie tepelno-deformačným šokom

Lom je výsledkom superpozície napäťových vln od mechanického nárazu a tepelných napätí, ktoré vyvoláva tepelný gradient v telese, ktoré majú vysokú hodnotu, ale pôsobia krátky čas.

Zbrzdený lom

Patrí do skupiny krehkých lomov. Vzniká, ak je materiál vystavený istý čas nepremennému zaťaženiu, ktoré je nižšie ako R_m a často aj menšie ako R_e . Vznik lomu sa skladá z času inkubácie, po uplynutí ktorého sa začne šíriť trhlina. Vyskytujú sa u vysokopevných ocelí a tiež v zliatinách titánu pri viacosovej napätosti.

Predčasný lom

Ide o krehké porušenie pri dosiahnutí maximálneho zaťaženia. Po porušení je ťažnosť a kontrakcia blízka nule. Vzniká u vysokopevných ocelí v čerstvo zakalenom alebo nízkopopustenom stave, alebo ak je v oceli vložkovitosť. Lomová plocha je heterogénna

Poškodenie vodíkom

Vodíkové skrehnutie

Je účinok atomárneho vodíka na oceľ pri normálnej teplote (do cca 200°C). Principiálne ide o difúziu atomárneho vodíka do ocele s následným vznikom molekulárneho vodíka v defekte, ktorý vplyvom vnútorných napätí vedie k porušeniu materiálu.

Postup vzniku vodíkovej krehkosti, **obr. 32**:

- disociácia molekúl H_2 na atómy H koróznou depolarizačnou reakciou
- difúzia atómov H do ocele
- usadenie atómov H v nepravidelnostiach štruktúry
- rekombinácia atómov H do molekúl H_2 (plyn)
- molekuly H_2 nemôžu kvôli svojej veľkosti spätne difundovať von z materiálu
- hromadenie molekúl H_2 v materiáli
- s rastúcou teplotou materiálu rastie tlak H_2
- dochádza k vzniku priehybov, popraskaniu



Obr. 32 Schéma vzniku vodíkovej krehkosti

Nebezpečenstvo vodíkoveho skrehnutia spočíva v tom, že na povrchu materiálu nevidieť žiadne varovné zmeny. Dochádza k nemu najmä pri sporadickom odstavení a ochladení zariadení pracujúcich pri zvýšených teplotách, nakoľko s klesajúcou teplotou klesá rozpustnosť vodíka v oceli a uvoľňuje sa plyný vodík.

Krehnutie ocele pri nízkych teplotách

V princípe sa podobá vodíkovej krehkosti – ide o vznik molekulárneho vodíka v trhline, ale rozdiel je v tom, že vodík je v oceli už prítomný, rozpustený v oceli už z výroby.

Postup vzniku krehnutia ocele pri nízkych teplotách:

- oceľ obsahuje z výroby menšie množstvo rozpusteného vodíka
- pri poklese teploty dochádza k uvoľneniu plyného vodíka v dôsledku klesajúcej teploty
- nárast tlaku v materiáli
- popraskanie materiálu

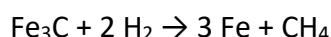
Príkladom tohto procesu je praskanie koľajníc.

Vodíková korózia

– vyskytuje sa u častí chemických zariadení, ktoré pracujú v prítomnosti vodíka pri vysokých teplotách. H reaguje s C v oceli za vzniku CH_4 (metán). Metán difunduje do materiálu, hromadí sa na hraniciach zŕn, tlak vyvolá napätie a vznik trhlín.

Oduhličenie ocele vodíkom pri vysokých teplotách

Ide o rozklad cementitu Fe_3C vodíkom H_2 za vzniku metánu CH_4 podľa rovnice:



Rozklad cementitu prebieha pri vysokých teplotách (nad 550°C) nasledujúcim postupom:

- rozklad $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow$ vznik metánu
- metán nemôže vydifundovať z materiálu von

- metán sa hromadí v dutinách vznikajúcich rozpadom cementitu, ktorý je súčasťou perlitu
- tlak metánu pri zvýšených teplotách rastie
- vznikajú pľuzgiere a trhliny

Nebezpečenstvo oduhličenia ocele vodíkom spočíva vtom, že na povrchu nie sú viditeľné žiadne zmeny. Riešením je použitie špeciálnych legovaných ocelí, ktoré nie sú náchylné na oduhličenie.

Poškodenie tekutým kovom

Je to interkryštalické porušenie v dôsledku objemového skrehnutia materiálu pri styku s roztaveným kovom. Spája sa s malou rozpustnosťou prvkov tekutého kovu v tuhom materiáli a s tvorbou intermetalických fáz. Tekutý kov má slabšiu zmáčavosť a atómy z neho difúziou prechádzajú do oblastí hraníc zŕn.

Poškodenie v okolí zvarov

Zváranie predstavuje významné tepelné a deformačné ovplyvnenie zvarového kovu i okolia zvaru, čo spôsobuje špecifické poškodenie – praskanie.

- **Lamelárne praskanie** - vzniká u jednosmerne valcovaných plechov v smere hrúbky, iniciuje sa na sulfidoch MnS, ktoré sú po valcovaní predĺžené v jednom smere. Riešením tohto poškodenia je zníženie obsahu S v oceli.
- **Horúce praskanie** – vzniká v zvarovom kove alebo v podhúsenicovej TOZ pri vysokých teplotách
- **Žihacie praskanie** – vzniká v priebehu tepelného spracovania zvarového spoja (žihanie na zníženie vnútorných napätí)

Poškodenie radiačné

Energia žiarenia môže meniť stav a rozloženie atómov v kove, čím sa zmenia ich fyzikálne, chemické a mechanické vlastnosti. Interakcia žiarenia s elektrónmi látky vedie k ich vybudeniu do vyšších energetických hladín, alebo k ich oddeleniu – ionizácii materiálu. Veľmi vplýva na vlastnosti plastov, kovy sú na žiarenie menej citlivé.

Postup pri radiačnom poškodení:

- Interakcia žiarenia s jadrom atómov látky - zvýšenie energie kmitov mriežky, presun iónu z uzlovej do medziuzlovej polohy
- Bombardujúca častica sa zachytí v atóme, čo vedie k rozštiepeniu alebo transmutácii atómu
- dôsledkom ožiarovania môže byť: vznik bodových porúch, lokálne tepelné ovplyvnenie, pokles húževnatosti ocelí, zvýšenie elektrického odporu, zvýšenie tvrdosti, zníženie odolnosti voči korózii

Poškodenie napučaním

Je jeden z dôsledkov ožiarenia materiálu. Po ožiarení sa zvyšuje počet vakancií a nastáva ich zhromažďovanie, čo vedie k zmene rozmerov telesa. Atómy sa pri ožiarení protónmi môžu vzdialiť až na 10 atómových vzdialeností - napučanie.

Poškodenie energetickými poľami

Je dôsledkom interakcie s laserovým, elektrónovým alebo iónovým lúčom. Dôsledkom pôsobenia lasera môže byť spevnenie povrchu rázovými vlnami, glazúrovanie, obrusovanie, zváranie.

Poškodenie vytrhnutím

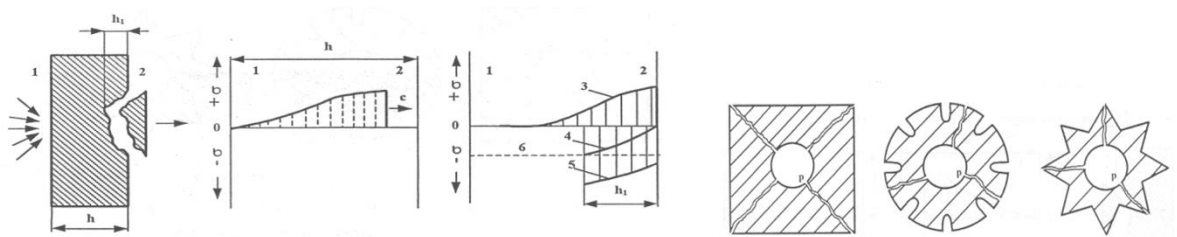
Pri lokálnom rázovom zaťažení jedného povrchu dosky môžeme pozorovať vytrhnutie materiálu z druhej strany dosky.

Postup poškodenia vytrhnutím:

- Tlaková vlna prechádza cez dosku. Čelo vlny stlačenia dosiahne voľný (opačný) povrch dosky, odráža sa v tvare vlny roztiahnutia.
- Obe vlny interagujú. V určitej hĺbke pod povrchom je výsledné ťahové napätie vyššie ako kritické lomové napätie – dôjde k vytrhnutiu materiálu.

Priemer vytrhnutého kusu materiálu je doj- až trojnásobok hrúbky dosky, hrúbka vytrhnutého kusa je (0,1-0,5) x hrúbka dosky.

U tvarových súčiastok môže dôjsť paradoxne k prasknutiu stien s najväčšou hrúbkou, pretože miestne ťahové napätia sú dôsledkom interakcie dvoch vln roztiahnutia, ktoré sú odrazené od dvoch vzájomne naklonených povrchov telesa, **obr. 33**.



Obr. 33 Princíp poškodenia materiálu vytrhnutím, príklad poškodených profilov

3.2. Prevencia dosiahnutia medzného stavu

Fraktografia sa zaoberá štúdiom lomov, stanovením príčiny ich vzniku s cieľom identifikácie a realizácie preventívnych opatrení.

Prevencia pred vznikom lomov zahŕňa:

- štúdium materiálu a jeho reakcie na rôzne konštrukčné prvky a technologické postupy
- výber vhodného materiálu
- zdokonaľovanie konštrukčných riešení a postupov určovania namáhania v jednotlivých miestach konštrukcie
- dodržiavanie technologických postupov výroby
- správna montáž
- správna prevádzka
- údržba a kontrola zariadenia alebo konštrukcie
- skúšky výrobkov priamo u výrobcu
- defektoskopia
- poučenie sa z chýb minulosti