

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# VLIV FREKVENCE ZATĚŽOVÁNÍ NA ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

INFLUENCE OF LOADING FREQUENCY ON FATIGUE PROPERTIES OF STRUCTURAL  
MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN KAŠPAR

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. STANISLAV VĚCHET, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálového inženýrství  
Akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Kašpar

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vliv frekvence zatěžování na únavové vlastnosti konstrukčních materiálů**

v anglickém jazyce:

### **Influence of Loading Frequency on Fatigue Properties of Structural Materials**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě literární rešerše a analýzy získaných informací stanovit vliv zatěžovací frekvence na únavové vlastnosti konstrukčních materiálů ve vysokocyklové oblasti.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Literární rešerše dané problematiky
- 2) Analýza literárních údajů
- 3) Volba podmínek tepelného zpracování
- 4) Diskuze
- 5) Závěry

Seznam odborné literatury:

- [1] PLUHAŘ, J., KORITTA, J.: Strojírenské materiály, SNTL, Praha 1977.
- [2] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I., CERM, Brno 2001.
- [3] VELES, P.: Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov, SNTL, Praha 1985.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2007/2008.

V Brně, dne 23.11.2007

Prof. RNDr. Jaroslav Cihlář, CSc.

Ředitel ústavu

Doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

Děkan fakulty

# LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

## 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jan Kašpar

Bytem: Za Radnicí 1862, Staré Město

Narozen/a (datum a místo): 27. 3. 1984 , Valašské Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

## 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

se sídlem Technická 2896/2, 616 69 Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. RNDr. Jaroslav CIHLÁŘ, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

## Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vliv frekvence zatěžování na únavové vlastnosti  
konstrukčních materiálů

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc.

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů .....2.....
- elektronické formě – počet exemplářů .....1.....

---

\* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....10.6.2008.....

.....  
prof. RNDr. Jaroslav CIHLÁŘ, CSc.

.....  
Autor

## **ABSTRAKT:**

Tato práce se zabývá vlivem frekvence zatěžování na únavu konstrukčních materiálů. Nízkofrekvenční zatěžování (do 200 Hz) nemá ve většině případů na únavové vlastnosti vliv. Vysokofrekvenční zatěžování (1 a více kHz) má velký vliv na mez únavy součástí. Toto ovlivnění se projeví jako zvýšení meze únavy. Např. mez únavy ocelí je významně ovlivněna vysokofrekvenčním zatěžováním, litina naopak není vysokofrekvenčním zatěžováním příliš ovlivněna. Důležitý aspekt při vysokofrekvenčním zatěžování je zvyšující se teplota vzorků v průběhu namáhání. Narůstající teplota vzorků má negativní vliv na únavu materiálů. Významnou součástí zatěžování vysokými frekvencemi je možnost dosažení gigacyklové oblasti únavy ( $10^9$  a více cyklů), kde dochází k porušení materiálu z oblastí pod povrchem. Toto porušení se nazývá „fish eye“.

**Klíčová slova:** únava, frekvenční zatěžování, porušení

## **ABSTRACT:**

This thesis analyse the influence of loading frequency on the fatigue of the structural materials. Low frequency loading (to the 200 Hz) has nearly no influence on the fatigue properties in almost all cases. High frequency loading (1 and more kHz) has major influence on the fatigue limit of the structural materials. This interference will display like increasing of the fatigue limit. For example fatigue limit of steel is more affected by high frequency loading than the cast-iron.

Important aspect at high frequency loading is rising temperature in the loading process. Rising temperature has negative influence on the fatigue limit of materials. Important aspect of the loading high frequency is possibility to achieved gigacycle regime of the fatigue ( $10^9$  and more cycles), where should appear crack from below surface. This crack is call „ fish eye“.

**Key words:** fatigue, loading frequency, fracture

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

KAŠPAR, J. *Vliv frekvence zatěžování na únavové vlastnosti konstrukčních materiálů*. Brno, 2008. 36 s. Bakalářská práce na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Vliv frekvence zatěžování na únavové vlastnosti konstrukčních materiálů* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 23. 5. 2008

Jan Kašpar  
Jméno a příjmení bakaláře

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Doc. Ing. Stanislavu Věchetovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.



# **1. Obsah**

## **1. Obsah**

## **2. Úvod**

## **3. Únava**

### **3.1 Cyklické proměnlivé zatěžování**

### **3.2 Rozbor únavového poškození**

3.2.1 Změny mechanických vlastností

3.2.2 Vznik únavových trhlin

3.2.3 Šíření únavových trhlin

3.2.4 Únavový lom

### **3.3 Křivky únavové životnosti**

3.3.2 Vysokocyklová únava

3.3.1 Wöhlerova křivka

3.3.3 Nízkocyklová únava

3.3.4 Manson-Coffinova křivka

3.3.5 Wöhler-Basquinova křivka

## **4. Vliv frekvence zatěžování na únavu**

### **4.1 Frekvence zatěžování**

4.1.1 Vysokofrekvenční zatěžování

### **4.2 Únavová životnost při gigacyklovém zatěžování**

### **4.3 Únavové porušení „fish eye“**

### **4.4 Vliv dalších faktorů na mez únavy**

## **5. Závěr**

## **6. Použitá literatura**

## **7. Seznam použitých zkratk a symbolů**

## 2. Úvod

Vývoj ve strojírenství stále zvyšuje nároky na vlastnosti konstrukčních materiálů. Tyto požadavky jsou v mnoha případech protichůdné. Jedna z nejdůležitějších vlastností materiálů je životnost (únavy).

Jako jeden z prvních se problematikou životnosti zabýval železniční inženýr August Wöhler v letech 1852 až 1870. Prováděl zatěžovací zkoušky ohybem za rotace na vzorcích, tyto zkoušky měly zjistit příčinu porušení os železničních vagónů. Wöhler dal do závislosti počet cyklů ( $N$ ) na působícím napětí ( $\sigma$ ), a vytvořil tak tzv. Wöhlerovu křivku. Životnost materiálu je tedy počet cyklů do lomu materiálu při působení zátěžné amplitudy  $\sigma_a$ .

Rozlišujeme tři stádia únavy:

- stadium změn mechanických a fyzikálních vlastností - mění se vlastnosti v celém objemu materiálu,
- iniciace trhliny- vytváření podmínek pro vznik trhliny,
- šíření trhliny a lom součásti.

Jsou rozlišovány tyto oblasti únavy:

- kvazistatické tečení
- nízkocyklová únavy ( $<10^4$  cyklů)
- vysokocyklová únavy ( $>10^4$  cyklů)
- gigacyklová únavy ( $10^9$  a více cyklů).

Oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy je dostatečně prozkoumána pro mnoho materiálů a podmínek zatěžování, ale oblast gigacyklové únavy není ještě zcela probádána.

Při nízkocyklových zkouškách je zatěžovací napětí v horní části Manson-Coffinovy křivky nad mezí kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ), v dolní části této křivky napětí klesá pod mez kluzu. U zkoušek dosahujících vysokého počtu cyklů je zatěžovací napětí pod mezí kluzu. K únavě materiálů dochází při cyklické plastické deformaci, při cyklické elastické deformaci nedochází ke změnám v objemu materiálu a proto také nedojde k porušení.

Konstrukční materiály jsou z velké části zastoupeny ocelí. U oceli se Wöhlerova křivka asymptoticky blíží k určité hodnotě zatěžovacího napětí  $\sigma_c$ -mezi únavy, je to hodnota zatěžovací amplitudy, při které by měl materiál vydržet nekonečný počet cyklů. Tento tvar Wöhlerova křivky je typický pro oceli. Naopak slitiny hliníku a bronzů nevydrží nekonečný počet cyklů.

Únavové vlastnosti materiálů také závisí na kvalitě povrchu a čistotě struktury. Kvalita povrchu je ovlivněna drsností, výskytem vrubů, pórů, apd. Čistota struktury je ovlivněna již vstupními surovinami, technologií výroby, tepelným zpracováním. Také vysoký výskyt defektů a inkluzí zhoršuje životnost materiálu. Závažný vliv na únavu má také mikročistota materiálu. Mez únavy je snižována nerovnoměrným rozložením karbidů a inkluzí jako např. oxidy, hlinitany a sulfidy, což je následek dezoxidace a tepelného zpracování.

Zkoušky životnosti se provádějí na zkušebních únavových strojích. Jako příklad lze uvést rezonanční a servohydraulické zkušební stroje. Resonanční stroje umožňují cyklické zatěžování s frekvencí desítky až stovky cyklů za sekundu a proto jsou vhodné pro vysokocyklovou únavu. Servohydraulické zkušební stroje jsou univerzální a lze na nich provádět cyklické zatěžování při konstantním napětí i konstantním rozkmitu plastické deformace. Využití těchto strojů je hlavně u nízkocyklových zkoušek.

Životnost součástí se určuje na zkušebních tělesech nebo přímo na určitých konstrukčních součástech. Jsou zkušební tělesa hladké nebo tělesa s koncentrátorem napětí (vrub, osazení, otvor). Tyto tělesa mají předepsané rozměry, v některých případech i drsnosti povrchu.

Únavové zkoušky jsou velice nákladné kvůli ceně zkušebních strojů a také náročnosti na počet odzkoušených vzorků. Jelikož při únavových zkouškách dochází k poměrně velkému rozptylu naměřených hodnot, je třeba několik desítek odzkoušených vzorků.

### 3. Únava

Únavové chování materiálů neboli únava materiálů je proces změn v struktuře materiálu a tím i změn jeho vlastností vyvolané cyklickým zatěžováním.

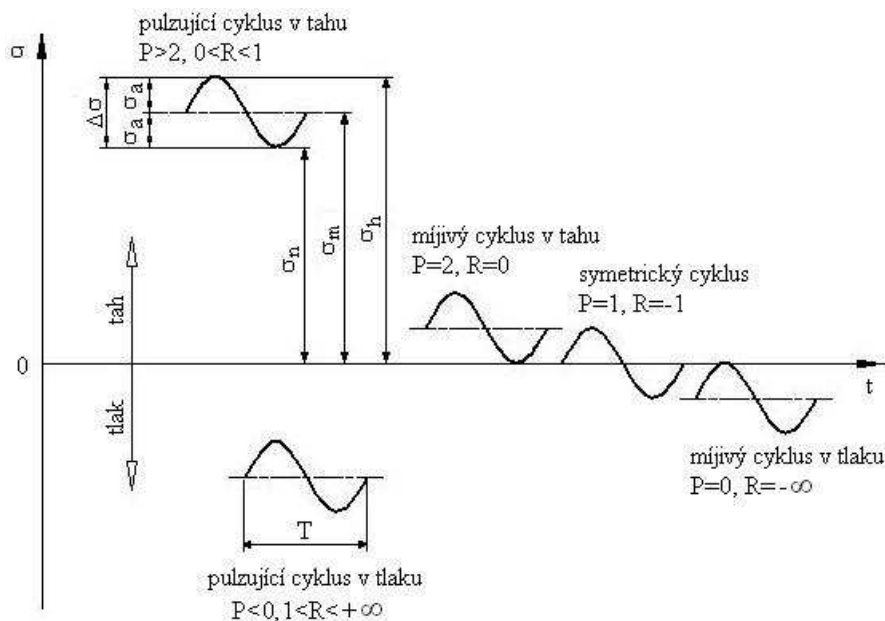
#### 3.1 Cyklické proměnlivé zatěžování

Součásti jsou v praxi cyklicky namáhány nepravidelně. Tyto průběhy se velice špatně modelují, proto jsou v praxi zjednodušovány. Nejčastěji je používán sinusový průběh zatěžování, méně často trojúhelníkový a obdélníkový.

Cykly se dále dělí na symetrické a asymetrické. Symetrický cyklus má střední napětí  $\sigma_m$  nulové, což v tomto případě znamená, že napětí v tahu i tlaku jsou stejné. U asymetrického cyklu je střední napětí  $\sigma_m \geq \sigma_a$ , což dává různé hodnoty pro tahu i tlak. Asymetrické namáhání je v praxi nejčastější. Tlakové namáhání zabraňuje vzniku a šíření trhlin.

V praxi se setkáváme s různými tvary zátěžných cyklů. Nejmodernější únavové zkušební stroje dokáží napodobit i reálné cyklické zatížení, přesto při vysokocyklových únavových zkouškách toto zatěžování nejčastěji nahrazujeme sinusovým průběhem zatížení.

Sinusový průběh zatížení mění svoji hodnotu periodicky od maxima do minima. Průběh zátěžného cyklu a různé druhy zátěžných cyklů s charakteristikami jsou znázorněny na obr.1



Obr.1. –Typy zátěžných cyklů a jejich charakteristiky

Časová osa rozděluje graf na tahovou část (nad osou) a na část tlakovou (pod osou). Pokud je střední napětí  $\sigma_m$  nulové, tak se jedná o cyklus symetrický souměrný, jestliže je  $\sigma_m$  nenulové, je cyklus asymetrický. Pokud je  $0 < \sigma_m < \sigma_a$ , poté se jedná o cyklus symetrický nesouměrný.

$$\sigma_m = (\sigma_h + \sigma_n) / 2, \quad (1)$$

kde:

$\sigma_h$  - horní napětí je maximální hodnota cyklického napětí,  
 $\sigma_n$  - dolní napětí je minimální hodnota cyklického napětí,  
 $\sigma_a$  – amplituda napětí je dynamická složka zátěžného cyklu,  
 $\sigma_a = (\sigma_h - \sigma_n) / 2$ .

Asymetrické cykly můžeme dále rozdělit na mívivé a pulzující. Mívivý cyklus má hodnotu  $\sigma_m = \sigma_a$ . Pulzující cyklus má hodnotu  $\sigma_m$  větší než  $\sigma_a$ , proto se v diagramu nachází nad nebo pod časovou osou.

Pro zhodnocení asymetrie cyklu jsou zavedeny parametry R a P.

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad P = \sigma_a / \sigma_h, \quad (2)$$

kde:

$\sigma_{\min} = \sigma_d$  – minimální nebo také dolní napětí zátěžného cyklu,  
 $\sigma_{\max} = \sigma_h$  – maximální nebo také horní napětí zátěžného cyklu,  
 $\sigma_a$  – amplituda napětí,

$$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2, \quad (3)$$

Mezi oběma parametry existují převodní vztahy:

$$P = 2 / (1 - R) \quad R = 1 - (2 / P). \quad (4)$$

Zatímco parametr R je všeobecně znám a používán, parametr P doporučený Klesnilem a Lukášem je méně používaný, ačkoliv má oproti parametru R několik výhod:

a) při logickém uspořádání různých tvarů zatěžovacích cyklů za sebou mění parametr P svoje hodnoty od  $-\infty$  do  $+\infty$ , zatímco parametr R vykazuje pro mívivý tlak nespojitost typu  $+\infty / -\infty$

b) ve většině vztahů zahrnující vliv asymetrie cyklu vystupují oba parametry v multiplikačních výrazech typu :

$$1 / (1 - R)^m \quad \text{a} \quad P^m, \quad (5)$$

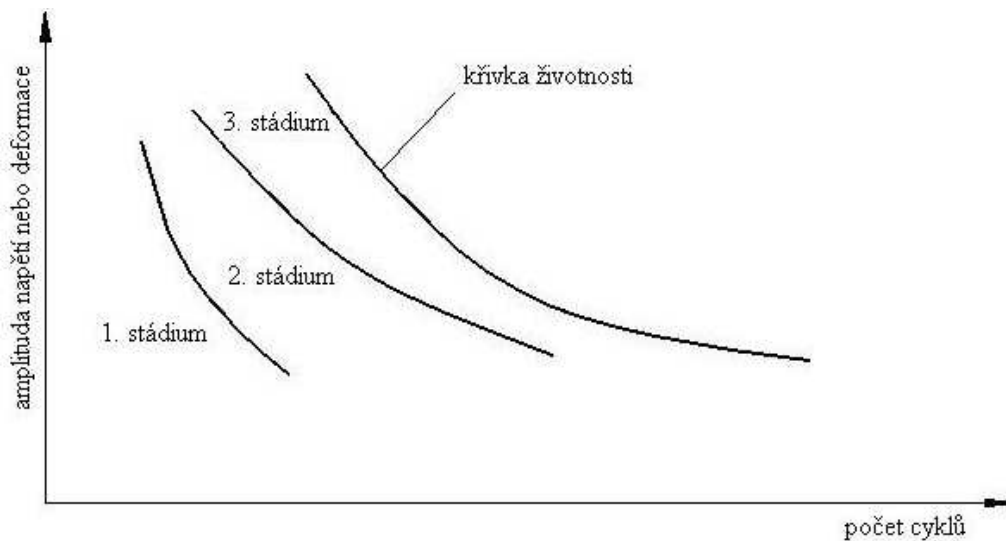
kde m je materiálová konstanta, čímž použití parametru P vede k podstatně jednodušším vztahům než v případě použití parametru R.

### 3.2 Rozbor únavového poškození

Únavové chování materiálů je způsobeno akumulací cyklické plastické deformace, což je nevratný proces měnící se s počtem cyklů.

Při nízkocyklových zkouškách bývá v materiálu překročena mez kluzu, což znamená výskyt plastické deformace v celém objemu materiálu. U vysokocyklových zkoušek není překročena mez kluzu, ale vlivem cyklického zatěžování také dochází k cyklické plastické deformaci, ale jen v určitých oblastech materiálu.

Únavový proces lze rozdělit na tři stádia dle. obr.2:



Obr.2. – Stádia únavového procesu

**1. stádium změn mechanických vlastností materiálu** - v důsledku vzniku a kumulace cyklické plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací. Tento proces probíhá v celém objemu vzorku. Důsledkem pohybu dislokací je změna mechanických vlastností, což se nejvíc projevuje jako cyklické změkčování a zpevňování materiálu.

**2. stádium vzniku únavových trhlin** - kumulováním cyklické plastické deformace dochází na povrchu vzorku ke koncentraci napětí a deformace v okolí koncentrátoru napětí (vrub, mikronečistoty, atd.). V koncentrátorech napětí vznikají první mikrotrhliny. K tomuto jevu dochází jen v malé části objemu materiálu.

**3. stádium šíření únavových trhlin** - mikrotrhliny z 2. stádia stále rostou, a kvůli nerovnoměrným deformacím a napětím se stane jedna trhlina řídicí trhlinou. Růst ostatních trhlin je potlačen, zatímco řídicí trhlina proroste určitou část vzorku. Až napětí v trhlině dosáhne kritické hodnoty tak dochází k lomu součásti.

Tyto tři stádia se prolínají a nelze je od sebe jednoznačně odlišit.

### **3.2.1 Změny mechanických vlastností**

Při cyklickém zatěžování materiálů dochází k mechanickým a fyzikálním změnám vlastností. Toto je zapříčiněno změnami v mikrostruktuře. Změny fyzikálních vlastností jsou z konstrukčního hlediska méně významné, proto jsou dále rozebírány jen změny mechanických vlastností.

**Cyklické zpevnění**- odpor materiálu proti cyklické deformaci vzrůstá. Zpevnění nastává u materiálu s poměrem meze pevnosti ku mezi kluzu  $R_m / R_e > 1,4$

**Cyklické změkčení**- odpor materiálu proti cyklické deformaci klesá. Změkčení nastává u materiálu s poměrem meze pevnosti ku mezi kluzu  $R_m / R_e < 1,2$

Zpevnění i změkčení materiálu mají u většiny materiálů sytící charakter, což znamená že jsou výrazné jen na začátku zatěžování, s přibývajícými cykly intenzita změkčení či zpevnění klesá.

Po určitém počtu cyklů zpevnění nebo změkčení přestane úplně, poté se materiál nachází v ustáleném neboli saturovaném stavu. K dosažení saturovaného stavu stačí poměrně málo cyklů v poměru k celkové životnosti. Na dobu cyklického zpevnění i změkčení má velký vliv charakter skluzu materiálu. Podle toho můžeme používané materiály rozdělit na dvě skupiny:

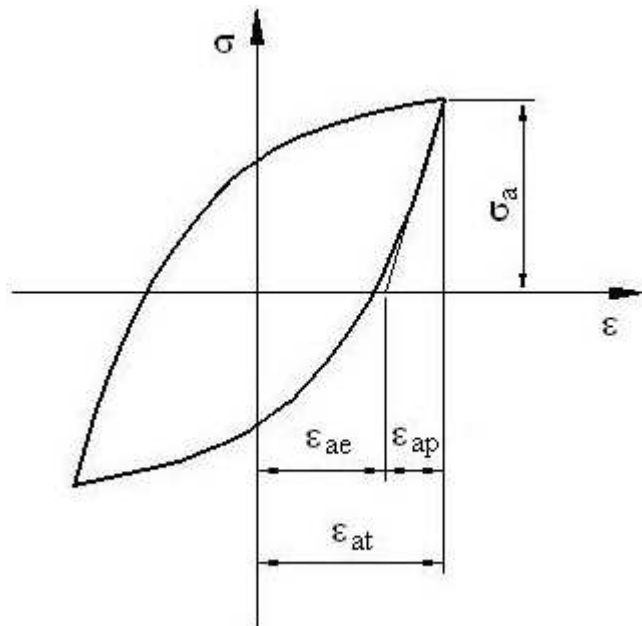
Kovy s vlnitým charakterem skluzu - jako je Cu, Al, Ni, Fe, bronz, u kterých dochází k snadnému skluzu příčných dislokací.

Kovy s planárním charakterem skluzu - jako slitiny Fe-Si, Cr-Ni oceli,  $\alpha$ -mosaz u kterých dochází k obtížnému příčnému skluzu šroubových dislokací.

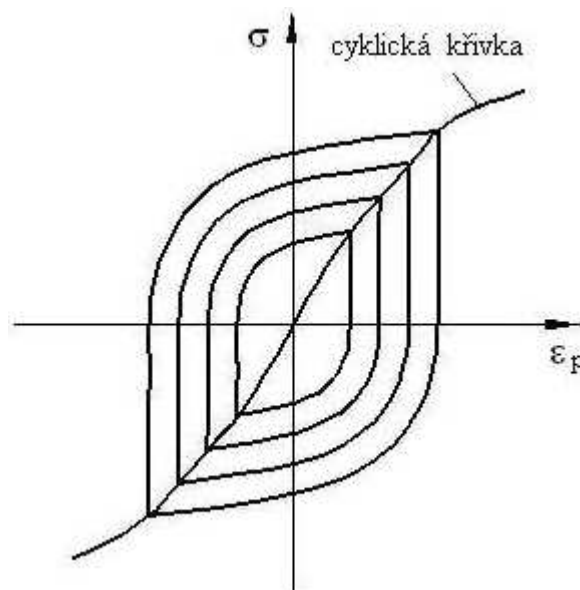
K cyklickému zpevnění i změkčení dochází rychleji u kovů s vlnitým charakterem skluzu než u kovů s planárním charakterem skluzu.

Dosažení saturovaného stavu nejlépe charakterizuje hysterezní smyčka, která po ukončení zpevnění nebo změkčování stabilizuje svůj tvar a velikost. Plocha hysterezní smyčky se rovná energii přeměněné za jeden cyklus na tepelnou energii. Celková energie do lomu je součet ploch smyček v jednotlivých cyklech. Protože se plocha smyček mění pouze v průběhu zpevnění nebo změkčení, lze celkovou energii určit jako součin počtu cyklů do lomu a plochy saturované hysterezní smyčky.

Spojení vrcholů několika saturovaných hysterezních smyček pro různé výchozí hodnoty amplitudy napětí nebo amplitudy plastické deformace získáme závislost, která se nazývá cyklická deformační křivka. Tato křivka vyjadřující vztah mezi napětím a plastickou deformací v ustáleném stavu. Cyklická deformační křivka je důležitou materiálovou charakteristikou pro popis únavového chování [1].



Obr.3. -Hysterezní smyčka



Obr.4. -Cyklická deformační křivka

Cyklickou deformační křivku pro polykrystaly v oblasti velkých a středních amplitud plastické deformace lze ve většině případech popsat dle Morrow [21] mocninou funkcí [1,s.20]:

$$\sigma_a = K \cdot \varepsilon_{ap}^n, \quad (6)$$

kde:

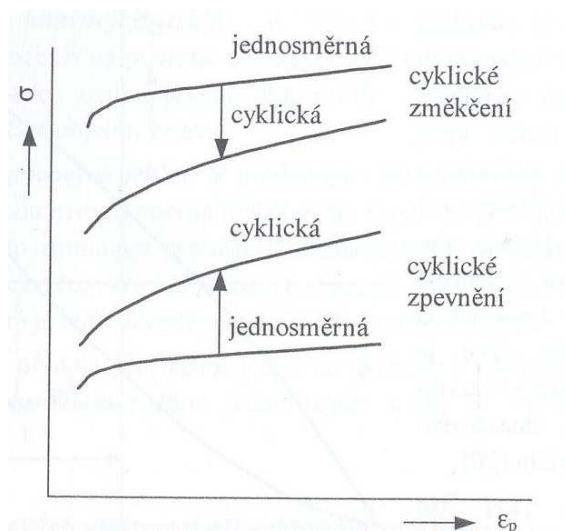
$\sigma_a$ - amplituda napětí,

$\varepsilon_{ap}$ - amplituda plastické deformace,

K- parametr cyklické deformační křivky,

n- exponent cyklické deformační křivky.

Ze srovnání cyklické deformační křivky s tahovým diagramem je možné přibližně určit cyklickou deformační odezvu materiálu. Leží-li cyklická křivka nad tahovou křivkou (viz.obr.5.), tak materiál cyklicky zpevňuje, tzn. že jeho odpor proti plastické deformaci roste. Leží-li cyklická křivka pod tahovou křivkou, tak materiál cyklicky změkčuje, což znamená, že jeho odpor proti plastické deformaci klesá. Jsou-li cyklická křivka s tahovou křivkou přibližně stejné, poté materiál cyklicky nezpevňuje ani nezměkčuje, tzn. že je cyklicky stabilní.



Obr.5. - Srovnání tahových diagramů a cyklických křivek [1]

### Vliv hustoty dislokací na cyklické zpevnění nebo změkčení materiálu

Cyklické zpevnění je typické pro vyžhnané materiály s malou hustotou dislokací (řádově  $10^6 \cdot \text{mm}^{-2}$ ). V průběhu cyklické deformace dochází ve struktuře materiálu k intenzivní generaci nových dislokací, k jejich vzájemné interakci a interakci dislokací se strukturními nehomogenitami. Výsledkem těchto jevů je tvorba nových stabilních dislokačních struktur s velmi vysokou hustotou dislokací, které jsou příčinou cyklického zpevnění. Typické dislokační struktury jsou např. buňková struktura, žilová struktura, rovinné řady dislokací, struktura skluzových pásů (ÚSP), atd. Na vznik dislokační struktury má rozhodující vliv energie vrstvené chyby a velikost zátěžné amplitudy.

Cyklické změkčení je typické pro materiály zpevněné deformačně, precipitačně, disperzačně nebo martenzitickou transformací atd., tyto materiály mají velmi vysokou hustotu dislokací ( $10^9$  až  $10^{10} \cdot \text{mm}^{-2}$ ). U takových materiálů dochází v průběhu cyklického zatěžování k uvolňování zablokovaných dislokací ze staticky vytvořených dislokačních struktur a také dochází k vytvoření nových dislokačních struktur. Zvyšující se hustota volných dislokačních struktur je příčina cyklického změkčení, protože na uskutečnění plastické deformace jsou potřeba dislokace pohyblivé a nikoliv všechny dislokace v krystalu [1].

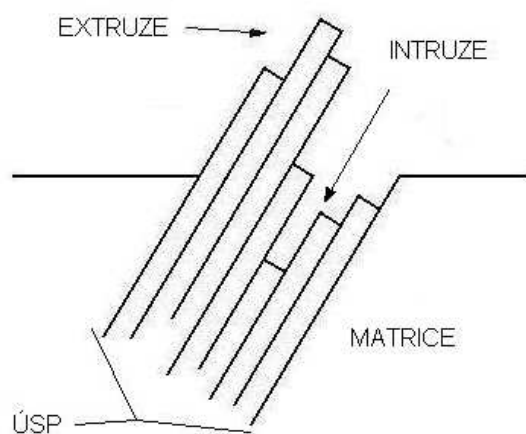


### 3.2.2 Vznik únavových trhlin

Zkoušky a experimenty z oblasti únavy dokazují že trhliny vznikají většinou na povrchu tělesa v místech koncentrace cyklické plastické deformace. Tento jev se nejčastěji přisuzuje vlivům koncentrátorů napětí, jako např. konstrukční vruby, velké změny průřezu, neopracovaný povrch (velká drsnost povrchu), svary, atd. Vliv má také gradient napětí s maximem na povrchu při zatěžování ohybem, krutem, nebo kombinací těchto druhů zatížení. Únavové lomy ale vznikají také na zkušebních tělesech, které jsou vyrobeny bez koncentrátorů vrubů napětí a které jsou navíc homogenně zatěžovány tahem-tlakem, kde se nevyskytuje napěťový gradient. Z těchto skutečností je zřejmé, že kromě makroskopických vrubů mají vliv i vruby mikroskopické, ale jen v situacích, kdy nedochází k vlivu makroskopických vrubů.

#### **Vznik trhliny v únavových skluzových páslech (ÚPS).**

Toto je nejčastější způsob vzniku únavové trhliny. Tato pásma vznikají v průběhu II. stádia únavového procesu v důsledku intenzivního vzniku nových dislokací, které se v povrchových vrstvách materiálu seskupují do skluzových pásů v rovinách maximálního smykového napětí. Působením napětí dochází v ÚSP ke vzájemnému prokluzu sousedních rovin (tzv. kartový skluz), díky němu se vytvoří na povrchu mikrorelief.



Obr.6. - Kartový skluz v ÚSP

Skluzové pásma vytlačené nad povrch matrice se nazývají extruze, skluzové pásma pod úrovní matrice jsou intruze. Intruze jsou mikrokoncentrátory napětí na povrchu součásti a jsou také zárodky budoucích únavových trhlin.

Tvorba ÚPS, intruzí, extrusí a iniciace únavových trhlin lze pozorovat na monokrystalu mědi. Tento jev byl popsán Polákem [25-28]. Na povrchu monokrystalu v důsledku cyklického zatěžování vznikají malé prohlubeniny a vyvýšeniny (mělké intruze a extruze) v místech průniku ÚSP o šířce 1-2  $\mu\text{m}$  na povrch. Se zvyšujícím se počtem cyklů se intruze a extruze postupně zvětšují jak do hloubky tak i do šířky a začínají se vytvářet makropásky, tzn. rovnoběžné řady intruzí a extruzí. Vznik prvních mikrotrhlin je výsledkem propojení řady intruzí podél únavových skluzových pásů. Tyto mikrotrhliny jsou mělké několik  $\mu\text{m}$ , ale jejich délka bývá v desítkách  $\mu\text{m}$  [1, s. 23].

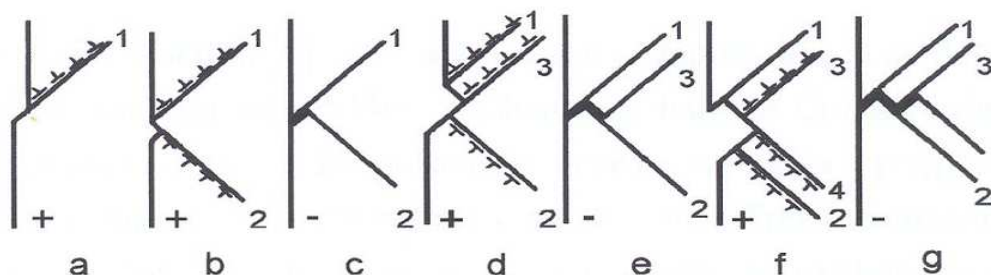
Ne ve všech případech vznikají trhliny na povrchu. U gigacyklové únavy se v některých případech trhlinka nešíří z povrchu ale zevnitř materiálu. Tato problematika bude vysvětlena v další kapitole této práce - (4.3).

V praxi je obtížné posoudit rozdíl mezi ostrou intruzí a mikrotrhlinou. Některé z navržených modelů nerozlišují mezi intruzí a mikrotrhlinou. Většina modelů a představ o vzniku trhlin ale vychází z toho, že mezi intruzí a mikrotrhlinou je kvalitativní rozdíl.

### Modely nerozlišující mezi intruzí a mikrotrhlinou

V tomto případě je vznik mikrotrhliny chápán jako spojitý růst intruze do hloubky díky opakovanému skluzu v jednom nebo dvou skluzových systémech.

Podle Neumanna je vznik mikrotrhliny zapříčiněn prohlubováním intruze, a to střídavým skluzem ve dvou nekomplanárních skluzových systémech (viz. obr.7).



Obr.7. - vznik mikrotrhliny při cyklickém zatěžování podle Neumanna [6]

Na skluzové rovině 1 v tahovém půlcyklu se realizuje skluz, který vytvoří elementární stupeň na povrchu tělesa (obr. 7a), což je také koncentrátor napětí, který aktivuje ve stejném půlcyklu skluzovou rovinu 2 - (obr. 7b). Následující půlcyklus vyvolá opačný pohyb dislokací na rovinách 1 a 2, což je skluz v opačném směru, který má za následek vznik mikrotrhliny, protože se v této oblasti neobjeví meziatomové vazby. Opakováním tohoto procesu se postupně trhlinka prohlubuje.

### Vznik trhliny křehkým prasknutím v kořeni intruze

Tento model rozlišuje mezi intruzí a mikrotrhlinou. Mikrotrhlinka vzniká vždy na ostrých inkluzích bez ohledu na typ okolní dislokační struktury jen tehdy, jestliže koncentrace napětí v okolí intruze nemůže být odrelaxována skluzovými procesy jako např. skluzem při zpevnění. Dislokace v tomto modelu mají jen vedlejší vliv, jelikož pohyby a interakce dislokací vedou k vytvoření povrchového reliéfu a k zpevnění matrice v okolí intruzí. Tento model předpokládá extrémně vysokou a také hodně lokalizovanou koncentraci napětí v kořeni intruze. Existence tak vysoké koncentrace napětí není možné experimentálně doložit ani vyvrátit.

### Vznik trhliny slučováním vakancí

Jelikož únavové skluzové pásy (ÚSP) jsou oblasti s největší dislokační aktivitou, je proto možné, že právě v těchto pásích v důsledku interakcí dislokací vznikají koncentrace vakancí. Tyto vakance mohou vytvořit zhluky a dutiny. Dostatečně velkou dutinu můžeme považovat za trhlinku. Tento model předpokládá difuzi vakancí, která je závislá na teplotě. Zvýšená teplota se může vyskytnout např. při provozu v praxi nebo také při cyklickém zatěžování za vysoké frekvence (např. 22kHz). Experimenty ukázaly, že difuze vakancí není potřebná podmínka pro vytvoření trhliny.

### **Vznik trhliny dekohezí krystalu**

Začíná podél skluzové roviny způsobené akumulací dislokací. Základní představa je taková, že v kritických místech se vytváří konfigurace dislokací, která vede k lokálnímu zvýšení napětí nebo ke zvýšení energie postačující ke ztrátě koheze.

### **Vznik trhliny na hranicích zrn**

Únavová trhlina může vznikat i na hranicích zrn v ÚSP. Toto je možné při zatěžování velkými amplitudami napětí, kdy dochází k intenzivní cyklické plastické deformaci v celé povrchové vrstvě jednotlivých zrn. Tento jev vede k relativnímu posunu zrna proti zrně a tím ke vzniku intruze. Tento model nerozlišuje mezi intruzí a mikrotrhlinou.

### **3.2.3 Šíření únavových trhlin**

Toto stádium lze rozdělit na tři etapy: - šíření krátkých trhlin  
- šíření dlouhých trhlin  
- únavový lom

Velkým problémem v této oblasti je definice krátké a dlouhé trhliny, proto existuje několik kritérií, podle kterých lze tyto trhliny rozlišit.

Například klasifikace krátkých trhlin podle Sureshe a Ritchieho [29]:

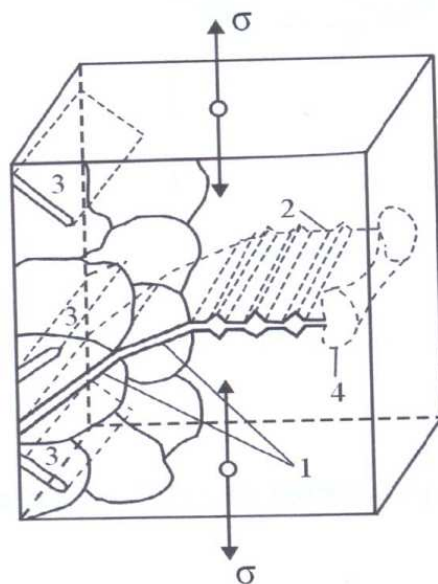
- únavové trhliny, jejichž velikost je srovnatelná s velikostí zrna u homogenních materiálů nebo s mezičásticovou vzdáleností u materiálu disperzně zpevněných-  
**mikrostrukturně krátké trhliny**
- únavové trhliny, u nichž je velikost plastické zóny na jejich čele srovnatelná s jejich délkou nebo trhliny startující z vrubu, jež se nalézají v plastické zóně tohoto vrubu –  
**mechanicky krátké trhliny**
- únavové trhliny, které jsou sice větší než trhliny předešlé, ale jejichž velikost nepřesahuje 1 až 2mm – **fyzicky krátké trhliny**

V praxi je vhodné použít jednodušší, ale stále dostačující dělení:

- **krátké trhliny**- trhliny s maximální délkou 0,5 až 1mm, maximálně 2mm, pro něž nelze bez korekcí použít kritérií lineárně elastické lomové mechaniky (LELM)
- **dlouhé trhliny**- trhliny pro jejichž popis šíření lze použít kritérií LELM [1].

### **Šíření krátkých trhlin**

V této etapě se šíří trhliny malé délky, ale jen ty které mají vhodné podmínky pro svůj rozvoj. Šíří se v krystalograficky podél aktivních skluzových rovin mřížky v rovině maximálního smykového napětí, což je přibližně pod úhlem 45° ke směru působení tahového cyklického napětí. V této fázi se trhliny šíří transkrystalisticky, po dosažení určité délky, která je závislá na materiálu a jeho pevnostních vlastnostech. Trhliny mají tendenci odklánět se z aktivních skluzových rovin a šířit se kolmo na směr hlavního napětí (viz. obr.8.)



1- transkrystalické šíření trhliny (1. etapa), 2 – nekystalografické šíření trhliny se striacemi (2. etapa), 3 – neefektivní trhliny, 4 – plastická zóna na čele trhliny

Obr.8. - Etapy šíření únavové trhliny [6]

Z dynamiky růstu únavových trhlin také vyplývá, že za určitých podmínek se může růst trhliny zastavit. Během růstu trhliny se za čelem trhliny koncentruje zbytkové cyklické napětí, které způsobuje tlakové napětí, což uzavírá špičku trhliny. Velikost tlakového napětí odpovídá velikosti cyklické plastické zóny před čelem trhliny. Toto tlakové napětí prezentuje odpor materiálu proti tahové deformaci, tedy proti otvírání trhliny a určuje tak podmínky zpomalení nebo úplného zastavení šíření trhliny. Prahová hodnota amplitudy součinitele intenzity napětí  $K_{ath}$  je potom pravděpodobně dána hladinou tlakových napětí v plastické zóně na čele trhliny.

Spekuluje se, že jev uzavírání krátkých trhlin souvisí s dalšími vlivy, jako např. rychlost šíření trhliny v různých prostředích, retardaci způsobenou přetížením, drsnost povrchu lomu, oxidické částice, usmýknuté kraje trhliny. Problém působení těchto vlivů je složitý a stále jsou některé vlivy předmětem studií.

Délka trhliny, která odpovídá přechodu z první etapy do druhé etapy šíření závisí na druhu materiálu a na velikosti amplitudy zatěžování. Rychlost šíření trhliny v první etapě je malá a počet cyklů potřebný na její skončení je také malý s porovnáním s druhou etapou šíření trhliny. Nekystalografické šíření v druhé etapě řídí normálové napětí, přičemž v obou etapách při pokojových teplotách zatěžování trhlina postupuje transkrystalicky.

### Šíření dlouhých trhlin

Děl zabývající se měřením rychlosti šíření trhlin je mnoho. Jejich společným znakem je poznatek, že rychlost šíření trhliny je funkcí amplitudy napětí, délky trhliny, asymetrie cyklu, geometrie tělesa, působících sil a materiálových parametrů.

V této etapě se většinou šíří jen jedna trhlina, protože se u ostatních trhlin růst zastavil. Tato trhlina se šíří nekystalograficky kolmo na směr hlavního napětí, a to většinou transkrystalicky, méně často interkrystalicky. Oblasti interkrystalického porušení v kombinaci

s transkrystalickým porušením se vyskytují u materiálů u niž nastalo oslabení hranic zrn, např. segregací nečistot.

Pro šíření v této etapě je charakteristický žlábkovaný mikrorelief lomové plochy-únavové striace.

Vznik striací (žlábkování) a postupné šíření trhliny je založené na představě opakovaného procesu otupování a zostřování čela trhliny při změně smyslu působení vnějšího zatěžování. Např. ve vákuu nemůžou vznikat oxidové filmy, a proto je potlačena tvorba striací a přírůstek trhliny za jeden cyklus zatěžování je menší než při zatěžování na vzduchu. Rychlost šíření únavových trhlin na vzduchu je jinak při stejných podmínkách několikanásobně vyšší než rychlost šíření trhlin ve vákuu.

Výskyt striací také závisí na velikosti zatěžování, teplotě, rychlosti zatěžování (frekvenci), vlastnostech materiálů. Při velkém  $\sigma_a$  a  $\varepsilon_a$  jsou striace dále od sebe jako i při zvýšených teplotách. Při velké rychlosti zatěžování jsou striace hustější (blíže k sobě). U některých materiálů se striace nevyskytují (např. vysokopevné oceli), u dalších materiálů jsou výrazné (např. slitiny Ti,Al).

Podle charakteru a tvaru se striace (únavové) dělí na transkrystalické a interkrystalické.

Interkrystalické únavové striace se vyskytují poměrně vzácně. Doposud byly pozorovány je u několika materiálů - feritické tvárné litiny, bainitické tvárné litiny, molibdenové slitiny. Interkrystalické striace jsou v porovnání s transkrystalickými výrazně mělké a často hůře rozpoznatelné.

Transkrystalické striace se dělí na – tvárné, křehké (štěpné), smíšené.

Šíření dlouhých trhlin je možno matematicky popsat pomocí parametrů lomové mechaniky. Nejčastěji se používá zobecněný Paris-Erdoganův zákon, jenž rychlost šíření únavové trhliny považuje za funkci amplitudy součinitele intenzity napětí  $K_a$ :

$$dl/dN = A \cdot K_a^m, \quad (7)$$

kde:

$dl/dN$  – rychlost šíření únavové trhliny [ $m \cdot \text{cyklus}^{-1}$ ],

$A, m$  – parametry rovnice,

$K_a$  – amplituda součinitele intenzity napětí [ $\text{MPa} \cdot m^{1/2}$ ].

Původně autoři [30] předpokládali konstantní exponent  $m = 4$ , ve skutečnosti se pohybuje v rozmezí od 2 do 7, nejčastěji však mezi 3 a 4.

Z Paris-Erdoganova vztahu vyplývá, že rychlost šíření trhliny dané délky je nulová pouze v případě, kdy amplituda napětí je rovna nule. Toto však neodpovídá skutečnosti, neboť bylo prokázáno, že existuje prahová hodnota amplitudy napětí při které se růst trhliny zastaví. Proto byla navržena nová modifikace Klesnilem a Lukášem [32]:

$$dl/dN = A \cdot (K_a^m - K_{ath}^m), \quad (8)$$

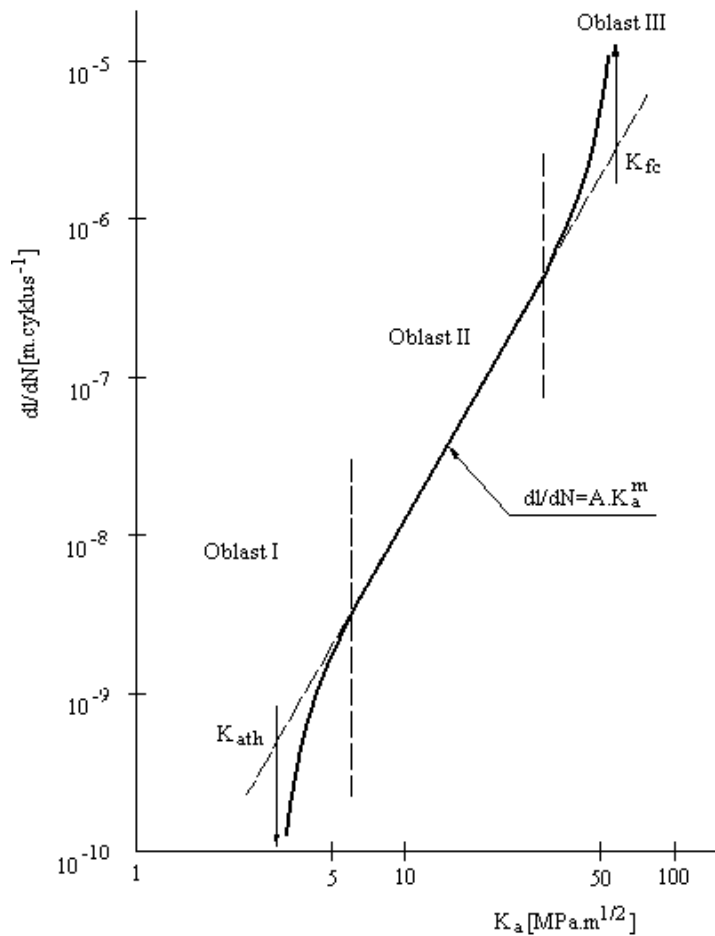
kde:

$K_{ath}$  – prahová hodnota amplitudy součinitele intenzity napětí [ $\text{Mpa} \cdot m^{-2}$ ].

Tento vztah zahrnuje jak oblast platnosti Paris-Erdoganova vztahu, tak i oblast prahové hodnoty amplitudy součinitele intenzity napětí  $K_{ath}$ . Řada experimentů dokázala, že

tato závislost je materiálovou křivkou, protože pro danou asymetrii zátěžného cyklu je nezávislá na tvaru tělesa, závisí jen na druhu materiálu [1, s.25].

Grafická podoba tohoto vztahu, tedy závislost  $dl/dN = f(K_a)$  je na obr.9.



Obr.9. – Diagram závislosti rychlosti šíření únavové trhliny ( $dl/dN$ ) na amplitudě součinitele intenzity napětí ( $K_a$ )

Vztahy Parise-Erdogana (7) a Klesnila-Lukáše (8) nelze použít v těchto případech:

- při velkém rozsahu plastické zóny před špicí trhliny, což nastává při zatěžování vysokými amplitudami plastické deformace v nízkocyklové oblasti. Zde je nutné použít kritérium elasticko-plastické lomové mechaniky (EPLM).
- v případě krátkých trhlín - I. etapa šíření

Křivky rychlosti šíření únavových trhlín jsou stanovené převážně pro oceli a hliníkové slitiny, pro litiny je jich méně [1].

### 3.2.4 Únavový lom

Závěrečným procesem únavy je únavový lom. Zvětšováním délky hlavní trhliny se zvyšuje napětí v ubývajícím nosném průřezu, když toto napětí dosáhne hodnoty kritického napětí, tak dojde k únavovému lomu. Konečný dolom materiálu probíhá velice rychle.

Závěrečné dolomení má často křehký charakter, ale může se vyskytnout i houževnaté dolomení. Velikosti ploch dolomení jsou různé, závisí na druhu zatěžování, druhu materiálu, vlivy prostředí, atd. Pohybují se kolem 50% původního průřezu vzorku, ale tato hodnota je proměnlivá.



Obr. 10. – Únavový lom [9]

#### **Fraktografie únavového lomu**

Je to analýza povrchu lomu. Fraktografie je významná hlavně pro vyšetření a určení příčin havárií strojů a zařízení.

Podle použitého zvětšení dělíme fraktografii na makrofraktografii a mikrofraktografii.

#### **Makrofraktografie**

Pozorování lomové plochy při zvětšeních 1x až 50x . Při těchto zvětšeních lze odlišit únavový lom s křehkým nebo houževnatým dolomením. V některých případech lze odhalit ohnisko únavového porušení, lze také pozorovat hrubší defekty na lomové ploše. Při makrografické analýze lze určovat dvě typické oblasti, které jsou navzájem dobře rozeznatelné, jsou to statické a únavové porušení.

Při únavového porušení je povrch lomu lesklý, protože je lom velmi hladký. Toto je způsobeno tím, že během růstu trhliny jsou obě strany vlivem cyklického zatěžování k sobě opakovaně přitlačovány, tímto způsobem se drsný povrch lomu vyhladí. Čím je větší počet cyklů, tím je povrch lomu hladší.

Na povrchu lomu lze při makrofraktografickém pozorování určit retardační (růstové) čáry. Retardační čáry odpovídají poloze čela trhliny. Výrazné jsou hlavně tehdy, když se změnil podmínky zatěžování, jako např. frekvence, amplituda, teplota, korozní prostředí a také

když se změní rychlost šíření trhliny. Střed retardačních čar je v místě iniciace hlavní trhliny. U tělesa s vrubem je tvar růstových čar závislý na tvaru vrubu.

V některých případech se na lomové ploše vyskytují i tzv. radiální stupně, které jsou přibližně paralelní se směrem šíření lomu. Tyto radiální stupně vznikají spojením trhlín šířících se v různých rovinách.

Povrch lomu při statickém porušení je oproti únavovému velmi hrubý a neliší se oproti povrchu lomu při statických zkouškách. Lom bývá většinou štěpný, méně často jamkový, což je závislé na mechanismu jeho vzniku. U štěpného i jamkového může být lom transkrystalický i interkrystalický.

Poměr velikosti únavového a statického lomu závisí na druhu materiálu, druhu namáhání (krut, ohyb, tah-tlak), na geometrii a umístění vrubu a hlavně na hodnotě působícího napětí. Čím je napětí větší, tím je větší oblast statického porušení a naopak.

### **Mikrofraktografie**

Únavové lomy jsou pozorovány při zvětšení 50x až 10 000x. Mikrofraktografie je zaměřena na mikromechanismy, které se uplatňují při únavovém procesu. Pro mikrofraktografickou analýzu únavových lomů je typický povrchový reliéf, který se vyznačuje únavovými striacemi neboli únavovým žlábkováním. Lomová plocha bývá obvykle rozdělena na řadu oblastí, v kterých jsou striace přibližně rovnoběžné. Šíření únavových trhlín nemusí být vždy spojené s výskytem striací.

## **3.3 Křivky únavové životnosti**

Únavové chování materiálů je možno vyjádřit pomocí křivek únavových životností. Nejčastěji používané křivky jsou Manson-Coffinova a Wöhler-Basquinova pro oblast nízkocyklové únavy s maximálním počtem cyklů do lomu mezi  $10^4$ - $10^5$ , a Wöhlerova křivka pro oblast vysokocyklové únavy ( $10^5$  –  $10^8$ ) a také pro gigacyklovou oblast ( $10^9$  a více cyklů).

Součástky nebo konstrukce lze z hlediska odolnosti proti únavovému poškození posuzovat dvěma způsoby, a to na základě:

**Celkové životnosti** – představuje počet cyklů  $N_i$  potřebných na vznik únavové trhliny a počet cyklů na šíření únavové trhliny  $N_p$ , kde jsou pro oblast nízkocyklové únavy známy závislosti plastické deformace  $\epsilon_{ap}$  od celkového počtu cyklů do lomu  $N_f = N_i + N_p$ . Pro oblast vysokocyklové únavy je používaná závislost amplitudy napětí  $\sigma_a$  na celkovém počtu cyklů do lomu  $N$ .

**Šíření únavové trhliny** – pro dodržení „filozofie přípustných defektů“ je sledován počet cyklů potřebný pro šíření únavové trhliny  $N_p$ . Zvláštní význam má základní prahová hodnota amplitudy součinitele intenzity napětí  $K_{ath}$ , která představuje schopnost materiálu bránit se šíření již existující trhliny.

Během únavového procesu jsou nejvíce pozorovatelné tyto makroskopické zákonitosti:

- 1) Počet cyklů do porušení stoupá s klesající amplitudou napětí
- 2) Počet cyklů do porušení není závislý jen na absolutní velikosti maximálního napětí cyklu (horního napětí  $\sigma_h$ ), ale je na velikosti amplitudy cyklu  $\sigma_a$ . Čím je větší  $\sigma_a$  při daném  $\sigma_h$ , tím menší počet cyklů do porušení materiál vydrží.
- 3) Většinou existuje mezní amplituda napětí, pod jejíž hodnotou nedochází k porušení materiálu prakticky při neomezeném počtu cyklů.



### 3.3.1 Vysokocyklová únava

Vysokocyklová oblast únavy začíná v oblasti  $10^4$  počtu cyklů a končí dosažením  $10^9$  počtu cyklů, kde začíná oblast gigacyklové únavy. Vysokocyklová únava je popsána Wöhlerovou křivkou (obr. 11, 12).

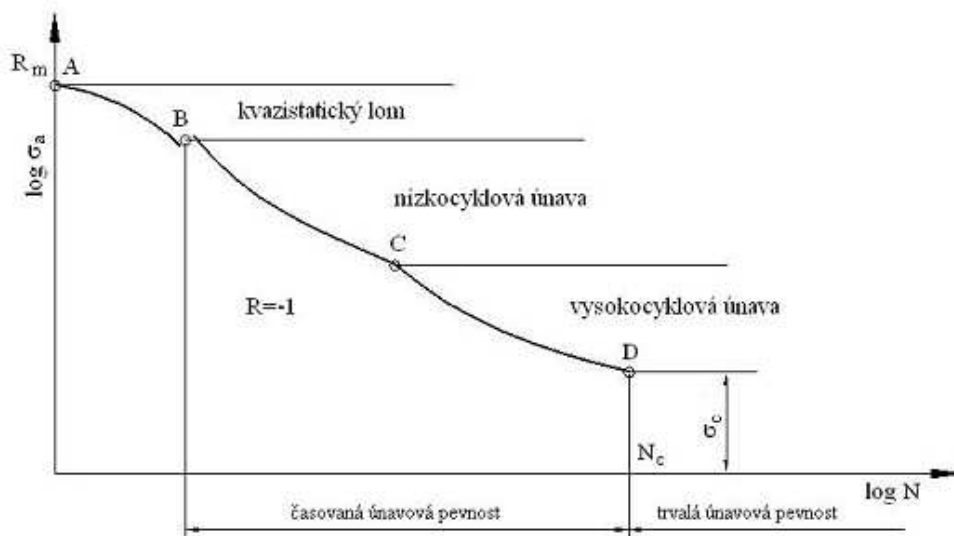
Počet cyklů dělí oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy je ovlivněn několika faktory, největší vliv mají materiálové vlastnosti. Tato hodnota se pohybuje v rozmezí mezi  $10^4$  až  $10^5$  cyklů.

Různá střední napětí  $\sigma_m$  cyklického zatěžování ovlivňují průběh Wöhlerovy křivky (obr.11.), a to hlavně v oblasti mezi body A-B. Při zatěžování mívivým cyklem, kdy je  $\sigma_m = \sigma_a$ , je mezi body A-B oblast cyklického creepu. Při zatěžování symetrickým cyklem, kdy je  $\sigma_m = 0$ , je mezi body A-B oblast kvazistatického lomu.

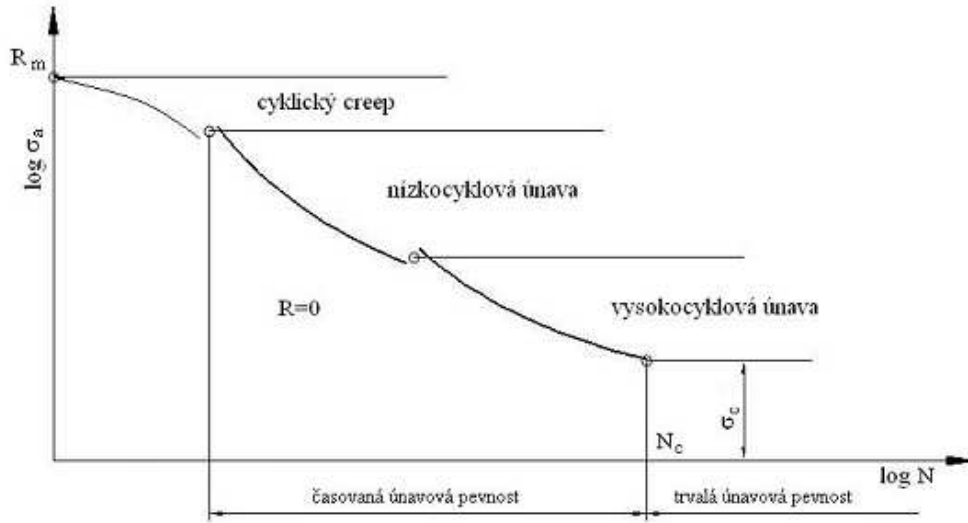
Křivku závislosti  $\sigma_a = f(N)$  je rozdělena na tři základní oblasti:

- oblast kvazistatického lomu ( $\sigma_m = 0$ ) nebo cyklického creepu ( $\sigma_m = \sigma_a$ ),
- oblast nízkocyklové únavy (ohraničená body B,C),
- oblast vysokocyklové únavy (ohraničená body C,D).

Symetrický cyklus ( $\sigma_m = 0$ )



Míjivý cyklus, kdy ( $\sigma_m = \sigma_a$ )



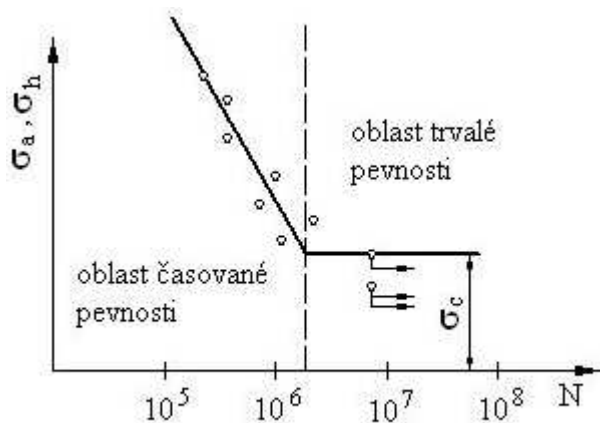
Obr.11. - schématické znázornění Wöhlerových křivek za různých hodnot  $\sigma_m$

Etapy únavového procesu u vysokocyklové únavy jsou obdobné jako byly rozebrány v kapitole únavového poškození (3.2). Pro vysokocyklovou únavu jsou rozdíly hlavně v prvním stádiu nazvaném inkubační etapa únavového porušení. Tuto etapu je rozdělena na několik stádií, které jsou charakterizovány mikrostrukturními a fyzikálními změnami.

### 3.3.2 Wöhlerova křivka (S-N křivka)

Wöhlerova křivka patří k nejpoužívanějším metodám zjišťujících meze únavy, a to hlavně v oblasti vysoko a gigacyklové. Dáváme do závislosti amplitudu napětí  $\sigma_a$  a počet cyklů do lomu  $N$ . Wöhlerova křivka je nejčastěji vynášena v semilogaritmických souřadnicích  $\sigma_a$ -  $\log N$ , jelikož počet cyklů je příliš vysoký ( $10^5$  a více). Tuto křivku lze znázornit pomocí jednoduché grafické metody tím, že aproximací z naměřených bodů vzniknou dvě křivky, šikmá a vodorovná. Zlom mezi nimi v místě  $10^6$  až  $5 \cdot 10^6$  rozděluje vysokocyklovou únavu na oblast časové únavové pevnosti a trvalé únavové pevnosti.

Z vodorovné oblasti Wöhlerovy křivky vyjádříme mez únavy  $\sigma_c$  - napětí, při němž vydrží materiál nekonečný počet cyklů. Na základě poznatků z šíření únavových trhlin je možné popsat  $\sigma_c$  jako hodnotu napětí, při níž se vytvoří únavové mikrotrhliny kritické délky, které se ale nemohou dále šířit.



Obr.12. - Wöhlerova křivka

**Wöhlerova křivka** vyhodnocena pomocí tříparametrové nelineární funkce navržené Sromeyerem:

$$\log(\sigma - K) = a + b \cdot \log N, \quad (9)$$

kde:

$\sigma$  – podle způsobu zatěžování amplituda napětí  $\sigma_a$  nebo horní napětí  $\sigma_h$  zátěžného cyklu,

$K$ ,  $a$ ,  $b$  – konstanty regresní křivky,

$N$  – počet cyklů do lomu nebo do ukončení zkoušky.

### 3.3.3 Nízkocyklová únava

Na obr.11 je to oblast B-C. V tomto úseku je oproti oblasti cyklického tečení pomalejší hromadění cyklické plastické deformace. Hysterezní smyčka se po určitém počtu cyklů uzavře a v dalších cyklech se její plocha nemění. Před porušením zkušebních tyčí v tomto úseku dochází k vzniku a šíření únavových trhlin. Toto je typické hlavně pro zpevňující materiály. V nízkocyklové oblasti jsou zapojeny do únavového procesu jen určité místa v průřezu tělesa (povrchové a podpovrchové oblasti), zatímco v oblasti cyklického tečení je zapojen celý průřez.

### 3.3.4 Manson-Coffinova křivka

Nízkocyklovou únavu je nejvýhodnější zobrazovat Manson-Coffinovou křivkou ( $\epsilon_{ap}$ - $N_f$ ), protože na určení plastické deformace  $\epsilon_{ap}$  lze využít zobrazení hysterezní smyčky, a také z ní lze vyčíst další údaje, jako amplitudu napětí  $\sigma_a$ , amplitudu elastické deformace  $\epsilon_{ap}$ , nebo také z více hysterezních smyček je patrné, jestli materiál zpevňuje nebo změkčuje. Křivka Manson-Coffinova pro vysoko i gigacyklové oblasti únavy ztrácí význam, protože při těchto počtech cyklů je hodnota amplitudy napětí tak malá (kolem  $10^{-5}$  a méně), že je velmi těžké ji změřit a vynášení pro Manson-Coffinovu křivku je nesmyslné.

## Manson-Coffinova křivka

Je závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě plastické deformace  $\epsilon_{ap}$

$$\epsilon_{ap} = \epsilon_f' \cdot (2 N_f)^c, \quad (10)$$

kde:

$\epsilon_f'$  - součinitel únavové tažnosti, je dán extrapolací plastické deformace na první půlcyklus zatížení,

$c$  – plastický exponent křivky životnosti, je dán sklonem křivky životnosti  $\epsilon_{ap} - N_f$  zobrazené v log-log souřadnicích.

### 3.3.5 Wöhler-Basquinova křivka

Pro popis nízkocyklové oblasti únavy je potřeba kromě Manson-Coffinovy křivky i Wöhler-Basquinovy křivky (W-B křivka, viz. obr 13). Tato křivka je oproti M-C křivce méně strmější.

#### **Wöhler-Basquinova křivka:**

Závislost počtu cyklů do lomu  $N_f$  na amplitudě napětí  $\sigma_a$  podle Morrow [21] :

$$\sigma_a = \sigma_f' \cdot (2 N_f)^b, \quad (11)$$

kde:

$\sigma_f'$  - součinitel únavové pevnosti, je dán extrapolací amplitudy napětí na první půlcyklus zatížení,

$b$  – elastický exponent křivky životnosti, je dán sklonem křivky životnosti  $\epsilon_{ae} - N_f$  zobrazené v log-log souřadnicích.

Jestliže křivky M-C a W-B aproximujeme, vznikne křivka životnosti  $\epsilon_a - N_f$  dána součtem křivek životnosti  $\epsilon_{ae} - N_f$  a  $\epsilon_{ap} - N_f$  [1, s. 29].

$$\epsilon_a = \epsilon_{ae} + \epsilon_{ap} \quad (12)$$

Při platnosti Hookova zákona v makroskopicky izotropních materiálech:

$$\sigma_a = E \cdot \epsilon_a, \quad (13)$$

po dosazení do vzorce dle Mansona:

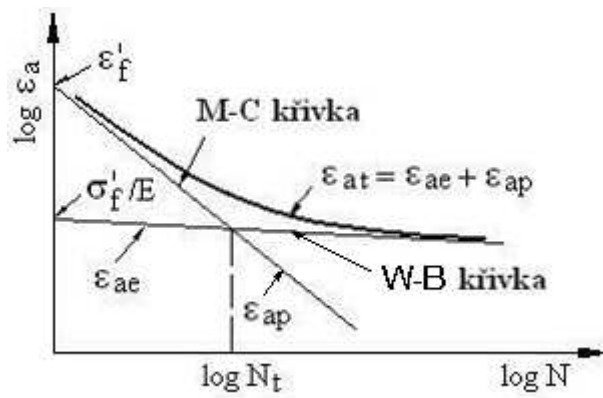
$$\epsilon_a = \sigma_f' / E \cdot (2 N_f)^b + \epsilon_f' / E \cdot (2 N_f)^c, \quad (14)$$

kde:

$E$  – modul pružnosti materiálu v tahu

- uvedené vztahy platí pro symetrické zatěžování hladkých vzorků homogenní napjatostí tah-tlak.

Grafické znázornění rovnic je na obr.13.



Obr. 13. - Schématické znázornění křivek životnosti

## **4. Vliv frekvence zatěžování na únavu**

### **Vliv některých faktorů na mez únavy**

Únava materiálů je ovlivněna různými faktory, které mohou samostatně, ale mnohem více v superpozici zhoršovat ale i zlepšovat odolnost materiálu proti únavovému porušení.

### **4.1 Frekvence zatěžování**

Frekvenční zatěžování je děleno na dvě kategorie:

**Nízkofrekvenční** – únavové vlastnosti bývají zjišťovány při frekvenci maximálně do 2000 Hz, obvyklé nízkofrekvenční zatěžování nepřesahuje 200 Hz.

**Vysokofrekvenční** – zatěžovací frekvence je větší než 2 kHz. Hodnoty vysokofrekvenčního zatěžování se mohou velmi lišit, od hodnot 2 kHz až k hodnotám dosahujících 100 kHz. Obvyklé hodnoty vysokofrekvenčního zatěžování jsou např. 3kHz, 10 kHz, 20 kHz, větší hodnoty (až do 100 kHz) nejsou příliš časté.

Podle ČS norem nemá zatěžovací frekvence v rozmezí 1-100 Hz žádný vliv na mez únavy, zatímco při 100-1000 Hz lze pozorovat v některých případech ovlivnění únavových vlastností. Při dalším zvyšování zatěžovací frekvence je ovlivnění únavových vlastností výraznější [1].

U většiny materiálů se vysoká frekvence zatěžování projevuje zvýšením meze únavy, tzn. že dochází k posunu křivek životnosti k vyšším napětovým hodnotám. V některých případech se však vysokofrekvenční zatěžování neprojevuje na únavových vlastnostech. Dokonce se v určitých případech při vysokofrekvenčním zatěžování únavové vlastnosti zhoršují.

#### **4.1.1 Vysokofrekvenčního zatěžování**

Jelikož i při poměrně vysoké zatěžovací frekvenci 200 Hz (ale stále nízkofrekvenční) jsou zkušební stroje schopny dosáhnout přibližně do týdne  $10^8$  cyklů, gigacyklová oblast ( $10^9$  a více cyklů) je i při této frekvenci velmi těžce dosažitelná, proto používáme vysokofrekvenční zatěžování.

Mnoho dnes používaných materiálů musí v provozu vydržet  $10^9$  i větší počet cyklů. Jsou to např. titanové slitiny, slitiny Al-Zn-Mg, vysokopevné slitiny s niobem, volframem, vysokopevné a mikrolegované oceli, tepelně-mechanicky zpracované oceli, kompozity, monokrystalové odlitky, keramika apd. [2].

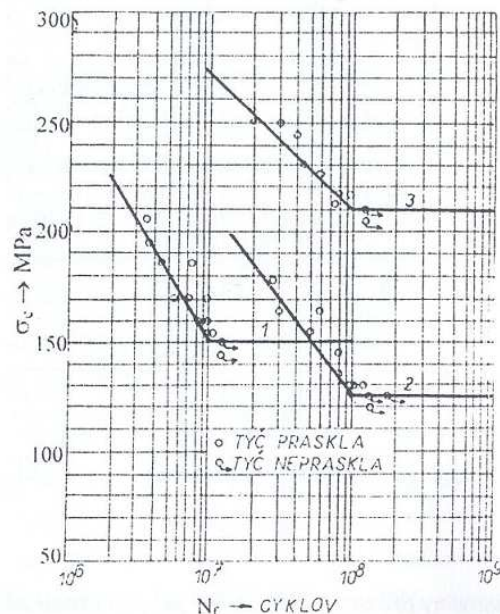
Tyto a další materiály jsou využívány ve speciálních konstrukcích a pro speciální součásti jako např. lopatky spalovacích turbín, součásti reaktivních a turboreaktivních motorů, části raket, u ultrazvukových svářečích strojů, u strojů pro ultrazvukové obrábění, atd. Všechny tyto a další součásti a zařízení jsou namáhány různými hodnotami vysokofrekvenčním zatěžováním. Z tohoto pohledu je výhodné, že ve většině případů vysokofrekvenční namáhání zvyšuje mez únavy oproti namáhání při normálních (nízkých) frekvencích.

Velkou předností vysokofrekvenčního zatěžování je podstatné zkrácení času únavových zkoušek. Například k dosáhnutí  $10^7$  počtu cyklů na únavovém stroji s frekvencí 50 Hz je potřebný čas přibližně 55 hodin. Proti tomu s frekvenčním zatěžováním 20 kHz stačí na stejný počet cyklů 8,3 minuty. Jak je vidět, na vysokofrekvenčních strojích lze bez větších potíží dosáhnout  $10^8$  až  $10^{10}$  počtu cyklů. Zřídka je vyžadováno, aby zkoušky dosáhly do oblasti  $10^{11}$  až  $10^{12}$  cyklů. Další výhodou vysokofrekvenčního namáhání a z toho plynoucí zkrácení doby zkoušení je možnost vložení zkušebních vzorků do různých plynných nebo tekutých prostředí, dále do korozivních nebo abrazivních prostředí. Také se zkušební tělesa dají lépe chladit.

Důležitý aspekt vysokofrekvenčního namáhání je ohřívání zkušebních vzorků v důsledku vysoké frekvence. Průběh teploty bez chlazení vzorku je přibližně hyperbolická. Snížení meze únavy v důsledku zvýšení teploty při vysokofrekvenčním namáhání souvisí s tepelnou aktivací lokálních plastických deformací a lokálních skluzů, také souvisí se vzrůstem koeficientu difúze, se změnou podmínek pro příčný skluz a pro pohyb dislokací. Dislokační struktura oceli je při tomto ohřevu podobná deformační substruktuře oceli, což zahrnuje i charakteristickou buněčnou strukturu. Změny charakteristik a vlastností, jako např. změny tvrdosti a hustoty dislokací jsou nejvýznamnější asi 1 mm pod povrchem vzorků.

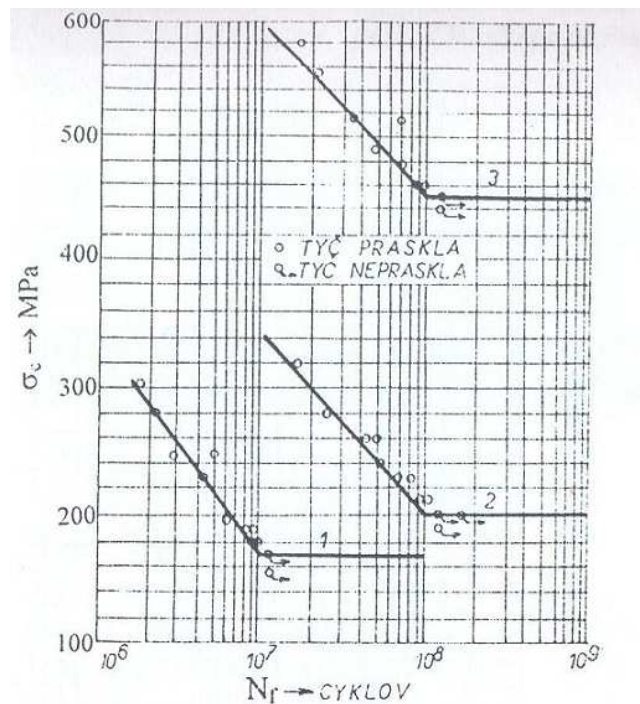
Další vlastnosti, které ovlivňují zvýšení meze únavy při vysokofrekvenčním zatěžování mohou být následující. Obtížné relaxování napětíových polí v krátkém čase, obtížný vznik „volných“ dislokací. Omezený pohyb dislokací v polovině cyklu zatížení bude ovlivňovat i kumulaci poškození při tomto namáhání. Velký vliv má také přítomnost atomů C a N v tuhém roztoku, jelikož jejich interakce s pohyblivými dislokacemi a s vakancemi řídí proces hromadění poškození v materiálu. V místech strukturálních poruch jsou teploty vyšší než v okolí, což vyvolává zvýšení koncentrace vakancí v oceli.

Vliv na únavu při vysokofrekvenčním namáhání a s ním související ohřev vzorků je znázorněn na obr.14a), 14b), kde jsou vyobrazeny Wöhlerovy (S-N) křivky pro ocel 12 013 a 14 109 při zatěžovacích frekvencích 83,3 Hz a 23 kHz. Zatěžování při frekvenci 23 kHz je provedeno bez chlazení ( $T \neq \text{konst.}$ ) i s chlazením ( $T = \text{konst.}$ ) zkušebního tělesa. Chlazení tělesa bylo prováděno průtokem vody. Korozní účinek vody a tudíž ovlivnění životnosti nebylo prokázáno.



Obr. 14a) S-N křivky pro ocel 12 013 při 83,3 Hz a 23 kHz s  $T \neq \text{konst}$  i  $T = \text{konst}$ . [2]

Mez únavy při počtu cyklů  $10^8$  pro ocel 12 013 při frekvenci zatěžování 83,3 Hz je 150 MPa (viz. křivka 1). Při zatěžování frekvencí 23 kHz a umožněnému ohřevu zkušebního tělesa je mez únavy 125 MPa (viz. křivka 2). Při zatěžování frekvencí 23 kHz a chlazení, které udržuje teplotu zkušebního tělesa na 35 °C je mez únavy 210 MPa (viz. křivka 3).



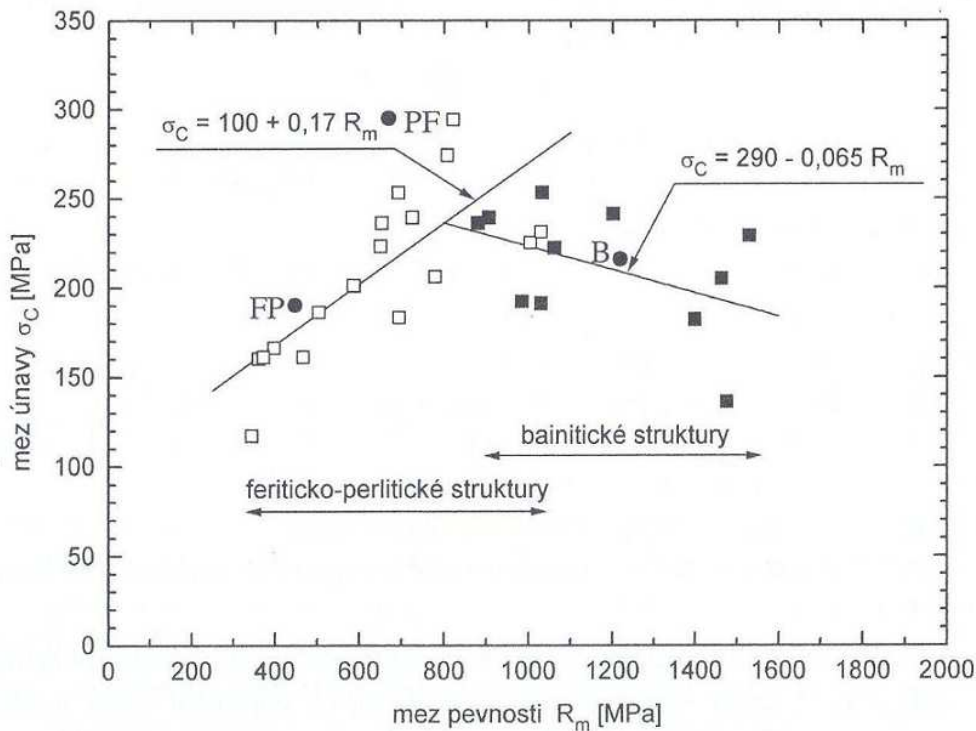
Obr. 14b) S-N křivky pro ocel 14 109 při 83,3 Hz a 23 kHz s  $T \neq \text{konst}$  i  $T = \text{konst}$ . [2]

Mez únavy pro ocel 14 109 při frekvenci zatěžování 83,3 Hz je 170 MPa (viz. křivka 1). Při zatěžování frekvencí 23 kHz a umožněnému ohřevu zkušebního tělesa je mez únavy 200 MPa (viz. křivka 2). Při zatěžování frekvencí 23 kHz a chlazení je mez únavy 450 MPa (viz. křivka 3).

Z grafů je zřejmé, že ocel 14 109 vykazuje vyšší závislost meze únavy na teplotě než ocel 12 013, jelikož ocel 12 013 má mez únavy vyšší při 23 kHz s  $T \neq \text{konst}$  než mez únavy při 83,3 Hz, ale ocel 14 109 má mez únavy při 23 kHz a  $T \neq \text{konst}$  menší než při zatěžovací frekvenci 83,3 Hz [2].

Vliv frekvence zatěžování na mez únavy litin je znázorněn na obr.15. Jsou zde vyobrazeny závislosti pro litiny perliticko-feritické (PF), feriticko-perlitické (FP) a bainitické (B).





Obr. 15 - lineární závislosti meze únavy  $\sigma_c$  při zatěžování symetrickým cyklem tah-tlak na pevnosti  $R_m$  pro tvárné litiny (□, ■ nízkofrekvenční, ● vysokofrekvenční cyklické zatěžování) [1]

Z těchto závislostí lze vypočítat, že litiny FP, PF a B mají mez únavy mírně ovlivněnou vysokofrekvenčním zatěžováním, jelikož hodnoty meze únavy těchto litin zatěžovaných nízkofrekvenčně byly zjišťovány při  $10^7$  počtu cyklů, zatímco hodnoty meze únavy při vysokofrekvenčním byly určeny při  $10^8$  počtu cyklů. Z grafu lze vyčíst, že PF litina je nejvíce z těchto litin ovlivněna vysokofrekvenčním zatěžováním, přesto je tato reakce na vysokofrekvenční zatěžování mnohem nižší než u ocelí.

Vliv teploty na únavu byl dokázán v mnoha pracích. Podle Mansona [41] je zvyšující se teplota při vysokofrekvenčním zatěžování důsledkem absorpce ultrazvukového kmitání převážně v místech mřížkových poruch. Toto bylo také experimentálně potvrzeno průběhy teploty vzorků v závislosti na čase při aplikaci vysokofrekvenčního zatěžování u různých předdeformovaných nízkouhlíkových ocelí. V případě ocelí 12 013 a 14 109 přispívá k rozdílu mezi jejich reakcemi na teplotu při zatěžování také skutečnost, že ložisková ocel (14 109) má heterogenní strukturu a současně má nižší teplotní vodivost než ocel 12 013 [2, s.285].

Součásti mohou být namáhány vysokým počtem cyklů ( $10^9$  a více), ale nejsou namáhány vysokofrekvenčně. Toto bývá případ automobilové, železniční nebo letecké dopravy. Jako příklad mohou posloužit součásti z japonského rychlovlaku Shinkansen, které dosáhnou  $10^9$  cyklů za 10 roků provozu [6]. Tyto součásti nejsou v reálu namáhány vysokofrekvenčně, ale únavové zkoušky se musí provádět za vysoké frekvence, aby se dosáhlo tak vysokého počtu cyklů. Dříve bylo uvedeno, že při vysokofrekvenčním namáhání se ve většině případů zvyšuje mez únavy, ale zmíněné součásti jsou v praxi zatěžovány při nízkých frekvencích, proto se musí provádět korekce hodnot meze únavy u těchto zkoušek.

Zde jsou uvedeny gigacyklové a vysokocyklové hodnoty pro některé z dříve zmiňovaných součástí [5]:

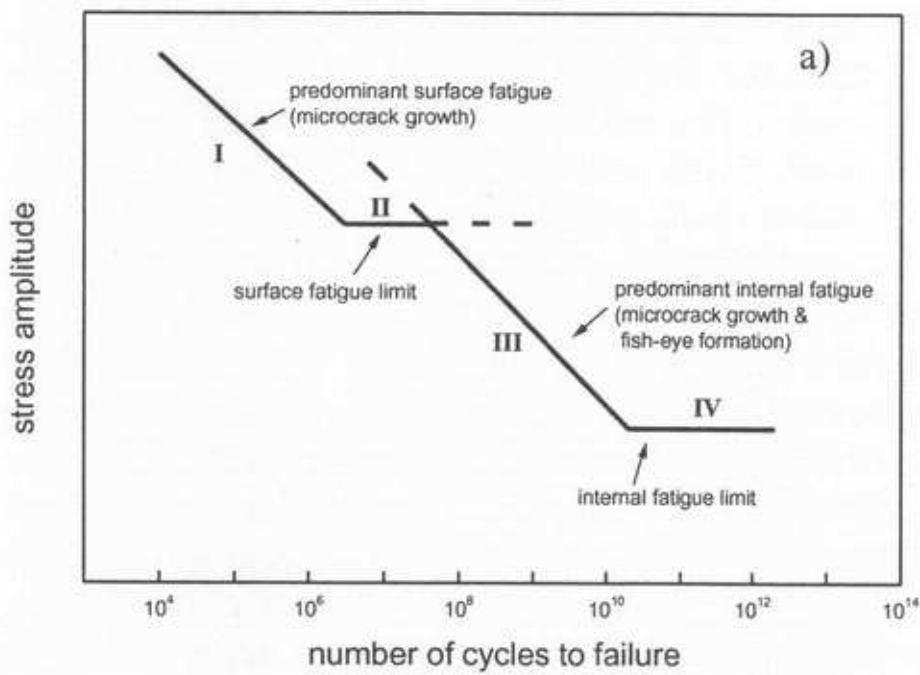
- lopatky parních turbín -  $10^{11}$  cyklů,
- hřídele parních turbín a elektrických generátorů -  $1,5 \cdot 10^{10}$  cyklů,
- klikové hřídele spalovacích motorů -  $10^{10}$  cyklů,
- součásti klikových mechanismů spalovacích motorů -  $5 \cdot 10^8$  cyklů,
- hnací hřídele -  $3,6 \cdot 10^8$  cyklů,
- železniční nápravy -  $2 \cdot 10^8$  cyklů,
- železniční kolejnice -  $1,5 \cdot 10^7$  cyklů,
- součásti kovacích lisů a strojů -  $10^7$  cyklů,
- hlavní nosníky železničních mostů -  $2 \cdot 10^6$  cyklů.

## **4.2 Únavová životnost při gigacyklovém zatěžování**

Od počátku výzkumu životnosti (únavy) materiálů v 19. století byla mez únavy ( $\sigma_c$ ) chápána jako hodnota napětí při kterém se materiál neporušil do  $10^7$  počtu cyklů. Z této teorie vznikl předpoklad, že materiál vydrží nekonečný počet cyklů při napětí menším nebo rovno  $\sigma_c$ . Studie a zkoušky z posledních desítek let ale ukázaly, že k porušení materiálů dochází i při mnohem větším počtu cyklů, dokonce i v gigacyklové oblasti ( $10^9$  a více cyklů), přestože je v tomto případě hodnota cyklické plastické deformace  $10^{-5}$  i méně. Takto malá hodnota nejde experimentálně změřit, a proto se odhaduje z Manson-Coffinových křivek

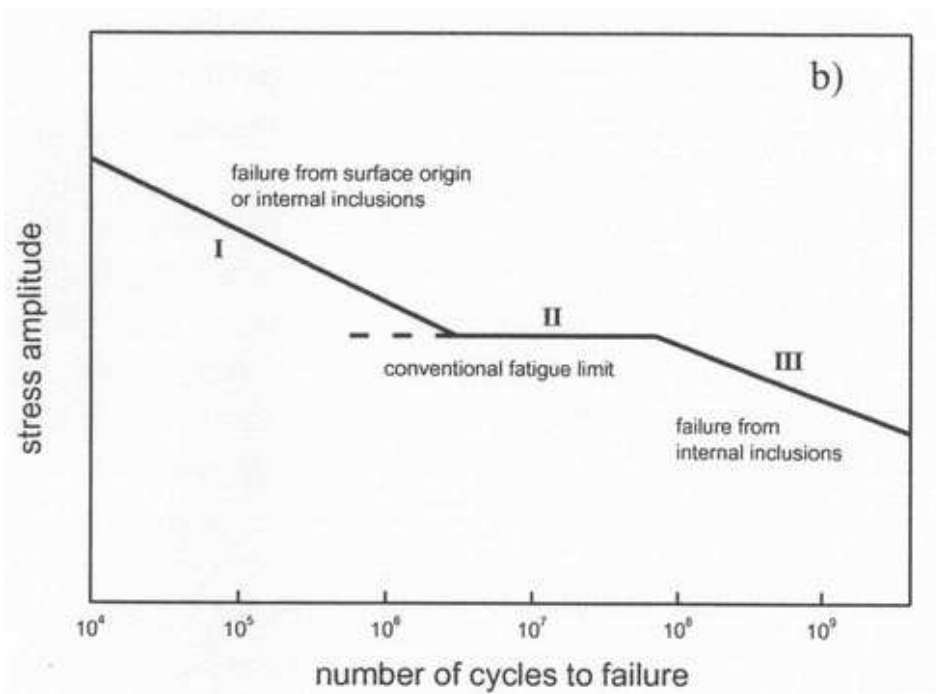
Přestože jsou oblasti nízkocyklové a vysokocyklové únavy dostatečně probádány, chování materiálů v oblasti gigacyklové únavy není dosud zcela přesně popsáno. Toto je také způsobeno velkou nákladností zkoušek i v případě použití vysokofrekvenčního zatěžování. Na dosažení např.  $10^{10}$  počtu cyklů při vysokofrekvenčním namáhání je potřeba přibližně týden, ale na prozkoumání gigacyklové oblasti únavy je nutné dosáhnout hodnot až  $10^{11}$  –  $10^{12}$  počtu cyklů, což je extrémně náročné. Za takto dlouhou dobu zatěžování je zkušební proces ovlivněn mnoha faktory. Jsou pokusy popsat gigacyklovou oblast modelovými výpočty, ale jejich výsledky nejsou dostatečně přesné důsledkem velké složitosti matematického popisu vlivů všech faktorů na zatěžování.

V současnosti existují dvě teorie pro tvar Wöhlerových křivek v gigacyklové oblasti (viz. obr. 16a), 16b).



I – převažující porušení z povrchu, II – konvenční mez únavy, III – převažující porušení pod povrchem, IV – nekonečná únavová životnost

Obr.16a) - schematické znázornění S-N křivky v gigacyklové oblasti [9]



I – převažující porušení z povrchových i podpovrchových vrstev, II – konvenční mez únavy, III – převažující porušení pod povrchem,

Obr. 16b)-schematické znázornění S-N křivek v gigacyklové oblasti [9]

V části označené I je oblast nízkocyklové a vysokocyklové únavy, poté křivka přechází při  $10^6$  počtu cyklů zlomem do vodorovné oblasti – oblasti trvalé pevnosti – oblast II. Přejít mezi nízkou a vysokocyklovou únavou může mít různé hodnoty počtů cyklů. Tato hodnota je závislá na vlastnostech materiálu.

V nízkocyklové oblasti se vyskytuje převážně porušení z povrchu, porušení vznikající pod povrchem jsou vzácné.

Oblast II je nazvána konvenční mez únavy, jelikož je obvyklá u vysokocyklového zatěžování.

Oblast III -začátek gigacyklové únavy . V rozmezí  $10^8$  až  $10^9$  cyklů začíná iniciace trhlin pod povrchem materiálu. V tomto místě se rozcházejí teorie o gigacyklové únavě. Předpokladem jedné z teorií je, že v oblasti III dojde k porušení, a to iniciací pod povrchem (obr.13b). Proto u této teorie je počet cyklů do porušení známý. Tudiž materiál vydrží konečný, ale velmi velký počet cyklů ( $10^{10}$  až  $10^{12}$ ). Mechanismus porušení bývá v této oblasti řízen nekovovými inkluzemi případně defekty pod povrchem.

Princip druhé teorie je zjištění, že na křivce III nastane zlom a Wöhlerova křivka přejde do oblasti IV- do nekonečné únavové životnosti, kdy materiál vydrží nekonečný počet cyklů. Což je mez únavy v gigacyklové oblasti únavy.

Další faktor zvyšující pravděpodobnost porušení iniciovaného pod povrchem je podle Mukaramiho [26] „ zachycení vodíku “ nekovovou inkluzí. Nastává vodíkové zkřehnutí, což způsobí výrazné zvýšení koncentrace napětí a z toho plynoucí usnadnění iniciace trhliny zevnitř materiálu.

Pro popis interakce vodíku s materiálem existuje více teorií. Základní představy o vlivu vodíku na zkřehnutí oceli jsou v práci Hyspecké a Mazance [54]. Jedna z jejich teorií předpokládá, že přítomnost vodíku v oceli vede k poklesu kohézní pevnosti – tj. dekohézní teorie vodíkové křehkosti. V této teorii je předpoklad, že v těsné blízkosti čela trhliny, kde se koncentruje vodík dochází ke vzniku vysoké úrovně tahové aerostatické složky elastického napětí. Při kritické koncentraci vodíku v určitých místech mřížky dochází k nukleaci a růstu trhliny do míst s nízkým obsahem vodíku, kde se trhlina zastaví. Popsaný proces se opakuje po určitém čase, když se dosáhne potřebného místního zvýšení koncentrace vodíku na čele trhliny. Proces šíření trhliny při výskytu vodíku v materiálu je tedy děj nespojitý.

Takai a kol.[55] dále zjistili, že nekovové inkluze mnohem častěji zachytávají vodík než je to u dislokací, hranic zrn apd. Tento efekt je podporován zvýšenými teplotami, například v důsledku tepelného zpracování. Za těchto podmínek dochází ke zvýšení množství vodíku zapříčiněné difuzí z okolního prostředí materiálu. V tuto chvíli může být porušování při velkém počtu cyklů přisouzeno vodíkovému zkřehnutí (Hydrogen Embrittlement). V podmínkách, kdy není vodíkové spojení schopné vytvořit vodíkové zkřehnutí, nastává mechanismus interakce vodíku a plastické deformace. Podstatou tohoto mechanismu je existence výrazné interakce mezi vodíkem a dislokací.

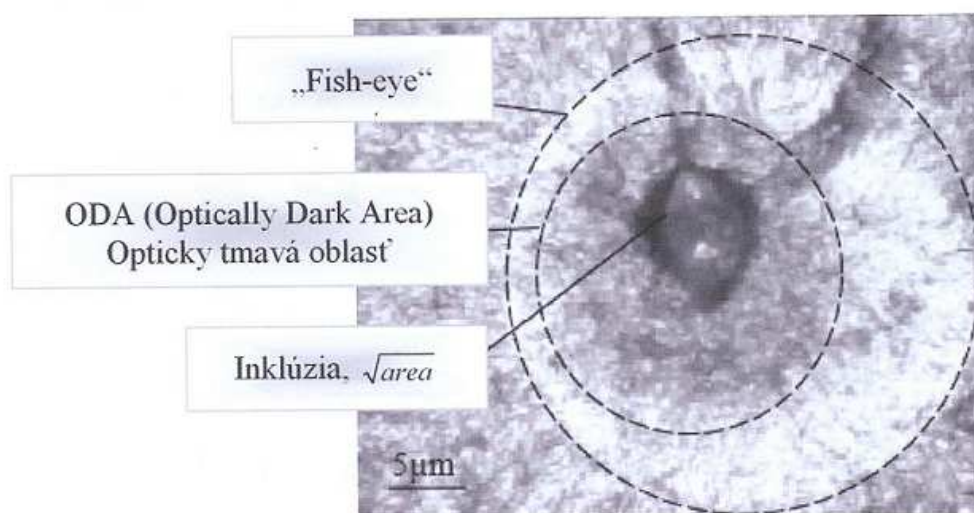
Přestože jsou stále vytvářeny různé modely mechanismu interakce vodíku z hlediska napětí v okolí inkluze, tato problematika není ještě zcela uzavřená [6, s.23]

### 4.3 Únavové porušení „fish eye“

V předešlé kapitole byla probírána iniciace trhlin a únavové porušení v gigacyklové oblasti únavy. Bylo řečeno, že ještě při  $10^8$  počtu cyklů (konvenční mez únavy) se únavová trhlina šíří většinou z povrchu vzorku. Při počtu cyklů dosahujících  $10^9$  se začíná materiál porušovat iniciací pod povrchem. Za těchto podmínek má počáteční lomová plocha typický tvar, který je nazván „fish eye“ (rybí oko). Toto porušení se může vyskytnout i ve vysokocyklové oblasti únavy. Pro výskyt tohoto jevu ve vysokocyklové oblasti je potřeba, aby defekt pod povrchem měl určitou kritickou velikost, a poté se trhlina může šířit pod povrchem, a ne z povrchu, jak je to v této oblasti únavy obvyklé.

Podle Kopase [6] je výskyt porušení „fish eye“ úzce spojen s přítomností podpovrchových vad a inkluzí různých typů v materiálu. „Fish eye“ porušení nemá žádnou závislost na volném povrchu materiálu.

Proces vzniku a růstu „fish eye“ je spojen s morfoloickou oblastí nazvanou „Optical Dark Area“ – (ODA). Plocha této „opticky tmavé oblasti“ (ODA) je zvětšována s narůstajícím počtem cyklů, proto je tuto oblast obtížné pozorovat po porušení při malém počtu cyklů. ODA vzniká pomalým šířením trhliny vevnitř materiálu. Doba vzniku ODA představuje velký časový úsek z celkové únavové životnosti. Jedna z teorií k pomalému šíření trhlin pod povrchem je následující. V místě šíření trhliny pod povrchem se nevyskytuje kyslík, který by oxidací napomáhal k rychlejšímu šíření trhliny jak tomu je u šíření trhlin z povrchu. Prostředí iniciace trhliny pod povrchem lze popsat jako vakuum nebo odlišnou atmosféru, než ta co působí na povrchu součásti. Proto v těchto speciálních podmínkách dochází k pomalejšímu růstu trhliny. Toto prostředí také kladně ovlivňuje drsnost lomové plochy u „fish eye“.

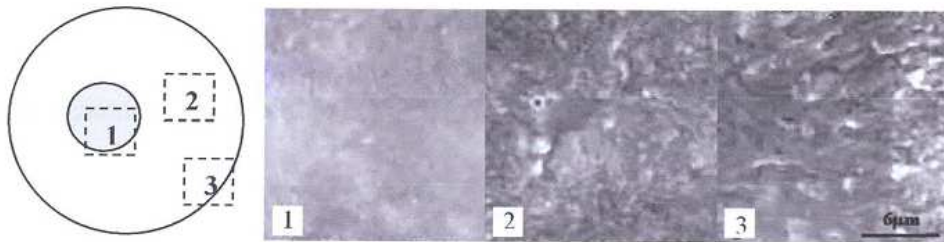


Obr. 17 – „Fish eye“

Trhlina vzniká v blízkosti povrchu a šíří se ve všech směrech stejně, dokud nedosáhne povrchové vrstvy se zbytkovým tlakovým napětím. Toto tlakové napětí zabrání dalšímu šíření

trhliny na povrch. Trhlina se po dosažení povrchové vrstvy začne šířit dovnitř zkoušeného materiálu, kde nejsou zbytková tlaková napětí. Lom nastává až dosáhne trhlina kritické velikosti. Výsledný tvar „fish eye“ může být kruh, nebo elipsa vzniklá při výrazném tlakovém napětí, které může být ovlivněno tvarem a orientací inkluze vzhledem ke směru působícího zatížení [6].

Morfologii lomové plochy „fish eye“ lze rozdělit na tři oblasti označené 1,2,3.



Obr. 18 – morfologické oblasti 1,2,3 u „fish eye“ [6]

Oblast 1 je nejmenší z těchto oblastí, je charakteristická plochým lomovým profilem povrchu v bezprostřední blízkosti inkluze, z které únavový lom začíná. Lomová oblast 2 se vyznačuje postupným zvyšováním drsnosti lomové plochy směrem od místa iniciace únavové trhliny. Oblast 3 oproti oblastem 1 a 2 pokrývá velkou část lomové plochy. V této oblasti se mohou vyskytovat výrazné radiální stupně.



Obr.19- lomová plocha a „fish eye“ [9]

Při hodnocení vlivu inkluzí na únavovou životnost  $\sigma_w$ , kde  $\sigma_w$  je mez únavy u gigacyklové oblasti, se podle Murakamiho [26] zavádí parametr plochy označený  $\sqrt{area}$  (viz. obr. 17) při předpokladu, že velikost nekovové inkluze bude ekvivalentní velikosti malé trhliny. Tento předpoklad vychází z toho, že trhliny vznikají na rozhraní inkluze s matricí, nebo přímo v inkluzi v důsledku jejího prasknutí [6, s.25].

#### 4.4 Vliv dalších faktorů na únavu materiálů

**Vliv druhu zatěžování** – má rozhodující vliv na mez únavy. Přibližné vztahy mezi hodnotami meze únavy pro základní druhy zatěžování – tah-tlak, ohyb, krut :

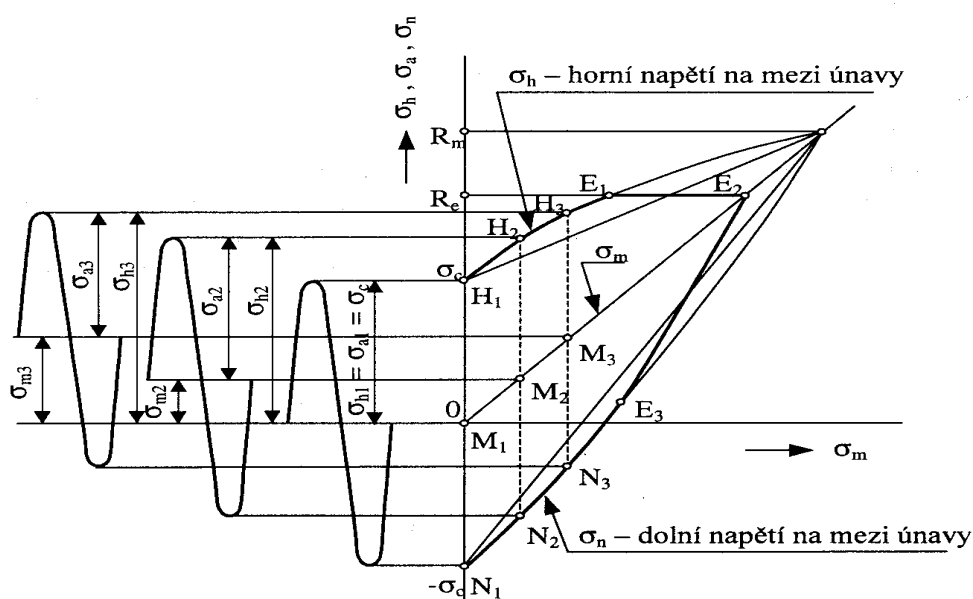
$$\sigma_{oC} = 1,3 \cdot \sigma_C = 1,73 \cdot \tau_C , \quad (15)$$

$$\sigma_{oC} = 1,14 \cdot \tau_C = 1,6 \cdot \sigma_C , \quad (16)$$

kde:  $\sigma_{oC}$  – mez únavy v ohybu,  
 $\sigma_C$  – mez únavy v tahu-tlaku,  
 $\tau_C$  – mez únavy v krutu.

První vztah platí pro oceli, druhý pro tvárné litiny. Z předešlých vzorců je zřejmé, že reakce obou skupin materiálu na určitý typ ztěžování jsou zcela odlišné.

**Vliv asymetrie zátěžného cyklu** – hodnota meze únavy je závislá na asymetrii zátěžného cyklu, a pro různé druhy zátěžných cyklů vzrůstá nebo klesá podle velikosti a znaménka statického předpětí. Grafickým zpracováním této závislosti je Haighův nebo Smithův diagram (obr. 20)



Obr. 20 - Smithův diagram

Pro stanovení těchto diagramů bylo navrženo několik vztahů vyjadřující závislosti mezní amplitudy zátěžného cyklu na středním napětí cyklu. Nejpoužívanější vztah:

$$\sigma_a = \sigma_C \cdot [1 - (\sigma_m / R_m)^\alpha] , \quad (17)$$

kde:  $\sigma_a$  – mezní amplituda napětí,  
 $\sigma_m$  – střední napětí cyklu,  
 $\alpha$  – exponent (1,0-2,0).

**Vliv velikosti strojní součástky** – zkoušky pro stanovení Wöhlerovy křivky a stanovení meze únavy se provádějí na hladkých válcových vzorcích o průměru 6 až 10 mm. Pro aplikaci těchto výsledků na rozměrnější součásti je však třeba znát vliv velikosti vzorku na mez únavy.

Při zatěžování v ohybu a krutu se tento vliv vyjadřuje pomocí součinitele velikosti:

$$k_V = \sigma_{oCd} / \sigma_{oC} , \quad (18)$$

kde:  $\sigma_{oCd}$  - mez únavy vzorku nebo součásti o charakteristickém rozměru d,  
 $\sigma_{oC}$  - mez únavy vzorku o průměru 6-10 mm.

Tento vliv je však významný jen při zatěžování s gradientem napětí, tedy v případě zatěžování ohybem a krutem, kdy napětí vykazuje lineární pokles od povrchu ke středu vzorku. Při zatěžování tahem-tlakem není vliv velikosti součásti významný.

**Vliv vrubu na mez únavy** – konstrukční vruby (např. ostré zářezy, drážky, osazení, otvory) i technologické vruby (stopy po obrábění, okujený povrch, atd.) mají velký vliv na únavové charakteristiky. V okolí vrubu dochází při zatížení k nerovnoměrnému rozdělení napětí a jeho účinkem je vytvoření plastické zóny. Nejvyšší koncentrace napětí a deformace (plastické i elastické) vzniká ve vrcholu vrubu, proto se stává místem iniciace trhliny, jež se dále šíří i do oblasti namáhané pouze elasticky.

Snížení meze únavy účinkem vrubu je definováno součinitelem vrubu  $K_f$ :

$$K_f = \sigma_C / \sigma_{CV} , \quad (19)$$

kde:

$\sigma_C$  - mez únavy vzorku bez vrubu,

$\sigma_{CV}$  - mez únavy vzorku s vrubem.

**Přítomnost apriorních trhlin** – apriorní trhliny submikroskopického i mikroskopického rozměru způsobují v tělese koncentraci napětí a vytváří tak předpoklady pro absenci nukleačního stádia únavového procesu a tím i výrazně snižují mez únavy.

**Vliv víceosé napjatosti** – víceosá napjatost vzniká v důsledku zatěžování kombinovaným namáháním, nebo v okolí vrubu i při prostém namáhání. Působí-li maximální napětí od více druhů namáhání ve stejném místě a vždy současně, tak se urychluje rozvoj únavového poškození a tím klesá hodnota meze únavy. Jestliže nepůsobí namáhání současně, není vliv na únavu tak velký.

**Vliv teploty** – vliv teploty na únavu byl popisován v kap (4.1.1). Jestliže teplota materiálu stoupá, mez únavy klesá. Naopak, když teplota materiálu klesá, mez únavy stoupá, dokud není dosaženo tranzitní teploty, při které mez únavy rapidně klesá (materiál zkréhne).



**Vliv stavu povrchu** – jelikož k iniciaci trhlin dochází převážně na povrchu součásti, proto má stav povrchu významný vliv na únavové vlastnosti. Vliv stavu povrchu na mez únavy vyjadřuje součinitel stavu povrchu  $K_p$ , který je definován takto:

$$K_p = \sigma_{Cp} / \sigma_C, \quad (20)$$

kde:

$\sigma_{Cp}$  - mez únavy tělesa s určitou drsností povrchu,

$\sigma_C$  - mez únavy tělesa s leštěným povrchem s drsností  $R_a = 0,025 \mu\text{m}$

Součinitel stavu povrchu je funkcí meze pevnosti materiálu  $R_m$  a s rostoucí hodnotou meze pevnosti klesá. Materiály o vyšší pevnosti jsou tedy více citlivé na stav povrchu než materiály s nižší pevností.

**Vliv zbytkových pnutí v povrchové vrstvě** – tyto pnutí vznikají, dojde-li k plastické deformaci. Zbytková napětí v povrchové vrstvě mohou být tahová nebo tlaková, což záleží na tom, kde nastala deformace. Příčiny deformace mohou být:

- mechanické síly,
- ohřev nebo ochlazování,
- fázová transformace nebo vylučování nových strukturních složek,
- absorpce nových látek.

Tahová pnutí zhoršují, naopak tlaková pnutí zlepšují únavovou pevnost.

**Vliv chemicko-tepelného zpracování** – nitridace, karbonitridace, cementace, nitrocementace a další chemicko-tepelné zpracování jsou používány nejen z důvodu zvýšení odolnosti součástí proti opotřebení, ale také jako zlepšení únavových vlastností materiálů.

Tyto chemicko-tepelné zpracování zvyšují tvrdost a tlakové pnutí v povrchových vrstvách, a tím zvyšují mez únavy materiálů. Např. u cementace to je o 30-70%, u nitridace o 50-70% [1].

## 5. Závěr

Tato práce se zabývá únavou konstrukčních materiálů a to hlavně vlivu frekvence zatěžování na únavové vlastnosti materiálů. Životnost (únavu) je ovlivněna velkým množstvím vlivů, jako např. prostředím zatěžování, velikostí středního napětí, přítomností vrubu, teplotou, kvalitou povrchu, chemicko-tepelným zpracováním a mnoha dalšími. Nároky na konstrukční materiály jsou dnes kladeny hlavně na jejich odolnost proti porušení při dosažení vysokého počtu cyklů. Tyto hodnoty mohou dosahovat až  $10^9$  a většího počtu cyklů, což je oblast gigacyklové únavy. Pro dosažení gigacyklové oblasti jsou vzorky zatěžovány při vysoké frekvenci, která běžně dosahuje 20 kHz, což je 20 000 cyklů za vteřinu.

Na základě zjištěných poznatků z oblastí nízkofrekvenčního a vysokofrekvenčního zatěžování, únavové životnosti v nízkocyklové, vysokocyklové a gigacyklové oblasti lze konstatovat tyto závěry:

- 1) Součást zatěžovaná vysokofrekvenčně má často vyšší, zřídka stejnou mez únavy jako materiál zatěžovaný při běžných (nízkých) frekvencích. Jestliže je tedy součást zatěžována vysokofrekvenčně, je kladně ovlivněna její životnost.
- 2) Významný aspekt vysokofrekvenčního zatěžování je zvyšující se teplota materiálu vlivem vysoké frekvence kmitů. Jednou z příčin zahřívání vzorku je absorpce ultrazvukových kmitů v mřížkových poruchách. Vysoká teplota snižuje mez únavy materiálu, a proto je nežádoucí. Tomuto se předchází chlazením součástí. Negativní vliv vysoké teploty na únavu může v určitých případech zastínit zvýšení meze únavy při vysokofrekvenčním zatěžování.
- 3) Na každý materiál působí vysokofrekvenční zatěžování odlišně. Velký vliv má např. na oceli, menší vliv byl pozorován na litinách. Významný vliv zvýšené teploty na mez únavy při vyšší frekvenci zatěžování lze pozorovat např. u austenitických ocelí, které se výrazně zahřívají již při nízkofrekvenčním zatěžování kolem 200 Hz.
- 4) S frekvenčním zatěžováním úzce souvisí dosažení gigacyklové oblasti únavy, kde se vyskytuje porušení „fish eye“, které je typické pro gigacyklovou únavu. Při tomto porušení začíná trhlinka růst zevnitř materiálu, a ne z povrchu, jak je běžné v nízkocyklové a vysokocyklové oblasti únavy.
- 5) Jelikož je zkoumání gigacyklové únavy velmi nákladné, není tato oblast únavy zcela probádána. Je zde několik teorií o životnosti a tvaru únavových křivek v gigacyklové oblasti. Rozdíl dvou hlavních teorií v popisu tohoto jevu je, zda-li se v gigacyklové oblasti objevuje „druhá“ mez únavy, nebo jestli se součást poruší po určitém počtu cyklů.

## **6. Použitá literatura**

- [1] VĚCHET S.; KOHOUT J.; BOKŮVKA O. *Únavové vlastnosti tvárné litiny*. Žilina: EDIS, 2002, ISBN 80-7100-973-3
- [2] PUŠKÁR A.; *Vysokofrekvenční únava materiálů*. Žilina, Edičné stredisko ŽU, ISBN 80-7100-118-X
- [3] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 1.vyd.Brno: CERM, 1999, ISBN 80-7204-130-4
- [4] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*, Brno: CERM, 2001, ISBN 80-7204-130-2
- [5] DYLAG Z.; ORLOŠ Z. *Únava materiálu a její zkoušení*. Praha: 1968, SNTL, L13-B3-IV-31/22147/VIII
- [6] KOPAS P.; *Únavová odolnost LGG a ADI liatin při gigacyklových režimoch zaťažovania*. Žilina: 2006, Dizertační práce na Strojnické fakultě na Katedře materiálového inženýrství. Školitel dizertační práce Prof. Ing. Otakar Bokůvka PhD.
- [7] BUČEK P. *Vliv nitridace na únavové vlastnosti LKG*. Brno, 2007. 26 s. Bakalářská práce na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc.
- [8] SLADKÁ J. *Vliv asymetrie zátěžného cyklu na únavové vlastnosti tvárné litiny*. Brno: 2001, Bakalářská práce na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Stanislav Věchet CSc.
- [9] PANTĚLEJEV L.; *Gigacyklová únava kovových materiálů*, [online], <[http://ime.fme.vutbr.cz/files/studijni\\_opory/gu/](http://ime.fme.vutbr.cz/files/studijni_opory/gu/)>

## 7. Seznam použitých zkratk a symbolů

A [-]	- parametr
a [-]	- konstanta regresní křivky
b [-]	- konstanta regresní křivky
b [-]	- elastický exponent křivky životnosti
c [-]	- plastický exponent křivky životnosti
dI/dN [m·cyklus <sup>-1</sup> ]	- rychlost šíření únavové trhliny
E [MPa]	- modul pružnosti materiálu v tahu
K[-]	- konstanty regresní křivky
K[-]	- parametr cyklické deformační křivky
K <sub>a</sub> [MPa·m <sup>-2</sup> ]	- amplituda součinitele intenzity napětí
K <sub>ath</sub> [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	- prahová hodnota amplitudy součinitele intenzity napětí
K <sub>f</sub> [-]	- součinitel vrubu
K <sub>p</sub> [-]	- součinitel stavu povrchu
k <sub>v</sub> [-]	- součinitel velikosti
m [-]	- parametr
m [-]	- materiálová konstanta
N [-]	- počet cyklů
N <sub>i</sub> [-]	- počet cyklů potřebných na vznik únavové trhliny
N <sub>p</sub> [-]	- počet cyklů na šíření únavové trhliny
N <sub>f</sub> [-]	- počet cyklů do lomu součástí
n [-]	- exponent cyklické deformační křivky
P [-]	- parametr
R [-]	- parametr
R <sub>e</sub> [MPa]	- mez kluzu
R <sub>m</sub> [MPa]	- mez pevnosti
R <sub>p0,2</sub> [MPa]	- mez kluzu
α [-]	- exponent
ε <sub>ap</sub> [-]	- amplituda plastické deformace
ε <sub>ae</sub> [-]	- amplituda elastické deformace
ε <sub>a</sub> [-]	- amplituda deformace
ε <sub>f</sub> ' [-]	- součinitel únavové tažnosti
σ [MPa]	- napětí
σ <sub>a</sub> [MPa]	- amplituda napětí
σ <sub>Cp</sub> [MPa]	- mez únavy tělesa s určitou drsností povrchu
σ <sub>CV</sub> [MPa]	- mez únavy vzorku s vrubem
σ <sub>d</sub> [MPa]	- dolní napětí zátěžného cyklu
σ <sub>f</sub> ' [MPa]	- součinitel únavové pevnosti
σ <sub>h</sub> [MPa]	- horní napětí
σ <sub>max</sub> [MPa]	- maximální napětí zátěžného cyklu
σ <sub>min</sub> [MPa]	- minimální napětí zátěžného cyklu
σ <sub>n</sub> [MPa]	- dolní napětí
σ <sub>oC</sub> [MPa]	- mez únavy v ohybu
σ <sub>oC</sub> [MPa]	- mez únavy vzorku o průměru 6-10 mm
σ <sub>oCd</sub> [MPa]	- mez únavy vzorku nebo součásti o charakteristickém rozměru d
τ <sub>C</sub> [MPa]	- mez únavy v krutu

