

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



ÚNAVA MATERIÁLU

Únavový lom

Ing. Martin Fusek, Ph.D.

Dr. Ing. Adámková Ludmila

Ostrava 2013

© Ing. Martin Fusek, Ph.D., Dr. Ing. Adámková Ludmila
© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
ISBN 978-80-248-3024-7



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

7	ÚNAVOVÝ LOM.....	3
7.1	Úvod	4
7.2	Druhy cyklického zatěžování	4
7.3	Mez únavy hladkých těles, Wöhlerova křivka	5
7.4	Tělesa namáhána pod mezí únavy, Diagram Kitawaga-Takahashi.....	7
7.5	Fyzikální podstata únavového poškození.....	8
7.6	Řešené příklady	9
7.7	Příklady k procvičení.....	10
7.8	Literatura.....	11



7 ÚNAVOVÝ LOM



OBSAH KAPITOLY:

Cyklické zatěžování.

Mez únavy hladkých těles. Wöhlerova křivka.

Diagram Kitawaga-Takahashi.

Fyzikální podstata únavového poškození.

Určování únavových parametrů materiálu.



MOTIVACE:

V praktických případech jsou mnohdy strojní součásti podrobeny zatížení, které se mění s časem (tzv. cyklické zatěžování) a výsledné poškození je způsobeno únavou materiálu.

Na praktických příkladech je zde proveden výpočet únavových parametrů materiálů a stanovení životnosti součástí.



CÍL:

Únava materiálu. Základní pojmy.

Wöhlerův diagram. Diagram Kitawaga-Takahashi

Základní fáze únavového poškození

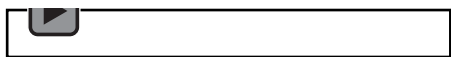


7.1 ÚVOD

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 únavou materiálu.



Audio 7.1 Úvod



Tento název je používán dodnes. Zkoumáním únavového poškození se rovněž zabýval v polovině 19.stol v Německu August Wöhler, který zkoumal příčiny lomů železničních náprav. Wöhler potvrdil, že únavové poškození není ovlivněno pouze cyklickým napětím, ale rovněž i doprovázejícím statickým (středním napětím). Vlivem středního napětí na únavové poškození se rovněž zabývali Gerber a Goodman (viz další text).

7.2 DRUHY CYKlickÉHO ZATĚŽOVÁNÍ

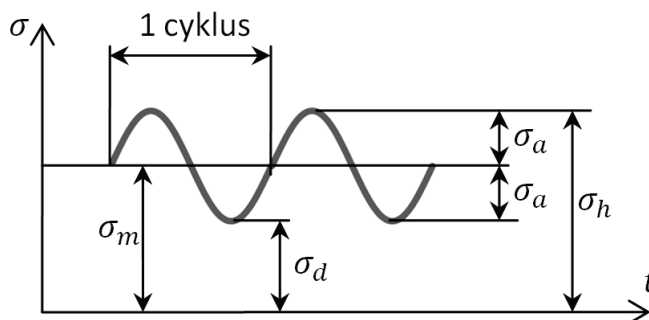
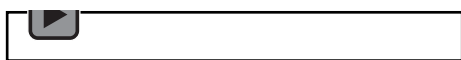
Předpokládáme, že vnější síly a napětí se mění zpravidla periodicky od jisté minimální hodnoty (dolní napětí) po maximální hodnotu (horní) napětí. Průběh napětí je zpravidla znázorňován funkcí sinus.

Obecný průběh cyklického napětí můžeme považovat za průběh vzniklý superpozicí statické složky

σ_m a amplitudy napětí σ_a .



Audio 7.2



Obrázek 1

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

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} \quad (7.1)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} \quad (7.2)$$

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

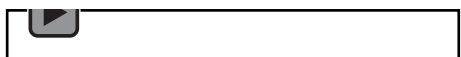
Mnohdy se rovněž zavádí pojem rozkmit napětí $\Delta\sigma$

$$\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d = 2\sigma_a. \quad (7.3)$$

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



Audio 7.3



$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a} \quad (7.4)$$

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

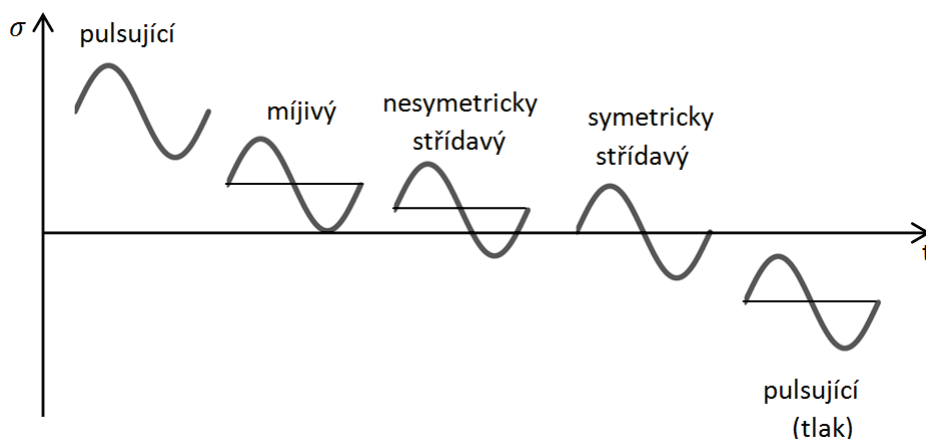
$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_h}{2} (1 - R) \quad (7.5)$$

a

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h}{2} (1 + R) \quad (7.6)$$

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).



Obrázek 2

V případě symetrického střídavého cyklu v tahu-tlaku je součinitel nesymetrie cyklu

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = -1 \quad (7.7)$$

a v případě mívivého cyklu

$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} = 0. \quad (7.8)$$

7.3 MEZ ÚNAVY HLADKÝCH TĚLES, WÖHLEROVA KŘIVKA

Vliv cyklického zatěžování byl poprvé zkoumán v druhé polovině 19. století Augustem Wöhlerem při studiu kolejnic. Bylo třeba vysvětlit, proč se při cyklickém zatěžování materiál porušuje při napětích menších než mez kluzu, aniž by docházelo k plastickým deformacím. Při zkouškách byly zkušební vzorky zatěžované symetrickým střídavým cyklem o dané amplitudě napětí a zjišťoval se počet cyklů do porušení. Zkušební vzorky musí být ze stejného materiálu, mít stejný tvar a být stejně opracovány. Zpravidla se jedná o zkušební tyčinky o průměru $7 \div 10\text{mm}$ s leštěným povrchem.

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.3). 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 kvazistatických lomů.

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

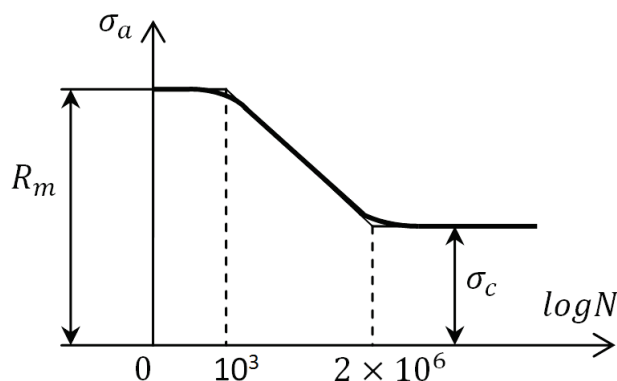
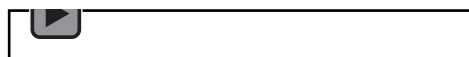
Ve třetím úseku, asi při $N \geq 2 \times 10^6$ cyklů, je zřejmé, že amplituda napětí se nemění. To znamená, že při této amplitudě vydrží materiál neomezeně dlouho. Hovoříme o mezi únavy



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.

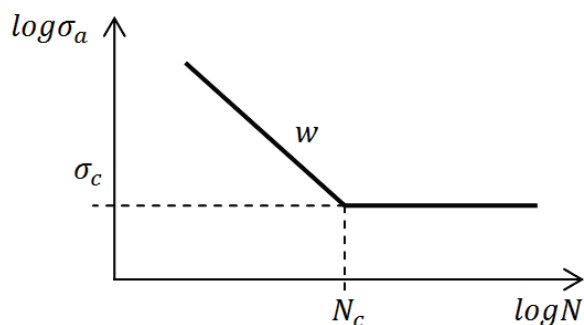


Audio 7.4



Obrázek 3

Mnohdy je Wöhlerův diagram znázorněn v log-log souřadnicích (obr.4). V tomto případě se závislost mezi amplitudou napětí a počtem cyklů do lomu zobrazí jako přímky. Počet cyklů do lomu N_c je závislý na pevnosti ocelí (tabulka 1).



Obrázek 4

Pevnost oceli R_m [MPa]	< 700	< 1000	< 1250	< 1700
Počet cyklů N_c	$10^6 \div 5 \times 10^6$	$10^7 \div 2 \times 10^7$	$2 \times 10^7 \div 4 \times 10^7$	$4 \times 10^7 \div 10^8$

Tabulka 1

K analytickému popisu Wöhlerovy křivky uvádí literatura celou řadu vztahů. Nejjednodušší je lineární popis šikmé větve Wöhlerovy křivky v log-log souřadnicích, použitelný v rozmezí amplitud od meze kluzu R_e do meze únavy σ_c

$$\log N + w \log \sigma_a = \text{konst.} \quad (7.9)$$

anebo

$$\sigma_a^w N = C \quad (7.10)$$

kde konstanta C a exponent w se určí na základě statistického vyhodnocení experimentálních výsledků.

Mnohdy se rovněž používá mocninná aproximace šikmé větve Wöhlerovy křivky od meze kluzu R_e do meze únavy σ_c v závislosti na počtu půlcyklů do lomu

$$\sigma_a = \sigma_f (2N)^b \quad (7.11)$$



kde

σ_f' - únavová pevnost materiálu,

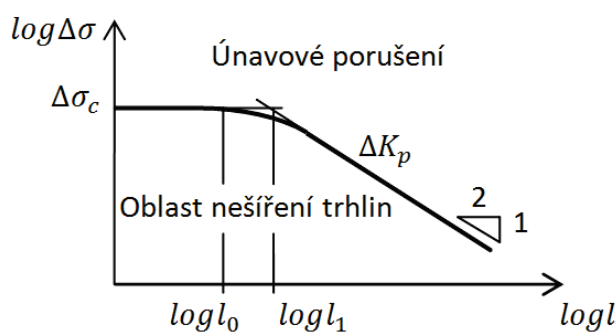
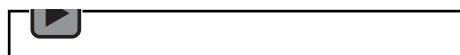
b - exponent únavové pevnosti.

7.4 TĚLESA NAMÁHÁNA POD MEZÍ ÚNAVY, DIAGRAM KITAWAGA-TAKAHASHI

V předchozí kapitole bylo poznamenáno, že nedojde k poškození únavou, jestliže amplituda napětí bude menší než mez únavy. Na základě poznatků z lineární elastické lomové mechaniky ovšem platí, že nedochází k šíření únavových trhlin, jestliže faktor intenzity napětí je menší než prahová hodnota K_p . Tato skutečnost platí pouze v případě makroskopických trhlin, kdy délka trhlina je delší než délka typické strukturní veličiny, zpravidla zrna materiálu.



Audio 7.5



Obrázek 5

Jestliže znázorníme v logaritmických souřadnicích závislost amplitudy napětí na délce trhliny dostaneme jednak vodorovnou přímku ($\Delta\sigma = \sigma_c$) a dále přímku se směrnicí 0.5 (viz obr. 5). Směrnice 0.5 plyne z následujícího řešení:

Jestliže pro prahovou hodnotu rozkmitu faktoru intenzity napětí platí

$$\Delta K_p = \Delta\sigma\sqrt{\pi l}Y \quad (7.12)$$

dostaneme logaritmováním

$$\log \Delta\sigma = \log \frac{\Delta K_p}{\sqrt{\pi}Y} - \frac{1}{2} \log l \quad (7.13)$$

kde Y – funkce tvaru a způsobu zatížení trhliny.

Průsečík obou přímek určuje kritickou délku trhliny l_1

$$l_1 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_p}{\Delta\sigma_c} \right)^2 \quad (7.14)$$

Kritická délka trhliny je v rozmezí $l_1 = 1 \div 1000 \mu m$ a klesá se zvyšující se pevností ocelí.

Ve skutečnosti je mez únavy konstantní pouze do velikosti zrna l_0 , dále je závislost meze únavy na délce trhliny znázorněna křivkou plynule přecházející v přímku se směrnicí 0.5.

Tato střední oblast může být podle Murakamiho a Endoa (1994) vyjádřena rovnicí

$$\Delta\sigma = C \frac{(H_v + 120)}{(\sqrt{A})^{1/6}} \quad (7.15)$$

kde

H_v – Vickersova tvrdost,

C – konstanta (C=1.43 pro povrchové trhliny a C=1.56 pro vnitřní trhliny),

A – plocha defektu [μm].



Z diagramu Kitawaga-Takahashi vyplývají následující závěry:

1. Na mezi únavy existují v materiálu trhliny o minimálních rozměrech, srovnatelnými s velikostí krystalického zrna
2. S délkou trhlín se mez únavy snižuje



Audio 7.6

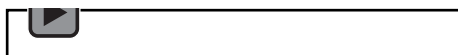


7.5 FYZIKÁLNÍ PODSTATA ÚNAVOVÉHO POŠKOZENÍ

Únavové poškození můžeme rozdělit do čtyř fází



Audio 7.7

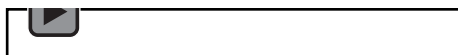


1. Nukleace únavových mikrotrhlín

Ve skutečnosti jsou všechny materiály nehomogenní a anizotropní. Například kovy jsou tvořeny velkým množstvím krystalických zrn nepravidelných tvarů. Krystalická zrna mohou být prostoupěna čárovými poruchami krystalické mřížky (tzv. dislokacemi), anebo jsou v nich vakantní místa nebo naopak intersticiální atomy. Rovněž hranice mezi zrny patří k materiálovým nehomogenitám. V důsledku nehomogenit dochází k nárustu napětí a ke vzniku (nukleaci) únavových mikrotrhlín. K nukleaci únavových mikrotrhlín dochází zpravidla na povrchu, případně v jeho těsné blízkosti.



Audio 7.8

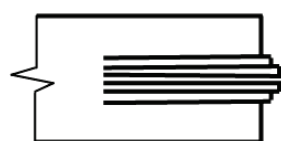


Existují v podstatě tři typy nukleacích míst:

- a) Únavová skluzová pásma. Skluzová pásma jsou oblasti, kde je deformace způsobena smykem krystalografických rovin. Dojde-li ke skluzu v jedné rovině krystalického zrna oceli, zpevní se tak, že další skluz nastane v sousední rovině. Při cyklickém zatěžování dochází ke vzniku intruzí a extruzí, které zakončují na povrchu únavová skluzová pásma (obr.5).



intruze



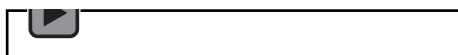
extruze

Obrázek 6

- b) Hranice mezi zrny. Hranice zrn omezují spojitost deformací a uplatňují se při velkých amplitudách deformace zvláště při vysokých teplotách.
- c) Rozhraní mezi základním materiálem (matricí) a nekovovými inkluzemi (vměstky). K tomuto způsobu nukleace dochází především v povrchových vrstvách vysocepevnostních ocelí.



Audio 7.9



2. Inicie a spojování mikrotrhlín



Velká většina mikrotrhlin se brzy zastavuje a neproniká do větší hloubky než několika desetin mm. Pouze některé z nich rostou dále, v místech největšího nakupení mikrotrhlin dochází k jejich vzájemnému spojování v delší povrchové trhliny. Po dosažení určité délky se mikrotrhliny začínají šířit do hloubky materiálu pod povrch. V této etapě roste zpravidla trhlina jedna – tzv. magistralní trhlina. Po dosažení hloubky přibližně desetinásobku průměru krystalického zrna se trhlina orientuje i v hloubce pod povrchem na největší hlavní napětí a není závislá na krystalické struktuře kovu.



Audio 7.10

3. Šíření únavové trhliny

Makroskopická trhlina je orientována ve směru kolmém na největší hlavní napětí, chování trhliny je dáno velikostí plastické zóny na jejím čele. Plastická zóna je složena jednak z části statické a dále z menší části cyklické. Rozměr cyklické plastické zóny je oproti statické části asi čtyřikrát menší. V plastické zóně probíhá změna mechanických vlastností materiálů, zpevňování anebo změkčování.



Audio 7.11

4. 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.7).



Audio 7.12



Obrázek 6

K zapamatování:

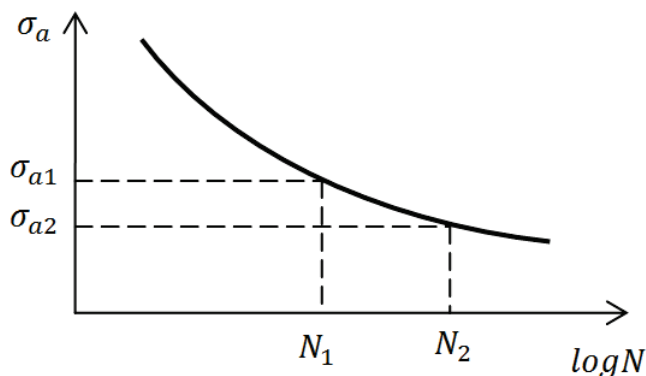
- Únava materiálu - poškození a lom způsobený cyklickým zatěžováním.
- Wöhlerův diagram – závislost mezi amplitudou napětí a životností součástí.
- Diagram Kitawaga-Takahashi – závislost meze únavy na délce mikrotrhliny
- Únavové poškození lze rozdělit do čtyř fází - nukleace únavových mikrotrhlin, iniciace a spojování mikrotrhlin, šíření trhlin a lom.

7.6 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

Příklad 1



Pro křivku životnosti $\sigma_a - N$ (obr.1) jsou známy body $[N_1, \sigma_{a1}]$ a $[N_2, \sigma_{a2}]$. Určete únavovou tažnost σ'_f a exponent únavové tažnosti b .



Obrázek 1

Řešení:

Z Basquinova vztahu plyne

$$\sigma_{a1} = \sigma'_f (2N_1)^b$$

a

$$\sigma_{a2} = \sigma'_f (2N_2)^b$$

odtud

$$\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^b$$

Logaritmováním obdržíme

$$\ln\left(\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}}\right) = b \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)$$

odtud

$$b = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_{a1}}{\sigma_{a2}}\right)}{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)} = \frac{\ln\sigma_{a1} - \ln\sigma_{a2}}{\ln N_1 - \ln N_2}$$

Pro vypočtený exponent únavové tažnosti b bude únavová tažnost

$$\sigma'_f = \frac{\sigma_{a1}}{(2N_1)^b} = \frac{\sigma_{a2}}{(2N_2)^b}$$

7.7 PŘÍKLADY K PROCVIČENÍ

Příklad 1

Pro ocel 12050 byly zjištěny tyto hodnoty:

smluvní mez kluzu: $R_{p0.2} = 325 \text{ MPa}$,

mez pevnosti v tahu: $R_m = 540 \text{ MPa}$,

mez únavy v symetrickém střídavém tahu – tlaku (pro leštěný vzorek $\varnothing 5 \text{ mm}$) $\sigma_c = 200 \text{ MPa}$,

únavová pevnost materiálu $\sigma'_f = 948 \text{ MPa}$,

součinitel únavové pevnosti $b = -0.092$.

Určete životnost součásti pro amplitudu napětí $\sigma_a = 270 \text{ MPa}$.

Výsledek: $N \cong 4.2 \times 10^5$ cyklů.



7.8 LITERATURA

- [1] Kučera, J. *Úvod do mechaniky lomu. Únava materiálu*. VŠB-TU Ostrava, 1994. 80s. Skriptum. ISBN 80-7078-244-7.
- [2] Tore Dahlberg, Anders Ekberg. *Failure Fracture Fatigue. An Introduction*. Sweden 2009. ISBN 978-91-44-02096-9. 360 p.
- [3] Hoschl, C. *Pružnost a pevnost ve strojnictví*. SNTL Praha 1971. 376 s.
- [3] 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.
- [4] Vlk, M., Florian, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. Elektronický učební text. www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf

