

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA V  
NITRE  
KATEDRA KONŠTRUOVANIA STROJOV

**1130558**

ŠTÚDIUM ÚNAVOVÝCH LOMOV VYUŽITÍM  
POZNATKOV FRAKTOGRAFIE

**2011**

**Roman Konečný**

SLOVENSKÁ POĽNOHOSPODÁRSKA UNIVERZITA V NITRE  
TECHNICKÁ FAKULTA

ŠTÚDIUM ÚNAVOVÝCH LOMOV VYUŽITÍM  
POZNATKOV FRAKTOGRAFIE

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program:	2386700 Prevádzková bezpečnosť techniky
Pracovisko (katedra):	Katedra Konštruovania strojov
Vedúci bakalárskej práce:	doc. Ing. Marian Kučera, PhD.
Konzultant bakalárskej práce:	doc. Ing. Milan Kadnár, PhD.

## **POĎAKOVANIE**

Touto formou by som sa rád poďakoval pánovi doc. Ing. Marian Kučera, PhD., vedúcemu bakalárskej práce za jeho cenné odborné rady a pripomienky pri vypracovávaní tejto bakalárskej práce. Tak isto ďakujem mojim rodičom a známym za ich morálnu podporu.

Nitra 05. 05. 2009

.....

Roman Konečný

## ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Podpísaný Roman Konečný vyhlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Štúdium únavových lomov využitím poznatkov fraktografie“ vypracoval samostatne a všetky použité pramene som uviedol v zozname použitej literatúry. Som si vedomý zákonných dôsledkov v prípade, ak hore uvedené údaje nie sú pravdivé.

Nitra 26. 04. 2011

.....

Roman Konečný

---

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca s názvom „Štúdium únavových lomov využitím poznatkov fraktografie“ obsahuje prehľad súčasného stavu riešenej problematiky. Konkrétnou oblasťou, ktorou sa zaoberám, je spracovanie informácií o únavových lomoch na základe fraktografických poznatkov. Začal som medzným stavom, v ňom podrobnejšie spracovaný vývoj a ohraničenie tohto pojmu, vonkajšie a vnútorné faktory. V ďalšej časti bola riešená problematika únavového lomu. Potom únavy a porušenia v ktorej boli ešte nízkokycklová a vysokocycklová únava a porušenie. Nasledovala mechanická únava. Pokračoval som vznikom zárodkov únavových trhlín, kde sú podrobnejšie spracované šírenia únavových trhlín a krátke trhliny spolu so zatváraním trhlín. Tepelná únava a v nej i tepelno-mechanická. Tečenie a únava zakončila túto časť. Nasledovali základné poznatky fraktografie únavových lomov, kde podrobnejšie bol definovaný napríklad aj vznik únavových trhliniek, vývoj únavových makrotrhlín, aké činitele ovplyvňujú životnosť namáhaných súčiastok a rôzne spôsoby zvýšenia medze únavy technologickými úpravami. Zakončené základnými faktormi pre výber materiálu. V závere som zhodnotil prácu.

**Kľúčové slová:** únavový lom, fraktografia, medzný stav,

---

## **ABSTRAKT**

Bachelor thesis entitled "Study of fatigue fractures using knowledge fractography" summarizes the current state of the field. Specific areas, which includes an information processing on the basis of the pits fatigue fractographic knowledge. I began to limit state, its further evolution and delimitation of this concept, external and internal factors. The next section was handled the issue of fatigue fracture. Then fatigue and infringements which were still low cycle and high cycle fatigue and violation. Followed by mechanical fatigue. I continued emergence of pathogenic fatigue cracks, which are dealt with in the spread of fatigue cracks and short cracks with crack closure. Thermal fatigue and it also thermo-mechanical. Creep fatigue and finished that part. Follow the basic knowledge of fractography of fatigue fractures, which was further defined as the fatigue cracks, fatigue development macrocracks what factors affect the life of parts exposed to a variety of ways to increase the fatigue strength technological modifications. Culminating in the fundamental factors for selection of material. In conclusion, I assess the work.

**Keywords:** fatigue fracture, fractography, limit state,

---

# Obsah

<b>ZOZNAM SKRATIEK .....</b>	<b>7</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>1 CIEĽ PRÁCE .....</b>	<b>9</b>
<b>2 METODIKA.....</b>	<b>10</b>
<b>3 PREHLAD RIEŠENEJ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>11</b>
3.1 MEDZNÝ STAV .....	11
3.1.1 Vývoj a ohraničenie tohto pojmu .....	11
3.1.2 Definícia medzného stavu .....	12
3.1.3 Vonkajšie faktory .....	12
3.1.4 Vnútorne faktory .....	13
3.2 ÚNAVOVÝ LOM .....	15
3.3 ÚNAVA A PORUŠOVANIE .....	17
3.3.1 Nízkokycklová únava a porušovanie .....	17
3.3.2 Vysokocycklová únava a porušenie .....	20
3.4 MECHANICKÁ ÚNAVA .....	21
3.5 VZNIK ZÁRODKOV ÚNAVOVÝCH TRHLÍN .....	22
3.5.1 Šírenie únavových trhlín.....	23
3.5.2 Krátke trhliny a zatváranie trhlín.....	27
3.6 TEPELNÁ ÚNAVA.....	29
3.6.1 Tepelno-mechanická únava .....	31
3.7 TEČENIE A ÚNAVA .....	31
3.8 ZÁKLADNÉ POZNATKY FRAKTOGRAFIE ÚNAVOVÝCH LOMOV .....	32
3.9 Činitele ovplyvňujúce životnosť cyklicky namáhaných súčiastok .....	39
3.10 Spôsoby zvýšenia medze únavy technologickými úpravami .....	40
3.11 ZÁKLADNÉ FAKTORY PRE VÝBER MATERIÁLOV .....	41
<b>4 VÝSLEDKY PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>5 ZÁVER .....</b>	<b>44</b>
<b>6 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>45</b>

---

## Zoznam skratiek

$\sigma_1$	medzný stav napätosti, MPa
$\mu$	je Poissonovo číslo,
E	je modul pružnosti, MPa
a	je súčiniteľ lineárnej tepelnej rozťažnosti,
p	je rýchlosť tečenia pri napätí zodpovedajúcom medzi pevnosťami, m/s
v	je súčiniteľ priečneho tečenia,
$K_a$	charakteristika plastickej deformácie
$\Delta K$	plastická deformácia
Ni	nikel
Cr	chróm
Zn	zinok
$R_m$	medza pevnosti v ťahu
$\sigma_{az}$	napätie prvého zlomu
$\sigma_{ad}$	napätie pri výskyte diskontinuity
$\sigma_{akr}$	kritické napätie
$\sigma_c$	medza únavy
$\sigma_{Cc}$	medza cyklickej citlivosti
$\sigma_{Ce}$	medza cyklickej elastickejšti
$N_{kr}$	medzný počet cyklov
$N_c$	počet cyklov pre určenie medze únavy



---

## Úvod

Pri stavbe strojov, zariadení a konštrukcií sa aj naďalej a dokonca vo významne väčšej miere budú uplatňovať požiadavky na zvýšenie ich výkonu, rýchlosti základných činností, životnosti a spoľahlivosti. Veľká časť súčastí, uzlov a konštrukcií sa v prevádzke zaťažuje dynamicky v rozličných teplotných podmienkach, pri pôsobení rozličných prostredí a energetických polí. To vytvára podmienky na porušovanie a poškodzovanie súčastí a uzlov častejšie, ako keď pôsobí len mechanické zaťaženie. Úspešné konštruovanie, technológia výroby a postup montáže strojných celkov alebo konštrukcií, bez nebezpečenstva neočakávaného porušenia možno realizovať len pri schopnosti kvalifikovane predvídať a zhodnotiť pravdepodobnosť vzniku možných medzných stavov strojného celku alebo konštrukcie. Preto je potrebné mať fyzikálne a chemicky podložené predstavy o všetkých možných formách porušenia, aj o príčinách, ktoré ich výskyt vyvolávajú. Dobré ovládnutie analytických alebo analyticko-empirických metód hodnotenia vzniku porušenia je predpokladom dosiahnutia zámeru, aby sa konštrukcia alebo strojný celok porušil až po vopred stanovenom čase.

---

## **1 CIEĽ PRÁCE**

Cieľom bakalárskej práce je spracovať prehľad súčasného stavu poznania riešenej problematiky, ktorá je predmetom bakalárskej práce a odbornej literatúry zaoberajúcej sa skúmanými otázkami. Charakterizovať pojem medzného stavu. Popísať vznik a šírenie únavových trhlin, aké sú zákonitosti únavového procesu. Charakterizovať makrofraktografiu a mikrofraktografiu lomovej plochy. Formulovať poznatky v závere pre uplatnenie poznatkov v praxi.

---

## 2 METODIKA

Metodika práce bola navrhnutá tak, aby mohli byť splnené stanovené ciele práce. Na základe štúdie odbornej literatúry základných metód vedeckej činnosti možno metodiku členiť nasledovne:

- charakteristika a ohraničenie základných pojmov
- definícia medzného stavu
- vonkajšie a vnútorné faktory
- systematické členenie
- charakteristika únavy a porušenia
- nizkocyklová a vysokocyklová únava
- vznik zárodkov a šírenie trhlín
- tepelná a mechanická únava
- základy fraktografie
- popis fraktografických máp

Na základe analýzy takto zistených poznatkov sú vyslovené odporúčania pre ich ďalšie využitie v praktických aplikáciách.

---

## 3 PREHĽAD RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

### 3.1 Medzný stav

#### 3.1.1 Vývoj a ohraničenie tohto pojmu

V päťdesiatych rokoch J.Nemec použil u nás pojem medzný stav, ktorý sa spájal s kritickými veličinami určenými lomovou mechanikou. Tento pojem bez definičného vyjadrenia ďalej rozvíjali na VUT v Brne (E. Ondráček) a ČVUT v Prahe (J.Nemec, V.Sedláček), ale aj na ÚMMS SAV v Bratislave (M.Bílý). Vývoj chápania pojmu je determinovaný vednou oblasťou, v ktorej autor pracuje, pretože pojem medzný stav sa uplatnil aj v stavebníctve, najmä pri oceľových konštrukciách. W.L.Starkey z univerzity v Ohio predložil systém klasifikácie všetkých možných druhov porušenia, ktorú prevzal Collins a rozvinul ju do dvadsiatich troch rozlíšiteľných druhov porušenia. Severt charakterizuje tento pojem ako kritériá hodnotenia vlastností mechanických systémov, ktoré zahŕňajú splnenie požiadaviek funkčnosti, vhodnosti pre danú aplikáciu a ľudskej prispôsobivosti, čiže ako určitú technickú mieru akosti mechanického systému, presnejšie ako akosť strojnej konštrukcie. Vyskytuje sa aj užšie chápanie medzného stavu ako mechanických vlastností materiálov, pretože medzný stav je často prejavom súčasného pôsobenia vonkajších a vnútorných faktorov, ktoré podstatne upravujú čas spoľahlivej exploatácie materiálu alebo súčiastky. Puškár predložil klasifikáciu a definíciu najdôležitejších pojmov, spojených s medzným stavom. Po diskusií s V.Sedláčkom, J.Pluharom, J.Koutským a V.Karelom sa definície a štrukturalizácia druhov a foriem porušenia upravili a autor predkladá upravenú systematiku, ktorá zahŕňa 33 rozličných foriem medzných stavov, pričom je zrejmé, že ďalší vývoj, prípadne zahrnutie ďalších oblastí intenzívnej exploatácie súčasných a novo vyvíjaných materiálov, systematiku ovplyvní (napr. supervodivosť, superplastickosť, strata feromagnetických a ferimagnetických vlastností). (PUŠKÁR,1989)

---

### 3.1.2 Definícia medzného stavu

Keď je materiálovo-technologicko-konštrukčný prístup základom formulovania pojmu, možno použiť ďalej formulovanú konvenciu.

*Medzný stav* je taký stav materiálu alebo súčiastky, pri ktorom v dôsledku malej zmeny vonkajších alebo vnútorných faktorov, času ich pôsobenia, prípadne kombináciou vonkajších a vnútorných faktorov kritickej veľkosti, materiál, súčiastka, skokom stratí funkčné a úžitkové vlastnosti, prípadne postupná zmena funkčných a úžitkových vlastností materiálu dosiahne kritickú hodnotu. Dosiahnutie medzného stavu závisí od dynamiky hromadenia poškodenia, ktorá je funkciou subštruktúrneho a štruktúrneho stavu materiálu, technologických a konštrukčných charakteristík výrobku a podmienok jeho využívania, ale predovšetkým času pôsobenia a veľkosti i priebehu faktorov, ktoré každý zvlášť alebo v superpozícií môžu vyvolať medzný stav.

*Úroveň poškodenia materiálu*, súčiastky a pod., charakterizuje hladina vnútornej energie, najmä v miestach jej koncentrácie, alebo objemový podiel oblastí s narušením kohézie materiálu v dôsledku pôsobenia vonkajších alebo vnútorných faktorov medzného stavu.

*Príčiny*, v dôsledku ktorých sa môže v určitých podmienkach dosiahnuť medzný stav, sú vonkajšie a vnútorné. (PUŠKÁR,1989)

### 3.1.3 Vonkajšie faktory

-mechanické zaťaženie, ktoré môže mať charakter statický, premenlivý alebo rázový, pričom významné postavenie má rýchlosť zaťaženia a časový priebeh vonkajších síl,

-teplota, ktorá môže byť od -273 stupňa Celzia do teploty topenia celého materiálu alebo aspoň jednej z častí zloženého materiálu, pričom zvláštny význam má časový priebeh teplôt a homologická teplota,

---

-prostredie, napr. vákuum, plynné, kvapalné, tuhé, chemicky upravujúce zloženie materiálu na povrchu alebo v objeme, chemicky agresívne, neutrálne, prípadne pasívne, -energetické polia neutrónové, magnetické, elektrické, laserové, plazmové a pod., ktoré na materiál, súčiastku a pod., pôsobia v ich prevádzke. (PUŠKÁR,1989)

### 3.1.4 Vnútorne faktory

-technologické charakteristiky súčiastky, ako je jej tvar a veľkosť, spôsob jej výroby, funkčné vlastnosti konštrukčných uzlov, kvalita opracovania, úprava funkčných povrchov,

-metalurgické charakteristiky materiálu a súčiastky, ako je chemické zloženie materiálu, tepelné, chemické, chemicko-teplné, tepelno-mechanické spracovania, stav subštruktúry, stav a charakter štruktúry pod.

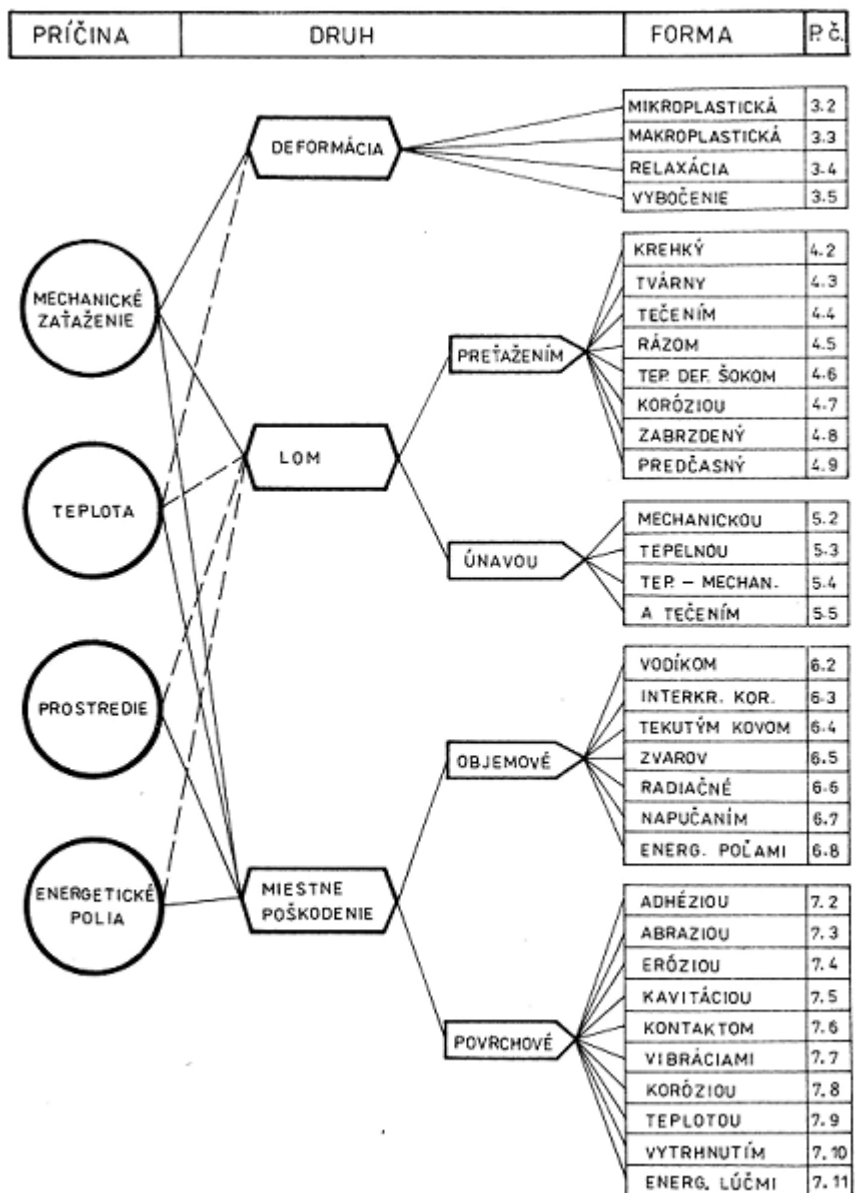
Druh medzného stavu spôsobený jedným alebo častejšie kombináciou uvedených príčin v priebehu určitého času je:

-deformácia, teda zmena tvaru a rozmerov materiálu, súčiastky a pod.,

-lom ako nenávratná strata kohézie častíc materiálu v celom priereze telesa, pričom sa vytvárajú dva alebo iný páry počet nových povrchov. Pôvodná súčiastka sa rozdelí na dva alebo viac kusov,

-miestne poškodenie alebo porušenie ako nevratná, miestna (napr. povrchovo) alebo objemovo obmedzená strata kohézie, ktorej výsledkom je oddelenie určitého objemu materiálu, vytvorenie trhliny alebo siete trhlín, prípadne vrstvy, ktorá má významne odlišné úžitkové vlastnosti ako východiskový materiál. Čas pôsobenia príčin na dosiahnutie určitého medzného stavu materiálu alebo súčiastky je funkciou ich veľkosti a intenzity ich účinku. Pri extrémnej hodnote, napr. mechanického zaťaženia, je čas dosiahnutia dôsledku veľmi krátky, napr. pri dosiahnutí lomu rázom. Posúdenie extrémnosti hodnoty príčiny sa vzťahuje na charakteristiky reakcie materiálu alebo súčiastky. (PUŠKÁR,1989)

Systematika druhov, príčin foriem je uvedená na obr.1.

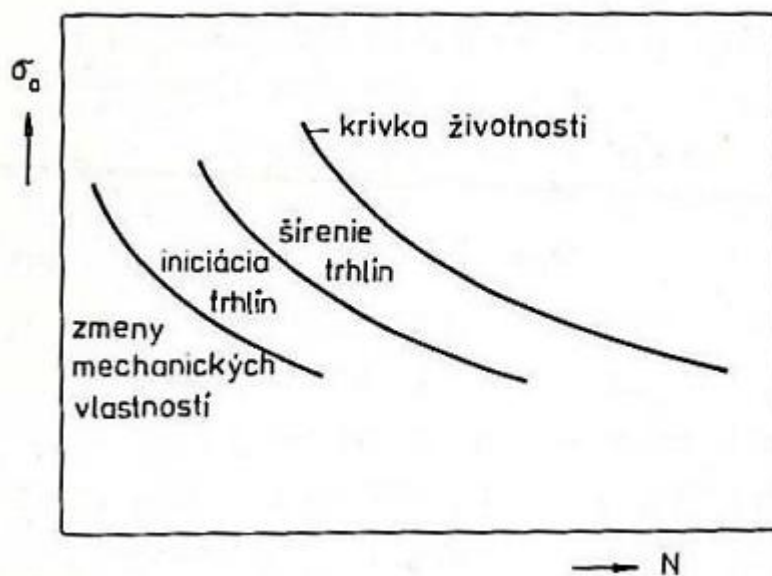


Obr.1

Systematika druhov, príčin a foriem medzných stavov materiálov  
(PUŠKÁR,1989)

### 3.2 Únavový lom

Opakované mechanické, tepelné alebo tepelno-mechanické zaťažovanie môže vyvolať jeden z najčastejších, externými i vnútornými faktormi významne ovplyvňovaných javov, t.j. medzný stav – únavový lom. Riadiacim faktorom procesu únavy je amplitúda plastickej deformácie, reakciu materiálu na opakované zaťažovanie charakterizuje prevádzková krivka napätia – deformácia. Doposiaľ veľmi dôležitým kritériom odolnosti proti únavovému porušeniu a vzniku lomu je Wohlerova krivka, aj keď sa účelne rozšírilo, najmä pre nízky počet cyklov do lomu, kritérium podľa Coffina a Mansona. Zvláštny význam má základná prahová amplitúda ako súčiniteľ intenzity napätia. (PUŠKÁR,1989)



Obr.2

Štádium únavového procesu

(KLESNIL,M.-kolektív,1987)

V súčasnosti možno považovať za preukázané, že nevratná cyklická plastickej deformácia je základným a rozhodujúcim faktorom procesu kumulatívneho poškodzovania pri premenlivom zaťažovaní. Jej prejavom je zmena mechanických



---

vlastností v zaťažovanom makroobjeme, ďalej potom vznik únavových trhlín v lokalizovaných oblastiach a neskôr šírenie trhlín v cyklickej plastickej zóne vytvorenej pred ich čelom.

Poznanie všeobecných zákonitostí únavového deja je významné z niekoľkých hľadísk. Umožňuje zámerné zásahy do štruktúry, smerujúce k vyššej rezistencii proti únavovému lomu, poskytuje vstupné údaje na klasifikáciu materiálu a neposlednom rade umožňuje vytvárať modely na kvantitatívny opis procesu kumulatívneho poškodzovania. Na základe prejavov nevratných zmien plastickej deformácie celý únavový proces možno členiť na niekoľko na seba nadväzujúcich štádií, a to:

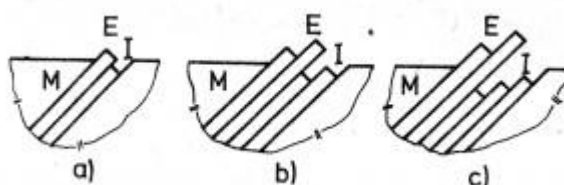
- a)únavové spevnenie alebo zmäkčenie, ktoré prebieha účinkom interakcie štruktúrnych porúch existujúcich v kove a vznikajúcich pri cyklickej plastickej deformácii v celom jeho objeme.
- b)iniciáciu únavových trhlín, ktorá je výsledkom nevratnej cyklickej plastickej deformácie v lokalizovaných oblastiach kovu.
- c)šírenie únavovej trhliny, riedené cyklickou plasticou deformáciou v plastickej zóne, ktorú si trhlina vytvára pred svojou špicou.

Jednotlivé štádia schematicky znázorňuje obr.2. Krivka únavovej životnosti označuje koniec štádia šírenia trhlín, a tým aj koniec celého únavového procesu. Ďalšie dve krivky vymedzujú štádium zmien mechanických vlastností a štádium iniciácie únavovej trhliny. Treba však zdôrazniť, že neexistujú presné hranice medzi jednotlivými štádiami. Iniciácia trhlín prebieha už v štádiu merateľných zmien mechanických vlastností a určenie dĺžky trhliny je dodnes konvenciou, ktorá delí štádium iniciácie a šírenia. Poloha kriviek oddeľujúcich jednotlivé štádia procesu je silne závislá od množstva prevádzkových, metalurgických a technologických parametrov. (PUŠKÁR,1989)

---

### 3.3 Únava a porušovanie

Únavové trhliny vznikajú na voľnom povrchu cyklicky zaťažovaných telies v miestach koncentrácie napätia. Následkom cyklického zaťažovania sa aktivujú zdroje dislokácií. Opakovanou produkciou dislokácií v miestach koncentrácie napätia na povrchu namáhaného telesa sa prejaví povrchový reliéf. Je charakterizovaný časťou materiálu zasunutého pod pôvodný povrch – intrúziou a časťou materiálu vysunutého nad pôvodný povrch – extrúziou. Charakter povrchového reliéfu (intrúzie a extrúzie) závisí predovšetkým na možnosti priečného sklzu v materiáli. Intrúzie pôsobia ako koncentrátor napätí, čo sa prejaví postupným vzrastom počtu sklzových čiar až na sklzové pásy. (*Vznik lomu*[online][cit.2010-09-20].)



Obr.3

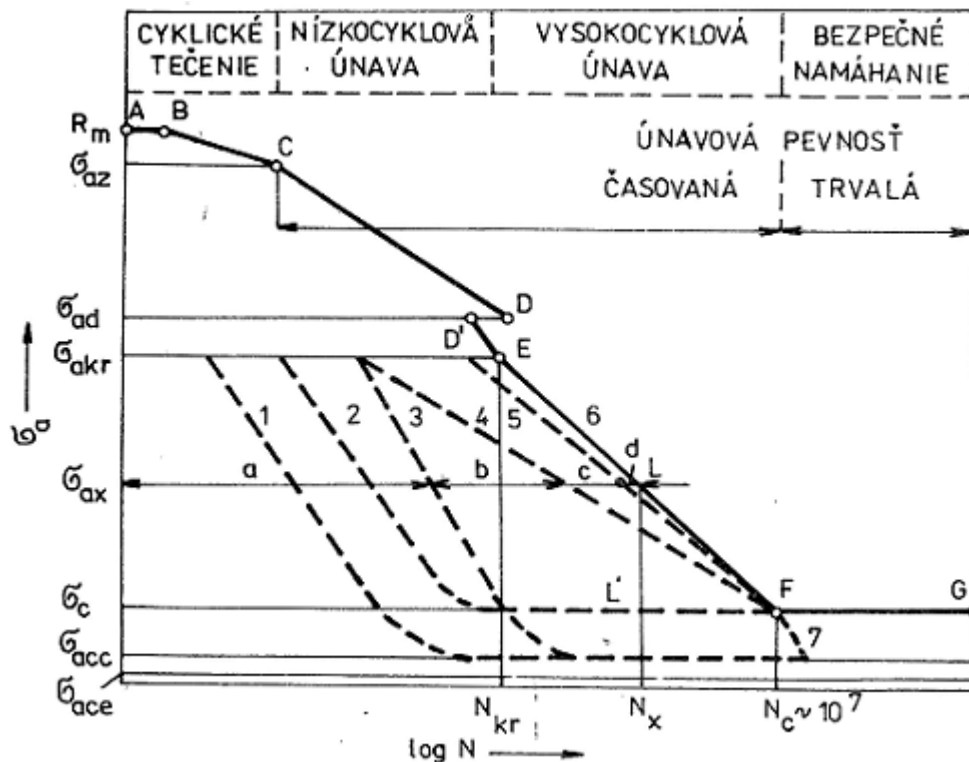
Schéma vzniku a rozvoja únavových sklzových pásov v matrici M a schéma rastu extrúzie E a intrúzie I

(*Vznik lomu*[online][cit.2010-09-20].)

#### 3.3.1 Nízkocyklová únava a porušovanie

Vysoko namáhané tlakové nádoby, časti jadrových reaktorov, mostných konštrukcií a podvozkov vozidiel sú často porušované nízkocyklovou únavou, či už v celom priereze alebo v mieste koncentrácie napätia. Výskyt kvázi statického porušenia závisí od druhu materiálu, jeho spracovania, rýchlosti zaťažovania, od koeficientu deformačného spevňovania i od vlastností skúšobného stroja, spôsobu vyvolávania zaťažovania a od charakteru cyklov zaťažovania. Lom vzniká pri prvom

cykle alebo v priebehu stoviek cyklov zaťažovania, s vytvorením zúženía v mieste lomu, predovšetkým pre hliníkové zliatiny, legované a nelegované ocele. Kvázi statický úsek nízkocyklovej oblasti únavovej krivky sa prejaví pri poddajnom zaťahovacom okruhu skúšobného stroja, keď je menej presné nastavenie a udržiavanie zaťahovacieho napätia, a pri hladkých vzorkách z materiálov, ktoré sa v hodnotenom intervale cyklov zaťažovania spevňujú. (PUŠKÁR,1989)



Obr.4

Schéma únavovej krivky

$R_m$ - medza pevnosti v ťahu,  $\sigma_{az}$ - napätie prvého zlomu,  $\sigma_{ad}$ - napätie pri výskyte diskontinuity,  $\sigma_{akr}$ - kritické napätie,  $\sigma_c$ - medza únavy,  $\sigma_{c_c}$ - medza cyklickej citlivosti,  $\sigma_{c_e}$ - medza cyklickej elastickejšti,  $N_{kr}$ - medzný počet cyklov,  $N_c$ - počet cyklov pre určenie medze únavy

(PUŠKÁR,1989)

V úseku BC (obr. 4), označovanom ako oblasť cyklického tečenia, súvislo vzrastá cyklická plastická deformácia. Hysterézne slučky materiálu sú v procese

---

cyklického zaťažovania otvorené až do vzniku lomu. Porušenie v úseku BC má kvázi-statický charakter, sprevádzaný zúžením prierezu tyče podobne ako v úseku AB s tým rozdielom, že na lomovej ploche môžeme identifikovať zárodky únavových trhlín.

Úsek BC na únavovej krivke sa zistí pre pulzujúce alebo aspoň pre nesúmerné cykly zaťažovania. Výskyt alebo absencia úseku BC závisí aj od charakteru vzoriek, stavu a charakteristík materiálu. Cyklické tečenie sprevádza neprestajný rast celkovej deformácie pri zaťažovaní hladkých vzoriek konštantnou amplitúdou napätia, prípadne na telesách s vrubom s malým gradientom napätia pri nesymetrickom cykle namáhania. Úsek BC zaregistrujeme pre cyklicky anizotropný materiál, pre cyklicky sa zmäkčujúci alebo cyklicky stabilný materiál s vlnitým charakterom sklzu, prípadne, keď sme materiál s rovinným charakterom sklzu plasticky preddeformovali.

V úseku CD (obr. 4) je hromadenie cyklickej plastickej deformácie pomalšie ako v úseku BC s tým, že hysterézná slučka po istom počte cyklov zaťažovania sa uzatvorí a so vzrastom počtu cyklov sa už jej plocha nemení. Porušeniu vzoriek predchádza vznik a šírenie únavových trhlín. Tento proces je typický pre cyklicky sa spevňujúce materiály.

Úsek CD nízkocyklovej oblasti únavovej krivky sa prejaví pri namáhaní s konštantnou silou pre vrubované vzorky s vysokým gradientom napätia, ale aj pri symetrickom cykle namáhania pre cyklicky sa spevňujúce materiály, pre materiály s rovinným charakterom sklzu po žíhaní. Porušenie má charakter únavového lomu s výraznými nerovnosťami, pričom konečný lom je často umiestnený v strede telesa.

Rozdiel medzi úsekmi AB, BC a CD únavovej krivky je v aktivácii celého objemu vzoriek alebo jeho časti. Keď sa v úseku AB zapája do procesu celý prierez vzoriek, pri súmernom ťahu—tlaku sa v úseku BC uplatňuje predovšetkým aktivita povrchovej a podpovrchovej oblasti vzoriek a v úseku CD je to predovšetkým povrchová vrstva vzoriek pre povrchovo nespevnené vzorky. (PUŠKÁR,1989)

---

### 3.3.2 Vysokocyklová únava a porušenie

Oblasť vysokocyklovej únavy je v rozsahu amplitúd napätí medzi cyklickou medzou sklzu, prípadne kritickým napätím, pri ktorom sa vyskytuje zlom, a medzou únavy. Pre určitú úroveň namáhania, napr. pri vyžíhaných materiáloch, možno pozorovať niekoľko úsekov:

- a) inkubáciu únavového procesu
- b) nukleáciu a šírenie mikrotrhlín
- c) šírenie únavovej trhliny
- d) konečné porušenie

*Úsek inkubácie únavového procesu* obsahuje prvú periódu, počas ktorej sa v experimentálnom materiáli nezistia merateľné zmeny mechanických vlastností. Nastáva lokálna redistribúcia dislokácií a mierne vzrastá hustota dislokácií v blízkosti hraníc zŕn a inklúzií. V tejto perióde sa významne prejavuje heterogenita v rozložení mikroplastickej deformácie povrchových zŕn. Pri vytvrdzovaných materiáloch sa v oblastiach zasiahnutých cyklickou deformáciou prejavuje deformačné starnutie. V druhej perióde úseku sa uplatňuje cyklická mikroplastickosť. Začína zmäkčením materiálu, dobre merateľným otváraním hysteréznej slučky pre materiály s výraznou medzou sklzu. Na povrchu vzoriek sa zistia únavové sklzové čiary, prípadne pásy. So vzrastom počtu cyklov zaťažovania sa zvyšuje počet zŕn zasiahnutých cyklickou deformáciou a aktivujú sa cyklické mikrodeformácie v podpovrchovej vrstve. Súbežne s procesom mikroplastickej deformácie prebieha aj deformačné spevnenie ako dôsledok výrazných zmien konfigurácie a vzrastu hustoty dislokácií v zasiahnutých zrnách povrchovej vrstvy vzoriek. V štádiu cyklickej mikroplastickosti sa menia niektoré fyzikálne a mechanické charakteristiky materiálov. V nasledujúcej perióde cyklického spevňovania pozorujeme vo vyžíhaných materiáloch formovanie zložitých konfigurácií dislokácií v povrchových zrnách vzoriek a zvýrazňovanie povrchového reliéfu sklzových pásov. V obmedzenom počte zŕn v sklzových pásoch sa zjavia extrúzie a intrúzie. Pokračuje proces zmien fyzikálnych a mechanických vlastností materiálov. Keďže sa všetky uvedené procesy lokalizujú do povrchovej vrstvy vzorky, je možné

---

dôsledky tejto periódy únavového procesu potlačiť, prípadne odstrániť vyžiháním alebo odleštením povrchovej vrstvy. (PUŠKÁR,1989)

*Úsek nukleácie submikroskopických trhlín a ich šírenia* charakterizuje interval počtu cyklov zodpovedajúcich čiaram. Prejavuje sa vzrastajúcim počtom stabilných povrchových sklzových pásov, vznikom a predlžovaním submikroskopických trhlín. Mikroplastická cyklická deformácia sa rozšíri na väčší počet zrn povrchu a prehĺbi sa povrchový reliéf. V dôsledku lokálneho spevnenia v miestach, kde prebehla mikroplastická deformácia, sa proces mikroplastickosti šíri aj na zrná a objemy v nich, ktoré mali menej priaznivé podmienky aktivácie sklzových procesov. V dôsledku vzniku mikrokontrátorov napätia v čelách submikroskopických trhlín v mnohých miestach v povrchovej vrstve vzorky. Na konci tohto úseku sa v materiáli nahromadili poškodenia z inkubačného úseku a navyše pribudli trvalé sklzové pásy, výrazné ovplyvnenie povrchovej a podpovrchovej vrstvy, submikroskopické až mikroskopické trhliny, ktorých rozmer nepresiahne rozmer zrna a výrazne zvýšená hustota dislokácií, pričom sa fyzikálne a mechanické vlastnosti zmenili už iba málo. Nahromadené poškodenie už nie je možné odstrániť vyžiháním alebo odleštením povrchovej vrstvy vzorky.

*Úsek šírenia únavovej trhliny.* Ich šírenie prebieha v rovinách kolmých na smer pôsobiaceho zaťaženia v podmienkach dvojsovej napätosti v čele trhliny. Na povrchu lomu sa v tejto etape pozorujú typické brázdy a trhlina sa šíri pri nízkych hodnotách koeficientu intenzity napätia na jej čele. V úseku prebieha intenzívne znižovanie pevnosti, plasticity a elektrickej vodivosti materiálu vzorky.

*Úsek konečného lomu.* Bezprostredné katastrofálne porušenie vzniká vtedy, keď otvorenie trhliny dosiahne kritickú hodnotu pri dosiahnutí kritickej dĺžky trhliny a pri dosiahnutí kritickej intenzity napätia v čele trhliny. Na výslednej lomovej ploche sú často dobre rozoznateľné rozličné zóny procesu šírenia únavovej trhliny. (PUŠKÁR,1989)

### **3.4 Mechanická únava**

Konvenčne sa rozdeľuje proces mechanickej únavy na štádium zmien subštruktúry a vlastností materiálu, štádium nukleácie únavových trhlín, štádium šírenia únavovej trhliny a na konečné odlomenie. V ostatnom čase vzrastá význam krátkych

---

trhlín a podmienok pre zatváranie trhlín. Pre inžiniersku prax je dôležité určenie únavovej životnosti a zhodnotenie vplyvu vonkajších a vnútorných faktorov na jej veľkosť. (PUŠKÁR,1989)

### **3.5 Vznik zárodkov únavových trhlín**

Únavové trhliny vznikajú na voľnom povrchu cyklicky zaťažovaných telies, v miestach koncentrácie cyklickej plastickej deformácie, teda v miestach koncentrácie napätia. Týmito miestami sú vruby rozličného typu a pôvodu, ako trvalé sklzové pásy, inklúzie, precipitáty a nedokonalosti opracovania povrchu, hranice zŕn, medzifázové hranice a pod. Ku koncentrovaniu napätia do povrchovej vrstvy prispieva druh zaťažovania, napr. pri ohybe a pri krútení, ale aj napr. excentricita zaťažujúcej sily pri pulzujúcom ťahu a ťahu-tlaku. Faktor intenzity napätia v mieste intrúzie, precipitátu alebo apriórnej trhliny určitého tvaru, je vždy väčší na povrchu vzorky ako vnútri.

Vznik únavových trhlín sa vysvetľuje na rozličných modeloch. V jednom modeli sa pokladá intrúzia za mikrotrhlinu a jej začiatočný rast sa vysvetľuje ako prehlbovanie intrúzie opakovaným sklzom v jednom alebo v dvoch sklzových systémoch. Predstava relatívneho pohybu umožňuje prehlbovanie intrúzie až do vzniku trhliny. Intrúzia pôsobí ako koncentrátor napätia, čo sa prejaví v postupnom vzraste počtu sklzových čiar až na sklzové pásy. Modelové predstavy sú rámcové a umožňujú prijať napr. experimentálny poznatok , že priečny sklz je nevyhnutnou podmienkou vzniku mikrotrhliny. Iný model predpokladá, že vznik trhliny podmieňuje krehké prasknutie v koreni intrúzie, alebo sa vznik únavovej trhliny spája s kondenzáciou vakancií, prípadne so zmenou intersticiálnych dipólov na vakančné dipóly pohybom segmentu skrutkovej dislokácie. Únavová trhlina môže nukleovať aj na hraniciach zŕn. Pri vysokých amplitúdach zaťažovania prebieha intenzívne cyklická plastickej deformácia v celej povrchovej vrstve jednotlivých zŕn, čo vedie k relatívnemu posunu zrna proti zrnu a teda k vzniku intrúzie. V práci sa uvádzajú tri rozdielne typy zárodkov únavových trhlín v polykryštalickom železe rozličnej čistoty, zaťažovaných ťahom-tlakom s frekvenciami 5 a 1000Hz. Experimenty preukázali, že prostredníctvom vzniku intrúzie a extrúzie nukleujú trhliny v rýchlostiach deformácie a s vysokou čistotou materiálu, prostredníctvom zmeny tvaru povrchových zŕn nukleujú trhliny pri vysokých

---

rýchlostiach deformácie a mechanizmus hraníc zŕn nukleuje trhliny, keď je plastická zložka amplitúdy deformácie príliš nízka na uplatnenie už uvedených mechanizmov. (PUŠKÁR,1989)

V železe s 0,07%C sa pozorovala nukleácia únavovej trhliny na voľnej častici cementitu vo ferite. Sklzové pásy vznikajúce v procese cyklického zaťažovania môžu naraziť na cementit a na medzifázovom rozhraní vytvárajú sklzový pás. Otváranie trhliny je nerovnomerné, čo pravdepodobne spôsobuje asymetria sklzu. Kim a Laird svetelnou mikroskopiou a interferometriou preukázali na medi ďalší možný mechanizmus nukleácie a prvého štádia únavových trhlín pri pôsobení vysokých vonkajších napätí. Pre vznik zárodkov trhlín v miestach hraníc zŕn je potrebné, aby bola dezorientácia susedných zŕn väčšia ako 25 stupňov, sklz v aktívnom sklzovom systéme v každom zo susedných zŕn väčší a pretínal voľný povrch vzorky a smer hranice zrna k voľnému povrchu bol v intervale 30 až 90 stupňov vzhľadom na os zaťažovania. Prvé dve požiadavky vytvárajú predpoklad pre súčasnú deformáciu susedných zŕn, ktorá vyvolá vznik stupňa na povrchu na rozhraní susedných zŕn a tým nukleáciu trhliny. (PUŠKÁR,1989)

### **3.5.1 Šírenie únavových trhlín**

Mikrotrhliny, ktoré vznikli v nukleačnom štádiu sú umiestnené pozdĺž aktívnych sklzových systémov, v ktorých pôsobí najväčšie šmykové napätie. Pri pokračujúcom cyklickom zažovaní trhlina preniká do hĺbky telesa. Veľký počet mikrotrhlín narastie však len do hĺbky niekoľko desiatok mikrometrov a ich rast sa zastaví. S narastajúcou hĺbkou prenikania sa aktívna trhlina postupne odkláňa smerom kolmým na vektor hlavného napätia a na čele trhlín sa prejaví plastická zóna. Kryštalografický vznik a rast i postupný odklon od kryštalografického rastu trhliny šíri nekryštalograficky. Dĺžka trhliny, ktorá zodpovedá prechodu z prvej etapy do druhej etapy šírenia závisí od druhu materiálu a od veľkosti amplitúdy zaťažovania. Rýchlosť šírenia trhliny v prvej etape je malá a počet cyklov potrebný na jej skončenie je malý v porovnaní s druhou etapou šírenia trhliny. Pre telesá s konštrukčnými, technologickými, resp. metalurgickými vrubmi sa prvá etapa šírenia trhlín neprejaví. (PUŠKÁR,1989)

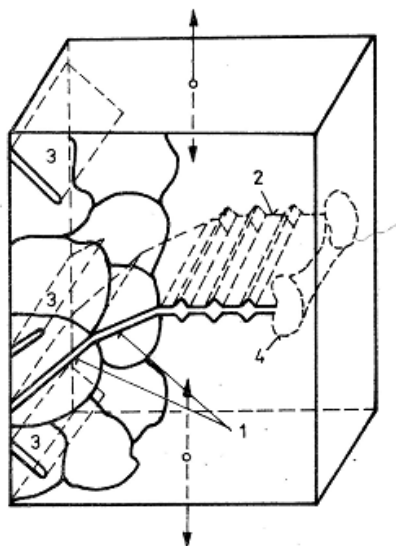
Kryštalografické šírenie trhlín v prvej etape riadi šmyková zložka napätia, ktorá leží v rovine trhliny. Nekryštalografické šírenie v druhej etape riadi normálové napätie,



---

pričom v oboch etapách pri zvyčajných teplotách zaťažovania sa trhlinka šíri transkryštalicky. Model pre rast trhliny pri aktivite dvoch sklzových rovín pred čelom trhliny predložil Weertman, rovnako ako predstavu lokálneho odklonu čela trhliny od smeru magistrálnej trhliny. Druhá etapa šírenia trhlín sa končí po dosiahnutí takéto zmenšenie nosného prierezu súčiastky, pri ktorom sa súčiastka poruší preťažením. Na lomovej ploche pozorujeme oblasť, resp. oblasti nukleácie trhlín, oblasť ich postupného šírenia, často dobre identifikovateľnú charakteristickým žliabkovaním a oblasť konečného lomu.

Deformačný proces v čele trhliny významne závisí od mechanických vlastností materiálu, ale aj od prostredia, v ktorom sa zaťažovanie realizuje. Vznik žliabkov a postupné šírenie trhliny, založené na predstave opakovaného procesu otupovania a zaostrovanie špica trhliny. Pri aplikácií ťahovej časti zaťažujúceho cyklu s postupným vzrastom napätia v čele trhliny v dôsledku vysokej koncentrácie napätia prebieha lokalizovaná plastická deformácia v rovinách maximálneho šmykového napätia, otvára sa čelo trhliny a otupuje sa jej špica. Odľahčenie vyvoláva približovanie oboch častí trhliny k sebe vtedy, ak nový povrch, ktorý vznikol pri ťahovom zaťažovaní nezanikne úplne a v smere maximálneho šmykového napätia zostávajú vytiahnuté výstupky trhliny, ktoré sú totožné so žliabkami lomového reliéfu. Súčasne sa realizuje plastická zóna hrúbky. Úplné odľahčenie a tlakové zaťažovanie vyvoláva priblíženie častí trhliny k sebe, súčasne pozorujeme zväčšenie dĺžky trhliny zodpovedajúce vzdialenosti medzi žliabkami. Proces nespájania častí trhliny podporujú oxidačné procesy alebo obmedzujú pri šírení trhliny, keď sa zaťažovanie realizuje vo vákuu, čo sa prejaví absenciou žliabkov na lomovej ploche. Vo vákuu nemôžu vzniknúť oxidové filmy, preto je potlačená tvorba žliabkov a prírastok dĺžky trhliny za jeden cyklus zaťažovania je menší ako pri zaťažovaní na vzduchu. (PUŠKÁR, 1989)



Obr.5

Schéma postupu šírenia únavovej trhliny: 1) prvá etapa šírenia, 2) druhá etapa šírenia, 3) neefektívne trhliny, 4) plastická zóna na čele trhliny,  
(PUŠKÁR, 1989, str. 164)

Rýchlosť šírenia únavových trhlín na vzduchu je pri inak rovnakých podmienkach niekoľkonásobne vyššia v porovnaní s rýchlosťou šírenia trhlín vo vákuu. Trhlina je významným koncentrátorom napätia. Deformačné pole na čele trhliny riadi spolu s mikroštruktúrnymi parametrami materiálu správanie trhliny v zaťažovanom telese. Bez ohľadu na rozmery telies, ich geometriu a rozloženie vonkajšieho zaťažovania, keď je rovnaké lokálne deformačné pole na čele trhliny, bude rovnaké i lomové správanie daného materiálu. Dislokačná štruktúra v plastickej zóne sa výrazne líši od subštruktúry mimo tejto zóny. Zasahuje konvenčne určenú vzdialenosť. Rozmer plastickej zóny obklopujúcej trhlinu je 200 až 300  $\mu\text{m}$  a je funkciou veľkého počtu faktorov, ktoré môžu mať aj navzájom protichodný účinok. Celkovú životnosť súčiastky môžeme rozdeliť na dve časti, na čas potrebný do vzniku únavovej trhliny a čas potrebný na šírenie únavovej trhliny až do úplného porušenia vzorky. Pre etapu šírenia únavovej trhliny bolo do r. 1964 predložených 54 rozličných rovníc, ktoré majú spoločnú predovšetkým súvislosť rýchlosti šírenia únavovej trhliny s parametrami lomovej mechaniky, predovšetkým s amplitúdou súčiniteľa intenzity napätia. Syntéza experimentov, ktoré hodnotia rýchlosť šírenia trhliny v závislosti od amplitúdy faktora intenzity napätia, poskytuje v súradniciach log-log charakteristickú krivku. Únavová trhlina sa začína šíriť merateľnou rýchlosťou vtedy, keď amplitúda faktora intenzity

---

napätia dosiahne prahovú hodnotu. Pri zvyšovaní hodnoty ma krivka lineárny charakter a pri vysokých hodnotách sa asymptoticky blíži k únavovej lomovej húževnatosti , pri ktorej nastane záverečný lom. Pre prax má osobitný význam oblasť malých a stredných rýchlostí. Prahovú hodnotu amplitúdy napätia pri danej dĺžke trhliny, určujú veľkosti makroskopických a mikroskopických vnútorných napätí v plastickej zóne na čele trhliny. Tieto tlakové napätia predstavujú odpor proti otvoreniu trhliny a vytvárajú aj podmienku na nešírenie trhliny. Základná prahová hodnota nezávisí od hodnoty  $K_a$  a je vlastným odporom materiálu proti šíreniu trhliny. Charakteristika  $K_a$  má zložku zodpovedajúcu odporu materiálu a zvyškové tlakové napätie na čele trhliny, ktoré základnú prahovú hodnotu zvyšuje. Na rýchlosti šírenia únavovej trhliny vyplýva aj história zaťažovania. Náhle zvýšenie alebo zníženie amplitúdy zaťažovania pri zachovaní faktora asymetrie má za následok prechodné podstatné zvýšenie, prípadne zníženie rýchlosti, ktorá sa až po určitom počte cyklov zaťažovania ustáli na novej hodnote rýchlosti šírenia únavovej trhliny, pričom efekt zvýšenia rýchlosti je menej výrazný ako efekt zníženia rýchlosti šírenia únavovej trhliny. (PUŠKÁR,1989)

Analýza prípadov rastúcej a zabrzdenej únavovej trhliny z hľadiska charakteru dislokačnej subštruktúry umožnila získať pri preťažení riešenie na posuv stien trhliny, pri ktorom sa ďalej otvára. V priebehu šírenia trhliny cez plasticкую zónu vyvolanom preťažením sa rýchlosť rastu trhliny najprv znižuje na minimálnu hodnotu a potom vzrastá na hodnotu, ktorá je potrebná na šírenie trhliny v podmienkach, v ktorých sa nepoužilo preťaženie. Teplotné pole, ktoré sa vytvorí okolo vrubu a únavových trhlín možno použiť na určenie práce, ktorá sa premenila na teplo. Teplo merali Pippan a Stüve v priebehu nukleácie trhliny na čele vrubu a počas rastu trhliny. Z pozorovaní vyplýva, že teplo sa generuje na čele vrubu, ale aj na čelách ďalej sa nešíriacich únavových trhlín, pričom sa vo vrube teplo generuje len v dôsledku plastickej deformácie. Pri trhlínkach sa teplo generuje nielen v dôsledku plastickej deformácie, ale aj vzájomného trenia povrchov o seba. Túto zložku generovaného tepla nemožno vždy zanedbať. Z väčšiny publikovaných závislostí rýchlosti rastu únavovej trhliny od amplitúdy súčiniteľa intenzity napätia zisťujeme, že mnoho experimentálnych údajov o šírení únavových je z oblasti rýchlostí od  $10^{-4}$  do  $10^{-2}$  mm/cyklus, čo predstavuje len relatívne malý interval rýchlostí šírenia trhlín. V spodnej časti tohto intervalu má rýchlosť rastu veľkosť zodpovedajúcu rozmeru precipitátov, v strednej časti

---

zodpovedajúcu sekundárne výlučným časticiam a inklúziám a v hornej časti zodpovedá šíreniu cez zrno počas jedného cyklu.

Mnoho anomálií v rýchlosti šírenia únavových trhlín pozorovaných pri cyklickom stláčaní, výskyte malých trhlín, brzdení a urýchľovaní ich rastu sú výsledkom nezapočítania napr. charakteru, rozmeru a vlastností plastickej zóny pred čelom trhliny, vnútorného napätia a typu porušovania materiálu. Obmedzená plastická deformácia, rovnaké hodnoty  $\Delta K$  a súčiniteľa asymetrie cyklu nezaručujú rovnakú veľkosť a tvar plastickej zóny pred čelom trhliny. Broek spresňuje podmienky na dosiahnutie rovnakých reakcií materiálu a spracovaním predchádzajúcich výsledkov meraní preukázal možnosť získať dobrú koreláciu medzi experimentom a analytickými výsledkami. (PUŠKÁR,1989)

### **3.5.2 Krátke trhliny a zatváranie trhlín**

V súčasnosti sa venuje zvýšená pozornosť vzniku a šíreniu krátkych únavových trhlín, ktoré sa môžu tvoriť aj pri zaťažovaní telesa pod medzou únavy, čo vysvetľuje jav, že z únavových skúšok vychádzajú kratšie únavové životnosti ako z rozličných modelov. Krátke trhliny majú rozmer až do 1 mm pre mäkké ocele, ale pre vysoko pevné materiály sú podstatne menšie. Rozdeľujú sa na mikroštruktúrne a mechanické krátke trhliny.

Mikroštruktúrne vznikajú ako dôsledok existencie cyklických sklzových pásov, inklúzií, mikroskopických porúch alebo hraníc zŕn. Mechanické vznikajú ako dôsledok koncentrácie napätia, drsnosti povrchu, zvyškových napätí, škrabancov, korózných jamiek, trhlín v oxidovom povlaku, chýb materiálu, porúch po zvaraní, prípadne porúch pri odlievaní. V tejto súvislosti je účelné upozorniť na výsledky pozorovaní, v ktorých sa po odstránení povrchovej vrstvy telies v určitej etape ich zaťažovania zvýšila ich únavová životnosť. Miller predpokladá, že toto zvýšenie je spojené s odstránením krátkych trhlín z povrchu telies. Rovnako je známe, že zmenšenie rozmeru zrna má priaznivý účinok na medzu únavy mnohých materiálov, čo sa spája s uplatnením rovnice Halla a Petcha. Miller predpokladá, že rozhodujúci je blokovací účinok hraníc zŕn na rast krátkych trhlín. Tam kde dominuje správanie krátkych trhlín nad dynamikou

---

rastu dlhej trhliny, pričom  $c_{kr}$  je v priesečníku priebehu čiary, ktorá charakterizuje platnosť lineárnej lomovej mechaniky a horizontálnou s po radnicou  $1/3 \sigma_c$ . Miller pozoroval tri fázy rastu únavovej trhliny. Prvú charakterizuje rast krátkych trhlín, druhá má intermediálny charakter medzi rastom krátkych a dlhých trhlín a tretiu fázu charakterizuje rast dlhých trhlín. Začiatočná rýchlosť rastu krátkych trhlín je relatívne vysoká. V závislosti od veľkosti amplitúdy pôsobiaceho napätia vzhľadom na medzu únavy zisťujeme, že pri zaťažovaní, keď  $\sigma_a < \sigma_c$ , rýchlosťou rastu s predlžovaním krátkej trhliny klesá až k nule a trhlina sa zastaví. Keď  $\sigma_a \approx \sigma_c$ , rýchlosť rastu krátkej trhliny klesá až do situácie, že dosiahne rozmer dlhej trhliny. Keď  $\sigma_a > \sigma_c$ , rýchlosť rastu krátkej trhliny najprv mierne klesá a po vzraste jej veľkosti na dlhú trhlinu sa rýchlosť rastu prispôsobuje priebehu tejto závislosti pre dlhé trhliny. Veľkosť trhlín sa rozlišuje vzhľadom na mikroštruktúru, miestnu plastickú zónu, v ktorej je čelo trhliny ponorené, alebo podľa veľkosti vzorky. Krátke trhliny charakterizuje aj to, že konvenčne definované  $\Delta K_{th}$  sa neobjavuje, rýchly rast pod  $\Delta K_{th}$  dlhých trhlín, zmena rýchlosti šírenia v procese ich rastu a občas úplné zastavenie rastu trhliny. Podľa Morrisa je diskontinuálne správanie sa rastu krátkych trhlín, predovšetkým v závislosti  $dl/dN-\Delta K$ , vyvolané interakciou trhlín s hranicami zŕn. Interakcia umožňuje vysvetliť napätie potrebné na zatvorenie trhliny. Sklzové procesy pred čelom trhliny vyvolávajú reiniciáciu trhliny v susednom zrne. Tento prístup vysvetľuje, prečo krátke trhliny rastú tak rýchlo, keď im neprekážajú hranice zŕn. Na vzorkách zliatiny hliníka 7075-T6 sa preukázalo, že krátke a dlhé trhliny sa otvárajú pri pôsobení asi 50% napätia vzhľadom na maximálne  $\Delta K$ . Potom sa zníženie výskytu uzatvárania trhlín pri krátkych trhlínach nezapočítava pre ich rýchlosti rastu. Model vyhovuje pre tie faktory, ktoré brzdia rast mikrotrhlín. Tanaka a spolupracovníci predložili model, v ktorom je rýchlosť rastu mikrotrhlín založená na poklese hodnoty  $\Delta K_{th}$  od veľkých k nižším  $K$ . Hodnotu  $\Delta K_{th}$  analyticky vyjadrujú z výsledkov pokusov, kde krátke trhliny rastú pod  $\Delta K_{th}$  dlhých trhlín, keď opakované napätie je rovné alebo väčšie ako je medza únavy. Tento model nevysvetľuje, prečo sa pomaly rastúca krátka trhlina rozbehne vyššou rýchlosťou. Na druhej strane konštatuje  $\Delta K_{th}$  existuje aj pre krátke trhliny a že ho možno dať do súladu s blokovaním sklzových pásov pred čelom trhliny hranicou zrna. Chan a Lankford predložili model založený na skutočných podmienkach, ktoré sú pred čelami krátkych trhlín. (PUŠKÁR,1989)

Model predpokladá fyzikálne krátku trhlinu, dĺžky niekoľko mikrometrov, ktorá nukleovala na inklúzii v zrne A. Plastická deformácia pred čelami krátkej trhliny sa

---

prejaví jednou alebo dvoma lokalizovanými sklzovými pásmi, ktoré sú orientované blízko k osi nominálneho napätia a sú pripojené k oblasti, v ktorej napäťové pole pred čelom dominuje. Plastická deformácia neprebíha v zrnách, ktoré susedia so zrnom A. Veľkosť plastickej zóny je radu polovice dĺžky trhliny. Keď krátka trhlina rastie a získava rozmer zrna, rýchlosť rastu trhliny sa znižuje, a to vtedy, keď sa sklzové pásy zo zrna A prenesú do susediacich zrn.

Experimenty na uhlíkovej oceli s 0,4 % C preukazujú, že správanie krátkych trhlín je veľmi závislé od mikroštruktúry ocele. Únavové trhliny vznikajú a šíria sa pozdĺž dosiek feritu v perlite. Rýchlosť rastu krátkej únavovej trhliny závisí od kryštalografickej orientácie feritu pred čelom trhliny. Z dynamiky rastu únavových trhlín vyplýva, že v určitých podmienkach sa môže zastaviť jej rast a dokonca sa môže uzavrieť. Únavová trhlina sa ďalej nešíri, keď oblasť v blízkosti čela trhliny zostane pružná a medzné napätie, označované ako " spotrebované " napätie je vyššie ako skutočné ťahové napätie v tejto oblasti. Nový model vyžaduje určiť experimentálne len jednu hodnotu, charakterizujúcu rast únavovej trhliny pri konštantnej amplitúde deformácie na predikciu únavovej životnosti. (PUŠKÁR,1989)

### **3.6 Tepelná únava**

Aj keď deformácia vzniká v dôsledku mechanických účinkov, opakovaná deformácia je veľmi často výsledkom opakovaných zmien teploty telesa. V dôsledku opakovaného pôsobenia stiahnutia alebo stlačenia, ako výsledku zmien teploty sa môžu dosiahnuť opakované mechanické napätia, ktoré vyvolajú hromadenie poškodenia, nukleáciu a rast trhlín a teda únavový lom --- tepelnú únavu.

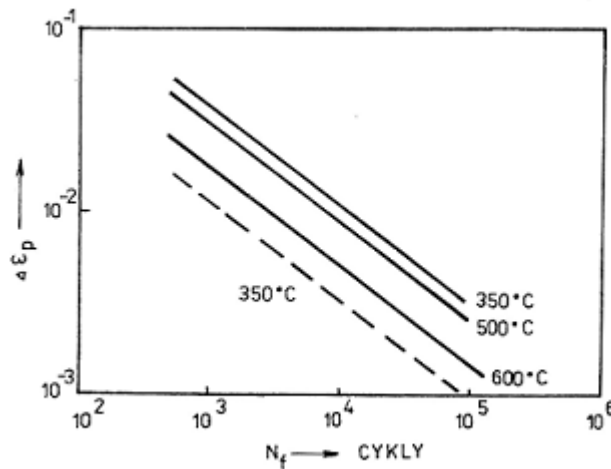
Základné zákonitosti opísané pre proces nízkokyčkovej a vysokocyčkovej mechanickej únavy majú svoje opodstatnenie aj pre tepelnú únavu. Proces únavy je zložitý nielen tým, že preberá komplikovanosť mechanickej únavy, ale aj tým, že súčasne zložito pôsobí teplota.

Mechanické vlastnosti materiálov závisia od teploty a menia sa v závislosti od času, preto pri tepelnej únave je účelné započítať túto skutočnosť ako aj prejavy tečenia, relaxácie, fázové a štruktúrne premeny a pod.

Zo všeobecnej teórie, ktorá zahŕňa tepelné napätia pri nerovnomernom ohreve a tepelnú vodivosť vzorky alebo telesa vyplýva, že parameter charakterizujúci medzný stav je

---

súčinnom parametra, ktorý charakterizuje odpor proti deformácií pri zvýšenej teplote a parametra, ktorý charakterizuje vlastnosti nerovnomerne zohriateho telesa.



Obr.6

Porovnanie výsledkov pôsobenia mechanickej únavy pri uvedených teplotách (plné čiary) a tepelnej únave (čiarkovaná čiara)

(PUŠKÁR, 1989, str. 203)

Výsledky experimentov poskytujú analogický výsledok, aj keď je krivka pre nízkokycklovú únavu pri určitej teplote rovnaká ako pre tepelnú únavu s priemernou teplotou, ktorá je rovnako vysoká ako konštantná teplota porovnávaného zaťažovania. Zvýšenie rýchlosti ohrevu zapríčini, že veľkosť rozdielu teplôt  $\Delta T$ , pri ktorom prebieha porušenie vzoriek sa zväčšuje.

Skúšobné telesá z aluminosilikátu vyrobené odliatím praskajú rýchlo pri výskyte radiálnej trhliny v prstenci, pričom trhlina sa začne šíriť z miesta výskytu akejkoľvek poruchy. Lisované telesá sa porušujú postupne. Trhlina je na niektorom z čiel prstenca a diskontinuálne sa šíri rovnobežne s osou prstenca. Okrem prvej trhliny sa prejavajú aj ďalšie. Diskontinuita šírenia trhlín je spojená s výskytom dutín v materiáli. Pri zvýšení rýchlosti ohrevu trhliny rastú rýchlejšie. Na odolnosť proti vzniku trhlín má vplyv aj kvalita opracovania povrchu vzoriek. Čím je povrch hladší, bez vrubov, tým je väčší počet tepelných cyklov, potrebných pre vznik trhliny. (PUŠKÁR, 1989)

---

### 3.6.1 Tepelno-mechanická únava

Niektoré súčiastky môžu byť v prevádzke vystavené pôsobeniu zmien teploty a súčasne sa namáhajú opakovaným mechanickým zaťažením. Opakované zmeny teploty, najmä pri nerovnomernosti ohrevu a ochladzovania, keď upevnením telesa zabránime dilatáciám, sa prejavia vo vzniku napätí, ktoré v niektorých podmienkach dosahujú veľkosť blízku statickej medzi sklzu. Potom pri súčasnom mechanickom zaťažení je teleso vo veľmi zložitom teplotno-napätovo-deformačnom stave, ktorý sa mení s časom. Pri zvýšených teplotách šírenie trhlin vyžaduje nižšie hladiny mechanického zaťažovania, ako napr. pri teplote miestnosti. Svoj zmysel má aj to, že so vzrastom teploty vzrastá účinok agresivity prostredia a frekvencie zaťažovania, či už tepelného alebo mechanického, na medzu únavy.

Všeobecné charakteristiky hromadenia poškodenia a porušenia pri tepelno-mechanickej únave sú blízke tým, ktoré sú typické pre mechanickú únavu, ale doposiaľ sa nepreukázalo, že životnosť pri tomto spôsobe zaťažovania je jednoduchou superpozíciou oboch procesov, keď sa uplatňujú rozličné vonkajšie a vnútorné faktory procesu únavy. (PUŠKÁR,1989)

### 3.7 Tečenie a únava

V dôsledku skutočnosti, že procesy tečenia a mechanickej únavy materiálov sú veľmi zložitú, je zrejmé, že ich súčasné pôsobenie je komplikované a doposiaľ len málo preštudované a opísané. Z toho vyplýva aj zložitosť určenia podmienok medzného stavu. Pre prípady plynových turbín leteckých motorov a niektorých častí jadrových elektrární je však uvedená charakteristická superpozícia. Zložitosť pre uvedené prípady spočíva aj v tom, že v prevádzke sú tieto uzly vystavené premenlivým napätiam pri konštantnej teplote, premenlivým teplotám pri konštantnom napätí a inokedy sa napätia a teploty menia súčasne.

Ukazuje sa, že tečenie a mechanická únava sú procesy synergické. Pri jednotlivých experimentoch bol čas do porušenia pri tečení, únave a statickom zaťažení v práci na titánovej zliatine RC-130A až 5-krát vyšší pri odľahčení na 1 hodinu, po každých dvoch hodinách zaťaženia, než keď sa uvedené odľahčenie neuskutoční. Pri porovnaní

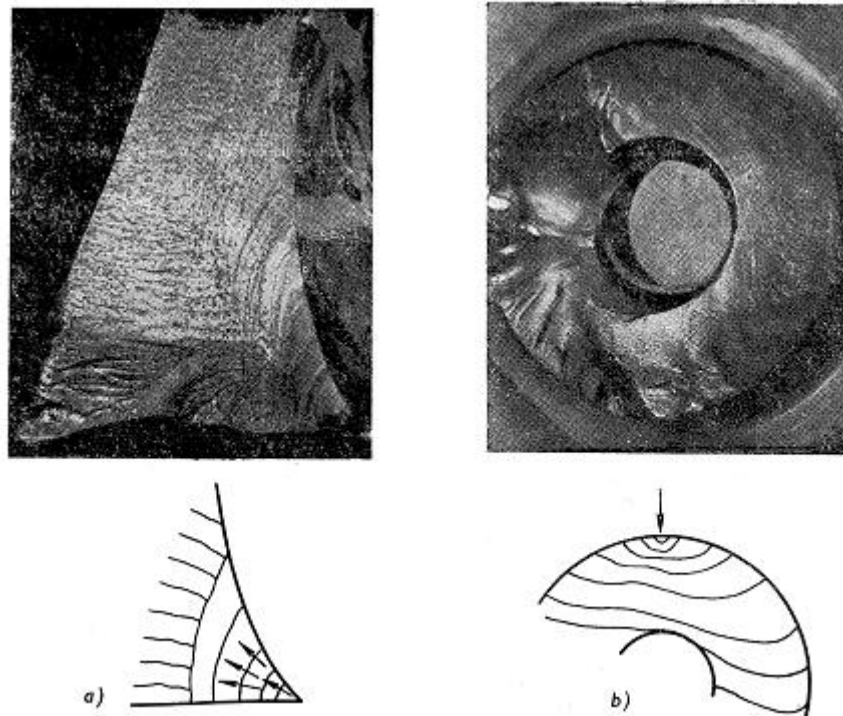


---

statického zaťaženia a únavového zaťaženia tejto zliatiny ukázalo, že pri superpozícii vzrastie až 2,5-krát. (PUŠKÁR,1989)

### 3.8 Základné poznatky fraktografie únavových lomov

Štúdie lomov tvoria dôležitú oblasť výskumu medzných stavov pevnosti telies, ktoré nazývame Fraktografia. Bežne popisuje predovšetkým charakter lomovej plochy a jej orientáciu v telese k smeru silového toku. Pokiaľ sa výskum sústreďí do priebehu lomov v mikroobjektoch kovu, v jeho štruktúre a sú hodnotené vo vrstve priliehajúcej k povrchu lomu, hovoríme o mikrofraktografii. Tá umožňuje obohatiť poznatky o vzniku trhlín a o mechanike lomu. Únavový lom má typický vzhľad.



Obr.7

Typický vzhľad únavových lomov

a)únavový lom lopatky vodnej turbíny, b)únavový lom čapu kľukového hriadeľa  
dieselového motora

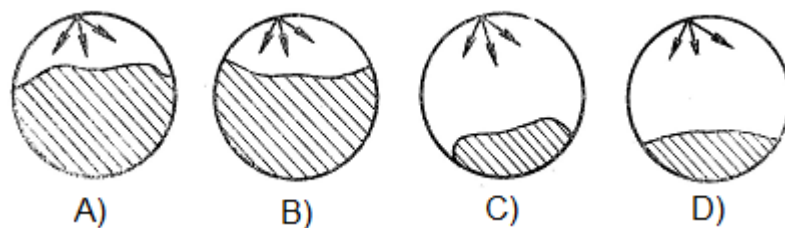
(NĚMEC,PUCHNER,1971)

---

Takzvaná únavová časť plochy lomu ma hladký, ošúchaný povrch, z pravidla lastúrovitého vzhľadu s charakteristickými čiarami zoskupenými okolo miesta z ktorého lom vyšiel. Tým je vyznačený smer a rýchlosť trhliny, ktorá sa vyvíja po etapách. Stály vývoj únavovej trhliny je tým výraznejší, čím nižšia je úroveň začiatočného nominálneho napätia pri cyklickom namáhaní, alebo čím vyššie sú občasné preťaženia pri kmitavom namáhaní telies. Mnoho prípadov ukazuje na to, že nominálny výkmit napätí, odpovedajúci bežným používaným podmienkam, nespôsobuje postup trhliny, alebo leží hlboko pod medzou únavy. Postup trhliny nastáva len pri náhlych preťaženiach, takže rozvoj trhliny je veľmi pomaly a nepravidelný. Cykly nízkeho namáhania medzi etapami skokov trhliny majú samozrejme vplyv na únavové poškodenie materiálu v zóne ležiacej pred koreňom trhliny. Čím vyššia je úroveň nominálneho napätia kmitavého, tým monotónnejší je rozvoj únavovej trhliny a tým menej viditeľné sú miesta jej zastavovania. Začiatok porúch súdržnosti leží väčšinou v povrchových vrstvách materiálu, v miestach lokálnej koncentrácie napätia v štruktúre kovov. Čím vyššia je úroveň nominálnych napätí a rýchlejší ich vzostup pri zoslabovaní prierezu telesa rozvíjajúci sa trhlinou, tým menšia je pomerná časť postupného rozvoja trhliny a väčšia konečná plocha náhleho lomu, ktorým je lomový proces zakončený. (NĚMEC,PUCHNER,1971)

U dynamického namáhania veľkých telies a pri vyššom stave vlastných technologických a teplotných ťahaní vzhľadom lomov zložitejší a únavové plochy sa môžu striedať s plochami odpovedajúcimi etapami krehkého náhleho porušenia. Zvyšok lomovej plochy ma obvykle charakter odpovedajúci štruktúre oceli a rýchlemu priebehu lomu. Preto táto plocha lomu nie je porušená a hladká ako tam, kde sa postupne šírila únavová trhlina. Táto konečná lomová plocha vznikla vtedy, keď únavová trhlina dosiahla kritickú hĺbku, odpovedajúcu podmienkam vzniku náhleho krehkého lomu. Čím je oceľ krehkejšia, teplota telesa nižšia a úroveň napätí vo zvyšku prierezu vyšší, tým ľahšie sú splnené podmienky pre vznik konečnej fázy lomu. Preto možno usudzovať z pomeru únavovej a konečnej krehkej časti lomu na veľkosť a charakter použitého namáhania, na podmienky a príčinu vzniku lomu a na mechaniku jeho rozvoja. Toto posudzovanie je pre prax závažné lebo z rozboru lomu môžeme usudzovať na opatrenie smerujúce k zvýšeniu únavovej pevnosti a trvanlivosti strojných častí a konštrukcií. Lomy s veľkým hladkým povrchom vznikajú z pravidla pri nízkom menovitom napätí. Čím menšia je plocha statického konečného lomu v porovnaní s celým prierezom telesa, tým menšia plocha prierezu mohla odporovať spustenému

zaťažení, než nastalo zlomenie, t.j. tým menšie bolo pôvodné menovité napätie a menší rast tohto napätia pri šírení únavovej trhliny. Vznik únavovej trhliny v týchto prípadoch bol vyvolaný veľkým vrubovým účinkom alebo veľmi nepriaznivým lokálnym vplyvom povrchu časti. Zároveň zakrivenie čiar oddeľujúcich lastúrovité plochy lomu jednu od druhej, a taktiež potom tvar kontúry medzi únavovou a konečnou krehkou časťou plochy lomu ukazuje na hladinu nominálneho napätia a na relatívnu účinnosť iniciátora únavovej trhliny. Veľmi dôležitá je vzájomná poloha únavovej a konečnej plochy. Je treba uviesť, že únavové trhliny vychádzajú z miest najväčšieho ťahového napätia a makroskopicky uvažované postupujú kolmo na smer najväčšieho ťahového napätia.



Obr.8

Význam hranice plôch únavových a konečných lomov a zakrivenia deliacich čiar:

A) veľká začiatočná koncentrácia napätia (veľké nominálne napätie)

B) malá začiatočná koncentrácia napätia (veľké nominálne napätie)

C) veľká začiatočná koncentrácia napätia (nízke nominálne napätie)

D) malá začiatočná koncentrácia napätia (nízke nominálne napätie)

(NĚMEC, PUCHNER, 1971)

Rozvoj experimentálnych metód umožňujúcich sledovať priebeh trhliny i prejavy súvisiace s vznikom trhliny v mikroobjemoch materiálu priniesli mnoho významných poznatkov k pochopeniu únavovej trhlinky vznikajú v exponovanom objeme kovu plastickej deformácie a materiál sa stáva deformačne veľmi nehomogénnym. Únavové trhlinky sa objavujú po určitom počte cyklov v miestach zložitých klzných pásov, z pravidla na rozhraní mäkkých a tvrdých oblastí v týchto pásoch. Jej vývoj je postupný, väčšinou zo začiatku veľmi pomaly, pričom koreň trhliny je predbehnutý plastickej zónou o vysokom stupni poškodenia materiálu. U väčšiny kovov za normálnych nižších a mierne zvýšených teplôt únavové trhlinky prebieha transkryštalicky. Vznik trhliniek môže byť veľmi rôznorodý podľa štruktúry

technických kovových materiálov. V povrchovej vrstve telies sú už určité začiatkové trhlinky, vyvolané výrobou, prítomný pred vlastným únavovým namáhaním vznikajúcim v prevádzke stroja a konštrukcií. Je preto najdôležitejšie študovať rozvoj mikrotrhlin, ktoré v celkovej dobe života telies predstavuje z pravidla rozhodujúci časový úsek. Ďalej sa môžeme pozrieť na obr.9, kde môžeme sledovať prehľad typických únavových lomov.(NĚMEC,PUCHNER,1971)

provozní zatížení		tah-tlak	ohyb za rotace	opakovaný ohyb	střídavý ohyb
hladká část jmenovité napětí	vysoké				
	nízké				
nízký vrubový účinek jmenovité napětí	vysoké				
	nízké				
vysoký vrubový účinek jmenovité napětí	vysoké				
	nízké				

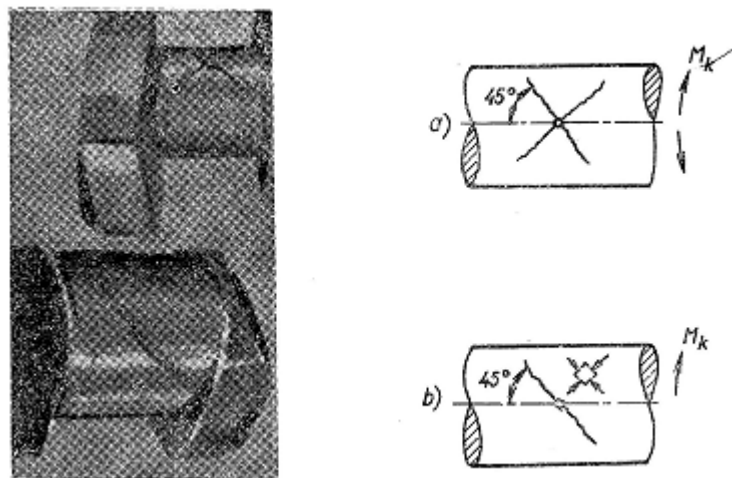
Obr.9

Prehľad typických únavových lomov

(NĚMEC,PUCHNER,1971)

Na obr.9 máme znázornené fraktografické mapy, ktoré sa používajú pri určovaní príčin vzniku lomu. Príkladom takého použitia je aj v súdnom znalectve pri dopravných nehodách na dokázanie viny.

Ak čap namáhaný kmitavým krutom, je lomová plocha naklonená pod uhlom  $45^\circ$  k osi čapu, ako zodpovedá smeru najväčšieho normálového napätia v prípade šmykovej napätosti. Pritom je treba rozlišovať charakter cyklu namáhania. Ak je krut opakovaný, vychádza únavová trhlina v miesta vrubu v jednej rovine (obr.10b). U striedavého krutu sa vyvíjajú dve lomové plochy, vzájomne zvierajú  $90^\circ$  (obr.10a). U opakovaného krutu valcových telies sa vytvára spirálny lom, pričom obe polovice porušovanej časti sú do seba z pravidla zakliesnené na spôsob pevnej spojky a lomová plocha nevykazuje takmer žiadny konečný lom. V týchto prípadoch sa nedá usudzovať spoľahlivo na veľkosť nominálneho napätia. (NĚMEC,PUCHNER,1971)



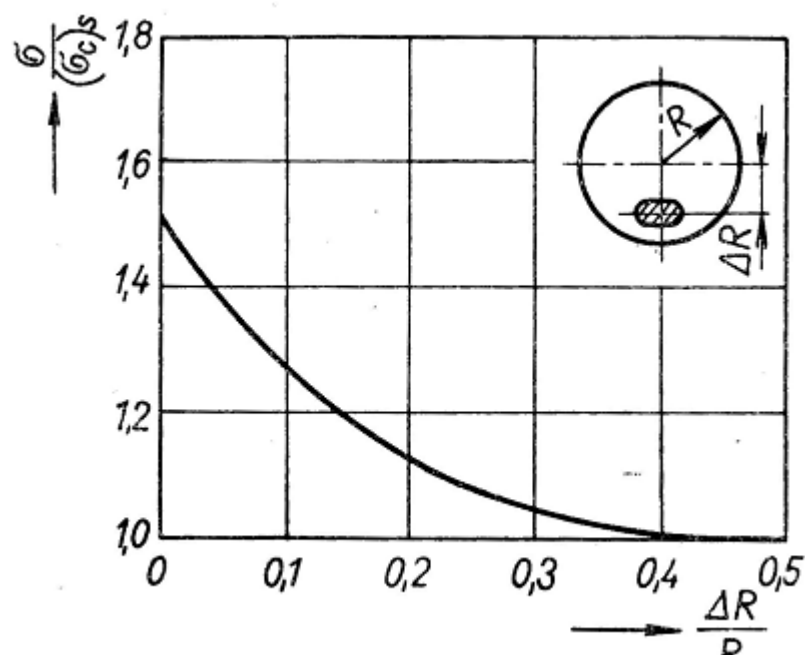
Obr.10

Poloha únavových trhlín z otvorov v čapoch klikových hriadeľov pre striedavý (a) a opakovaný (b) krut

(NĚMEC,PUCHNER,1971)

V oblasti opakovaného tlaku sa únavová trhlina šíriť nemôže. Ak i naďalej takýto proces vzniká, je to z pravidla dôkazom, že v časti pôsobí ťahové vlastné pnutie, ktoré môžu byť opakovanými deformáciami zmenené v porovnaní so začiatočným stavom. U opakovaného ohybu vychádza únavový lom z jednej strany prierezu, ktorá je vystavená ťahovému napätiu. U striedavého ohybu sa rozvíja únavová trhlina z dvoch protiľahlých bodov, ktoré sú najviac vzdialené od neutrálnej osi a sú vystavované najväčšiemu normálovému napätiu. I keď úroveň napätia v oboch týchto bodoch je rovnaká, záleží počet cyklov do objavenia únavovej trhliny na lokálnych vlastnostiach povrchu a na vrubových účinkoch pôsobiacich v oboch sledovaných miestach. Preto únavový lom nemusí byť symetrický. U ohybu za rotácie, pri rovnakej kvalite povrchu po obvodu prierezu, vznikajú trhlinky na viacerých miestach, lebo behom jednej otáčky

telesa sú všetky body na jeho povrchu v uvažovanom priereze postupne vystavené najväčšiemu ťahovému napätiu. Zaujímavé je pritom poloha konečného krehkého lomu obklopeného plochou únavového charakteru. Ak je rotačným vrubom po obvode valcového telesa vytvorená vysoká koncentrácia napätia, postupujú trhliny takmer súčasne z celého vonkajšieho obvodu do vnútra telesa. Záverečný krehký lom má približne kruhový tvar a leží na osi telesa. U tyčí hladkých bez vrubu alebo s nízkym vrubovým účinkom býva poloha i tvar konečného lomu predovšetkým závislý na hodnote nominálneho napätia. Čím vyššia je začiatočná úroveň nominálneho ohybového napätia, tým dokonalejšiu rotačnú symetriu majú typické časti lomovej plochy. Ak je nominálne napätie vysoké, tak je počet cyklov do porušenia malý. Spomenutá osová symetria býva obvykle u oceľových valcových telies strednej veľkosti len asi do  $10^5$  cyklu zaťaženia. Pri nižšej úrovni napätia blízko medze únavy leží plocha konečného lomu vo všeobecnej polohe, niekedy i blízko okraja prierezu. Počet cyklov do porušenia je veľký, okolo  $10^7$ , a konečný krehký lom má relatívne malú plochu. Výsledky fraktografického prieskumu u čapov z mäkkej uhlíkovej ocele, ktoré sú pre ilustráciu uvedené na obr.11. (NĚMEC,PUCHNER,1971)



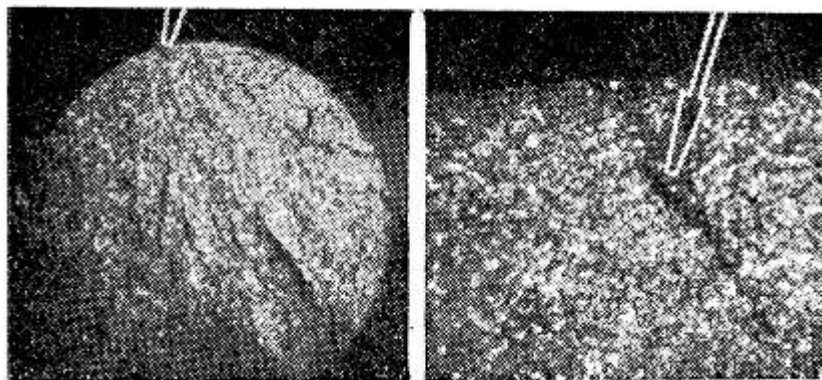
Obr.11

Poloha konečného lomu čapu pri ohybe za rotácie v závislosti na úrovni napätia

(NĚMEC,PUCHNER,1971,str.26)

---

Dôvody pre uvedenú polohu plochy konečnej časti lomu je v tom, že sa predovšetkým uplatňujú náhodne rozložené najslabšie miesta v povrchovej vrstve kovu a určujú prednostný smer šírenia únavovej trhliny. Je však treba poznamenať, že u ohybu za rotácie sa trhlina najrýchlejšie rozvíja v začiatkovej fáze v povrchovej vrstve kovu a potom najprv postupuje smerom do vnútra prierezu. Rozvojom trhliny sa zvyšuje nominálne napätie zoslabeného prierezu, tým sa postupne homogenizuje proces porušovania súdržnosti materiálu. Ak je tvorený únavový lom z viacerých začiatkových trhlínok po obvode, tak musia vzniknúť zuby a schody na lomovej ploche u vonkajšieho okraja, pretože jednotlivé trhlínky sú náhodne rozložené v rôznych blízkych rovinách a niekedy i mierne naklonené od roviny kolmo na os telesa. (NĚMEC,PUCHNER,1971)



Obr.12

Vzhľad lomu tyče z liatej ocele

(NĚMEC,PUCHNER,1971)

Každý lom, ktorý nesie stopy etáp, nemusí však vzniknúť pôsobením kmitového zaťaženia. Takéto lomy vznikajú postupným šírením trhliny pri opakovanom kovaní a ohrievaní behom výroby telesa. Statický rozbor polohy, početnosti a rozsahu trhlínok je veľmi dôležitý, pretože môže objasniť radu závislostí, ktoré vplyvom veľkého rozptylu v procese vzniku trhlínok nie sú na prvý pohľad často zrejme. (NĚMEC,PUCHNER,1971)

---

### 3.9 Činitele ovplyvňujúce životnosť cyklicky namáhaných súčiastok

Na únavu materiálov vplyvajú tieto činitele:

a) Inklúzie

Technické kovy obsahujú veľmi veľa zložiek, ktorých vlastnosti v zrovnaní s matricou sú veľmi rozdielne. Tieto zložky spôsobujú, že pri deformácii kovov nie je homogénne prostredie. Súvisí to s tvarom a fyzikálnymi vlastnosťami týchto zložiek. Inklúzie majú na únavové vlastnosti materiálov nepriaznivý vplyv. Platí to hlavne pre ostrohranné inklúzie pri vysokej pevnosti základného kovu.

b) Druh napätia

Najvhodnejšie je namáhanie ťah-tlak, keď je stredné napätie posunuté k tlakovým napätiam.

c) Koncentrátory napätia

Výrazne znižujú únavovú pevnosť. Vruby ktoré spôsobujú vznik koncentrátorov napätia môžu byť konštrukčné (ostré prechody, otvory, a pod.), alebo technologické (stopy po obrábaní, heterogenita štruktúry, vruby spôsobené zvaraním a pod.).

d) Mikroštruktúra

Z hľadiska únavových vlastností sú v oceliach najvhodnejšie štruktúry feritické. Príklad pomer medze únavy pri krútení k pevnosti je pri sorbitickej a feritickej štruktúre 0,6. Pre perlitickú štruktúru 0,4 a pre martenzitickú len 0,3.

e) Oduhličenie povrchu

Oduhličenie znižuje pevnosť povrchových vrstiev a pri kalení vyvoláva ťahové pnutie, ktoré sú spôsobené rôznymi objemovými zmenami pri martenzitickej transformácii neoduhličeného jadra a oduhličeného austenitu v povrchovej vrstve. Experimentálne sa ukázalo, že škodlivý vplyv oduhličenia závisí na jeho stupni. Už slabé oduhličenie povrchovej vrstvy z 0,6 na 0,4 % C, znížilo medzu únavy o 13 %. Úplné oduhličenie povrchu, keď sa vytvorilo súvislé pásmo feritu znížilo medzu únavy o 40 %. Čiastočne tento nepriaznivý vplyv možno odstrániť technologickými operáciami, ktoré vnašajú do povrchu tlakové pnutia (guličkovaná a valčekovaná).



---

#### f) Stav povrchu

Stav povrchu a povrchové vady ovplyvňujú únavu výrazne hlavne pri takom spôsobe namáhania, kde za maximálneho ťahového, alebo šmykového napätia dosahuje v povrchových vrstvách súčiastok (ohyb, krut). Medzu únavy veľmi znižuje hrubo opracovaný povrch. Tiež veľmi klesá medza únavy pri pôsobení korózie. Výrazne ovplyvňujú medzu únavy pnutia v povrchovej vrstve. Priaznivé sú tlakové pnutia, ktoré znižujú menej priaznivé ťahové napätia v povrchu od vonkajších síl a prenesú špičku ťahových napätí pod povrch. (HAVALDA,ŠIMKOVIČ,1985)

### **3.10 Spôsoby zvýšenia medze únavy technologickými úpravami**

Ako bolo popísané v prevažnej väčšine vznikajú únavové trhliny na povrchu súčiastok. Preto je potrebné z hľadiska únavovej pevnosti zlepšovať vlastnosti povrchu. Dá sa to dosiahnuť vytvorením tlakových pnutí v povrchovej vrstve ako aj odstránením vrubov z povrchu. Tlakové pnutia sa dajú dosiahnuť mechanickými, tepelnými, alebo chemicko-tepelnými úpravami povrchu. Tým sa dosiahne aj zvýšenie povrchovej pevnosti.

Z mechanických úprav sú to guličkovanie a valčekovanie z tepelných úprav povrchové kalenie a z chemicko-tepelného spracovania nitridovanie a cementovanie.

Guličkovanie zvyšuje medzu únavy, pretože spôsobuje v povrchovej vrstve tlakové pnutia. Zvýšenie únavovej pevnosti nie je veľmi vysoké- do 20 %. Je to spôsobené tým, že sa negatívne prejaví účinok vrubov, ktoré vznikajú pri guličkovaní v povrchovej vrstve. Takéto spracovanie je vhodné u hrubo opracovaných súčiastkach a u súčiastok, ktoré sa po tepelnom spracovaní už ďalej neopracovávajú. Zlepšenie únavových vlastností sa dosiahne jemným obrúsením povrchovej vrstvy do hĺbky 0,1 mm.

Valčkovanie je podstatne vhodnejší spôsob. Spôsobuje v povrchu súčiastok tlakové pnutia a pritom zachováva hladký povrch. Zvýšenie medze únavy sa udáva v rozmedzí 20 až 80 %.

Povrchové kalenie pôsobí veľmi efektívne. Zvýšenie medze únavy môže byť až 90 % ak súčiastky majú jednoduchý tvar. U komplikovaných tvarov otázka zvýšenia

---

únavovej pevnosti nie je jednoznačná, pretože pnutie, ktoré pri kalení v takýchto súčiastkach vznikajú môže mať v niektorých častiach ťahový charakter.

Chemicko-tepelné spracovanie zvyšuje únavovú pevnosť v rozmedzí 5 až 97 %. Výsledný efekt závisí na druhu vzniknutých napätí a hrúbke vrstvy. Únavové trhliny vznikajú medzi vrstvou a základným materiálom.

Elektromechanické pokovovanie pôsobí rôzne. Nanášanie vrstiev mäkkých neželezných kovov (Sn, Zn) nemá vplyv na medzu únavy. Vrstvy Cr a Ni znižujú medzu únavy, čo je spôsobené vznikom ťahových pnutí na povrchu. U Cr sa udáva zníženie medze únavy až o 50 % u Ni o 25 %. Zlepšenie vlastností sa dosiahne vyžiháním pri teplote 300 °C. (HAVALDA,ŠIMKOVIČ,1985)

### **3.11 Základné faktory pre výber materiálov**

Dôležitou úlohou konštruktéra a technológa je nielen dať telesám vhodný tvar a rozmery, ale taktiež zvoliť vhodný materiál a potrebnú úpravu povrchu telesa. Voľba vhodného materiálu je vždy zložitá úloha, ktorý nejde riešiť len z hľadiska únavovej pevnosti. Je nutné prihliadať k ďalším okolnostiam, ako je výroba telesa, opotrebenie, kľzné vlastnosti, odolnosť proti vonkajším vplyvom. Samozrejme, že hlavným hľadiskom, ak sú ostatné splnené je čo najväčšia životnosť pri čo najmenšej cene výroby. Životnosť závisí na úrovni napätia a na medznom stave. Ak je rozhodujúci len únavový proces, potom je potrebné zvážiť, či takýto proces nemôže byť vyvolaný mechanickými, tak i teplotnými opakovanými účinkami. Pri vysokej teplote materiálu je však v praktických prípadoch vždy súhrou únavových procesov s procesom tečenia materiálov za tepla. U mechanických účinkoch je vždy dôležité prihliadať k tomu, či ide o vynútené deformácie bez rezonančného zosilnenia, alebo o rezonančnom kmitaní telies. Pokiaľ máme na mysli len únavu materiálov a ekonomickú voľbu rozmeru telies, tak je jasné že zásadnú úlohu majú tieto vlastnosti materiálov:

- a)Základná medza únavy
- b)Medza pevnosti materiálu
- c)Sklon základnej Wöhlerovej krivky
- d)Deformačná pevnosť telesa
- e)Vrubová citlivosť materiálu

- 
- f)Krivka vzniku určitej vzdialenosti únavovej trhliny
  - g)Kritická vzdialenosť únavovej trhliny pre vznik konečnej plochy lomu
  - h)Vnútorne trenie materiálov
  - i)Parametre teplotnej únavy
  - j)Odolnosť proti koróziám
  - k)Hustota
  - l)Cena materiálu

Niektoré technologické faktory ovplyvňujú únavovú pevnosť telies v rôznych smeroch. Príkladom je prechodová zóna zvarového spoja na povrchu telesa má veľmi zreteľný vplyv na miesto vzniku prvých únavových porúch. (NĚMEC,PUCHNER,1971)

---

## 4 Výsledky práce

Výsledkom mojej bakalárskej práce je štúdia únavových lomov z doterajších zistených poznatkov fraktografie. Sú v nej charakterizované jednotlivé pojmy, ako napríklad i medzný stav, ktorý sa prejavuje tak, že súčiastka, materiál skokom stratí funkčné a úžitkové vlastnosti. V ďalšej kapitole som podrobnejšie skúmal únavový lom a s ním súvisiace pojmy ako napríklad únava a porušovanie materiálu. Ďalej základné javy medzi ktoré určite patrí tepelná únava resp. tepelno-mechanická únava. V posledných kapitolách som sa venoval štúdie základných poznatkov fraktografie, príkladom sú činitele ovplyvňujúce životnosť cyklicky namáhaných súčiastok, rôzne spôsoby zvýšenia medze únavy technologickými úpravami. Táto štúdia má obrovský význam pri podrobnejšom skúmaní únavových lomov, ktoré sú významnou súčasťou strojárskoho priemyslu a ťažkej poľnohospodárskej techniky (ťažká technika, zariadenia, nástroje na poľnohospodárske činnosti) i pri znaleckých posudkoch (napr. autonehody).

Na základe viacerých knižných i internetových publikácií som vytvoril prehľad súčasného stavu poznania riešenej problematiky.

---

## 5 Záver

Javy, ktorým som sa v bakalárskej práci venoval a všeobecne javy z fraktografie, majú široké uplatnenie v praxi. Jednou z možností je využitie v súdnom znalectve na vyhodnocovanie príčin nehôd rôzneho charakteru. Veľakrát práve fraktografické skúmanie bolo konečnou etapou odhalenia skutočnej príčiny nehody, resp. jej vinníka (napr. pri autonehodách). Ďalšou možnosťou využitia týchto poznatkov je poľnohospodárstvo. Konkrétnym príkladom môžu byť poľnohospodárske stroje. V prípade kombajnov má každý druh iné technické parametre, je konštruovaný do iného prostredia, či už sa jedná o pohyb na nerovných povrchoch alebo o špecifikáciu podľa konkrétnej plodiny (obilniny, kukurica).

Štúdium únavových lomov a fraktografie je dôležité z hľadiska bezpečnosti práce. Na jeho základe sa dá nielen kriticky vyhodnotiť určitý lom a jeho príčiny, predovšetkým je možné zabrániť situáciám, kedy by mal lom nežiaduce negatívne účinky.

---

## 6 Zoznam použitej literatúry

- NĚMEC,J.-PUCHNER,O.: Tvarová pevnosť kovových těles. Praha: SNTL 1971,296 s.
- PUŠKÁR,A.: Medzné stavy materiálov a súčastí. Bratislava: Veda 1989,304 s.
- HAVALDA,A.-ŠIMKOVIČ,M.: Náuka o materiáloch II. Bratislava: ALFA 1985,176 s.
- HRIVŇÁK,I.: Fraktografia.Bratislava:2009,94 s.
- KLESNIL,M.-kolektív.: Cyklická deformácia a únava kovov. Bratislava: VEDA 1987,383 s.
- TREBUŇA, F., BURŠÁK, M.: Medzné stavy – lomy. Prešov: Grafotlač 2002, 348 s.
- PLUHÁŘ,J.-PUŠKÁR,A.-KOUTSKÝ,J.-MACEK,K.-BENEŠ,V.: Fyzikální metalurgie a mezní stavy materialů. Praha, SNTL 1987
- COLLINS,J.A.: Failure of Materials in Mechanical Design, Analysis, Prediction, Prevention. New York,Wiley and Sons 1981
- PUŠKÁR,A.:Mikroplastickosť a porušenie kovových materiálov. Bratislava, VEDA 1986
- Vznik lomu*[online][cit.2010-09-20].
- Dostupné na: <http://www.ltmetal.net/teoria/vznik-lomu/>
- Únavový lom*[online][cit.2010-10-02]
- Dostupné na: <http://encyklopedie.vseved.cz/únavový+lom>
- Únavový materiál*[online][cit.2010-10-04]
- Dostupné na: <http://www.mtfdca.szm.com/subory/unava.pdf>
- Fraktografia*[online][cit.2010-10-24]
- Dostupné na: [http://materialisti.webovastranka.sk/file/2421\\_fraktografia](http://materialisti.webovastranka.sk/file/2421_fraktografia)
- Fraktografické hodnocení*[online][cit.2010-10-24]
- Dostupné na: <http://www.ateam.zcu.cz/fraktografie.html>