

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ



VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

ÚNAVA MATERIÁLU

doc. Ing. Halama Radim, Ph.D.
Ing. František Fojtík, Ph.D.
Ing. Martin Fusek, Ph.D.
Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.
Dr. Ing. Ludmila Adámková

Ostrava 2013

© doc. Ing. Halama Radim, Ph.D., Ing. František Fojtík, Ph.D., Ing. Martin Fusek, Ph.D., Ing.
Jaroslav Rojíček, Ph.D., Dr. Ing. Ludmila Adámková
© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
ISBN 978-80-248-3027-8



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ÚNAVA MATERIÁLU.....	3
1.1	ÚVOD.....	4
1.2	Způsoby skutečného zatěžování strojních součástí a konstrukcí	4
1.3	Fyzikální podstata únavového poškození.....	5
1.4	Wöhlerova křivka	7
1.5	Faktory, ovlivňující mez únavy	8
1.6	Chování materiálů při cyklickém zatěžování	13
1.7	Nízkocyklová únava materiálu při konstantním rozkmitu deformace	14
1.8	Vliv středního napětí na životnost součástí	17
1.9	Kumulace únavového poškození.....	17
2	POUŽITÁ LITERATURA	22



1 ÚNAVA MATERIÁLU



OBSAH KAPITOLY:

Cyklické zatěžování

Fyzikální podstata únavového poškození

Wöhlerova křivka

Mez únavy

Nízkocyklová únava materiálu při konstantním rozkmitu deformace

Kumulace únavového poškození



MOTIVACE:

Nejčastější příčinou porušení součástí v technické praxi bývá únavový lom. Únavový lom je výsledkem deformačních procesů, které probíhají v materiálu v důsledku opakovaného, časově proměnlivého zatěžování.



CÍL:

Proměnné zatížení periodické – základní typy. Charakteristiky cyklu zatížení. Fáze únavového poškození.

Mez únavy. Zkoušky vysokocyklové únavy materiálu.

Nízkocyklová únava. Cyklické změkčování/zpevňování. Křivky životnosti.



1.1 ÚVOD

Části strojů a konstrukcí jsou často vystaveny působení cyklického zatěžování, v důsledku čehož dochází k poškození v mikroobjemu materiálu. Se vzrůstajícím počtem cyklů dochází ke kumulaci poškození a k lomům dochází při napětí nižším, než je konvenční mez kluzu R_e . Poškození a lom způsobený cyklickým zatěžováním, bylo nazváno v roce 1839 J.V. Ponceletem únava materiálu. Tento název je používán dodnes.



Audio 1.1

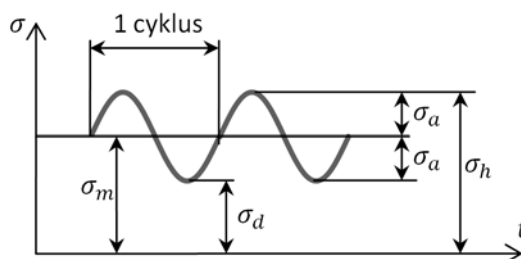
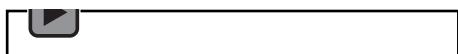


1.2 ZPŮSOBY SKUTEČNÉHO ZATĚŽOVÁNÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ A KONSTRUKCÍ

Zatěžování, se kterým se setkáváme v technické praxi lze rozdělit do dvou základních skupin. Je to jednak zatěžování deterministické, u kterého lze určit velikost namáhání podle exaktních vztahů a dále zatěžování náhodné. Deterministické zatěžování může být periodické (zpravidla harmonické) anebo neperiodické. V této kapitole se budeme zabývat pouze problematikou cyklického periodického zatěžování. V tomto případě předpokládáme, že vnější síly a napětí se mění zpravidla periodicky od jisté minimální hodnoty (dolní napětí) po maximální hodnotu (horní) napětí. Průběh napětí je zpravidla znázorňován funkcí sinus. Obecný průběh cyklického napětí můžeme považovat za průběh vzniklý superpozicí statické složky σ_m a amplitudy napětí σ_a (obr. 1).



Audio 1.2



Obr. 1

Pro střední napětí cyklu σ_m a amplitudu napětí σ_a platí následující vztahy

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (8.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} \quad (8.2)$$

kde σ_h je horní napětí cyklu a σ_d je dolní napětí cyklu.

Pomocí amplitudy napětí σ_a a středního napětí σ_m se definuje součinitel nesymetrie cyklu R



$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (8.3)$$

Pomocí součinitele nesymetrie cyklu můžeme vyjádřit amplitudu napětí σ_a a střední napětí σ_m následovně

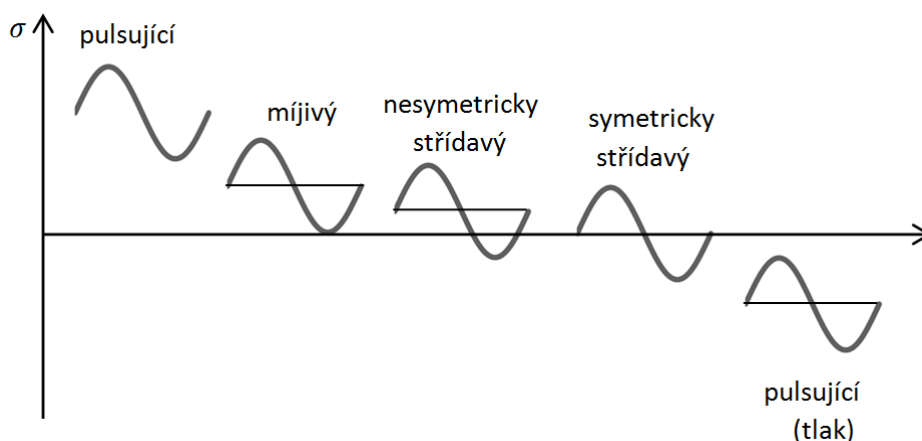
$$\sigma_a = \frac{\sigma_h}{2}(1 - R) \quad (8.4)$$

a

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h}{2}(1 + R) \quad (8.5)$$

Obdobné vztahy je možné použít pro další veličiny, jakými jsou například síly F , ohybové a kroutící momenty M_o, M_k , deformace ϵ .

Základním druhům klasické pružnosti odpovídají při cyklickém zatěžování tyto cykly (obr. 2).

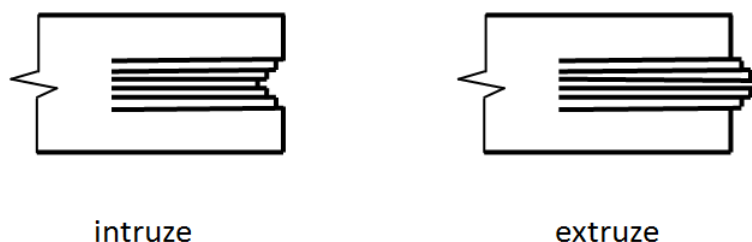


Obr. 2

1.3 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ

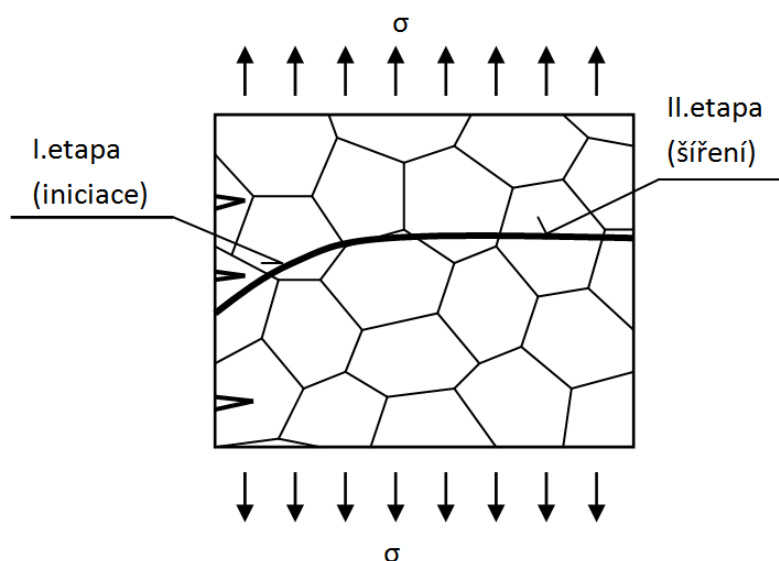
Ve skutečnosti jsou všechny materiály nehomogenní a anizotropní. V důsledku nehomogenit dochází k nárůstu napětí a ke vzniku (nukleaci) únavových mikrotrhlin. Únavová trhlinka vzniká nejčastěji na povrchu. V podstatě se rozlišují tři základní typy nukleačních míst: únavová skluzová pásma, hranice krystalických zrn a rozhraní mezi základní maticí a vměstky. Při cyklickém zatěžování dojde nejprve ke vznikům intruzí a extruzí, která zakončují na povrchu únavová skluzová pásma (obr. 3).



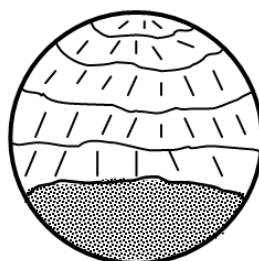


Obrázek 3

Stadium nukleace končí vytvořením povrchových mikrotrhlin ležících podél skluzových rovin (orientovaných ve směrech maximálních smykových napětí – obr. 4). Velká většina těchto mikrotrhlin se brzy zastavuje a neproniká do větší hloubky než několika desetin mm (I. etapa – tzv. krystalografický růst). Pouze některé rostou dále, navzájem se spojují a ovlivňují. Vznik a vzájemné spojování mikrotrhlin bývá často označováno jako iniciace únavových trhlin. Iniciace trhliny je ukončena, jakmile trhlina dosáhne hloubky asi pětinasobku průměru středního krystalografického zrna materiálu. Směr růstu trhlin se postupně mění do směru kolmého k největšímu hlavnímu napětí. V této II. etapě (zvané etapou nekystalografického růstu) roste obvykle již jen jediná trhlina – magistrální trhlina. Poslední fází únavového poškození je konečný náhlý lom. Lomy, způsobené únavou materiálu se zpravidla vyznačují dvěma charakteristickými, ostře ohraničenými lomovými plochami. První plocha je hladká, má často lasturovitý vzhled, jsou na ní zřetelné čáry, odpovídající vrstevnicím, které ukazují, jak se lom šířil po ploše průřezu. Druhá plocha je hrubozrná a vzniká při náhlém zlomení (obr. 5).



Obr. 4



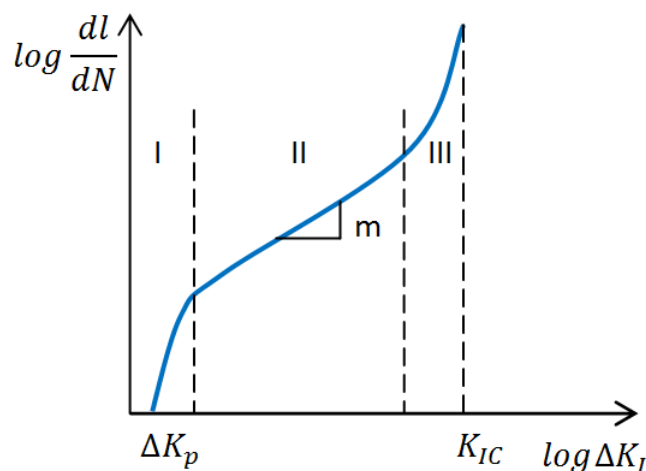
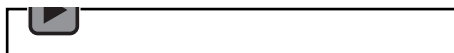
Obr. 5

Rychlost šíření únavových trhlin je závislá na faktoru intenzity napětí K_I (obr. 6).





Audio 1.3



Obr. 6

Křivka, znázorňující rychlost šíření únavových trhlin může být rozdělena do tří oblastí:

- 1) Prahová oblast - rychlost šíření únavových trhlin je nulová anebo velice malá. V obr. 6 veličina ΔK_p je rozkmit prahové hodnoty faktoru intenzity napětí. Pod touto hodnotou se únavové trhliny nešíří.
- 2) Střední oblast – závislost rychlosti šíření únavových trhlin na faktoru intenzity napětí v logaritmických souřadnicích je téměř lineární. V této oblasti platí Paris-Erdoganův zákon.

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K_I)^m \quad (8.6)$$

kde A, m jsou materiálové konstanty.

- 3) Nestabilní oblast – trhliny rostou velice rychle a následuje lom.

1.4 WÖHLEROVA KŘIVKA

Závislost mezi amplitudou napětí a životností součástí je znázorněna Wöhlerovou křivkou. V technické praxi se zpravidla Wöhlerova křivka znázorňuje v semilogaritmických souřadnicích, přičemž na osu pořadnic se vynáší amplituda napětí a na osu úseček cykly v logaritmických souřadnicích (obr. 7). Celý Wöhlerův diagram je možno rozdělit na tři úseky.

V prvním úseku ($N \cong 10^3$ cyklů), kdy počet cyklů je malý, se jedná o oblast statických lomů.

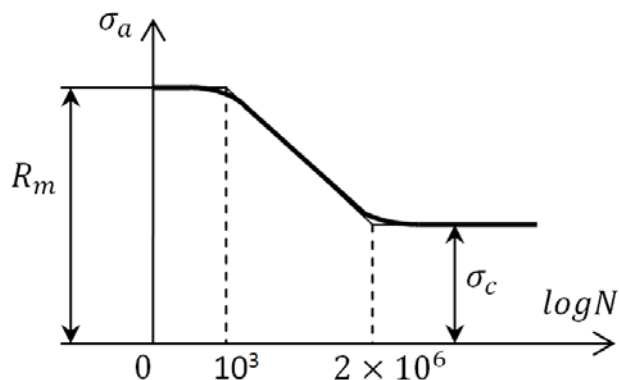
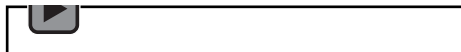
Ve druhém úseku amplituda napětí klesá. Jedná se o tzv. úsek časové pevnosti s omezenou životností. Dochází k porušení nízkocyklovou únavou.



Ve třetím úseku, asi při $N \geq 2 \times 10^6$ cyklů, je zřejmé, že se amplituda napětí nemění. To znamená, že při této amplitudě vydrží materiál neomezeně dlouho. Hovoříme o mezi únavy materiálu. Mez únavy lze definovat jako největší napětí, které nevede k lomu ani po překonání smluvní hranice 10^7 cyklů. Tato definice platí u ocelí; slitiny hliníku nemají konstantní mez únavy.



Audio 1.4



Obr. 7

Mez únavy se dá určit jednak experimentálně, rovněž ale bylo prokázáno, že mez únavy hladkých těles je funkcí konvenční pevnosti R_m .

Pro konstrukční oceli s mezí pevnosti $R_m = (500 \div 1500) \text{ MPa}$ platí následující vztahy:

$$\text{Tah-tlak } \sigma_c = 0.36R_m + 13$$

$$\text{Míjivý tah } \sigma_{hc} = 0.59R_m + 38$$

$$\text{Plochý ohyb } \sigma_{o,c} = 0.29R_m + 111$$

$$\text{Míjivý ohyb } \sigma_{o,hc} = 0.4R_m + 317$$

$$\text{Krut } \tau_c = 0.21R_m + 49$$

$$\text{Míjivý krut } \tau_{hc} = 0.1R_m + 485$$

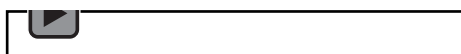
$$\text{Ohyb za rotace } \sigma_{oR,C} = 0.36R_m + 44.$$

1.5 FAKTORY, OVLIVŇUJÍCÍ MEZ ÚNAVY

Mez únavy hladkého tělesa (bez koncentrátorů napětí) je závislá na celé řadě faktorů, k nimž zejména patří velikost tělesa, jakost povrchu, nesymetrie zatěžovacího cyklu, vliv víceosé napjatosti.



Audio 1.5



Vliv velikosti tělesa, vliv gradientu napětí

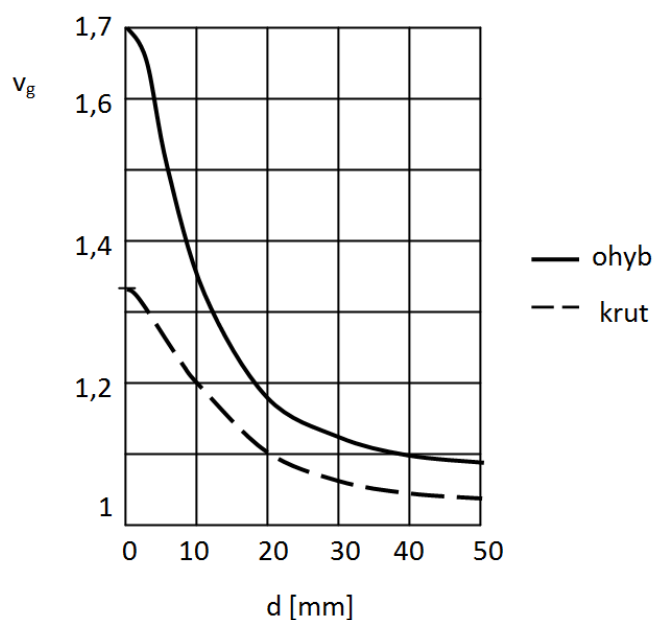
Mez únavy s rostoucím rozměrem vzorku poněkud klesá, což je dáno odlišnostmi povrchových vrstev a jádra průřezu, která je zpravidla u větších vzorků horší.

Podle Němce a Puchnera je možno vliv velikosti vyjádřit následovně

$$v = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{D}{d}}, \quad (8.7)$$

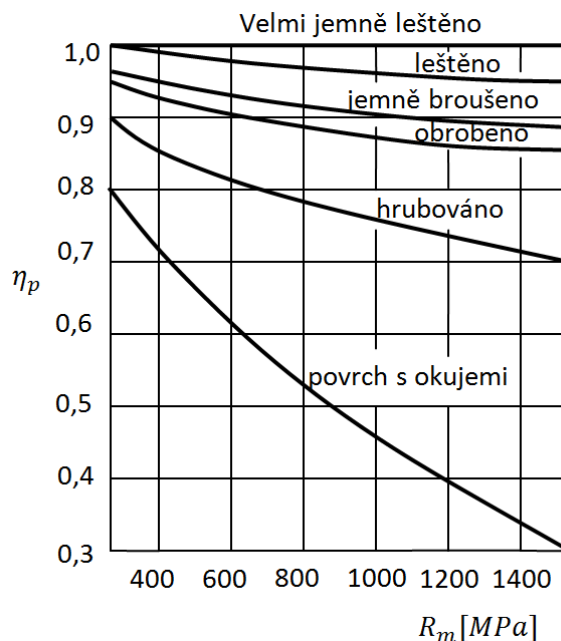
kde d je rozměr menšího vzorku a D rozměr většího.

Při ohybu a krutu se rovněž uplatňuje vliv gradientu napětí (napětí roste se vzdáleností od osy). Proto je např. mez únavy v ohybu větší než mez únavy v tahu, a to tím více, čím je menší průměr zkušebního vzorku.



Obr. 8





Obr. 9

Vliv gradientu napětí se projevuje zejména u součástí menších rozměrů (obr. 8), u rozměrů větších než cca 50 mm je jeho vliv zanedbatelný. Důvodem je skutečnost, že u součástí větších rozměrů se méně projeví odlišné vlastnosti povrchové vrstvy, která má vlivem technologického zpracování poněkud jiné mechanické vlastnosti než jádro součástí. Vliv gradientu napětí pro kruhový průřez je znázorněn na obr. 8.

Celkový součinitel velikosti součástí, namáhané střídavým ohybem v_σ (krutem v_τ), je závislý na součiniteli gradientu napětí v_g a součiniteli velikosti, tedy

$$v_\sigma = f(v_g, v), \quad (8.8)$$

$$v_\tau = f(v_g, v). \quad (8.9)$$

Vliv jakosti povrchu

Protože k nukleaci trhlin dochází zpravidla v povrchové vrstvě, je mez únavy ovlivňována jakostí povrchu. Tento vliv je ve výpočtech zohledněn součinitelem jakosti povrchu η_p , který je definován jako podíl meze únavy součástí s daným povrchem k mezi únavy součástí s povrchem leštěným (obr. 9).

Při namáhání krutem je součinitel jakosti povrchu roven

$$\eta_{pk} = \frac{1 + \eta_p}{2}. \quad (8.10)$$



Mez únavy hladké části (bez vrubu) v tahu- tlaku nebo ohybu je pak definována následovně

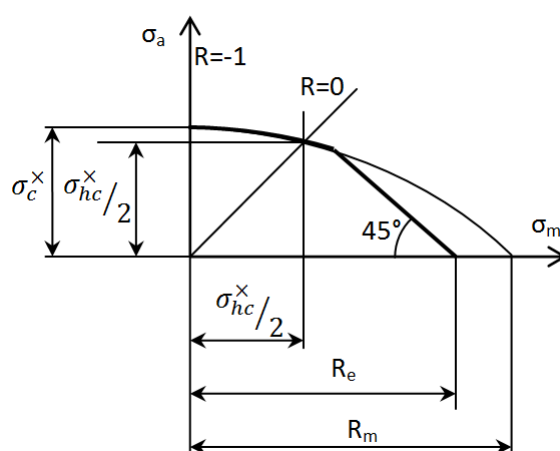
$$\sigma_c^x = \sigma_c v_\sigma \eta_p \quad (8.11)$$

a v krutu

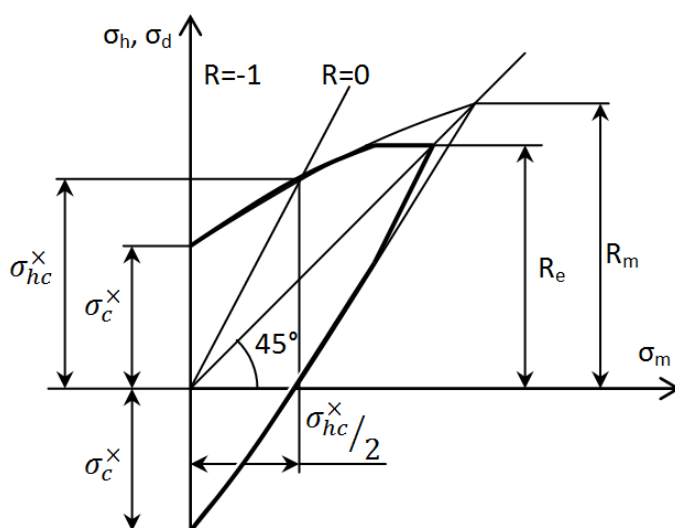
$$\tau_c^x = \tau_c v_\tau \eta_{pk}, \quad (8.12)$$

kde σ_c, τ_c jsou meze únavy leštěných vzorků.

Vliv nesymetrie cyklu



Obr. 10



Obr. 11



Skutečné zatěžování součástí je zpravidla nesymetrické, se statickou složkou napětí σ_m různou od nuly. Experimenty bylo prokázáno, že tahové střední napětí snižuje amplitudu napětí na mezi únavy, tlakové ji naopak zvyšuje.



Audio 1.6



Závislost $\sigma_a = f(\sigma_m)$ je znázorněna v Haighově diagramu (obr. 10). Skutečný tvar tohoto diagramu se zpravidla idealizuje. V praxi se nejčastěji používá náhrada Goodmanovou přímkou

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c^x} = 1 - \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (8.13)$$

nebo Gerberovou parabolou

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_c^x} = 1 - \left(\frac{\sigma_m}{R_m} \right)^2. \quad (8.14)$$

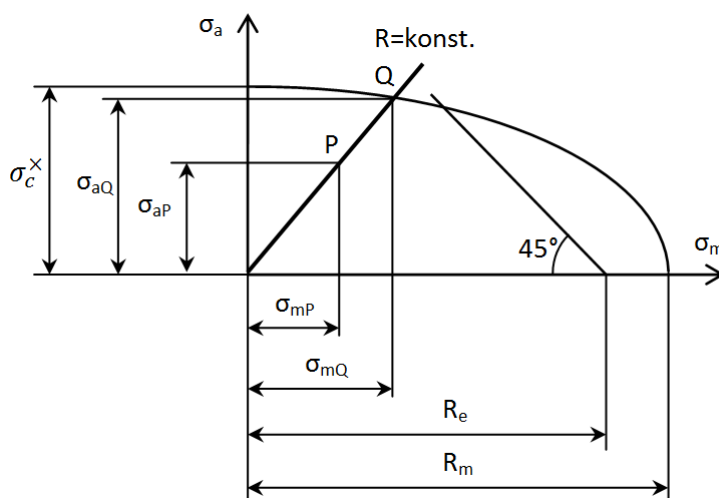
Celý diagram ovšem není použitelný, protože střední složka i amplituda napětí nesmí překročit mez kluzu. Proto je diagram omezen přímkou svírající s vodorovnou osou úhel 45° .

V praxi se rovněž používá diagram Smithův, udávající závislost $\sigma_h = f(\sigma_m)$ (obr. 11).

Stanovení bezpečnosti vůči mezi únavy

Jestliže je amplituda napětí σ_{aP} a střední napětí σ_{mP} a meznímu stavu odpovídá v Haighově diagramu bod Q (obr. 12), pak součinitel bezpečnosti je definován následovně

$$k = \frac{\sigma_{aQ}}{\sigma_{aP}} = \frac{\sigma_{mQ}}{\sigma_{mP}} \quad (8.15)$$



Obr. 12



1.6 CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ PŘI CYKLICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ

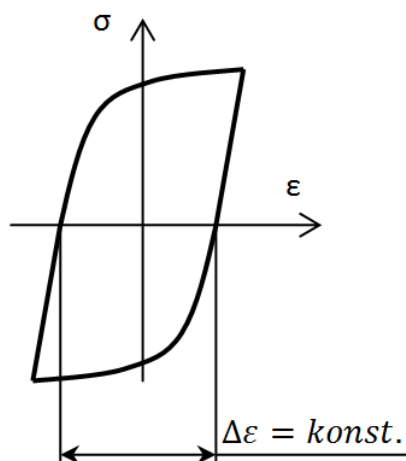
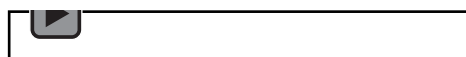
Chování materiálů při cyklickém zatěžování je možno rozdělit do čtyř základních skupin:

- 1) Dokonale pružné- mez úměrnosti není překročena v průběhu prvního ani dalších zatěžných cyklů.
- 2) Elastické přizpůsobení – plastická deformace zaujímá místo v prvních cyklech zatížení, ale v dalších cyklech je dosaženo elastického stavu.
- 3) Cyklická plasticita – toto chování je charakterizováno uzavřenou elasticko-plastickou křivkou napětí –deformace (hysterezní smyčkou) - obr.13. Tento případ vede k porušení nízkocyklovou únavou.
- 4) Postupný nárůst plastické deformace vedoucí k vyčerpání plastických vlastností materiálu (cyklické tečení anebo ratchetting) – obr.14. Tento stav není v technické praxi přípustný.

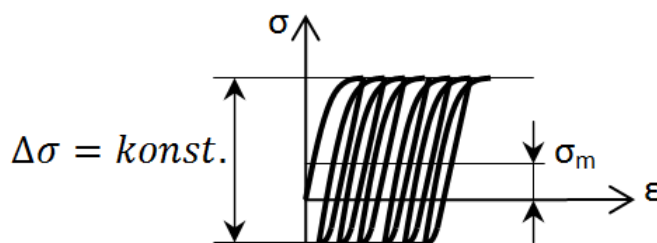
V našem studiu se podrobněji seznámíme s problematikou č.3 – Nízkocyklovou únavou materiálu.



Audio 1.7



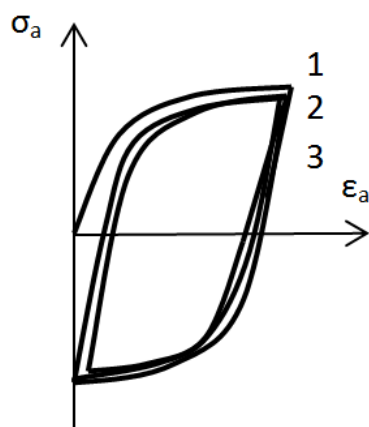
Obr.13



Obr. 14



1.7 NÍZKOCYKLOVÁ ÚNAVA MATERIÁLU PŘI KONSTANTNÍM ROZKMITU DEFORMACE

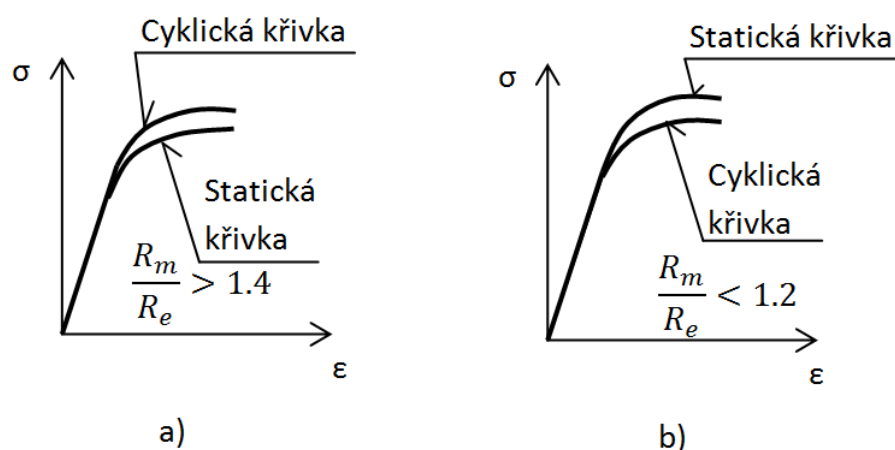
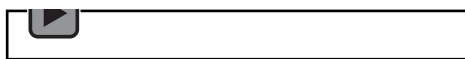


Obr. 15

Jak už bylo uvedeno v předcházejícím textu, v případě nízkocyklové únavy materiálu při konstantním rozkmitu deformace je chování materiálu charakterizováno uzavřenou hysterezní smyčkou. Ve skutečnosti dochází v průběhu prvních zátěžných cyklů ke změnám mechanických vlastností materiálu - zpevňování anebo ke změkčování materiálů. Po několika málo cyklech zatížení dojde k ustálení hysterezní smyčky (obr. 15). Jestliže vrcholy ustálených hysterezních smyček (stanovují se pro polovinu životnosti) pro různé amplitudy napětí proložíme křivku, dostaneme cyklickou deformační křivku. V případě cyklického zpevňování amplituda napětí vzrůstá (cyklická deformační křivka je nad křivkou statickou - obr.16a), v případě cyklického změkčování amplituda napětí klesá (cyklická deformační křivka je pod křivkou statickou - obr.16b).



Audio 1.8



Obr.16

Obecně platí, že pevné materiály zpevněné např. tvářením za studena v průběhu únavového procesu cyklicky změkčují a naopak měkké materiály cyklicky zpevňují. Experimenty bylo prokázáno, že k cyklickému změkčování dochází u materiálů s poměrem meze pevnosti k mezi kluzu $R_m/R_e < 1.2$ a k cyklickému zpevňování, jestliže $R_m/R_e > 1.4$.



Schéma cyklické deformační křivky a ustálené hysterezní smyčky je na obr.17 resp. 18. Výška hysterezní smyčky je rovna dvojnásobné amplitudě napětí, šířka dvojnásobné amplitudě plastické deformace.

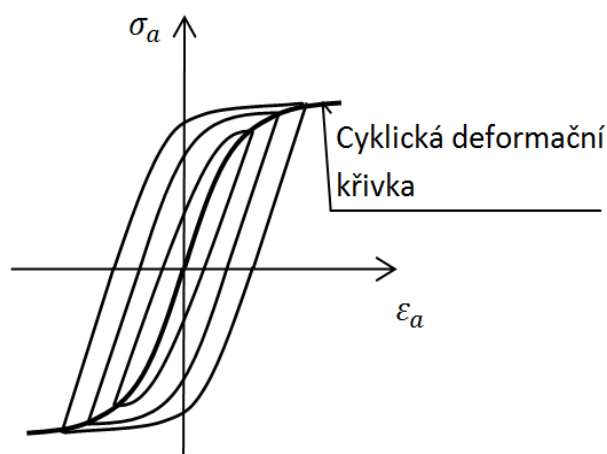
Mezi amplitudou napětí a plastické deformace platí vztah

$$\sigma_a = K \cdot \varepsilon_{ap}^n \quad (8.16)$$

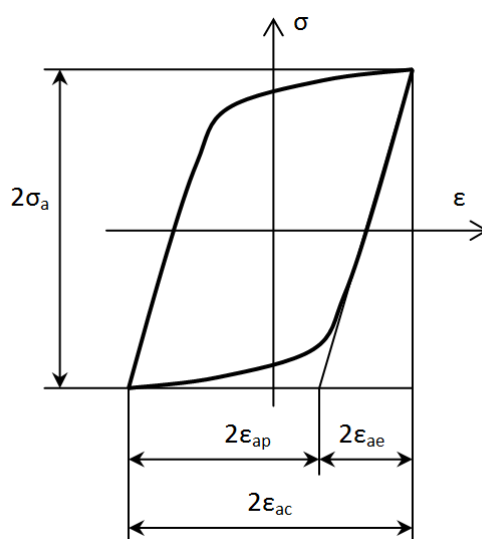
kde K, n jsou koeficient a exponent cyklické pevnosti materiálů.

Amplituda celkové deformace je rovna součtu amplitudy elastické deformace ε_{ae} a amplitudy plastické deformace ε_{ap} , tedy

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K}\right)^{\frac{1}{n}}. \quad (8.17)$$



Obr.17



Obr. 18



Manson a Coffin nezávisle na sobě vyjádřili závislost mezi amplitudou plastické deformace a životností součástí

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (8.18)$$

kde ε'_f je únavová tažnost materiálů, c - exponent únavové tažnosti a $2N_f$ je počet půlcyků do lomu.

Závislost mezi elastickou deformací a životností součástí vyjadřuje Basquinův vztah

$$\varepsilon_{ae} = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad (8.19)$$

kde σ'_f je únavová pevnost materiálu a b je exponent únavové pevnosti.

Podle (17) je závislost mezi amplitudou celkové deformace a životností součástí rovna

$$\varepsilon_{ac} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (8.20)$$

V rovnicích charakterizujících nízkocyklovou únavu (16-20) se vyskytuje šest materiálových konstant σ'_f , ε'_f , b , c , K' , n' , navzájem na sobě závislých. Vyloučením dvojnásobného počtu cyklů z rovnic (18) a (19) obdržíme

$$K' = \frac{\sigma'_f}{\varepsilon'_f n'} \quad (8.21)$$

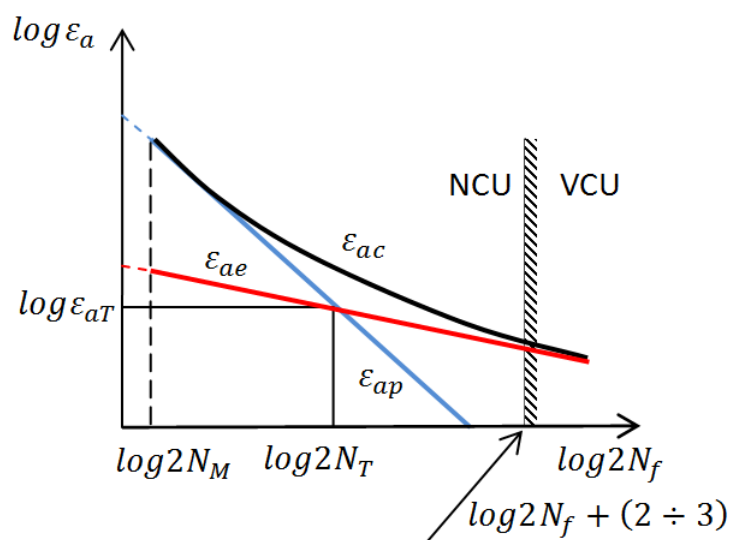
a

$$n' = \frac{b}{c}. \quad (8.22)$$

K definici rovnic nízkocyklové únavy stačí tedy čtyři konstanty: σ'_f , ε'_f , b , c .

Křivky životnosti jsou graficky znázorněny na obr. 19.





Obr. 19

V logaritmických souřadnicích se Manson-Coffinova a Basquinova rovnice zobrazí jako přímky. V jejich průsečíku je dosaženo tranzitního počtu půlcyklů $2N_T$, které oddělují oblast únavy s převládající plastickou deformací od oblasti s převládající elastickou deformací.

1.8 VLIV STŘEDNÍHO NAPĚTÍ NA ŽIVOTNOST SOUČÁSTI

Experimenty bylo prokázáno, že tahové střední napětí má nepříznivý vliv na únavovou životnost a naopak tlakové střední napětí má vliv příznivý.

K posouzení vlivu středního napětí bylo navrženo několik matematických vztahů, zahrnujících vliv středního napětí. Uvedeme zde např. metodu Smith-Watson-Topferovu, nazývanou mnohdy SWT parametrem.

Podle této metody se předpokládá, že na životnost má vliv maximální normálové napětí $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$ a amplituda celkové deformace ε_{ac} , tedy

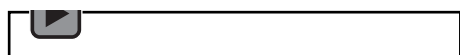
$$\sigma_{max} \varepsilon_{ac} = \sigma'_f (2N_f)^b \left[\frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \right]. \quad (8.23)$$

1.9 KUMULACE ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ

Problematika únavové životnosti v případě proměnlivé amplitudy zatížení je mnohem složitější. Je zřejmé, že během cyklického zatěžování každý jednotlivý cyklus vyvolává dílčí poškození součásti. Dochází k tzv. kumulaci únavového poškození. Celý únavový proces je možno rozdělit do dvou stadií: iniciace trhlin a následné rozšíření trhlin do lomu.



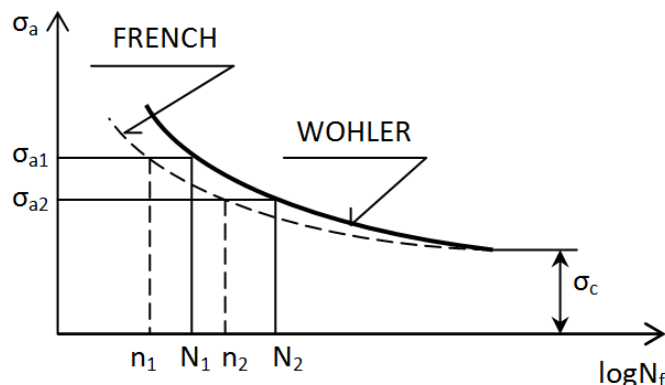
Audio 1.9



Do iniciace makrotrhliny není znám způsob určení dílčího poškození materiálu, způsobeného jedním cyklem. Počet cyklů do iniciace mikrotrhliny srovnatelné s velikostí krystalického zrna udává tzv. Frenchova křivka, formulována H. Frenchem v r. 1933. Tato křivka (obr.20) se vyšetřuje dvoustupňovým zatěžováním, kdy v prvním stupni, při amplitudě napětí σ_{a1} se



vzorek podrobí určitému počtu cyklů $n_1 < N_1$ (kde N_1 je počet cyklů do lomu). Ve druhém stupni se pak napětí sníží na mez únavy σ_c a v zatěžování se pokračuje až do 10^7 cyklů. Lze tedy Frenchovu křivku definovat jako geometrické místo bodů, představující stejné únavové poškození, způsobené různými hladinami napětí. Do Frenchovy křivky tedy materiál není poškozen.



Obr. 20

Jestliže při amplitudě napětí σ_{a1} je vzorek podroben počtu cyklů n_1 , je dílčí poškození

$$D_1 = \frac{n_1}{N_1} \quad (8.24)$$

a obecně poškození způsobené i-tým cyklem bude

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (8.25)$$

Na základě těchto předpokladů byla formulována Palmgrem-Minerova hypotéza, udávající celkové poškození do iniciace trhliny

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (8.26)$$

Příklad č. 1

Určete bezpečnost vůči mezi únavy u ocelového táhlo, které je namáháno pulsující tahovou silou (obr.21), jestliže je dáno:

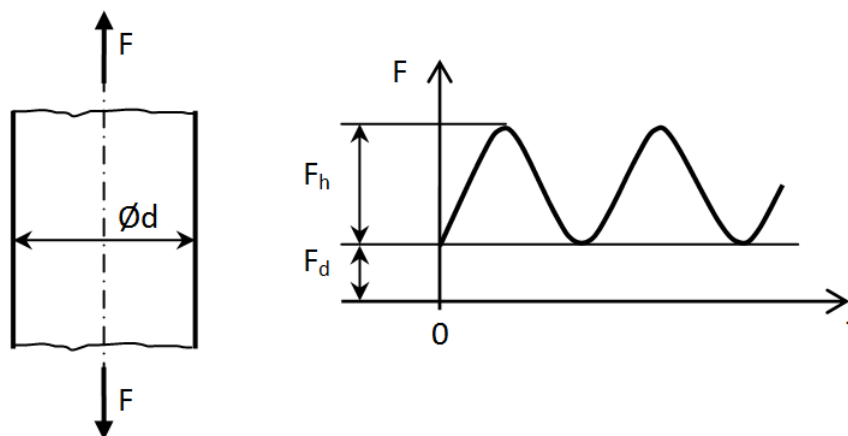
Velikost zátěžných sil: $F_h = 100kN$, $F_d = 30kN$.

Mechanické vlastnosti materiálu: mez pevnosti $R_m = 690MPa$, mez kluzu $R_e = 470MPa$, mez únavy v symetrickém střídavém cyklu $\sigma_{ct(5)} = 260MPa$.

Povrch součásti je obroben.

K výpočtu aproximace Haighova diagramu použijte Goodmanovu přímku.





Obr. 21

Řešení:

Součinitel nesymetrie cyklu je

$$R = \frac{F_d}{F_h} = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = 0.3$$

Horní napětí cyklu σ_h bude

$$\sigma_h = \frac{F_h}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{100 \times 10^3}{\frac{\pi}{4} \times 30^2} = 141.5 \text{ MPa}$$

Zbývajících napětí je možno vyjádřit pomocí součinitele nesymetrie cyklu

$$\sigma_d = R\sigma_h = 0.3 \times 141.5 \text{ MPa} = 42.45 \text{ MPa},$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} = \frac{\sigma_h}{2}(1 - R) = \frac{141.5}{2} \times (1 - 0.3) = 49.5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} = \frac{\sigma_h}{2}(1 + R) = \frac{141.5}{2} \times (1 + 0.3) = 92 \text{ MPa}$$

Pro $R_m = 690 \text{ MPa}$ a obrobený povrch určíme z diagramu (obr. 9) součinitel jakosti povrchu $\eta_p = 0.89$.

Součinitel velikosti součásti v určíme ze vztahu (7)

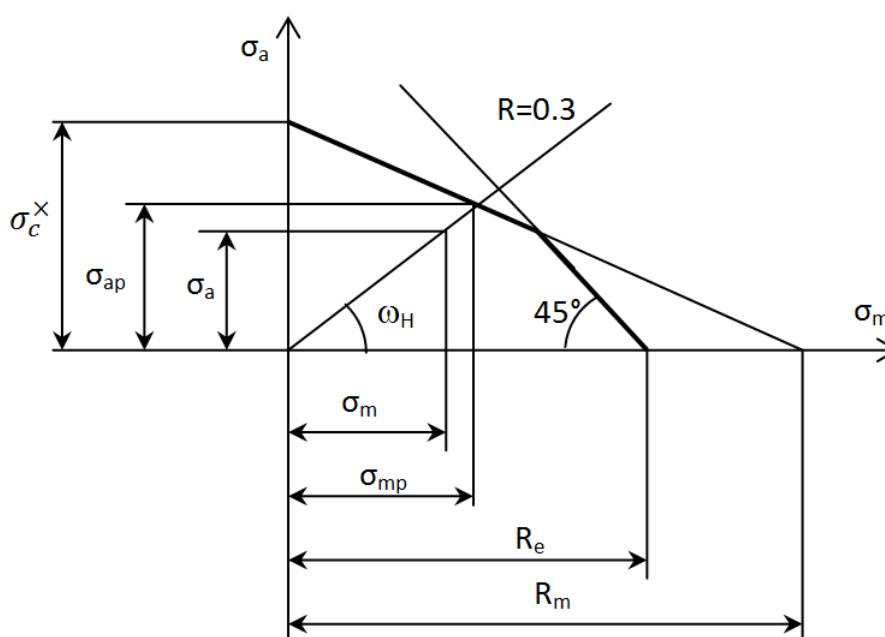


$$v = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{D}{d}} = 1 - \sqrt{0.02 \ln \frac{30}{10}} = 0.852.$$

Mez únavy tedy bude

$$\sigma_c^\times = \sigma_{ct(30)} = \sigma_{ct(5)} v \eta_p = 260 \times 0.852 \times 0.89 = 197.15 \text{ MPa}$$

Přípustnou amplitudu napětí σ_{ap} určíme z Haighova diagramu (obr. 22). Z počátku souřadnicového systému vedeme přímku pod úhlem $\omega_H = \arctg \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \arctg \frac{1-R}{1+R} = 28.3^\circ$ a průsečík této přímky s mezní přímkou Goodmanovou určuje přípustné napětí σ_{ap} .



Obr. 22

Zmíněné napětí σ_{ap} je možno rovněž určit analyticky na základě rovnice Goodmanova přímky

$$\frac{\sigma_{ap}}{\sigma_c^\times} = 1 - \frac{\sigma_{mp}}{R_m}$$

a po dosazení za σ_{ap} a σ_{mp} obdržíme

$$\frac{\sigma_{hp}(1-R)}{2\sigma_c^\times} = 1 - \frac{\sigma_{hp}(1+R)}{2R_m}$$



Odtud

$$\sigma_{hp} = \frac{1}{\frac{1-R}{2\sigma_c} + \frac{1+R}{2R_m}} = \frac{1}{\frac{1-0.3}{2 \times 197.15} + \frac{1+0.3}{2 \times 690}} = 368 \text{ MPa}$$

a

$$\sigma_{ap} = \frac{\sigma_{hp}}{2} = \frac{368}{2} (1 - 0.3) = 128.9 \text{ MPa}$$

Součinitel bezpečnosti bude

$$k = \frac{\sigma_{ap}}{\sigma_a} = \frac{128.9}{49.5} = 2.6$$

Příklad k procvičení

Určete bezpečnost vůči mezi únavy u ocelového táhla z příkladu č.1, jestliže je táhlo namáháno symetricky střídavým tahem-tlakem.

Výsledek $k = 3.98$

K zapamatování:

Únava materiálu - Poškození a lom způsobený cyklickým zatěžováním.

Cyklické napětí - charakterizováno statickou složkou σ_m a amplitudou napětí σ_a

Součinitel nesymetrie cyklu – podíl dolního a horního napětí cyklu

Wöhlerova křivka - závislost mezi amplitudou napětí a životností součástí.

Mez únavy - jako největší napětí, které nevede k lomu ani po překonání smluvní hranice 10^7 cyklů.

Mez únavy hladkého tělesa (bez koncentrátorů napětí) je závislá na celé řadě faktorů, k nimž zejména patří velikost tělesa, jakost povrchu, nesymetrie zatěžovacího cyklu, vliv víceosé napjatosti.

Nízkocyklová únava materiálu při konstantním rozkmitu deformace - chování materiálu charakterizováno uzavřenou hysterezní smyčkou.

Kumulace únavového poškození - v případě proměnlivé amplitudy zatížení každý jednotlivý cyklus vyvolává dílčí poškození součásti. Dochází k tzv. kumulaci únavového poškození.



2 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Kučera, J. *Úvod do mechaniky lomu. Únava materiálu*. VŠB-TU Ostrava, 1994. 80s. Skriptum. ISBN 80-7078-244-7.
- [2] Dowling, N.E. *Mechanical behavior of materials. Engineering Methods for Deformation, Fracture and fatigue*. Third edition. Pearson Prentice Hall, 2007. ISBN 0-13-186312-6.
- [3] Anderson, T.L. *Fracture mechanics. Fundamentals and Applications*. Third edition. CRC Press Taylor & Francis Group. 2005. ISBN 0-8493-1656-1

