Dynamická únosnost a životnost

Přednášky

Milan Růžička, Jan Papuga

jan.papuga@fs.cvut.cz, papuga@pragtic.com

Přednášky - část 5

Vyhodnocení životnosti konstrukcí pomocí NSA

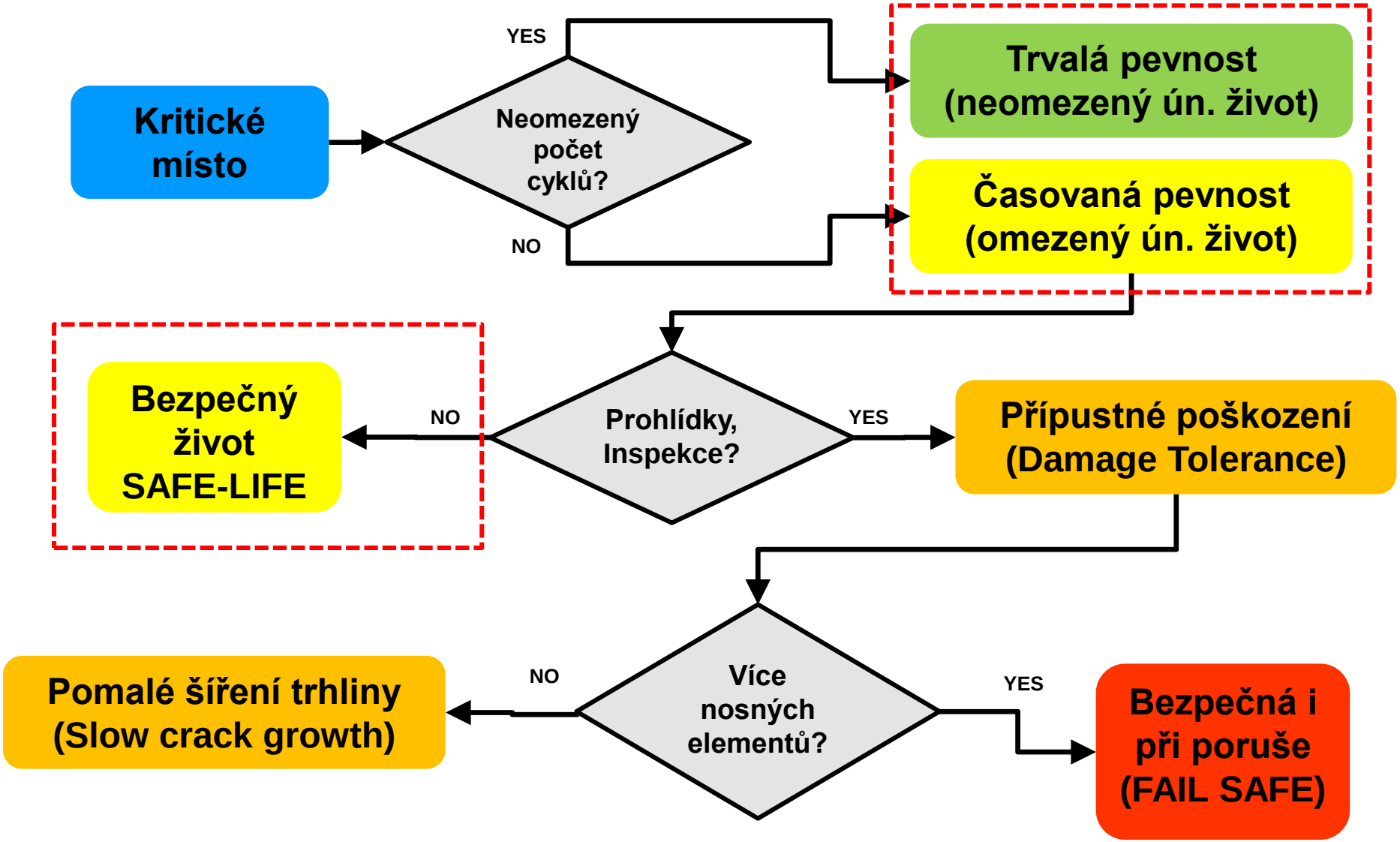
Jan Papuga

mechanika.fs.cvut.cz jan.papuga@fs.cvut.cz, papuga@pragtic.com

Jan Papuga

- living in Kunovice, Czech Republic
- PhD in Applied Mechanics 2006
- working at
  - Czech Technical University in Prague
  - Evektor spol. s r.o. (aircraft producer)
  - Fatigue Analysis RI s.r.o. - executive head
- previous jobs – Kappa 77 (producer of ultralight airplanes), SKODA VYZKUM (VZU Plzen now), ITER facility in Cadarache (France)
- developer of PragTic fatigue solver (www.pragtic.com)
- initiator and leader of FADOFF consortium (www.fadoff.cz)
- chairman of “Workshop on Computational Fatigue Analysis & PragTic Users’ Meeting” (3-day educative workshop, 5 volumes already)
- manager of “Damage Tolerance – Methods and Applications 2011” – a 11-day course in spring 2011
- Etc…

Filosofie navrhování na únavu– přístupy



Safe-Life: Metody predikce životnosti

- Přístup pomocí nominálních napětí

  (NSA - Nominal Stress Approach)

- Přístup pomocí lokálních elastických napětí

  (LESA - Local Elastic Stress Approach)

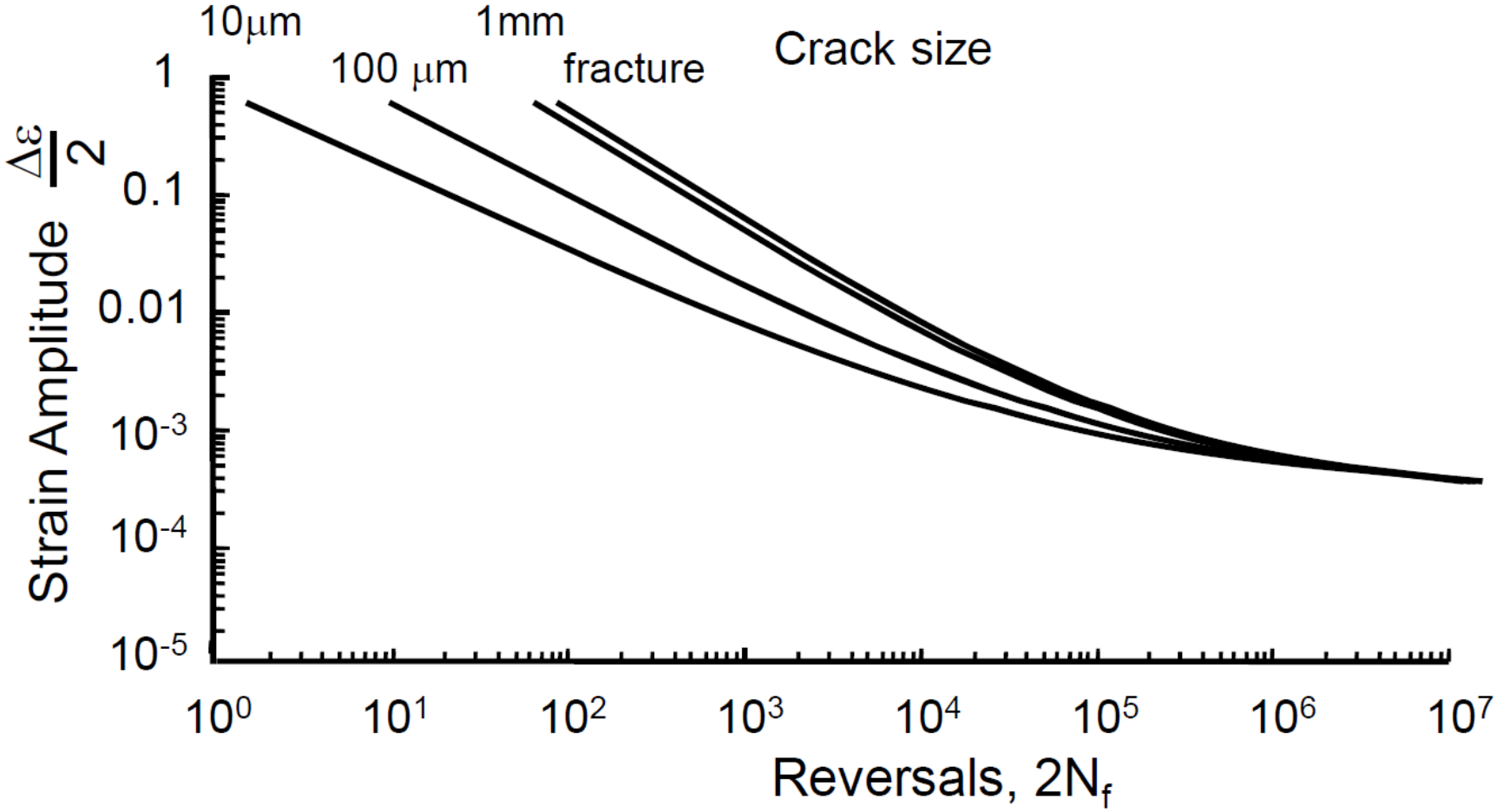
Poškození odpovídá finálnímu lomu součásti

- Přístup pomocí lokálních elasto-plastických napětí a deformací

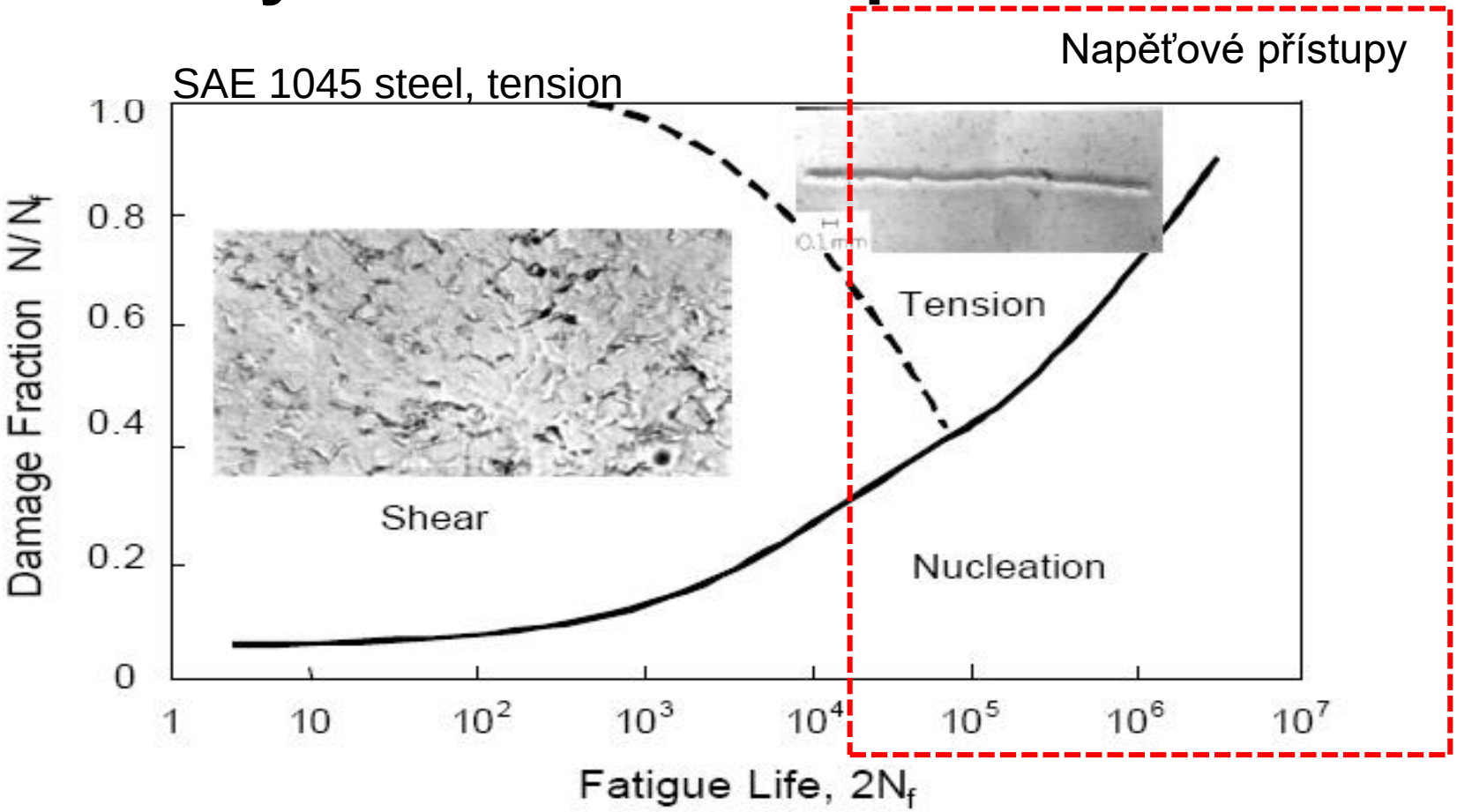
  (LPSA - Local Plastic Stress and Strain Approach)

Poškození odpovídá vytvoření technické makrotrhliny

Rozvoj poškození



Rozdíly v mechanismu poškozování



SOCIE, D. F.: Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment. In: Advances in Multiaxial Fatigue, ASTM STP 1191. Red. D. L. Dowell a R. Ellis, Philadelphia, American Society for Testing and Materials 1993, pp. 7-36.

Formulace S-N (Wöhlerovy) křivky

- August Wöhler data uváděl jen v tabulkách
- Teprve následníci je začali vynášet v grafech
- A teprve Basquin (1910) formuloval vztah

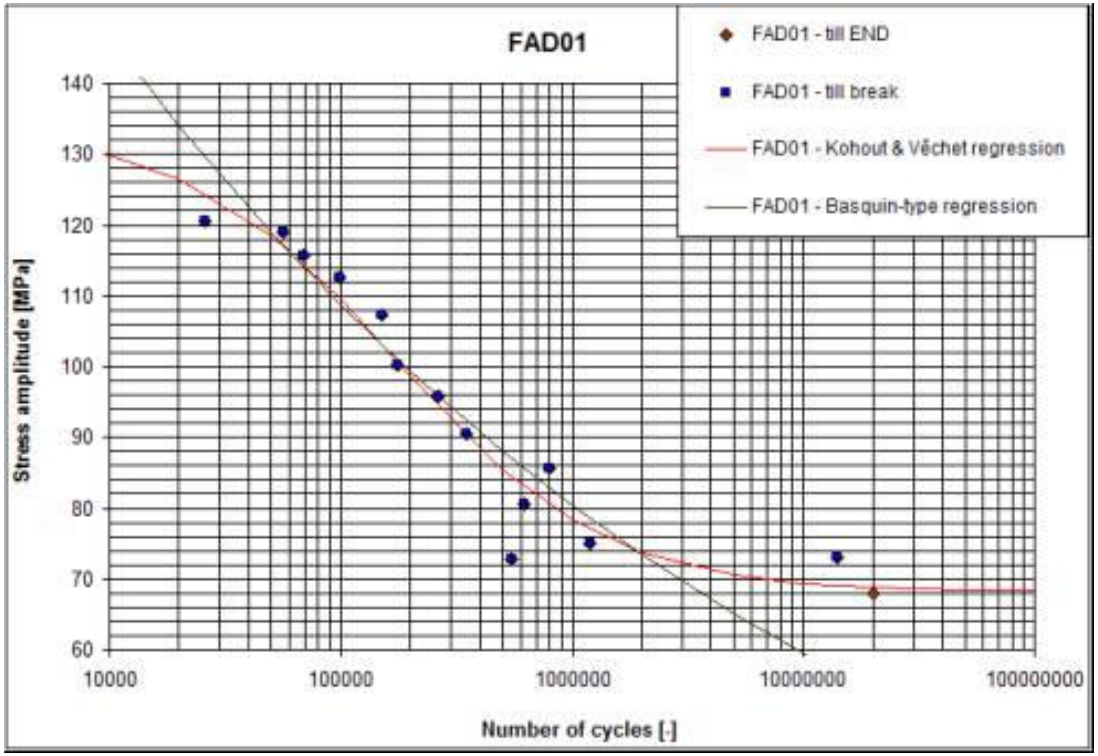
$$\sigma_a = \sigma_f'(2N)^b$$

- Alternativní vztah

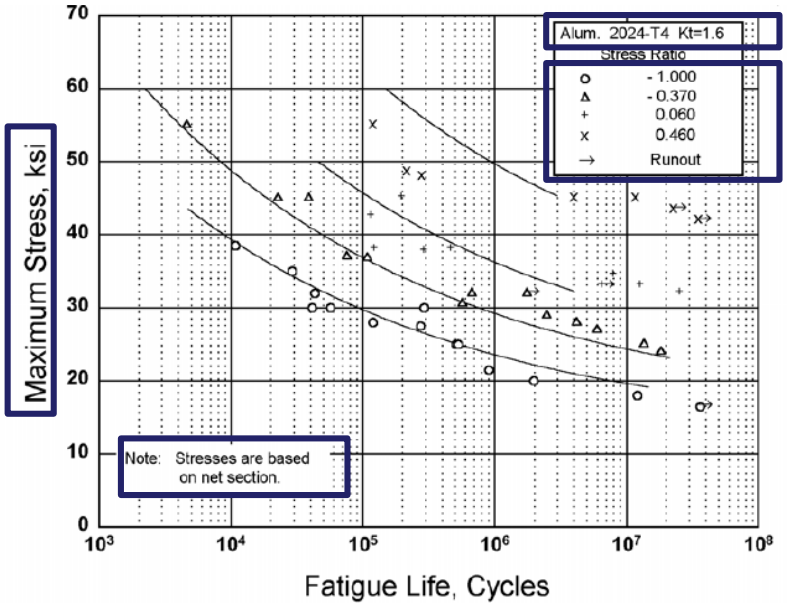
$$\sigma_a^w N = C$$

- Kohout-Věchet

$$\sigma_a = \sigma_C \left(\frac{N+B}{N+C} \right)^b$$



S-N křivka – co vlastně hledáme?



Rice, R.C.; Jackson, J. L.; Bakuckas, J.; Thompson, S.: Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS) [DOT/FAA/AR-MMPDS-01 Report]. FAA, Washington D.C. 2003.

Product Form: Rolled bar, 1.125 inch diameter

Properties:	TUS, ksi	TYS, ksi	Temp., °F
	73	49	RT

Specimen Details: Semicircular
V-Groove, $K_t = 1.6$
0.450 inch gross diameter
0.400 inch net diameter
0.100 inch root radius, r
60° flank angle, ω

Surface Condition: As machined

Test Parameters:
Loading - Axial
Frequency - 1800 to 3600 cpm
Temperature - RT
Environment - Air

No. of Heats/Lots: Not specified

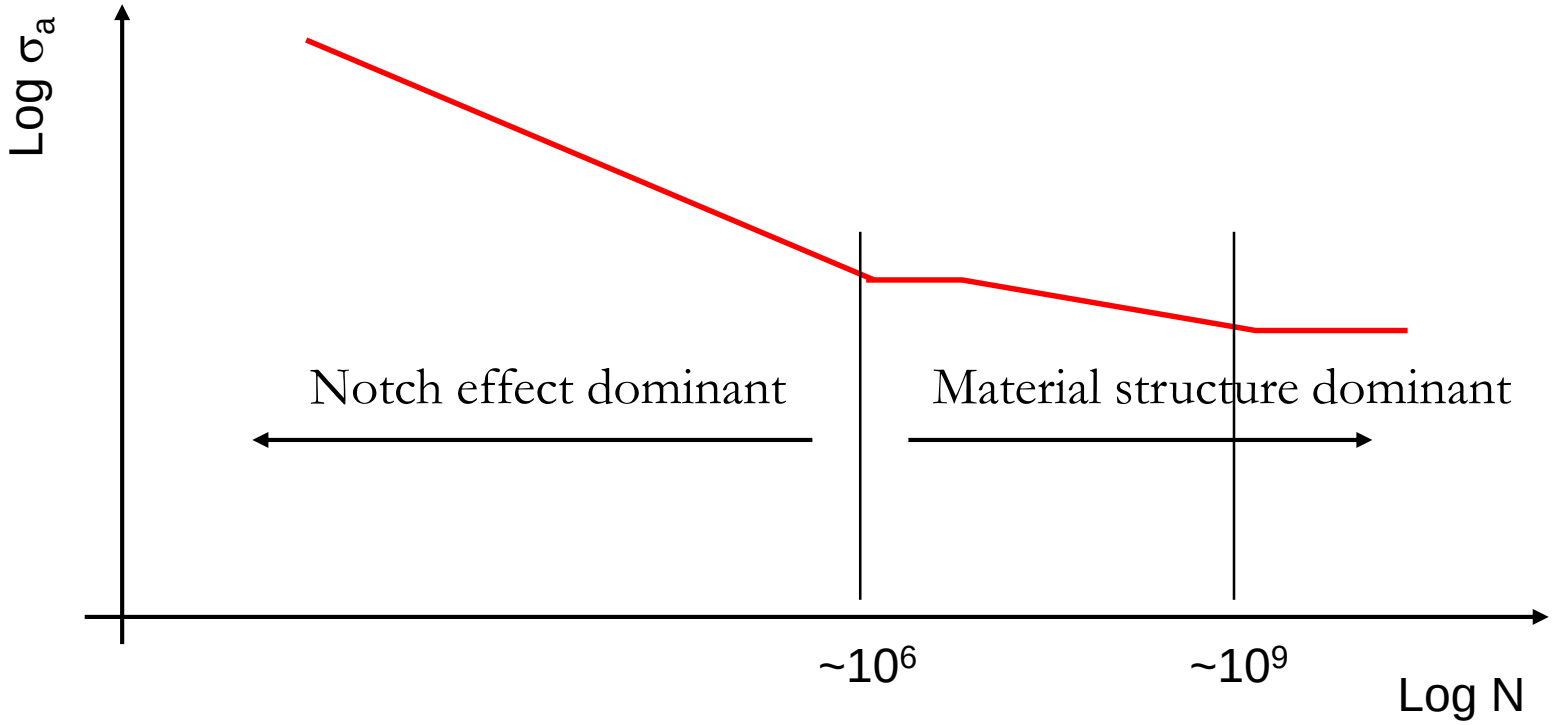
Equivalent Stress Equation:
$\text{Log } N_f = 12.25 - 5.16 \log (S_{eq} - 18.7)$
$S_{eq} = S_{max} (1-R)^{0.57}$
Std. Error of Estimate, Log (Life) = 0.414
Standard Deviation, Log (Life) = 0.989
$R^2 = 82\%$

Faktory ovlivňující únavovou pevnost

- Loading factor
- Size factor
- Surface quality factor
- Notch factor
- Mean stress effect
- Residual stresses
- Effect of thermo-mechanical treatment
- Temperature effect
- Multiaxiality factor
- Oxidation factor
- Hydrogen embrittlement factor
- Irradiation factor
- Load frequency factor
- …

Mez únavy

- Mezné napětí, které může být v součásti opakovaně vybuzeno, aniž by došlo k její poruše během libovolného počtu cyklů
- Někdy pouze konvenční hodnota (hliníkové, hořčíkové slitiny)
- Důležité, pokud navrhuji na nekonečnou životnost (trvalou pevnost)
- Giga-cycle fatigue (GCF) / Very high cycle fatigue (VHCF):



Mez únavy - odhad

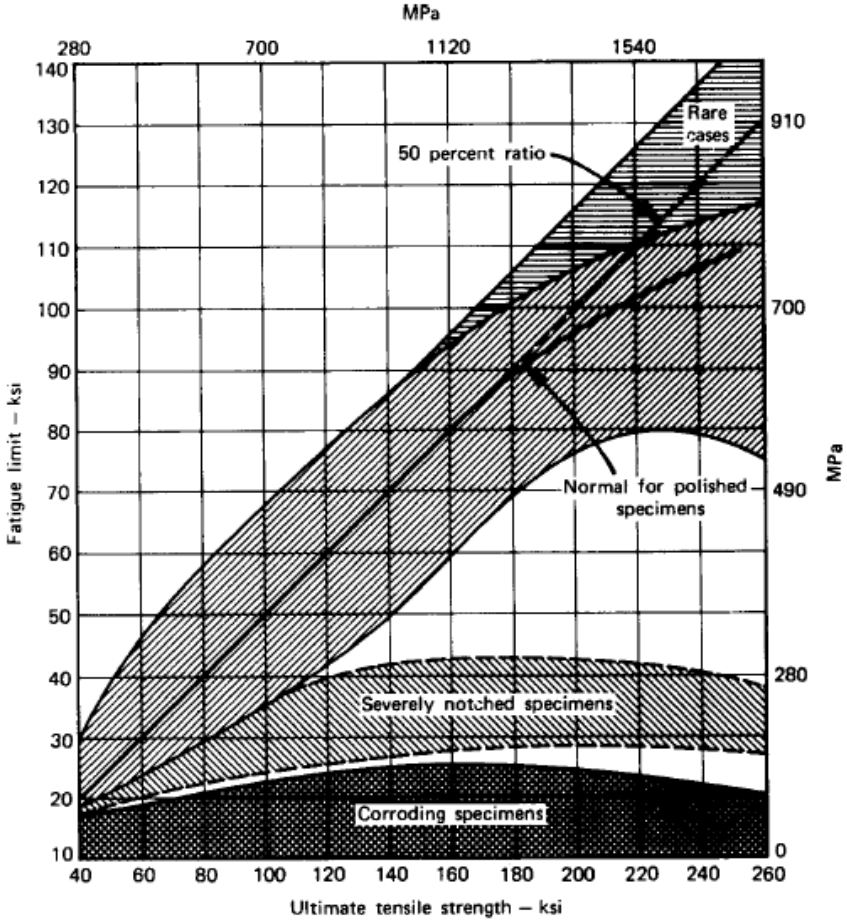
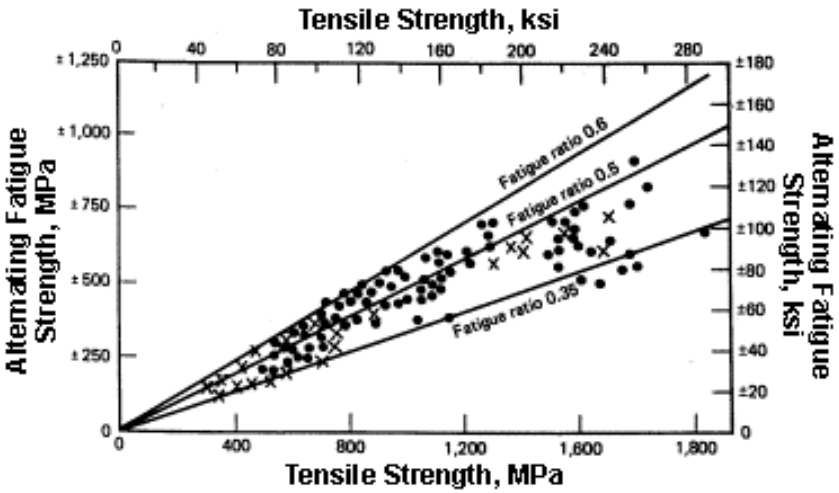


FIGURE 6-9

Relationship Between Fatigue Limit and Ultimate Strength for Steel Specimens (From *Steel and Its Heat Treatment*, by D. K. Bullens, John Wiley & Sons, New York, 1948, with permission of the publisher)



http://fatiguecalculator.com

STEELS:

σ_C v tahu≅ 0,35 Rm

v ohybu = 0,43 Rm

v krutu ≅ 0,25 Rm .

Mez únavy - odhad

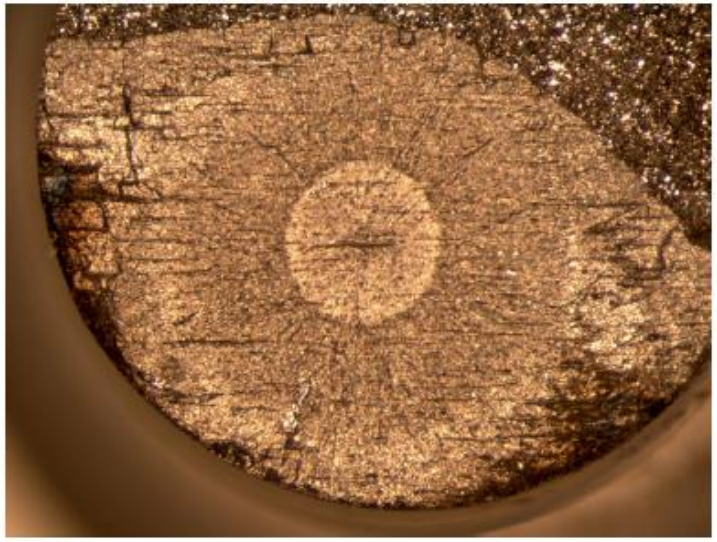
Skupina materiálů	$f_{W,\sigma}$	$f_{W,\tau}$
Kalená ocel	0,4	0,577
Nerezová ocel	0,4	0,577
Ocel na výkovky	0,4	0,577
Jiné oceli	0,45	0,577
Ocelolitina	0,34	0,577
Kuličková litina	0,34	0,65
Tvárná litina	0,3	0,75
Šedá litina	0,34	1,0
Tvářená hliníková slitina	0,3	0,577
Litá hliníková slitina	0,3	0,75

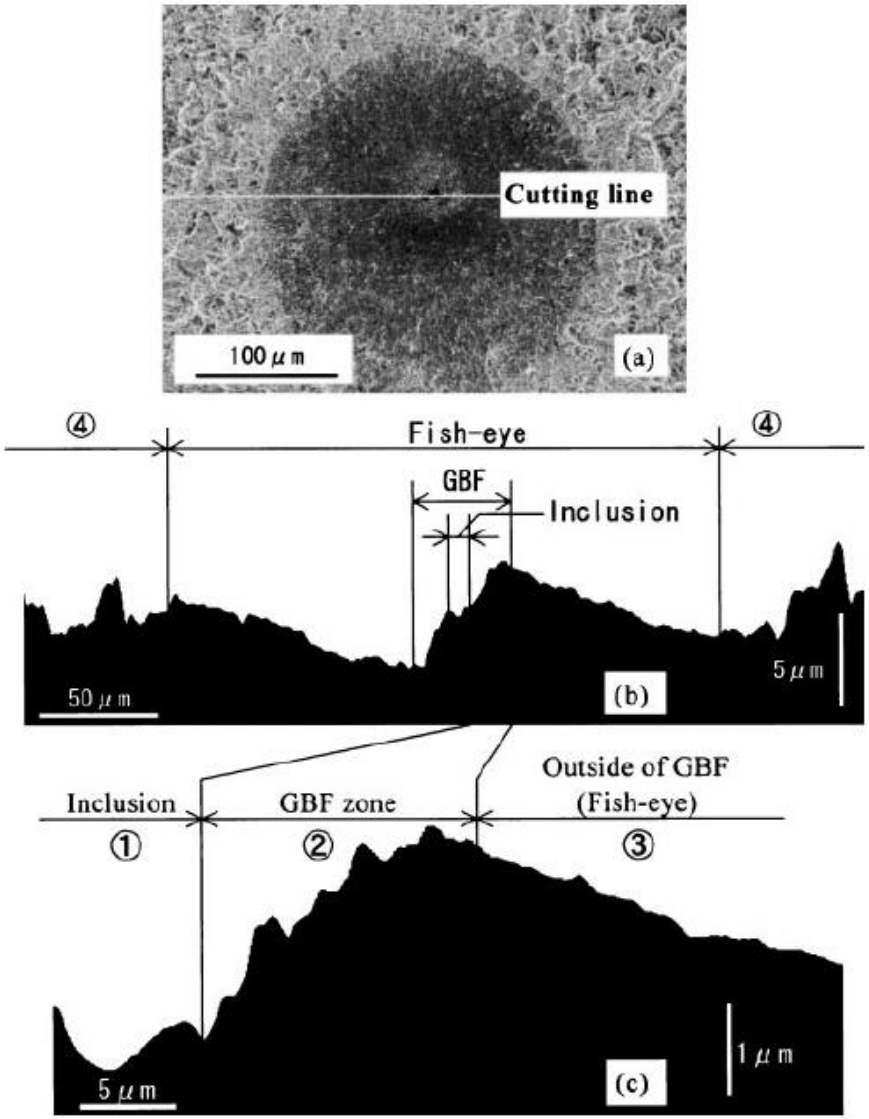
$$\sigma_C = f_{W,\sigma} \cdot R_m$$

$$\tau_C = f_{W,\tau} \cdot \sigma_C$$

Gigacyklová únava

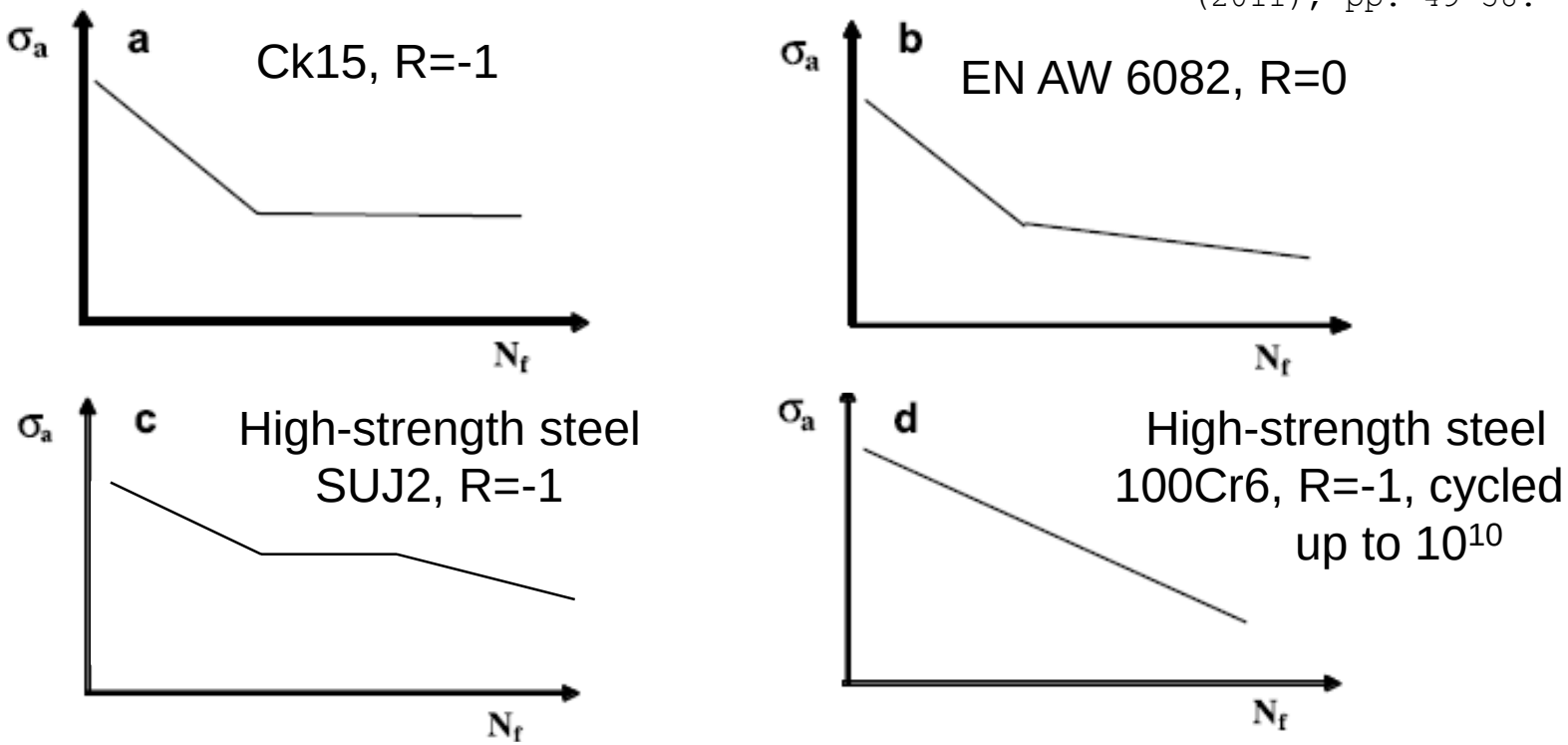
- Trhliny můžou vznikat i uvnitř materiálu
- Důsledek materiálové nehomogenity





Gigacycle Fatigue

Pyttel, B.; Schwerdt, D.; Berger, C.: Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? Int J Fatigue 33 (2011), pp. 49-58.



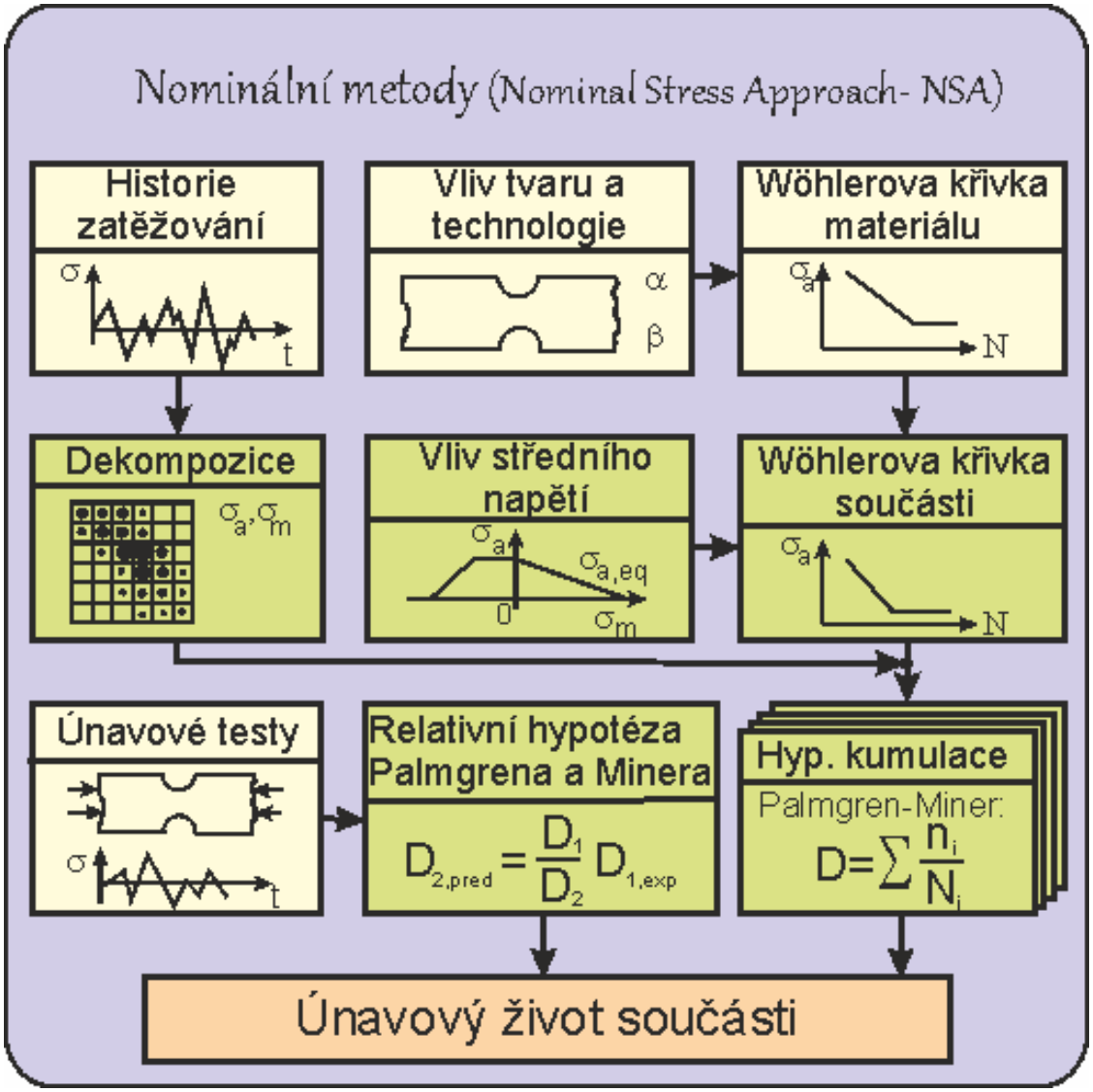
Design code	Material	Assumption
FKM-Guideline [17]	Steel, cast iron	$k = 5$ for LCF, fatigue limit from $N_k=10^6$,
	aluminium alloys	$N_k=10^6$, $k^*=15$, fatigue limit from $N_k=10^8$
IIW-Recommendation [19]	Steel, aluminium alloys, welded	$N_k=10^7$, $k^*=22$, no fatigue limit
Eurocode 3 [18]	Steel	Fatigue limit from $N_k=5\text{x}10^6$
Eurocode 9 [20]	Aluminium	Fatigue limit from $N_k=10^8$

Gigacycle Fatigue

Sonsino CM. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. Int J Fatigue 2007; 29:2246–58.

Material	N_k	k^*	Decrease per decade in %	$1/T_\sigma$
Steel, not welded	5x105 - high-strength 2x106 - structural steels	45	5	1.20
Steel, welded	$1x10^6$ - thermal stress relieved $1x10^7$ - high tensile residual stresses	45 22	5 10	1.50
Cast steel	$5x10^5$ - high-strength $2x10^6$ - medium-strength	45	5	1.40
Sintered steel	$5x10^5$ - high-strength $2x10^6$ - medium-strength	45	5	1.25
Cast nodular iron	$5x10^5$ - high-strength $2x10^6$ - medium-strength	45	5	1.40
Wrought Al alloys, not welded	$1x10^6$–$5x10^6$	22	10	1.25
Wrought Al alloys, welded	$1x10^6$ - low tensile resid. stresses $1x10^7$ - high tensile resid. stresses	22	10	1.45
Cast aluminium	$1x10^6$–$5x10^6$	22	10	1.40
Sintered aluminium	$1x10^6$	22	10	1.25
Wrought Mg alloys, not welded	$5x10^4$–$1x10^5$	45	5	1.20
Cast magnesium	$1x10^5$–$5x10^5$	45	5	1.30
Wrought Mg alloys, welded	$5x10^5$ - low tensile resid. stresses $1x10^7$ - high tensile resid. stresses	22	10	1.50
Vysvětlivky: N_k ~ bod zlomu; k^* ~ sklon S-N křivky za bodem zlomu; $T_\sigma = \sigma_a$ (P_S=90%) / σ_a (P_S=10%)				

Nominální napěťová únavová analýza



- Prakticky všechny části postupu už známe

Proč „nominální“

- Vycházíme z jednoduchých analytických vztahů pro výpočet nominálních napětí v průřezu součásti
- Vhodné pro:
  - Jednoduché prizmatické nosníky
  - Návrhový předběžný výpočet

Co ale vruby?

- Koeficient tvaru

$$\alpha \equiv K_t = \frac{\sigma}{S}\left(= \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}\right)$$

  – Míra lokálního zvýšení napětí v důsledku vrubu
  – Zastupuje podrobnější MKP výpočet

- Koeficient vrubu

$$K_f \equiv \beta = \frac{\sigma_C}{\sigma_C^*}$$

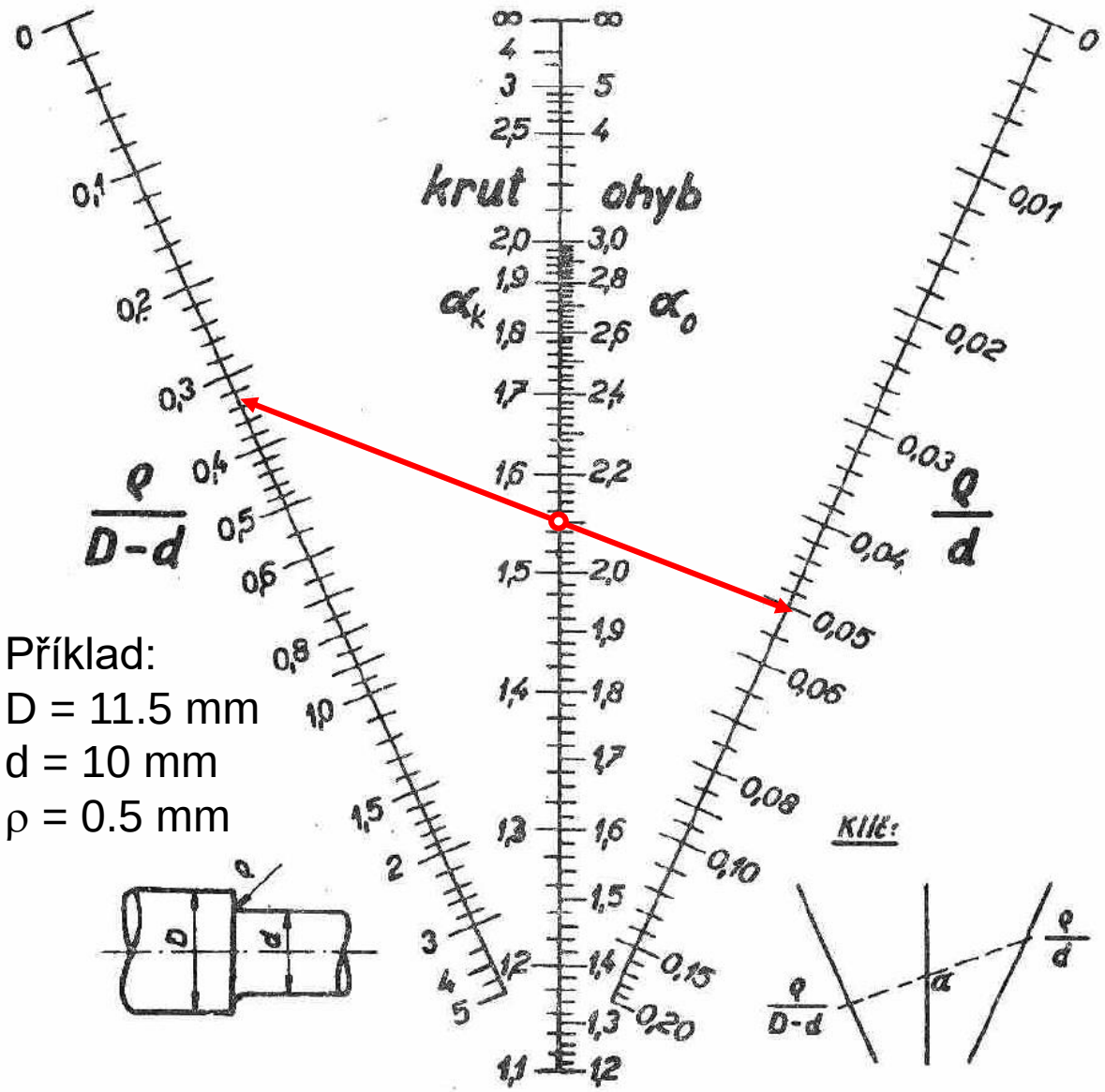
  – Míra snížení meze únavy vrubovaného dílu

- Součinitel únavy

$$n = \frac{K_t}{K_f}$$

  – Vždy větší než 1

Součinitel tvaru



Příklad:
D = 11.5 mm
d = 10 mm
ρ = 0.5 mm

Zjištění koeficientu tvaru (stress concentration factor, SCF)

Růžička, M., Hanke, M., Rost, M.: Dynamická pevnost a životnost. ČVUT, 1987.

Str. 194-195

Kde hledat na Internetu?

Zjištění koeficientu tvaru (stress concentration factor, SCF) – trochu více „trendy“ řešení:

www.efatigue.com

Zdrojem analytické formule převzaté z:

Pilkey, W. D.(2005). Formulas for Stress, Strain, and Structural Matrices.2nd Edition John Wiley & Sons

Různá vyjádření součinitele vrubu

V závislosti na tvarových vlastnostech (ρ – radius v kořeni vrubu)

Thum

$$K_f = 1 + (K_t - 1) \cdot q = \frac{K_t}{n}$$

Neuber

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{\frac{A}{\rho}}}$$

Peterson

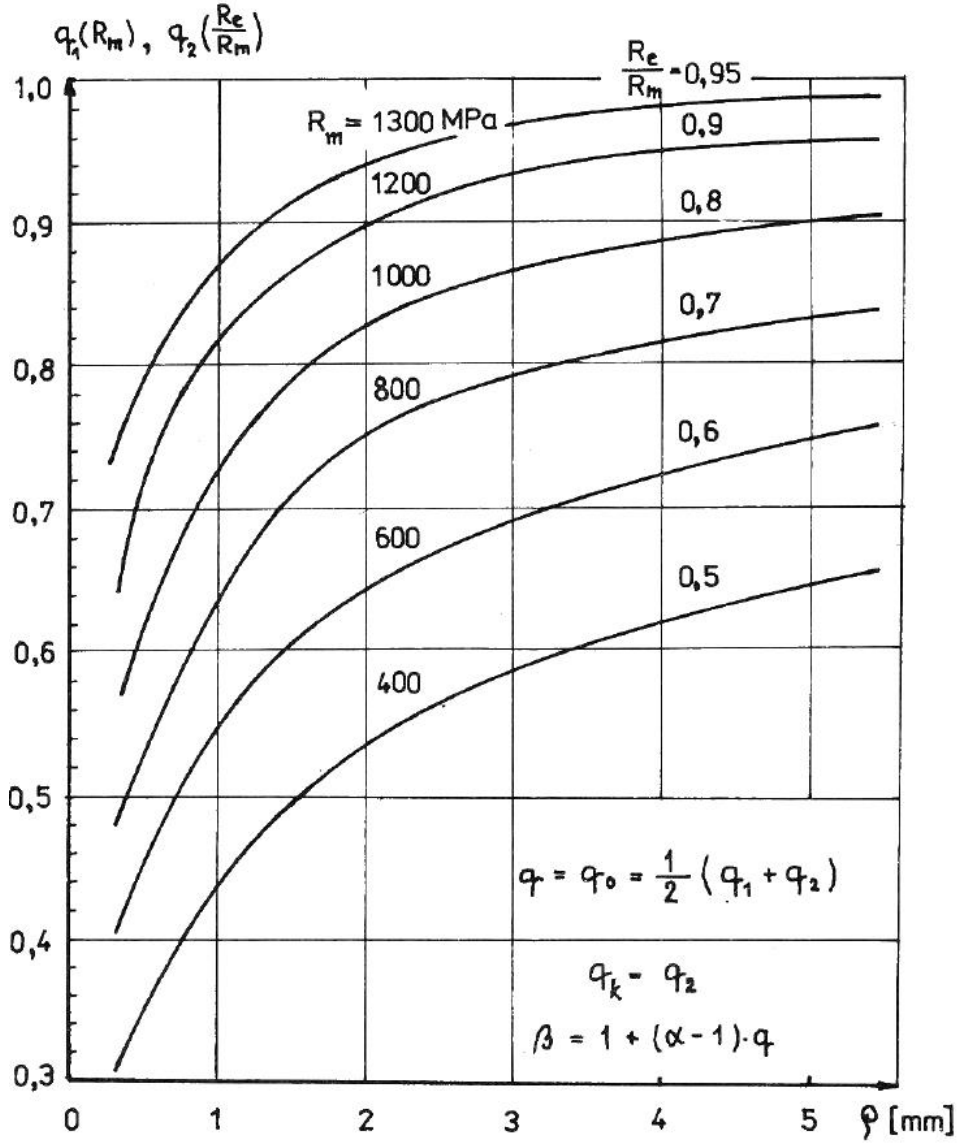
$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a}{\rho}}$$

Heywood

$$K_f = \frac{K_t}{1 + 2\frac{K_t - 1}{K_t}\sqrt{\frac{a'}{\rho}}}$$

Dodatečné materiálové parametry

Thum – součinitel vrubové citlivosti



- Bylo by pěkné, aby vrubová citlivost byla čistě materiálový parametr
- Ale není

Různá vyjádření součinitele vrubu

V závislosti na relativním gradientu napětí γ‘ $\gamma' = \frac{1}{\sigma}\left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial x}\right)_{x=0}$

FKM-Richtlinie

$\gamma' \leq 0{,}1 mm^{-1}$

$$n_\gamma = 1 + \gamma'.10^{-\left(a_G - 0{,}5 + \frac{R_m}{b_G}\right)}$$

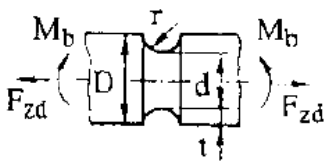
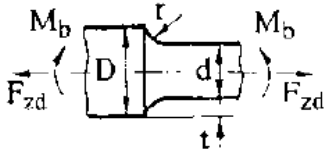
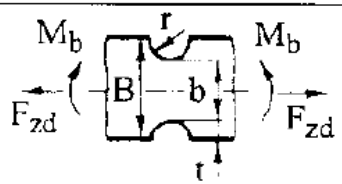
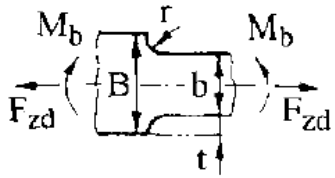
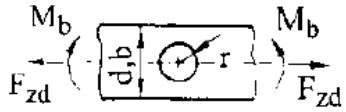
$0{,}1 mm^{-1} < \gamma' \leq 1 mm^{-1}$

$$n_\gamma = 1 + \sqrt{\gamma'}.10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G}\right)}$$

$1 mm^{-1} < \gamma' \leq 100 mm^{-1}$

$$n_\gamma = 1 + \sqrt[4]{\gamma'}.10^{-\left(a_G + \frac{R_m}{b_G}\right)}$$

	Oceli			Litina			Hliníková slitina	
	Nerezová	Litá	Jiná	Kuličková	Tvárná	Šedá	Tvářená	Litá
a_G	0,4	0,25	0,5	0,05	-0,05	-0,05	0,05	-0,05
b_G	2400	2000	2700	3200	3200	3200	850	3200

Bauteilform	$G_\sigma(r)$ ◇2 ◇3	$G_\tau(r)$ ◇4
	$\frac{2}{r}\cdot(1+\varphi)$	$\frac{1}{r}$
	$\frac{2{,}3}{r}\cdot(1+\varphi)$	$\frac{1{,}15}{r}$
	$\frac{2}{r}\cdot(1+\varphi)$	–
	$\frac{2{,}3}{r}\cdot(1+\varphi)$	–
 Rundstab oder Flachstab	$\frac{2{,}3}{r}$	–

◇1 $r > 0$. Für Rundstäbe gelten die Gleichungen näherungsweise auch bei Längsbohrung.

◇2 $\varphi = 0$ für $t/d > 0{,}25$ oder $t/b > 0{,}25$,
$\varphi = 1/(4\cdot\sqrt{t/r}+2)$ für $t/d \le 0{,}25$ bzw. $t/b \le 0{,}25$.

◇3 Das bezogene Spannungsgefälle $G_\sigma(r)$ gilt für Zugdruck und für Biegung; der Unterschied wird mit der Stützzahl $n_\sigma(d)$ in Gl. (2.3.2) und (2.3.3) berücksichtigt.

Zjednodušený výpočet

- FKM směrnice, vydání č. 6:

  FKM-Guideline: Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering. 6th revised edition. Frankfurt/Main, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) 2012.

- G_σ – poměrný gradient napětí

Vliv vrubovitosti

- Geometrie vrubu

↓ Nomogramy, efatigue.com

- Součinitel tvaru

↓ Thum (vrubová citlivost), FKM (gradient napětí), jiné metody…

- Součinitel vrubu

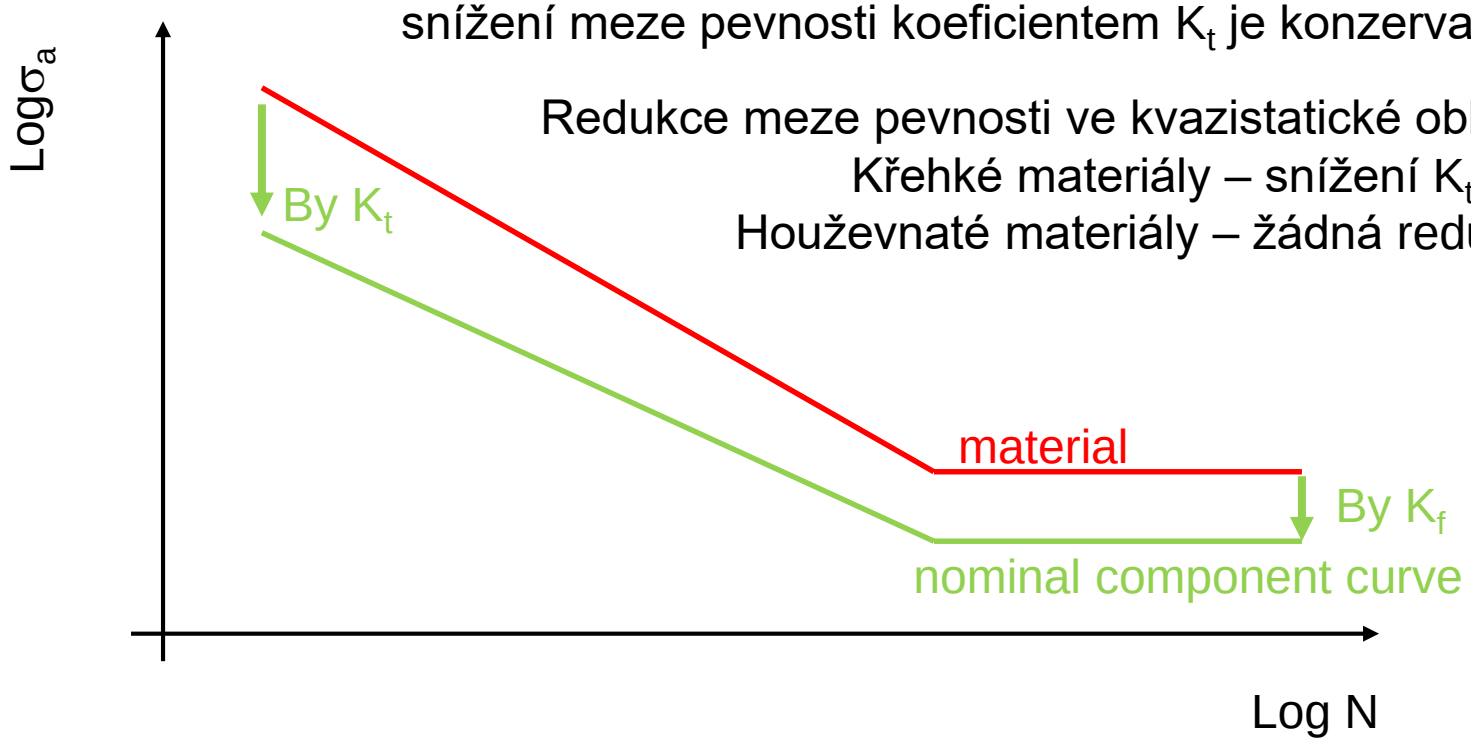
↓ $$K_f \equiv \beta = \frac{\sigma_C}{\sigma_C^*}$$

- Snížení **meze únavy** S-N křivky

Vliv vrubovitosti

K_t vyjadřuje lokální změnu napjatosti ve vrubu, tj. předpoklad snížení meze pevnosti koeficientem K_t je konzervativní

Redukce meze pevnosti ve kvazistatické oblasti:
Křehké materiály – snížení K_t krát
Houževnaté materiály – žádná redukce

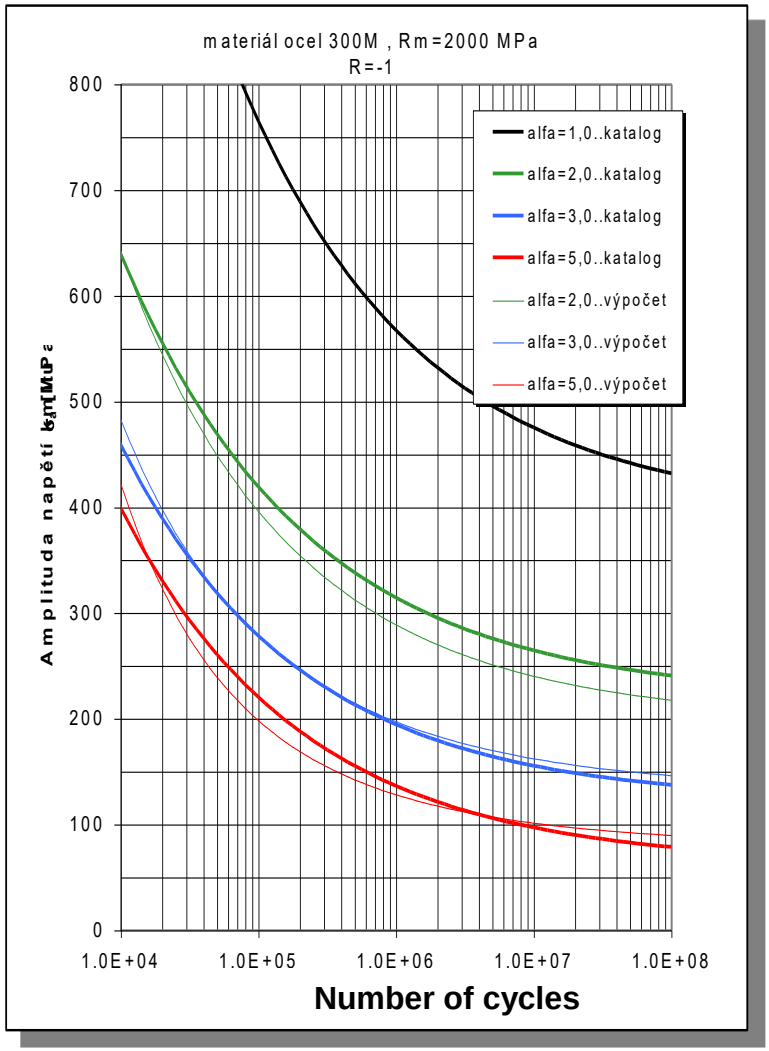


Fatigue limit:

σ_{FL} , σ_C

$$K_f = \frac{\sigma_{FL,mat}}{\sigma_{FL,notched}} < K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

Víceparametrická formulace rodiny S-N křivek



Heywood formula modification : Růžička

$$K_{f,N}(N) = 1 + (K_f - 1).\mu(N)$$

$$\mu(N) = \frac{(\log N)^E}{B + (\log N)^E}$$

$$\frac{1}{n_\gamma} = \frac{K_f}{K_t} = 1 + \sqrt{\gamma} \cdot 10^{-(K1)}$$

$$E = 4 \cdot \gamma^{K2}$$

$$B = \left[\frac{1}{(1+\gamma)^{K3}} \cdot \frac{K4}{R_m} \right]^2$$

Pouze pro info!

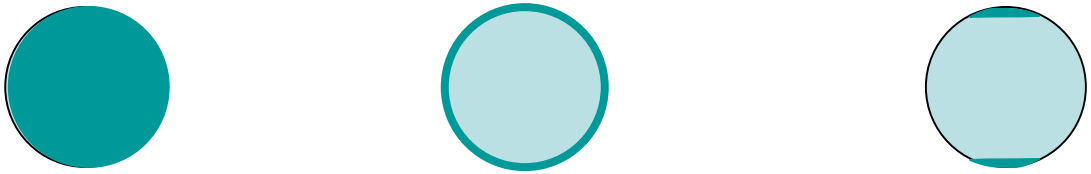
Vliv velikosti nejzatíženější oblasti

Vliv velikosti nejzatíženější oblasti

- Únava – koncept nejslabšího článku
- Poškození jediného článku řetězu vede k roztržení řetězu
- Čím větší oblast pod velkým napětím, tím pravděpodobnější porušení

⇓

Fatigue limit: Push-pull < Rotating bending < Plane bending



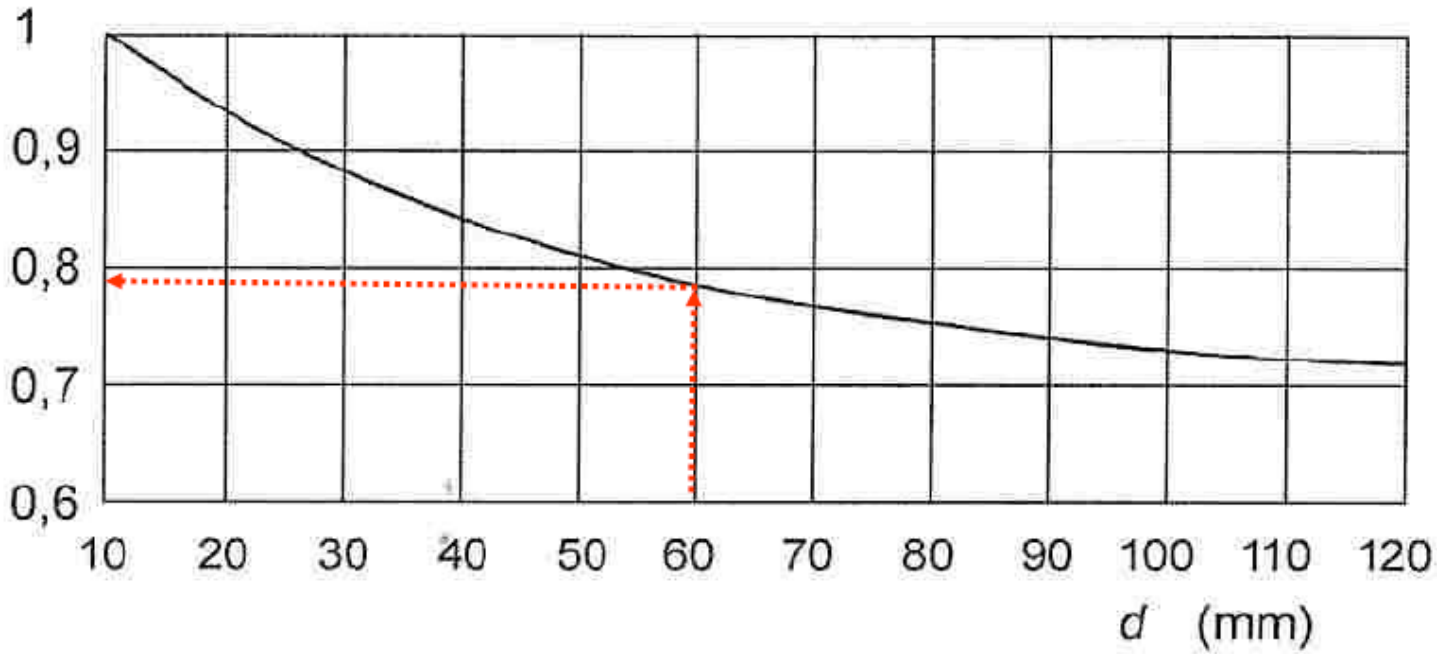
Size effect vs. Stress gradient effect

Koeficient typu zatížení (Loading factor, k_L)

- Meze únavy bývaly často definovány v módu prostého ohybu (tj. včetně vzniklého gradientu napětí)
- Vzorek zatížený v tahu bude mít nižší mez únavy než v ohybu
- A tohle má řešit koeficient typu zatížení (pamatujete odhad meze únavy?)

Loading Type	k_L
Axial	0.9
Bending	1.0
Torsion	0.57

Vliv velikosti (Size effect, k_s)



$$k_S = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$$

0.3 inch

Stanoveno pro *d = 3 - 50 mm*

V případě prostého ohybu: $d = \sqrt{\frac{A_{0.95}}{0.077}}$

Vliv velikosti – exponovaný objem

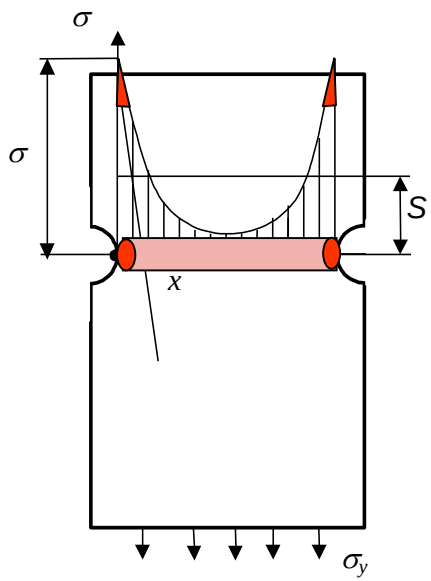
Ekvivalentní průměr

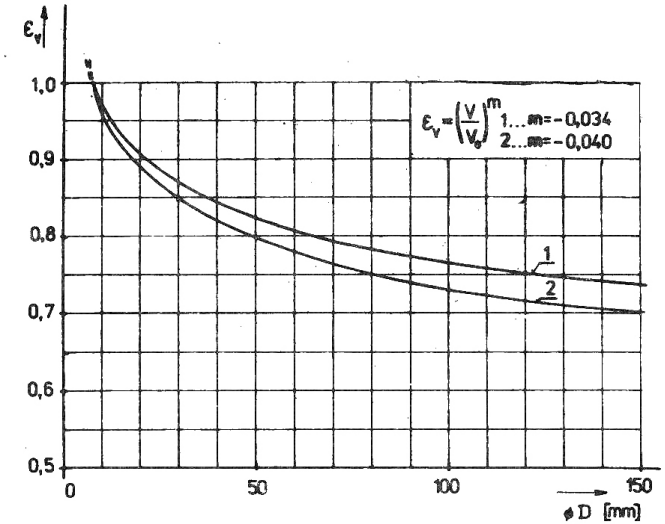
- Objem součásti zatížený napětím přesahujícím 95% maxima

$$k_S = \left(\frac{\sigma_C^D}{\sigma_C^{d=10}} \right) = \left(\frac{V_{\exp}^D}{V_{\exp}^d} \right)^m$$

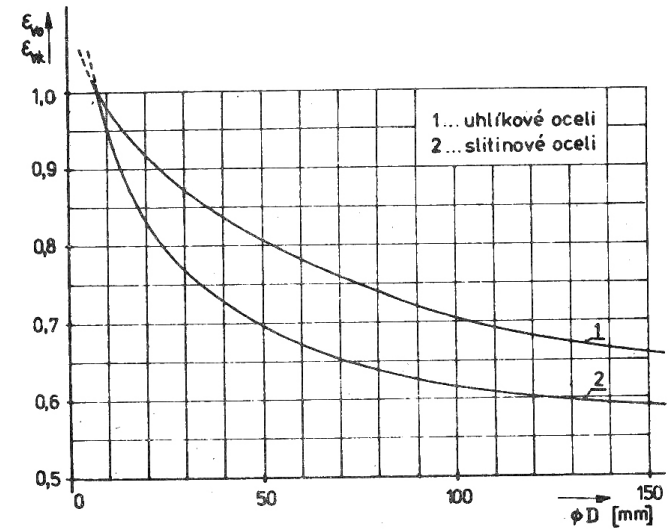
Koeficient m

- Oceli: -0,03 ÷ -0,06
- Konstrukční ocel: -0,034





obr. a/



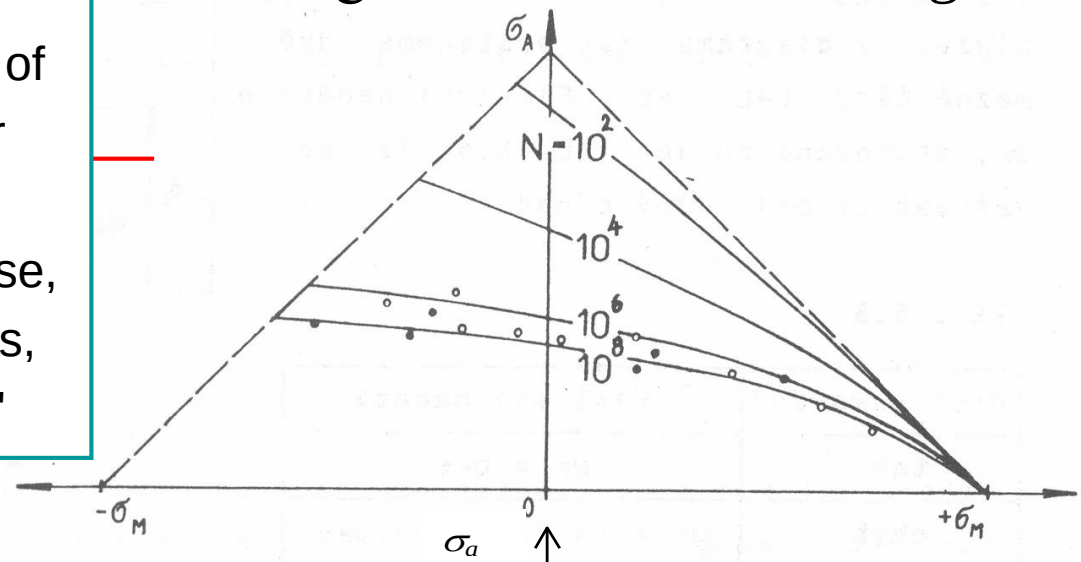
obr. b/

Vliv střední hodnoty napětí (Mean stress effect – MSE)

Vliv středního napětí cyklu

Goodman, 1890:
".. whether the assumptions of the theory are justifiable or not.... We adopt it simply because it is the easiest to use, and for all practical purposes, represents Wöhler's data."

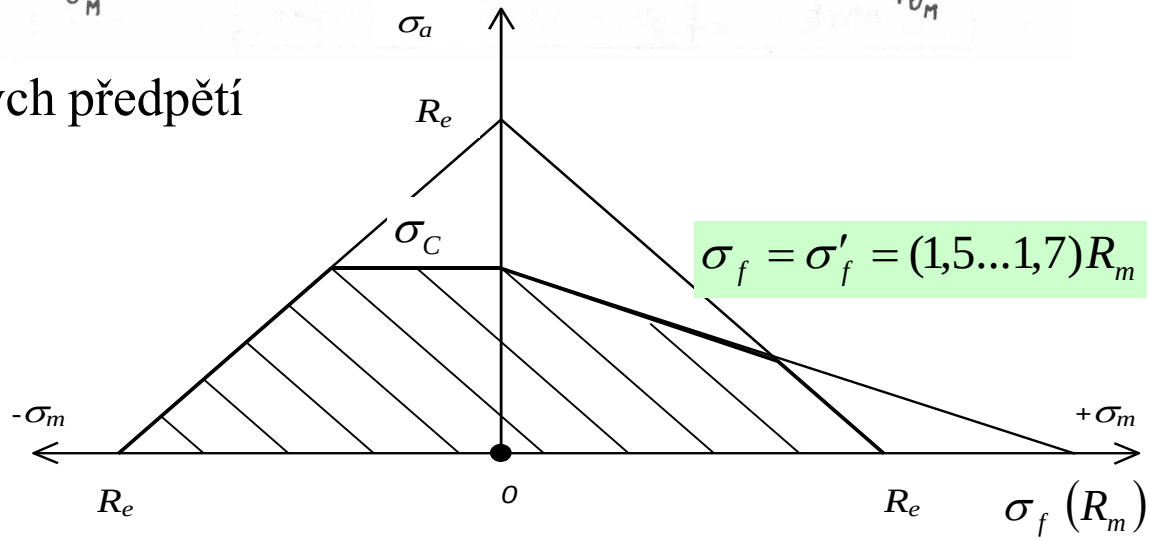
Haighův - Goodmanův diagram



Aproximace v oblasti tahových předpětí

$$\sigma_a = \sigma_C \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_f} \right)^m \right]$$

m=1 Goodmanova přímka
m=2 Gerberova parabola



$$\sigma_f = \sigma'_f = (1{,}5 \ldots 1{,}7) R_m$$

Vytvoření Haighova diagramu (dle Fatemiho)

σ_f – true fracture stress
S_y – yield stress
S_f – fatigue limit
S'_y – cyclic yield stress
S_{cat} – critical alternating tensile stress (below this stress the cracks will not propagate)
= 70 MPa (hard steel)
= 30 MPa (mild steel)
= 20 MPa (high-strength aluminum)

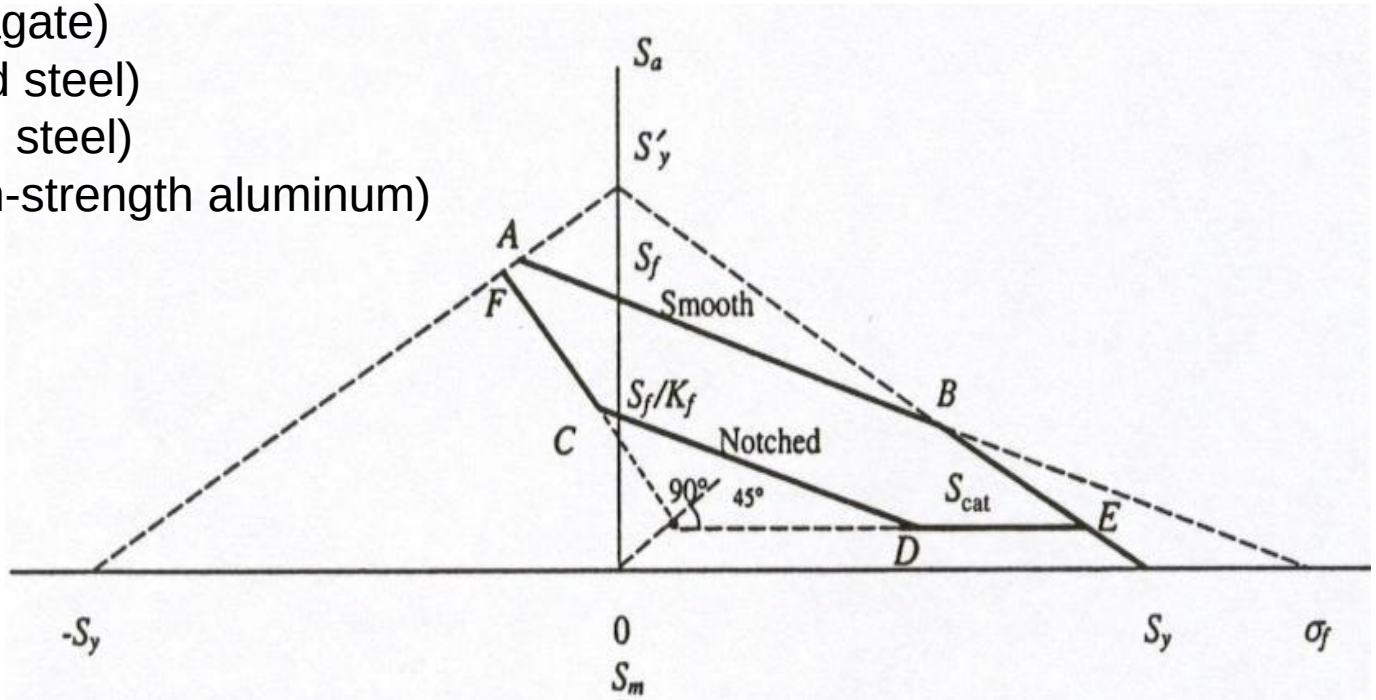


Figure 7.11 Haigh diagram.

Citlivost na střední napětí M

$$M = \frac{\sigma_{a,R=-1}}{\sigma_{a,R=0}} - 1$$

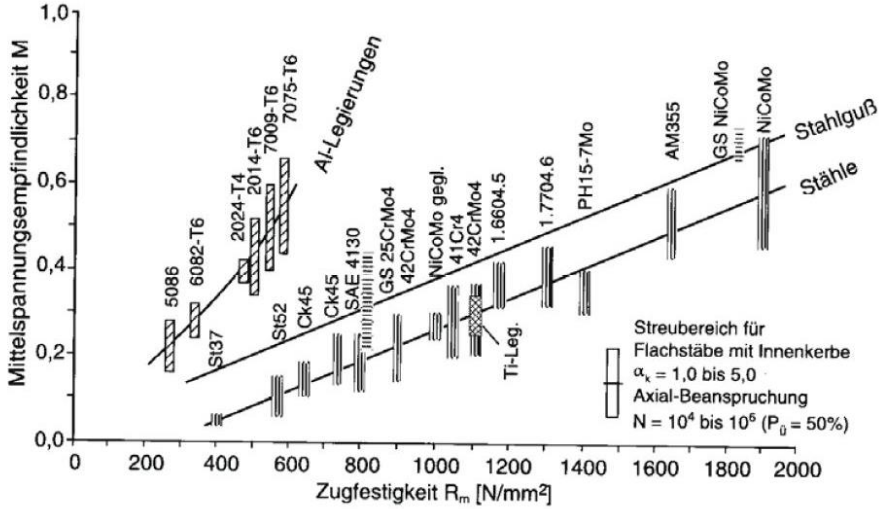


Bild 2-1: Mittelspannungsempfindlichkeit verschiedener Werkstoffe in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit /5/ (aus /25/).

Anon.: Mittelspannungseinfluß auf das Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Aluminiumlegierungen. [AIF-Nr. 12676 N, DVS-Nr. 9.031]. TU Braunschweig, Braunschweig 2004.

Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Springer 2006.

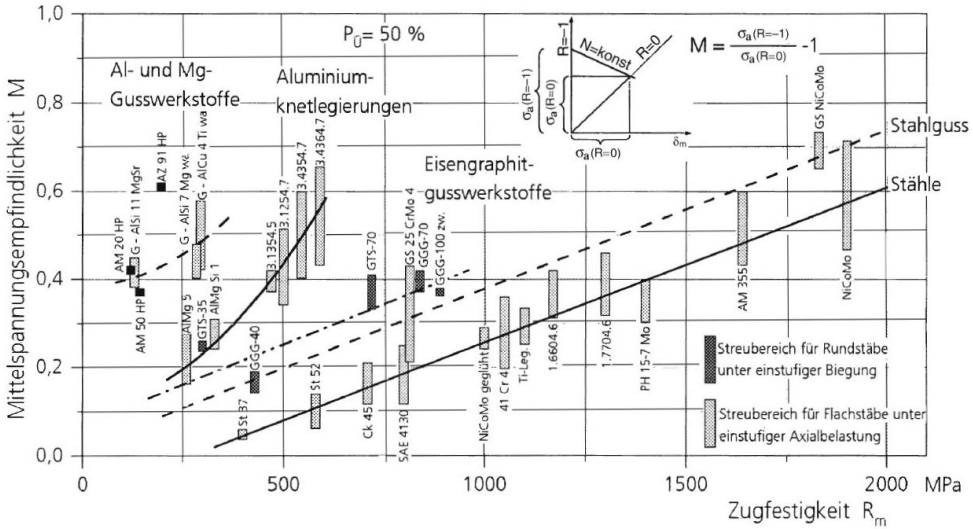
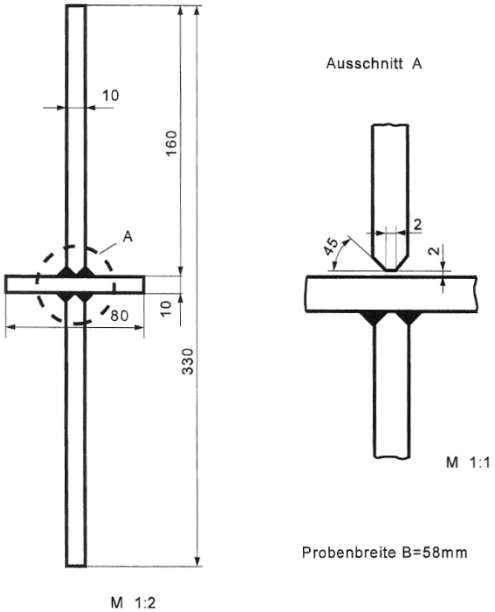
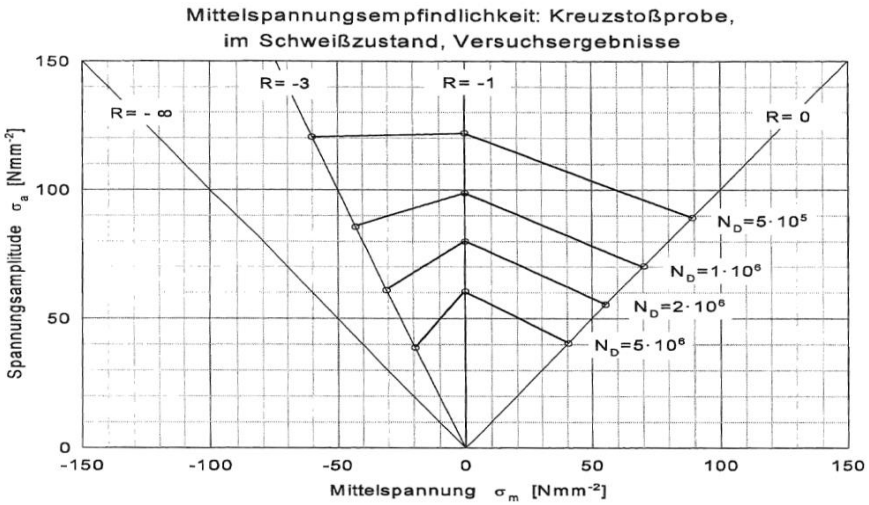


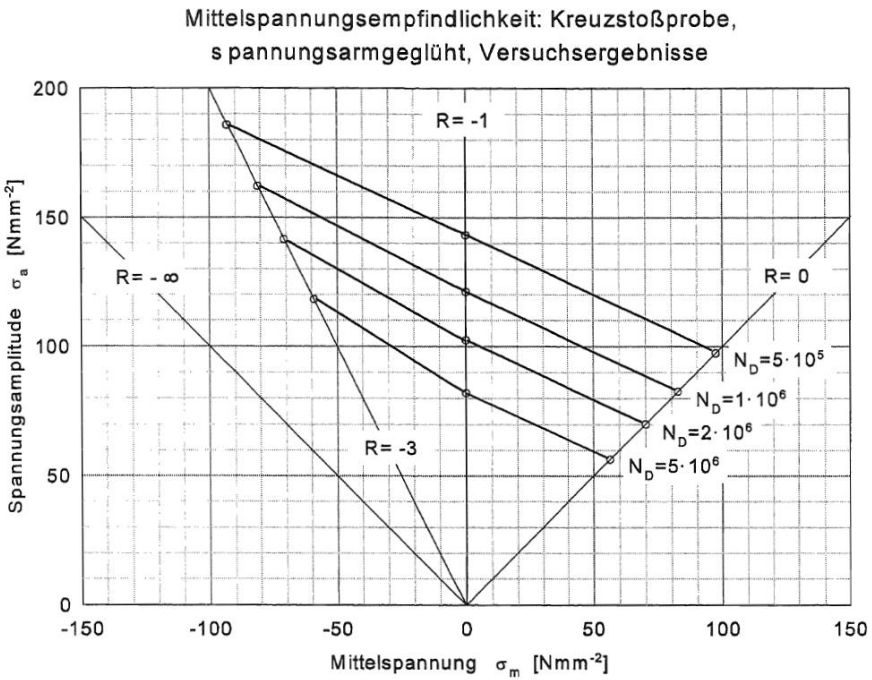
Abb. 2.1–9. Mittelspannungsempfindlichkeit *M* verschiedener Stahl-, Eisenguss und Aluminium-Werkstoffe, nach Sonsino

Vliv středního napětí v tlaku



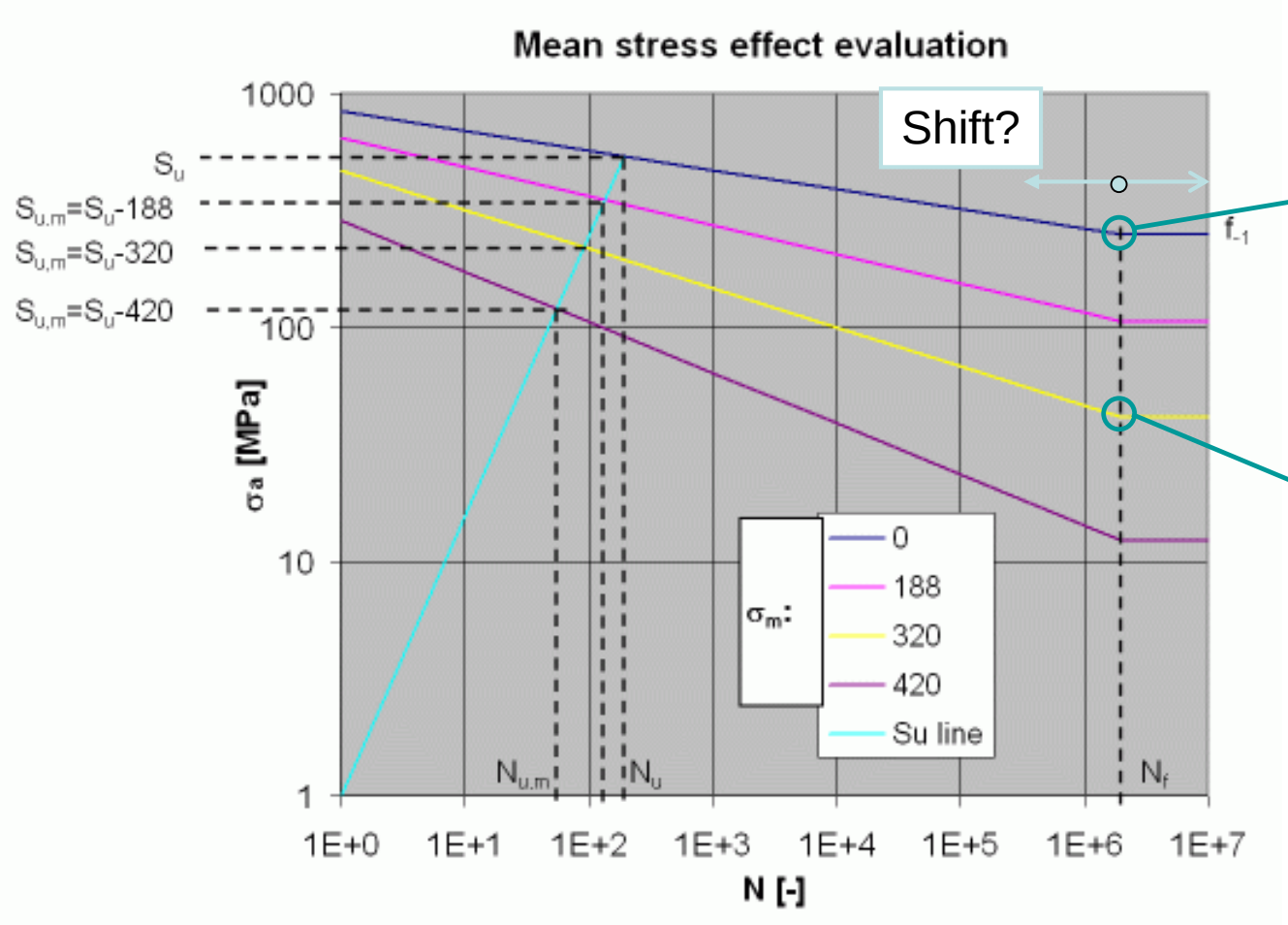
Bakczewitz, F.; Friedrich, P.; Naubereit, H.: Zum Einfluss der Druckmittelspannung auf die Betriebsfestigkeit. Universität Rostock 1998.





MSE – dopad na S-N křivku

Mimo mez únavy (Haighův diagram), může být potřeba modifikovat celou S-N křivku:



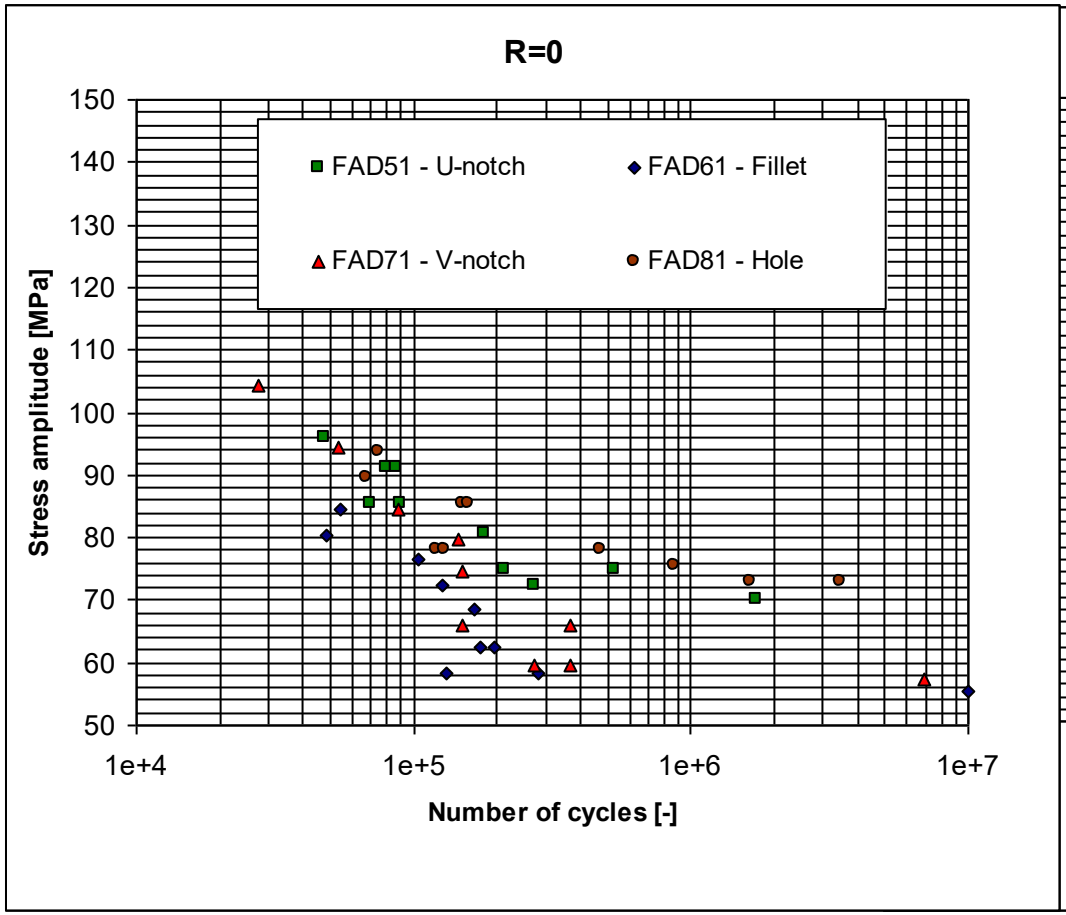
Fatigue limit in fully reversed loading

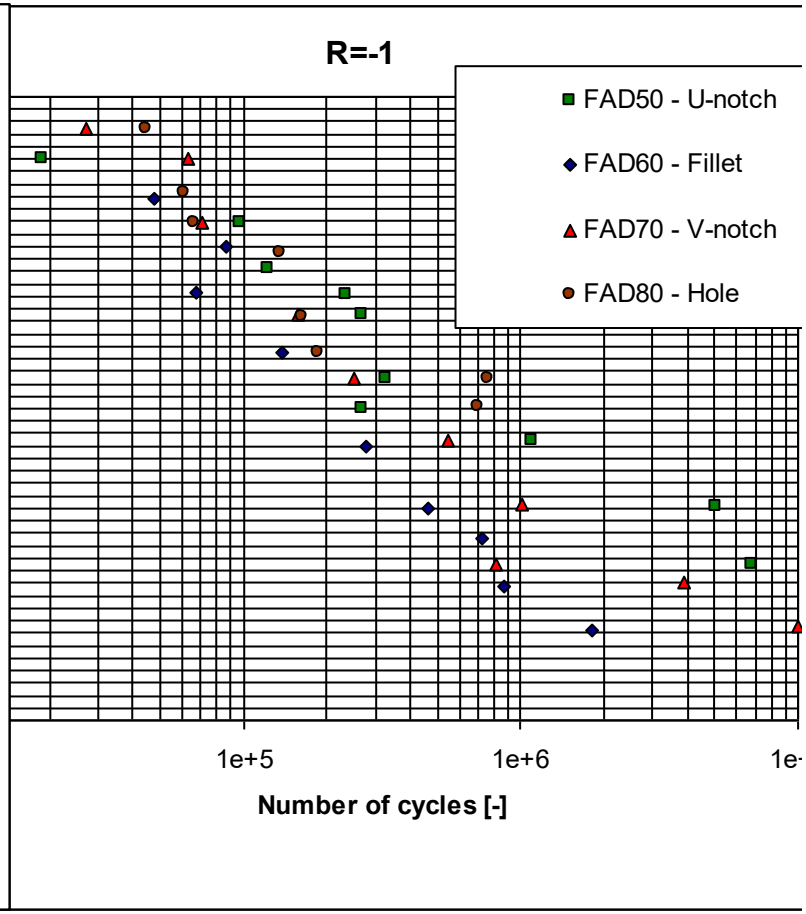
Fatigue limit amplitude, if σ_m=320MPa

Posuv životnosti na mezi únavy

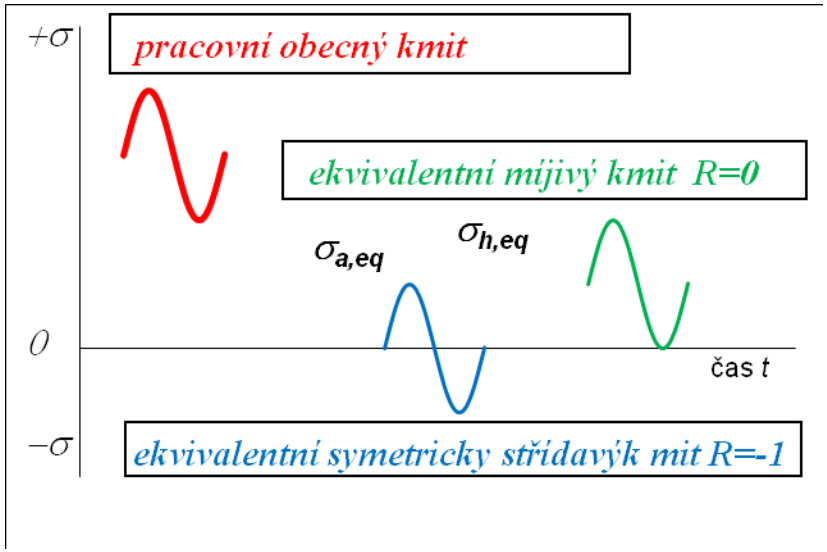
Fillet r=0.4 mm
U-notch r=1.6 mm
V-notch r=1.6 mm
Hole r=2 mm

Aluminium alloy 2124T851
Kt = 2.3





Ekvivalentní napětí kmitu



= převod napěťových kmitů s různou střední složkou, na smluvní symetricky střídavé nebo míjivé kmity **se stejným únavovým účinkem**.

Landgraf a Morrow:

$$\sigma_{a,eq} = \frac{\sigma_a}{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma'_f}\right)}$$

Oding / Walker:

$$\sigma_{h,eq} = \sigma_{\max} \cdot (1-R)^w = 2^w \cdot \sigma_{\max}^{1-w} \cdot \sigma_a^w$$

MIL HDBK:

$$\sigma_{h,eq} = \sqrt{2 \cdot (\sigma_a + \sigma_m) \cdot \sigma_a}, \quad pro\ \sigma_m > 0$$

$$\sigma_{h,eq} = \sqrt{2} \cdot \sigma_a, \quad pro\ \sigma_m \le 0$$

pro p=0,5 přejde v Odinga

SWT parametr:

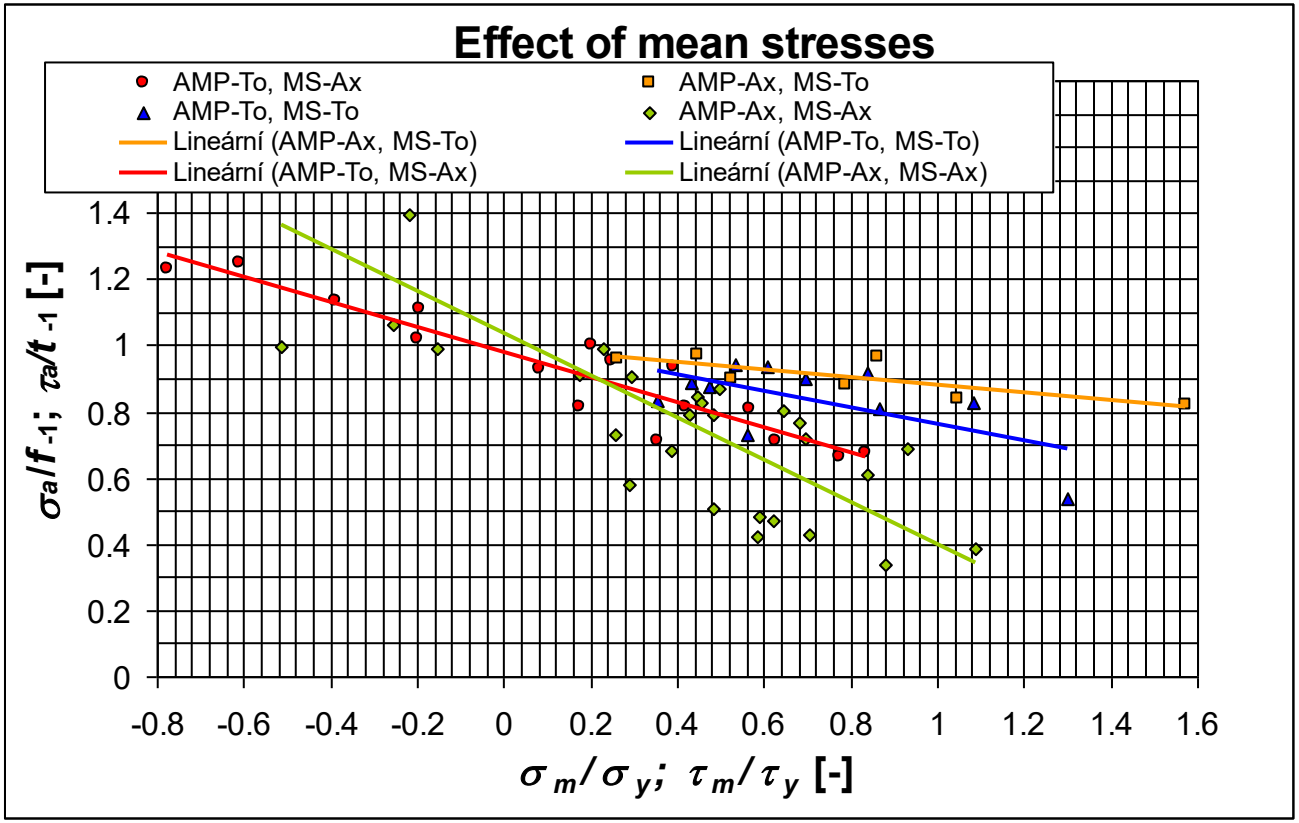
$$\sigma_{a,eq} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot E\varepsilon_a}, \quad pro\ \sigma_m > 0$$

$$\sigma_{a,eq} = \sigma_a, \quad pro\ \sigma_m \le 0$$

„Walker“: $$\sigma_{a,eq} = \sigma_a^{\gamma} \cdot (\sigma_m + \sigma_a)^{1-\gamma}$$

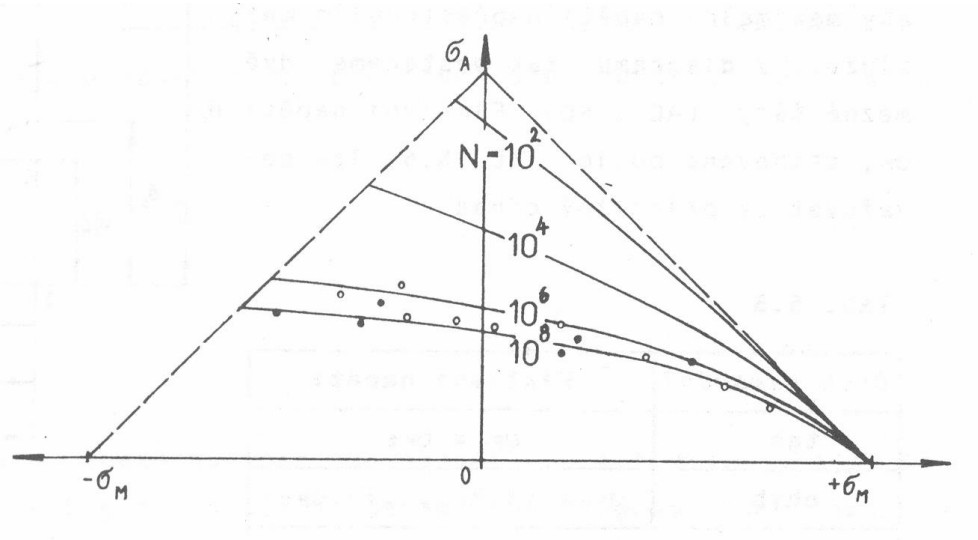
Jiné módy zatížení

- Pro torzní zatěžování se lze setkat s tvrzením, že střední hodnota torzního cyklu ve vysokocyklové únavě nehraje roli – to je NEPRAVDA



Shrnutí: vliv středního napětí cyklu

- tahové střední napětí snižuje únavovou pevnost či životnost
  - vliv nutno korigovat



- tlakové střední napětí může únavovou pevnost či životnost zvýšit
  - vliv možno zanedbat
- střední smykové napětí také snižuje únavovou pevnost či životnost
  - vliv nutno korigovat

Mimochodem…

Když už tu tak pěkně odhadujeme nějaká referenční napětí:

- Co se stane, když u dané křivky omylem přeženu nebo nedocením napětí o 10%?
- Zkuste: S-N křivka se sklonem (exponentem) 10.

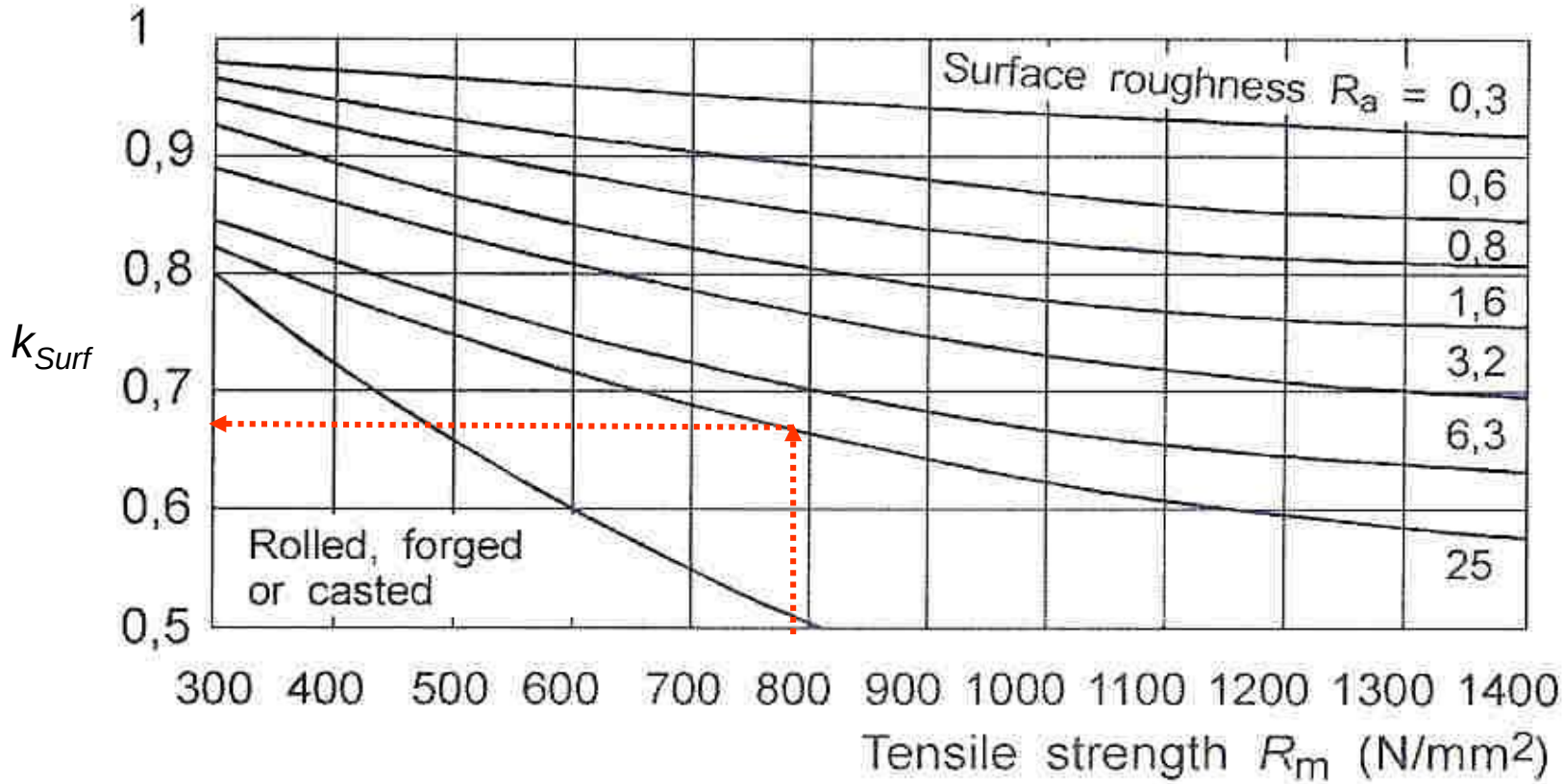
chyba v odhadu napětí	20%	10%	5%	k	10
přetíženo: násobek správné životnosti	0.162	0.386	0.614		
podtíženo: násobek správné životnosti	9.313	2.868	1.670		
faktor zkrácení životnosti	6.192	2.594	1.629		
faktor prodloužení životnosti	9.313	2.868	1.670		

chyba v odhadu napětí	20%	10%	5%	k	15
přetíženo: násobek správné životnosti	0.065	0.239	0.481		
podtíženo: násobek správné životnosti	28.422	4.857	2.158		
faktor zkrácení životnosti	15.407	4.177	2.079		
faktor prodloužení životnosti	28.422	4.857	2.158		

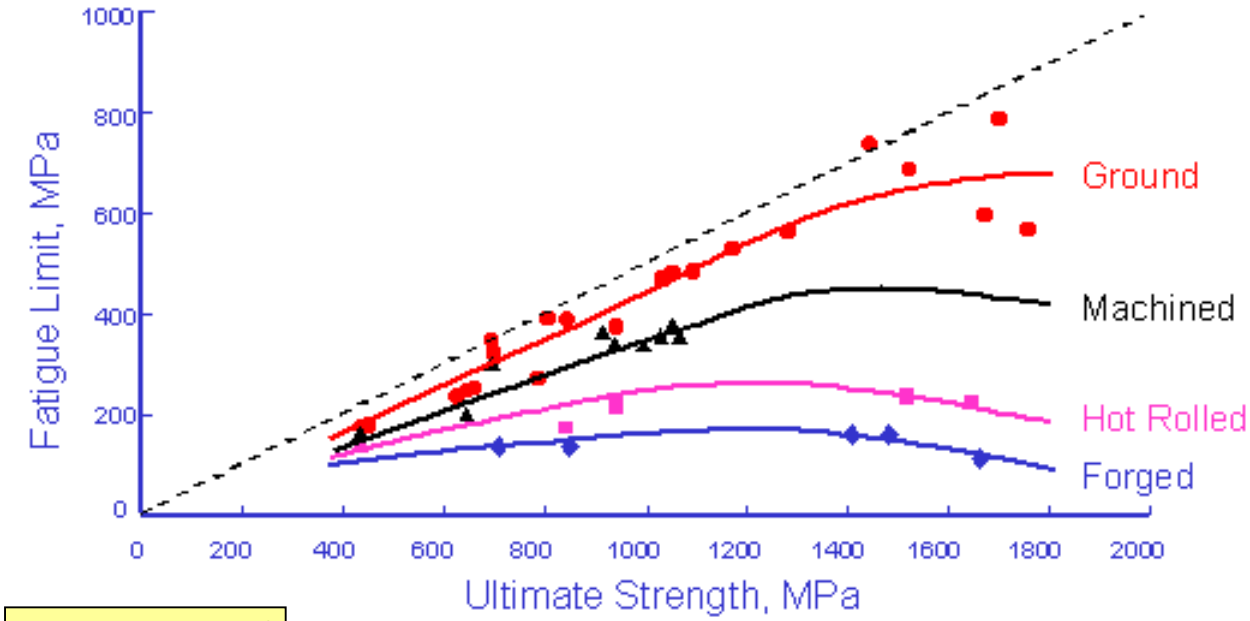
Vlastnosti povrchové vrstvy

Vliv jakosti obrobení povrchu

$$f_{Surf} = \frac{\sigma_c^{real}}{\sigma_c^{etalon}}$$



Vliv jakosti obrobení povrchu



Noll and Lipson: Allowable Working Stresses. Society for Experimental Stress Analysis, Vol. III, no. 2, 1949

$$f_{Surf} = a \cdot R_m^{\beta}$$

	a	β
Ground	1.58	-0.085
Machined	4.51	-0.265
Hot rolled	57.7	-0.718
Forged	272	-0.995

- Regresní střední křivky – nikoli bezpečné

Vyhodnocení převzato z efatigue.com

Vliv jakosti obrobení povrchu

- FKM-Richtlinie $$f_{Surf} = 1 - a \cdot \log R_z \cdot \log\left(\frac{2 \cdot R_m}{R_{m,N,\min}}\right)$$

Připraveno pro analýzu normálových napětí, pro smyková napětí nutno přenásobit koeficient *a* parametrem $f_{W,t}$

R_z Střední drsnost v mikronech

R_m Mez pevnosti v MPa

	Ocel	Litá ocel	Litina s kuličkovým grafitem	Temperovaná litina	Šedá litina	Hliníkové slitiny tvářené	Hliníkové slitiny lité
a	0.22	0.2	0.16	0.12	0.06	0.22	0.2
$R_{m,N,min}$	400	400	400	350	100	133	133
$f_{W,t}$	0.577	0.577	0.65	0.75	1	0.577	0.75

Vliv technologie úprav povrchu - k_T

$$f_{tech} = \frac{\sigma_c^{tech}}{\sigma_c^{etalon}}$$

FKM-Guideline: Analytical Strength Assessment of Components in Mechanical Engineering. 5th revised edition. Frankfurt/Main, Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM) 2003.

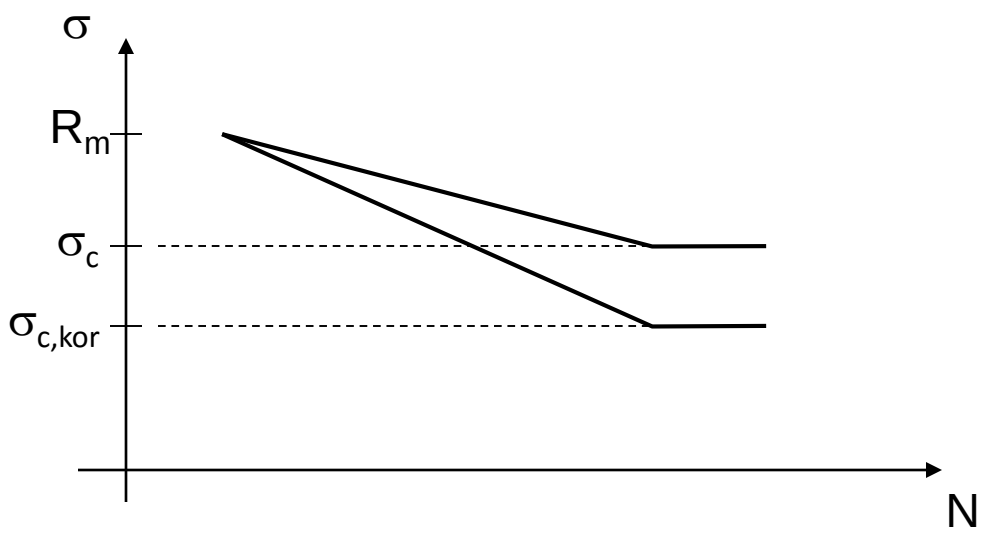
Levý sloupec – nevrubované součásti

Pravý sloupec – vrubované součásti

Steel		
Chemo-thermal treatments		
Nitriding Depth of case 0,1...0,4 mm Surface hardness 700 to 1000 HV 10	1,10 - 1,15 (1,15 - 1,25)	1,30 - 2,00 (1,90 - 3,00)
Case hardening Depth of case 0,2 ... 0,8 mm Surface hardness 670 to 750 HV 10	1,10 - 1,50 (1,20 - 2,00)	1,20 - 2,00 (1,50 - 2,50)
Carbo-nitriding Depth of case 0,2 ... 0,8 mm Surface hardness 670 to 750 HV 10	(1,80)	
Mechanical treatment		
Cold rolling	1,10 - 1,25 (1,20 - 1,40)	1,30 - 1,80 (1,50 - 2,20)
Shot peening	1,10 - 1,20 (1,10 - 1,30)	1,10 - 1,50 (1,40 - 2,50)
Thermal treatment		
Inductive hardening Flame-hardening Depth of case 0,9 ... 1,5 mm Surface hardness 51 to 64 HRC	1,20 - 1,50 (1,30 - 1,60)	1,50 - 2,50 (1,60 - 2,80)

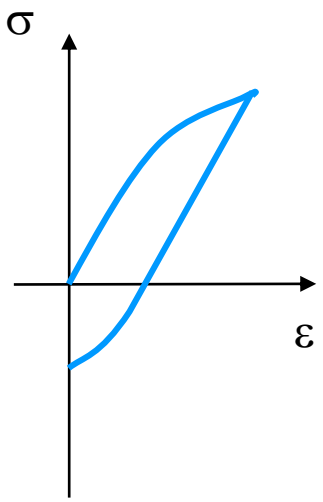
Shrnutí: Vliv jakosti povrchu

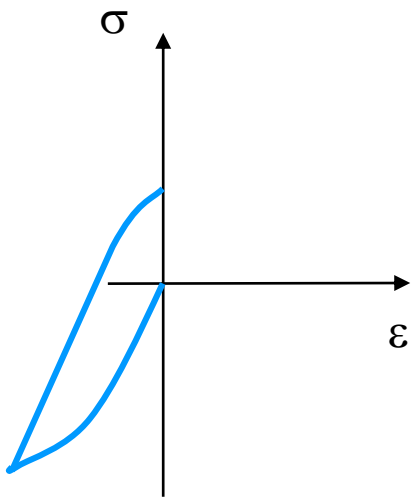
- Vliv drsnosti povrchu je nejvyšší pro vysoké počty cyklů
- Termomechanické úpravy povrchu ovlivní povrchovou vrstvu
  - mírné změny statických vlastností
  - výrazné změny meze únavy
  - tj. efekt se snižující se cílovou životností klesá



Zbytková pnutí

- Následek předchozích změn zahrnujících plastické přetvoření
- Tlakové zbytkové pnutí pozitivní (využíváno u některých technologických operací – autofretáž)
- Tahové zbytkové pnutí snižuje životnost (pozor např. na broušení)

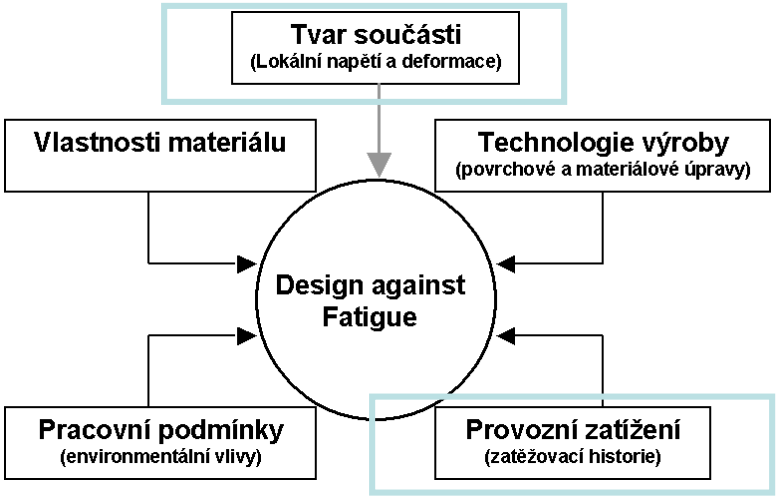




De Havilland Comet (1954)

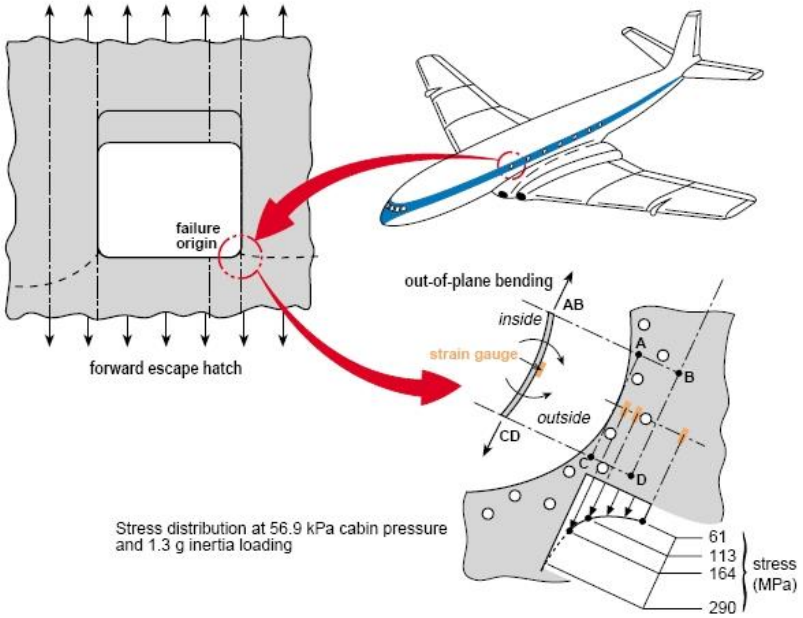
První dopravní letadlo schopné létat ve velkých výškách

Dva letouny ztraceny během tří měsíců (1286 a 903 vzletů; žádní přeživší)



Důvody:

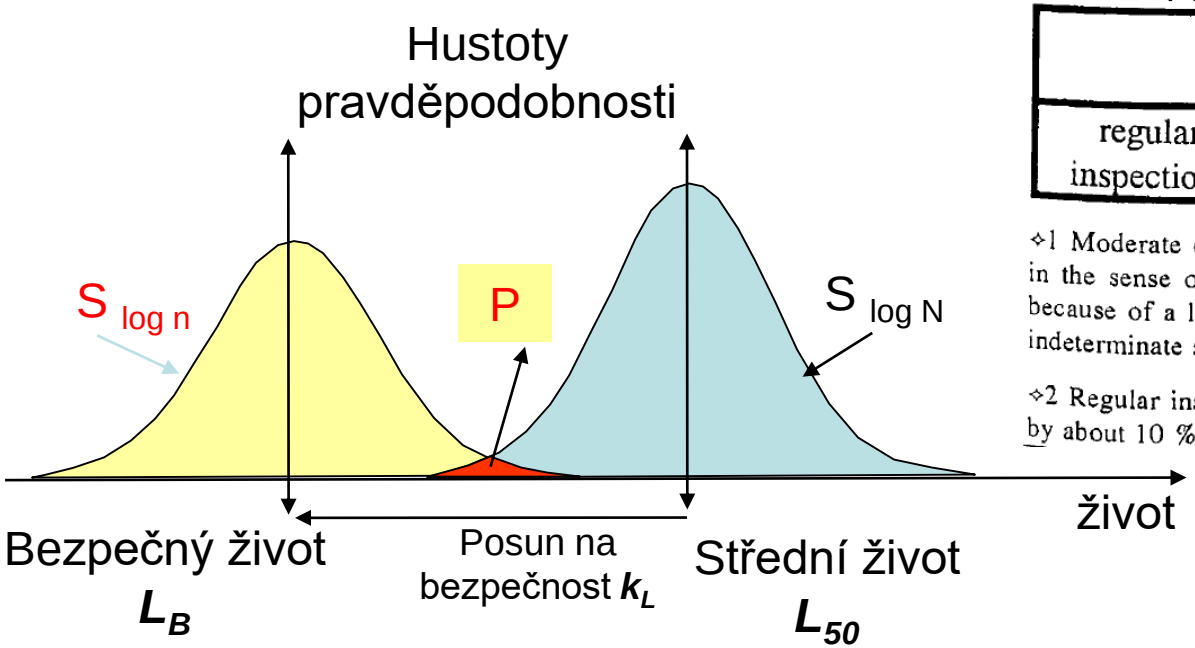
- **Kombinovaný ohyb způsobil, že napětí na vnitřním povrchu byly větší než na vnějším (napětí na úrovni 70% meze pevnosti)**
- **Full-scale zkouška byla realizována na draku, který prošel statickou zkouškou**



Faktor bezpečnosti

Vztah mezi hustotami pravděpodobností únavové křivky a četností zatížení a výsledným faktorem bezpečnosti

$$u_P = \frac{\log L_B - \log L_{50}}{\sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}} = \frac{\log \frac{L_B}{L_{50}}}{\sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}} = \frac{\log \frac{1}{k_L}}{\sqrt{S_{\log N}^2 + S_{\log n}^2}}$$



FKM:

Table 4.5.1 Safety factors for steel *[3] (not for GS) and for ductile wrought aluminum alloys (A≥ 12,5 %).

j_D		Consequences of failure	
		severe	moderate ✧1
regular inspections	no	1,5	1,3
	yes✧2	1,35	1,2

✧1 Moderate consequences of failure of a less important component in the sense of "non catastrophic" effects of a failure; for example because of a load redistribution towards other members of a statical indeterminate system. Reduction by about 15 %.

✧2 Regular inspection in the sense of damage monitoring. Reduction by about 10 %.

Kumulace poškození

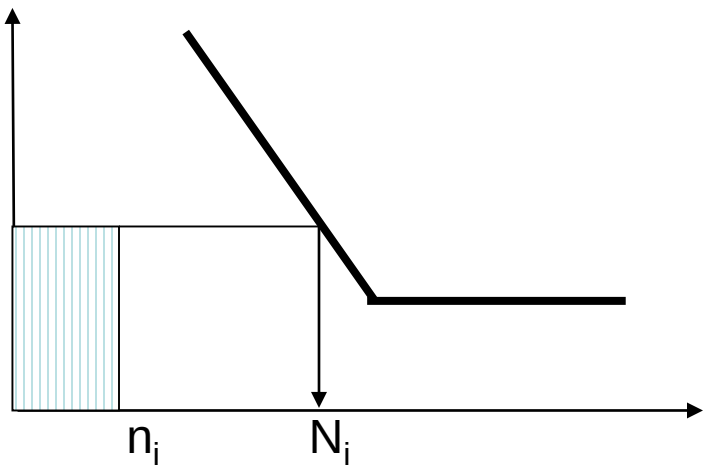
Number of cycles at a given load level

Fatigue damage

$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i}\right)$$

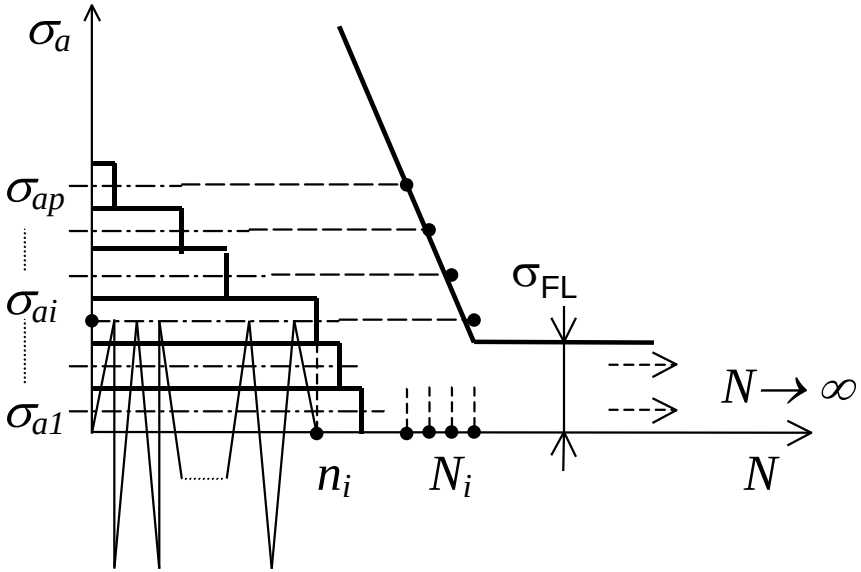
$$D_i = \left(\frac{n_i}{N_i}\right)^m$$

Number of cycles till break at a given load level



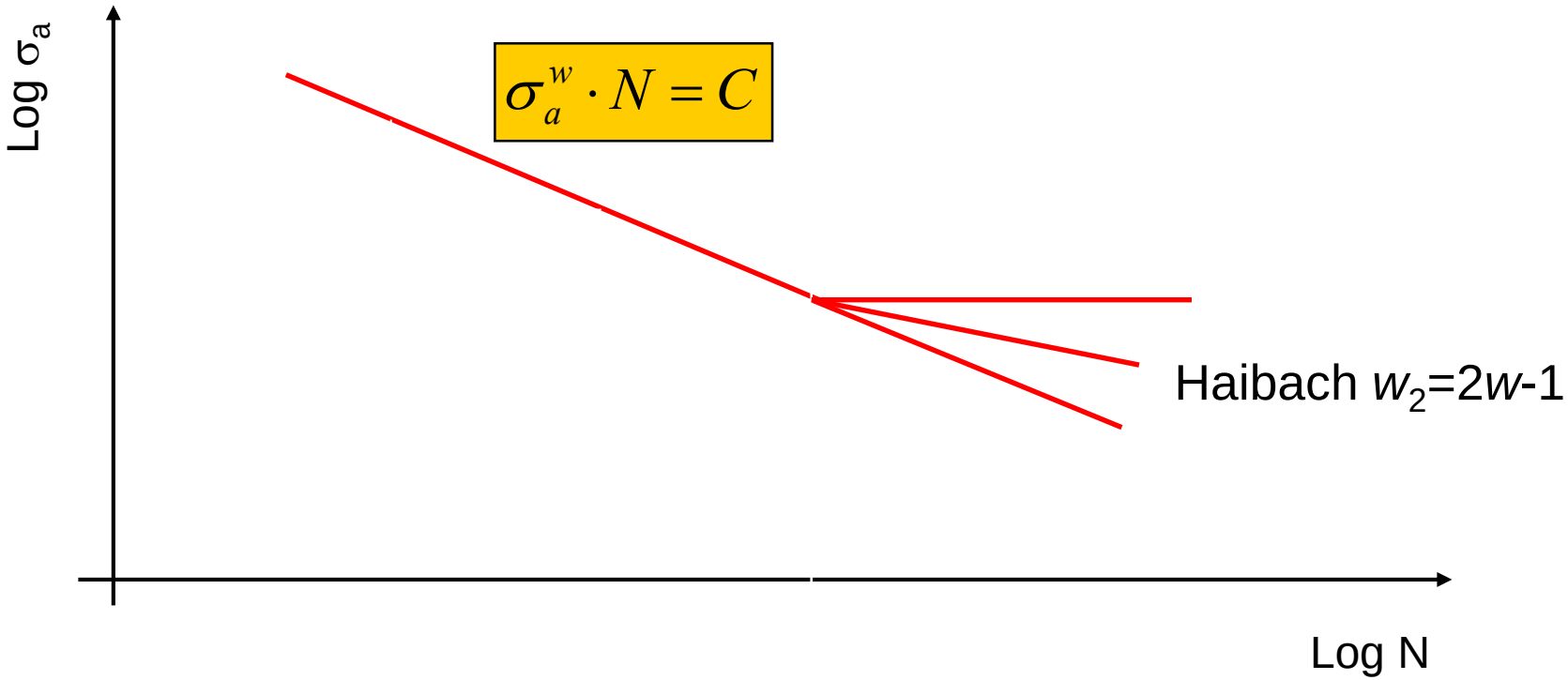
Linear damage accumulation
Palmgren, Miner 1945

$$D = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \ldots + \frac{n_p}{N_p} = \sum_{i=1}^{p} \frac{n_i}{N_i}$$



Poškození pod mezí únavy

- **Co dělat v případech četných kmitů, které jsou nicméně pod mezí únavy?**



Kde hledat materiálová data?

www.fatiguecalculator.com

Aluminums

- Aluminum 1100
- Aluminum 2014-T6
- Aluminum 2014-T6, Hand Forged
- Aluminum 2024-T3
- Aluminum 2024-T4
- Aluminum 5083-0, BHN = 93
- Aluminum 5083-H12
- Aluminum 5183-0, Weld metal, BHN = 92
- Aluminum 5454, Forged
- Aluminum 5456-H311
- Aluminum 6061-T6, Forged
- Aluminum 6061-T6, Sheet
- Aluminum 6061-T6, Hand Forged

Steels

- Steel 1045, Q&T, BHN = 500
- Steel 1045, Q&T, BHN = 563
- Steel 1045, Q&T, BHN = 595
- Steel 4130, BHN = 259
- Steel 4130, Q&T, BHN = 366
- Steel 4140, Q&T, BHN = 293
- Steel 4140, Q&T, BHN = 475
- Steel 4142, As Quenched, BHN = 670
- Steel 4142, Q&T, BHN = 380
- Steel 4142, Q&T, BHN = 400
- Steel 4142, Q&T, BHN = 450
- Steel 4142, Q&T, BHN = 450
- Steel 4142, Q&T, BHN = 475

Steel 4140, Q&T, BHN = 293

Fatigue Strength Coefficient (s_f') in MPa	Fatigue Strength Exponent (b)	Fatigue Ductility Coefficient (e_f') in MPa	Fatigue Ductility Exponent (c)	Elastic Modulus (E) in MPa
1163	-0.062	2.36	-0.765	207000
Fatigue Limit (S_{FL}) in MPa	**Fatigue Limit (N_{FL}) in MPa**	**Cyclic Strength Coefficient (K')**	**Cyclic Strain Hardening Exponent (n')**	**Ultimate Strength (S_u) in MPa**
		1084	0.082	848

http://fatiguecalculator.com
Now: http://efatigue.com

Other material database: http://www.pragtic.com/vmat.php
Other links: http://www.pragtic.com/links.php

Data sources – material data

MATDAT.com
Material Properties Database and Estimation Tools

Material search results - DETAILED REPORT

GENERAL INFORMATION

RECORD INFORMATION		
Material ID:	90	
Contributed by:	MATDAT	Entry date:
Source:	Boller, C., Seeger, T.: Materials data for cyclic loading, Part A, Elsevier, Amsterdam 1987.	
Other reference(s):	Reik, W., Mayr, P., Macherauch, E.: Untersuchungen zum Schwingfestigkeitsverhalten vo report, part B, 1979	

MATERIAL INFORMATION		
	DIN	W.Nr. (DIN 17007)
	Ck 45	1.1191
	AISI	AFNOR
	1042 ; 1045	*XC45 ; XC48H1*
	BS	GOST
	060A47 ; 080M46	*45*
	ISO	JIS

http://www.matdat.com

Other material database:

- http://www.pragtic.com/vmat.php -> http://www.fadoff.eu
- http://barsteelfatigue.autosteel.org

Other links: http://www.pragtic.com/links.php

Information sources - www.fadoff.eu