

Dynamická únosnost a životnost

Ing. Jitka Jágrová, CSc.

doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D.

Liberec 2017

Recenzent: prof. Ing. Milan Růžička, CSc.

© Ing. Jitka Jágrová, CSc., doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D., 2017

ISBN 978-80-7494-366-9

Předmluva

Tato skripta si kladou za cíl poskytnout pouze základní vhled do problematiky únavové pevnosti a životnosti konstrukcí a jejich jednotlivých částí.

Výzkum procesu únavového poškození neustále pokračuje a pro různá materiálová a konstrukční specifika dává velké množství značně roztržitých poznatků. Avšak obecný model poškozování, který by bylo možno aplikovat na nejrůznější tvary součástí, chování materiálu a podmínky provozu v současnosti neexistuje a nelze předpokládat ani jeho brzký vznik. Za tím účelem a také z důvodů nezbytných pedagogických zjednodušení byl proveden spíše stručný výběr faktů a postupů obecnější platnosti, což vedlo k tomu, že jsou vedle sebe uvedeny desítky let staré, praxí osvědčené inženýrské postupy a zároveň některé poznatky moderní. Podrobně jsou rozebrány pouze partie týkající se stanovení mezního stavu, tj. meze únavy daného konkrétního místa dané součásti, případně její rezervy (součinitele bezpečnosti).

Skripta byla napsána pro předmět *Dynamická únosnost a životnost*, který je zařazen do studijního plánu oboru Konstrukce strojů a zařízení a Aplikovaná mechanika magisterského studia na FS TUL v Liberci, měla by také sloužit i konstruktérům v praxi, kteří se nezabývají speciálně problematikou únavového poškozování. Ve stádiu prvního návrhu konstrukce se bez postupů vymezujících mezní stav jednotlivých částí z hlediska únavového poškození nelze obejít. Text skript je doplněn příklady, které mohou usnadnit samostatné řešení problémů technické praxe. V závěru jsou zařazeny přílohy poskytující podklady pro konkrétní výpočty.

Autoři budou vděčni za laskavé připomínky k textu a upozornění čtenářů na chyby a nedostatky, které se mohou v textu vyskytnout. Kapitoly 1 až 8 zpracovala Ing. Jitka Jágrová, CSc. a kapitoly 9 a 10 doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D.

Obsah

Předmluva.....	3
Obsah	5
1 Úvod. Namáhání při časově proměnném zatížení.....	7
1.1 Únavový lom	7
1.2 Cyklické zatěžování.....	8
1.3 Křivka S - N (Wöhlerova křivka).....	11
2 Některé faktory ovlivňující mez únavy skutečné součásti	16
2.1 Vliv velikosti součásti	16
2.2 Vliv jakosti povrchu součásti	19
2.3 Vliv zbytkových napětí v povrchové vrstvě součásti.....	20
2.4 Vliv technologických úprav povrchové vrstvy součásti.....	20
2.5 Vliv frekvence zatěžování a teploty	22
2.6 Mez únavy hladké součásti při střídavém namáhání	22
3 Vliv koncentrátoru napětí (vrubu) na statickou a únavovou pevnost.....	24
3.1 Napjatost v okolí vrubu při statickém namáhání	24
3.2 Metody určování součinitele koncentrace napětí	26
3.3 Vzájemný vliv sousedních vrubů	27
3.4 Napjatost v okolí otvoru v tažené desce nekonečných rozměrů.....	28
3.5 Vliv vrubu na mechanické vlastnosti materiálu při statickém zatížení	33
3.6 Vliv vrubu na pevnost v únavě.....	34
3.7 Mez únavy součásti s vrubem při střídavém namáhání.....	36
3.8 Některá konstrukční doporučení eliminující vliv vrubu a únavové poškození všeobecně	37
4 Vliv středního napětí na pevnost v únavě.....	40
4.1 Nahrazení mezní čáry	40
4.2 Vliv vrubu na amplitudovou a střední složku.....	46
5 Mez únavy při kombinovaném namáhání	49
6 Součinitel bezpečnosti součástí namáhaných v únavě	54

6.1	Součinitel bezpečnosti při střídavém a pulzujícím namáhání	54
6.2	Součinitel bezpečnosti při kombinovaném namáhání	57
7	Oblast časované pevnosti	71
7.1	Namáhání nad mezí únavy	71
7.2	Kumulace únavového poškození	72
7.3	Dimenzování součástí na únavu	75
8	Náhodné zatěžování.....	79
9	Koncentrace napětí vlivem kontaktu	84
9.1	Úvod	84
9.2	Zatížení pružného poloprostoru - první přiblížení.....	84
9.3	Prostorová Hertzova úloha	87
9.4	Napjatost v kontaktních úlohách	98
9.5	Kontaktní únava.....	99
10	Úvod do zkoušení únavy materiálu	101
	Literatura	105
	PŘÍLOHA č I.	107
	PŘÍLOHA č II.	107
	PŘÍLOHA č III.....	108
	PŘÍLOHA č IV.....	110
	PŘÍLOHA č V.....	110
	PŘÍLOHA č VI.....	111
	PŘÍLOHA č VII.	112
	PŘÍLOHA č VIII.....	113
	PŘÍLOHA č IX.....	114
	PŘÍLOHA č X.....	116
	PŘÍLOHA č XI.....	117

1 Úvod. Namáhání při časově proměnném zatížení

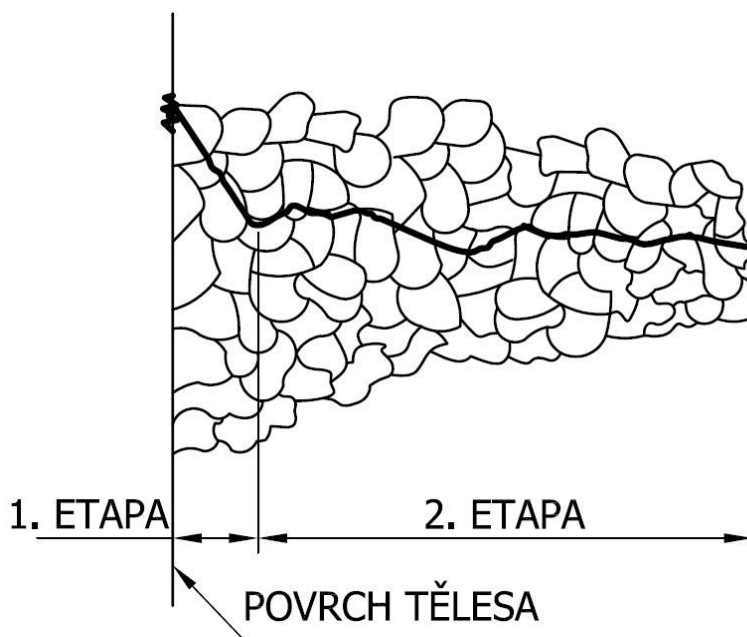
1.1 Únavový lom

Většina strojních součástí je namáhána silovými veličinami, které se s časem mění. Zvláštní chování součástí vzhledem k jejich poruše lze uvést na příkladu některých částí železničních vozidel vystavených po dobu svého provozu velkému počtu cyklů zatížení, které se začalo objevovat v počátcích jejich provozu. Poruchy vznikaly vždy až po určité době provozu a charakter lomové plochy vykazoval zvláštní vzhled, jenž souvisí se vznikem a šířením únavového poškození, které vedlo až k tzv. **únavovému lomu**.

Únavové poškození je od počátku zatěžování nevratným dějem a je často viditelné až v pokročilé fázi. Objasnění počátků jevu je třeba hledat v mikrostruktuře materiálu. Při tom je nutné opustit předpoklad materiálu homogenního. Dochází ke změnám mechanických vlastností materiálu a nukleaci trhliny z důvodů cyklické plastické deformace v některých exponovaných místech tělesa. *Trhlinou* je míněno ohraničené částečné porušení spjitosti materiálu.

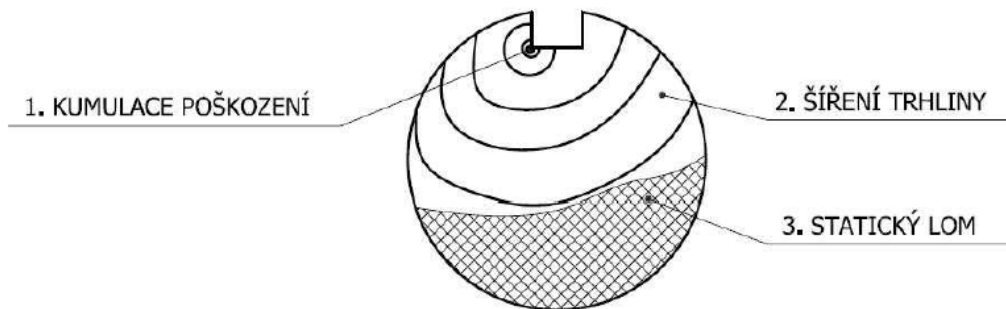
Všeobecně platí, že trhlina vzniká na povrchu anebo velmi blízko pod povrchem tělesa. Trhlina se nejprve šíří pod úhlem $\pi/4$ vzhledem k povrchu, její rozměr je dán mikrostrukturou materiálu (tzv. mikrotrhlina). Prostředí je nehomogenní a proces se neřídí zákony mechaniky kontinua.

Další šíření trhliny již v rozměrech makrostruktury (*makrotrhlina*) se děje na jejím čele, většinou kolmo ke směru největšího normálního napětí a to po etapách, vždy po určitém počtu absolvovaných cyklů (obr.1.1). Velikost makrotrhliny je srovnatelná s velikostí zrna materiálu anebo větší. Její šíření probíhá podle zákonů lomové mechaniky. Povrch trhliny se při jejím opakovaném rozevírání a zavírání obrušuje. Bývá hladký, někdy s lasturovitými čarami podle jeho různého okysličení v obdobích mezi jednotlivými etapami šíření trhliny. Trhlina se šíří pouze působením tahových napětí.



Obr.1.1 Šíření trhliny při únavovém poškození

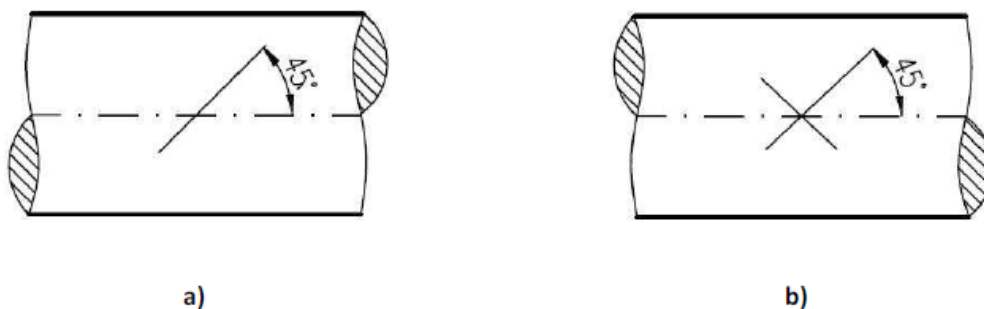
Je-li zbývající průřez tak zeslaben, že není schopen přenést ani statické zatížení (i s ohledem na případné změny materiálových vlastností při únavovém poškození), dojde ke *křehkému dolomu*. Vzhled únavového lomu je znázorněn na obr.1.2.



Obr.1.2 Vzhled únavového lomu

Ze skutečného vzhledu lomu lze vyčíst některá fakta o namáhané součásti (tab. 1.1). Je to např. *způsob namáhání* podle tvaru hladké části lomové plochy, *počet cyklů do lomu* – odhad podle vyhlazení povrchu únavové části lomu. U součásti s náhlou změnou tvaru (vrubem) lze odhadnout velikost *původního (jmenovitého) napětí* podle velikosti dolomové plochy a *ostrost vrubu* podle tvaru hranice mezi hladkým únavovým lomem a hrubým povrchem dolomu.

Šíření trhliny kolmo na směry hlavních napětí demonstruje např. obr.1.3a při namáhání na opakovaný krut a obr.1.3b při namáhání na střídavý krut.



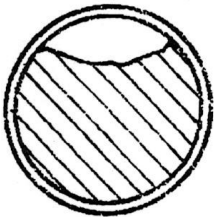
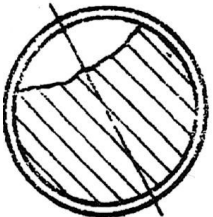
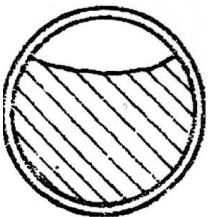
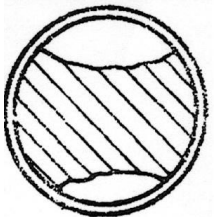

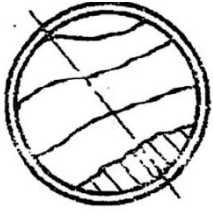
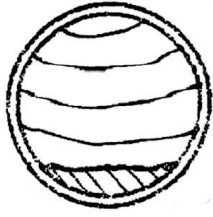

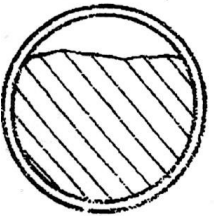
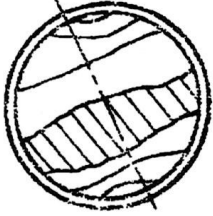
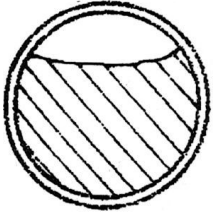
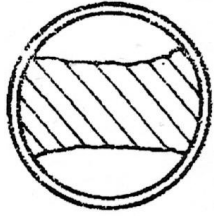
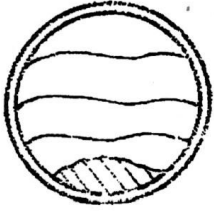
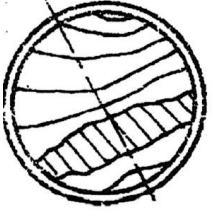
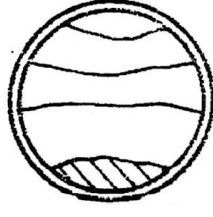
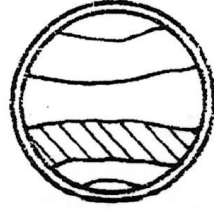
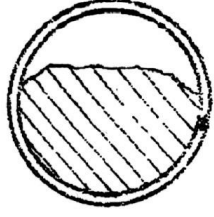
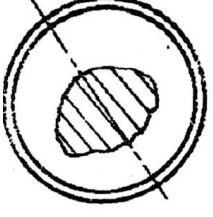
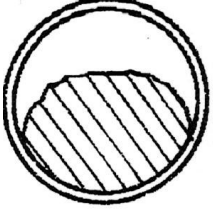
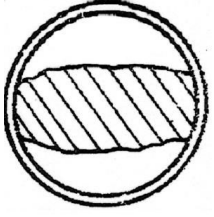
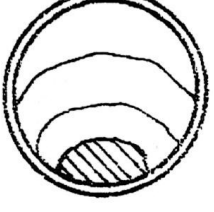
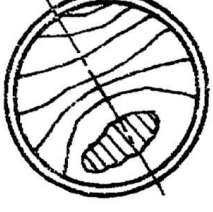
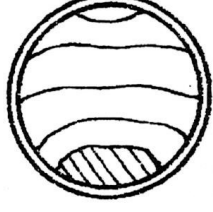
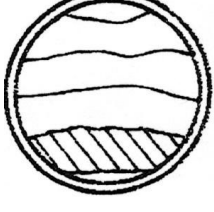
Obr.1.3 Únavový lom při namáhání na krut

Všeobecně lze konstatovat, že vznik únavového poškození je podmíněn místní plastickou deformací, ačkoliv napětí v zatěžovaném tělese se pohybuje v oblasti elastické.

1.2 Cyklické zatěžování

Proměnné zatížení konstrukcí v čase může být *deterministické* (napětí je známou funkcí času) nebo *náhodné* (tj. *stochastické*). Deterministický proces je pak buď *neperiodický* nebo *periodický se opakující*. Ten se vyznačuje konstantními hodnotami maximálního a minimálního napětí. Základní jednotkou zatěžování je v takovém případě *zátěžný cyklus*, jeho opakováním se tvoří *zátěžný proces*. Některé příklady periodických průběhů zátěžného cyklu jsou uvedeny na obr.1.4.

Tab.1.1 Co lze vyčíst ze vzhledu lomové plochy (fraktografie)

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

Vliv tvaru zátěžného cyklu na únavový jev není nijak významný, šetrnější je průběh cyklu s pozvolným nárůstem napětí oproti jeho zvýšení skokem.

Základní charakteristiky zátěžného cyklu jsou podle obr.1.5:

horní (maximální) napětí

$$\sigma_h = \sigma_{\max} ,$$

dolní (minimální) napětí

$$\sigma_d = \sigma_{\min} ,$$

střední (meridiánové) napětí

$$\sigma_m = \frac{\sigma_h + \sigma_d}{2} , \quad (1.1)$$

amplitudové napětí

$$\sigma_a = \frac{\sigma_h - \sigma_d}{2} , \quad (1.2)$$

asymetrie cyklu

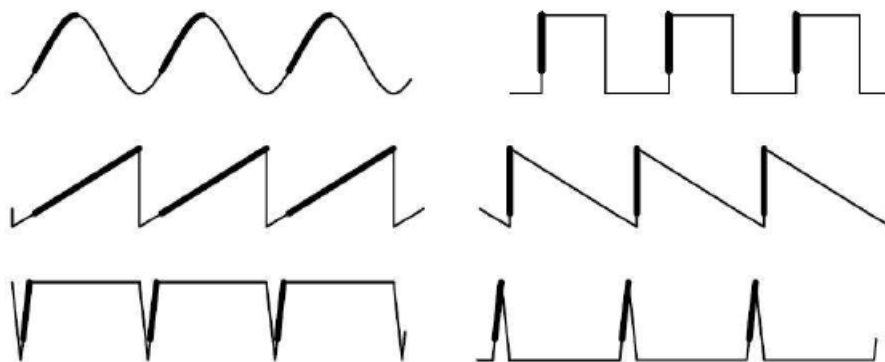
$$R = \frac{\sigma_d}{\sigma_h} , \quad (1.3)$$

doba trvání jednoho cyklu

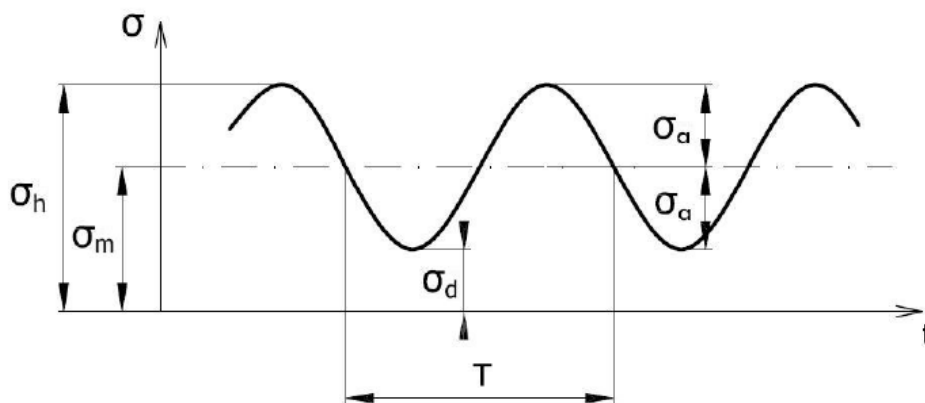
$$T ,$$

frekvence zatěžování

$$f = \frac{1}{T} .$$



Obr.1.4 Různé tvary zátěžného cyklu



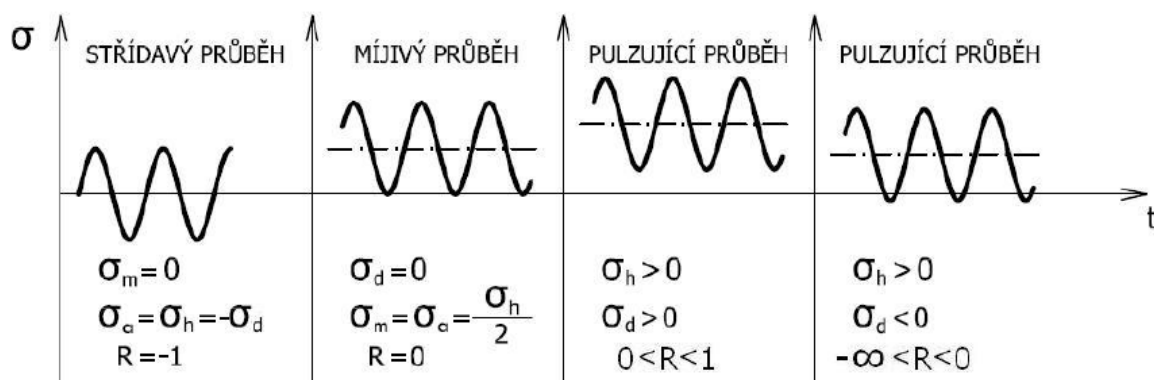
Obr.1.5 Základní charakteristiky zátěžného cyklu

Pokud je tvar kmitu sinusový (obr.1.5), nazýváme průběh zatěžování *harmonickým*. Pak napětí v libovolném čase je

$$\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_a \sin(\omega t - \varphi) ,$$

kde φ je fázový posuv a perioda je $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Tab.1.2 Zátěžné cykly pro různá střední napětí



V tab.1.2 jsou uvedeny některé polohy zátěžného cyklu pro různé velikosti středního napětí.

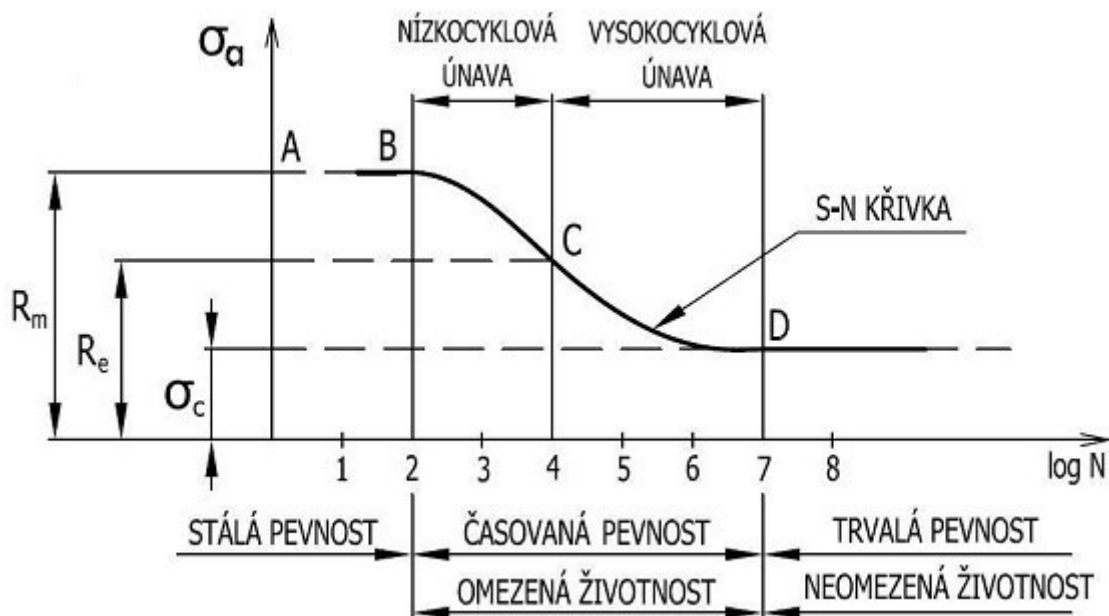
Většina podkladů, které jsou v literatuře k dispozici pro posouzení únavového poškození a které jsou uváděny i v těchto skriptech, byla získána pomocí experimentů právě při harmonickém zatěžování. To je třeba mít na zřeteli, protože zatěžování řady konstrukcí má ve skutečnosti náhodný charakter. O některých metodách vyhodnocování obecnějšího zátěžného procesu pojednává kap.7 a 8.

1.3 Křivka S - N (Wöhlerova křivka)

Již v letech 1850 – 1870 prováděl inženýr Wöhler systematické experimentální zjišťování únavových vlastností materiálů. Vyšetřoval závislost amplitudy napětí σ_a při harmonickém střídavém zatěžování (ohyb za rotace) na počtu cyklů N až do poruchy zkušebního vzorku. Jako první si všiml charakteristického tvaru křivky v logaritmické škále počtu cyklů. Počet cyklů N do poruchy vzorku udává charakter jeho *životnosti*.

Zkušební vzorek má stanovenou velikost (obvykle od $\varnothing d=7\div 10$ mm do $\varnothing d=20\div 40$ mm) a povrch, který se blíží dokonale hladkému (leštěný).

Základní charakter *únavové křivky napětí* v souřadnicích logaritmicko-lineárních pro většinu materiálů udává obr.1.6. Oblasti změny charakteru křivky (místa B a D) odpovídají křivce $S-N$ pro oceli, kde $N_B \cong 10^2$ cyklů, $N_C \cong 10^4$ cyklů a N_D lze upřesnit podle tab.1.3



Obr.1.6 S-N křivka

V diagramu $S-N$ existují následující oblasti:

- Oblast **stálé (quasistatické) pevnosti** (oblast A – B): únavový jev se neprojeví, napětí při poruše je dáno mezí pevnosti R_m , poruchy mají statický charakter.
- Oblast **časované pevnosti**, životnost vzorku je omezena počtem cyklů N . Lze ji rozdělit na oblast **nízkocyklové únavy** (oblast B – C), kde mezní hodnota napětí klesá od velikosti meze pevnosti přibližně k mezi kluzu (mechanismus porušení je dán cyklováním v plastické oblasti) a

na oblast **vysokocyklové únavy** (oblast C – D), kde velikost mezního napětí pro porušení klesá k hodnotě σ_c (lom má již typický únavový charakter).

- Oblast **trvalé únavové pevnosti** σ_c (oblast $D \rightarrow \infty$) s neomezenou životností vzorku.

Tab.1.3 Minimální počet cyklů pro oblast trvalé pevnosti v závislosti na R_m (ocel)

R_m [MPa]	do 700	700 ÷ 1000	1000 ÷ 1250	1250 ÷ 1700
N_D [kmitů]	$10^6 \div 5 \cdot 10^6$	$10^7 \div 2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7 \div 4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7 \div 10^8$

Napětí σ_c se nazývá **mez únavy**. Je-li vzorek namáhán amplitudou σ_a provozního zatížení, které je menší než mez únavy, nedojde k únavovému lomu ani při nekonečně velkém počtu cyklů. Trhlina buď vůbec nevznikne, nebo se její růst zastaví ve stadiu mikrotrhliny. Velikost meze únavy je ovlivněna vlastnostmi materiálu a způsobem namáhání součásti (tah, ohyb, krut). Při experimentálním zjišťování meze únavy je třeba zohlednit rozptyl výsledků experimentů a u udávaných velikostí σ_c je vhodné uvést procento pravděpodobnosti vzniku poruchy.

Mez únavy zkušebního vzorku lze nejjednodušeji vyjádřit v závislosti na mezi pevnosti vztahem

$$\sigma_c = c_i R_m, \quad (1.4)$$

kde c_i závisí na vlastnostech materiálu a způsobu namáhání. Pro mez únavy zkušebních vzorků z konstrukčních ocelí platí (s pravděpodobností poruchy 1%):

pro střídavý tah – tlak $\sigma_{ct} \cong 0,35 R_m,$

pro střídavý ohyb $\sigma_{co} \cong 0,43 R_m,$

pro střídavý krut $\tau_c \cong 0,25 R_m.$

Pro některé další kovové materiály jsou hodnoty meze únavy uvedeny v tab.1.4 s pravděpodobností poruchy 50%. Z toho důvodu je třeba volit při posouzení pevnosti vyšší součinitel bezpečnosti k . Podrobněji v kap.6.

Náročnější požadavky na materiály s vyšší statickou, ale především únavovou pevností a s vyšší odolností proti šíření trhlin vedou v současné době k vývoji nových materiálů kovových s minimálním obsahem nežádoucích prvků, příp. materiálů kompozitních či keramických.

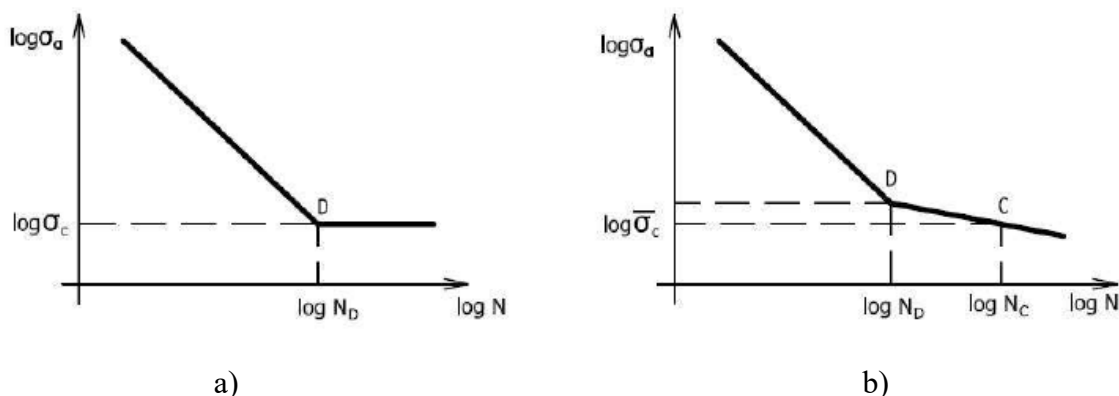
Analytický popis křivky S-N v elastické oblasti lze aproximovat vztahem

$$\sigma_a^w N = c, \quad (1.5)$$

použitelným v rozmezí R_e, σ_c , který je v bilogaritmických souřadnicích zobrazen přímkou o směrnici $1/w$ (obr.1.7a). Velikost parametru w závisí na materiálu a na tvaru součásti (vruby). Pokud nemáme dostupná data pro daný materiál, je třeba parametry křivky S-N odhadnout. Pro běžné materiály, pro něž platí, že poměr velikosti meze kluzu a meze únavy (R_e/σ_c) se nachází v intervalu 2,5 až 4, je možno w vybrat z intervalu $\langle 7 \div 10 \rangle$. Pro určení parametru c pak postačí znalost meze únavy a odpovídajícího počtu cyklů N_D . Podle [26] lze odhadnout pro nelegované a nízkolegované oceli $w \cong 11,5$ a $c \cong 53R_m^w$ a pro hliníkové a titanové slitiny $w \cong 10,5$ a $c \cong 109R_m^w$.

Tab.1.4 Mez únavy v ohybu některých materiálů [19]

Materiál	R_m [MPa]	σ_c v ohybu
Šedá litina	140÷400	$0,38R_m$
Tvárná litina - feritická - perlitická	320÷420 500÷650	$0,45R_m$ $(0,4 \div 0,5)R_m$
Al-slitiny - tepelně nezpracované - tepelně zpracované	200÷300 300÷600	$(0,45 \div 0,55)R_m$ $(0,3 \div 0,35)R_m$
Titanové slitiny	700÷1250	$0,6R_m$



Obr.1.7 S-N křivka s trvalou a smluvní mezí únavy

Některé hliníkové slitiny, slitiny mědi, příp. některé vysokopevnostní slitiny oceli se vyznačují tím, že jejich křivka $S-N$ nevykazuje mez únavy (obr.1.7b). V takovém případě se zavádí tzv. smluvní mez únavy $\overline{\sigma}_c$, která odpovídá určitému smluvnímu počtu cyklů N_C . U hliníkových slitin se nejčastěji považuje za smluvní mez únavy napětí, které odpovídá poruše při počtu cyklů $N_C = 5 \cdot 10^7$ kmitů.

Pro odhad meze únavy hliníkových slitin existuje v literatuře [19] empirický vztah

$$\sigma_c = R_m \frac{1 + \frac{0,0031n^4}{1 + 0,0064R_m}}{1 + 0,0031n^4}, \quad (1.6)$$

kde $n = \log N$ a mez pevnosti R_m se dosazuje v MPa.

Experimenty pro stanovení křivky S-N se provádějí za řízené velikosti síly (tzv. měkké zatěžování), které je vhodné především pro oblast vysokocyklového namáhání.

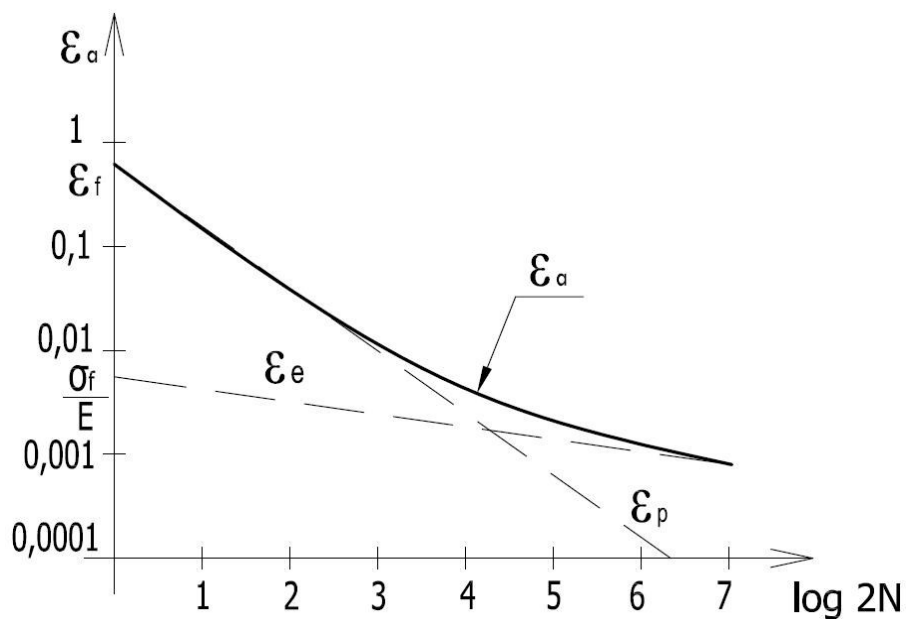
V oblasti nízkocyklového namáhání se na únavovém poškození podílí především plastická složka deformace. Proto se zkoušky provádějí při řízené velikosti poměrné deformace (tzv. tvrdé zatěžování s počtem půlkmitů do lomu $2N$). Celková deformace je tvořena elastickou a plastickou složkou

$$\varepsilon_a = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c,$$

kde σ'_f je součinitel únavové pevnosti, ε'_f součinitel únavové tažnosti a b, c exponenty životnosti. Tyto parametry se vztahují ke konkrétnímu materiálu a jeho tepelnému a technologickému zpracování. Např. Manson [26] pro oceli udává

$$\varepsilon_a(N) \cong \frac{1,9018R_m}{E} (2N)^{-0,12} + 0,7579(\varepsilon_f)^{0,6} (2N)^{-0,6} \quad (1.7)$$

kde ε_f je skutečná lomová tažnost materiálu.



Obr.1.8 Únavová křivka deformace

Podle [25] lze poměrnou deformaci odhadnout pro nelegované a nízkolegované oceli

$$\varepsilon_a(N) \cong \frac{1,5R_m}{E} (2N)^{-0,087} + 0,59\psi(2N)^{-0,58}$$

a pro hliníkové slitiny

$$\varepsilon_a(N) \cong \frac{1,67R_m}{E} (2N)^{-0,095} + 0,35(2N)^{-0,69}$$

Zde značí $\psi = 1,0$ pro $\frac{R_m}{E} \leq 3 \cdot 10^{-3}$

$$\psi = 1,375 - 125 \frac{R_m}{E} \text{ pro } \frac{R_m}{E} > 3 \cdot 10^{-3}$$

Na obr.1.8 je zakreslena *únavová křivka deformace* (Mansonova – Coffinova křivka) v závislosti na počtu $2N$ kmitů. Průběh obou složek deformace se v diagramu znázorní přímkou.

Název	Dynamická únosnost a životnost
Autoři	Ing. Jitka Jágrová, CSc., doc. Ing. Lukáš Čapek, Ph.D.
Určeno pro	studenty FS TUL
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, Liberec
Schváleno	Rektorátem TUL dne 16.10.2017, čj. RE 45/17
Vyšlo	leden 2018
Počet stran	117
Vydání	2.
Číslo publikace	55-045-17

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7494-366-9