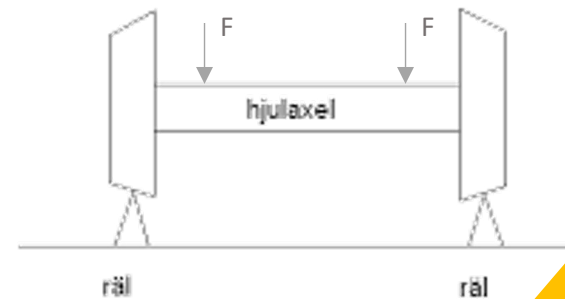
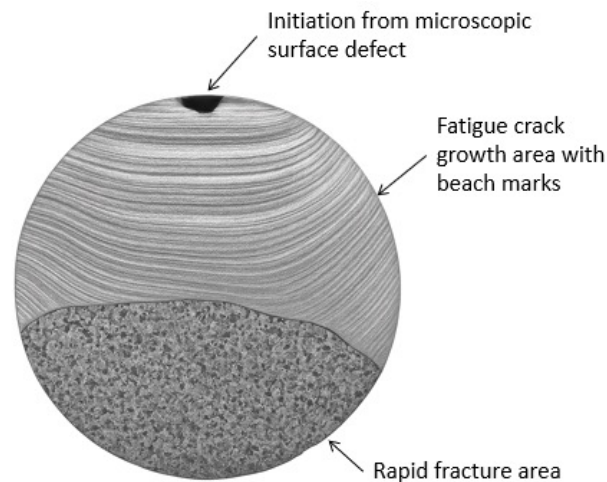


Utmattning

Begreppet utmattning (eng. fatigue) är ett fenomen som uppträder vid ett antal upprepade belastningscykler och leder i regel till sprickbildning. I vissa fall kan dessa sprickor propagera och leda till allvarliga brott och haverier av en konstruktion.

Utmattning förekommer i anvisningar där man får en koncentrerad spänning i materialet. Vi kommer här att främst fokusera på stålmaterial och speciellt svetsade konstruktioner där det här fenomenet är som allra vanligast.

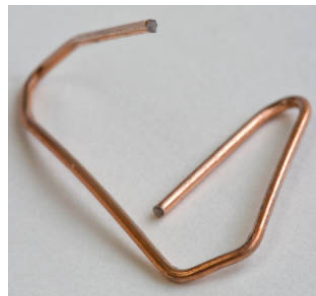


Ett typiskt utseende efter ett utmattningsbrott i en hjulaxel.

Låg- respektive högcykelutmattning

Man brukar skilja på två olika typer av utmattning, så kallad låg- respektive högcykelutmattning:

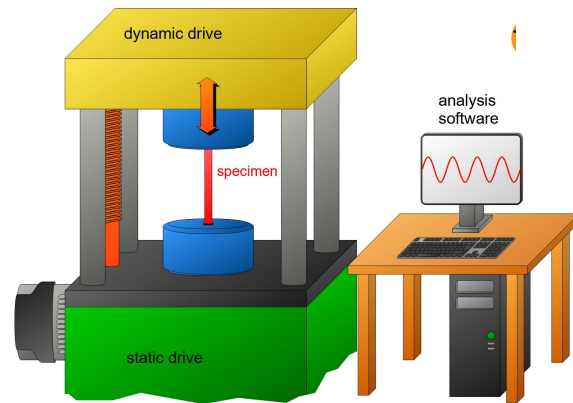
- **Lågcykelutmattning:** Då belastningen pendlar över och under materialets sträckgräns kan utmattning ske vid ett ganska lågt cykeltal. Att prediktera livslängden vid lågcykelutmattning är förhållandevis svårt och komplext, även om vissa beräkningsmetoder förekommer.
- **Högcykelutmattning:** Vid ett högt antal belastningscykler (typ > 10.000) kan utmattningssprickor uppstå trots att belastningsnivån ligger under materialets sträckgräns.



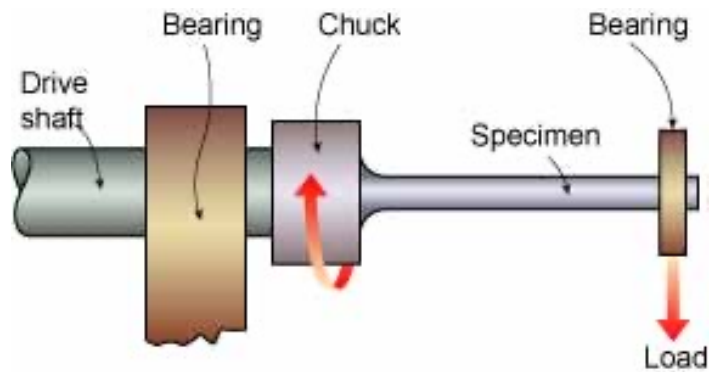
Upprepad böjning av ett gem som går av kan sägas vara en form av lågcykelutmattning.

Materialets utmattningshållfasthet

Alla nya stålmaterial provas ut med avseende på dess utmattningshållfasthet. I regel testas materialet både för varierande drag/tryck-belastning samt böjbelastning och en så kallad SN-kurva tas fram. Kurvan kallas ibland för en Whölerkurva efter den tyska järnvägsingenjören som utförde omfattande utmattningstester på hjulaxlar under 1800-talet.



drag/tryckbelastning



böjbelastning

Materialets utmattningshållfasthet, forts

Om man belastar en provkuts av stål med en konstant spänningvidd $\Delta\sigma$, vid olika nivåer kommer kutsen att brista vid olika cykeltal N enligt ett exponentiellt mönster. Med hjälp av regression (kurvanpassning) kan en kontinuerlig funktion mellan belastningsnivå och antal cykler tas fram. I syfte att förenkla avläsningen brukar SN-kurvan ha logaritmisk skala på axlarna.

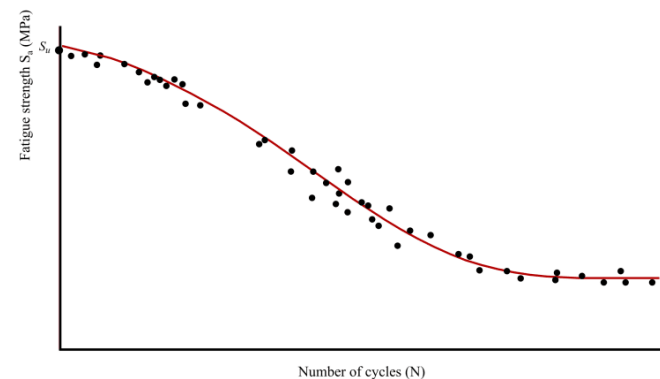
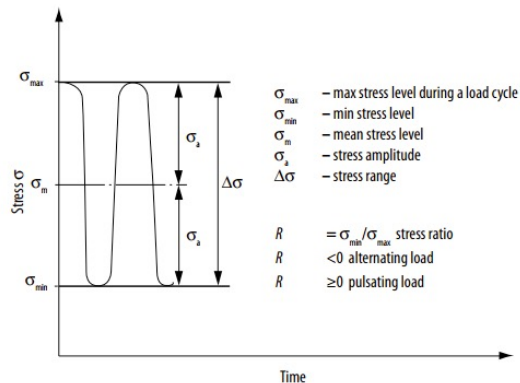
$$N = C \cdot \Delta\sigma^{-m}$$

N = antal belastningsväxlingar (cykler)

C, m = materialkonstanter

$$\log(N) = -m \cdot \log(\Delta\sigma) + \log(C)$$

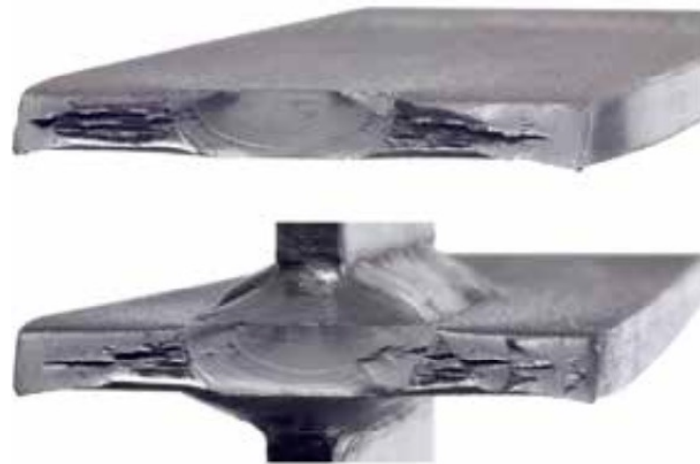
(Med log-skala på axlarna fås en rät regressionslinje)



Svetsutmattning

Det förekommer att utmattning sker i opåverkat grundmaterial men det i särklass vanligaste är utmattning i svetsade konstruktioner. Svetsens geometri ger i sig en anvisning men det som påverkar utmattningskänsligheten allra mest är den värmepåverkan och de mikrosprickor som erhålls i samband med svetsning.

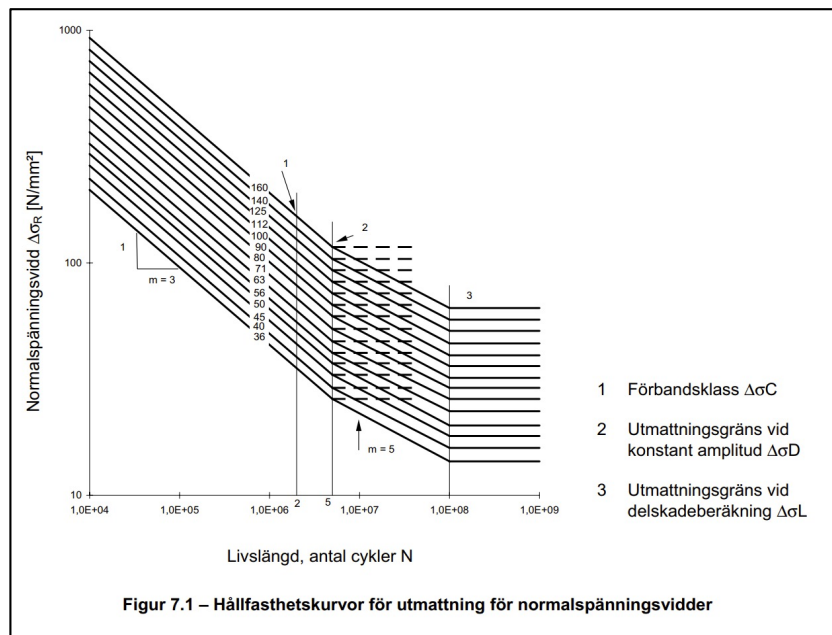
I normer som amerikanska ASME och europeiska Eurokod anges specifika dimensioneringsregler för olika typer av svetsfogar. En annan värdefull källa för utmattningsdimensionering är SSAB:s Design handbook (f d Plåthandboken) vars regler till största delen baseras på Eurocode.



Utmattningssprickor i stumfog och kälfgog

Svetsutmattning, forts

I Eurokod 3 delas olika svetsförband upp i klasser med sk FAT-värden mellan 36 och 160, beroende förbandets känslighet mot utmattning. Bilden nedan visar SN-kurvan i Eurokod ur vilken man kan avläsa karaktäristisk utmattningshållfasthet för svetsade förband. Om spänningsvidden understiger en viss nivå betraktas det som att svetsen klarar oändligt antal cykler. FAT-värdena motsvarar den karaktäristiska hållfastheten vid en livslängd på 2 miljoner cykler.

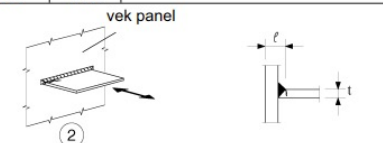
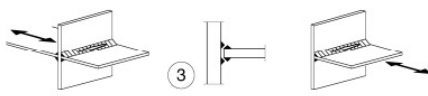
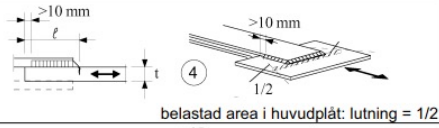
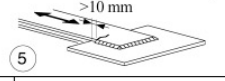


$$N = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma}\right)^3$$

Karaktäristisk utmattningshållfasthet vid konstantamplitudbelastning.

FAT-värdet för olika förbandstyper

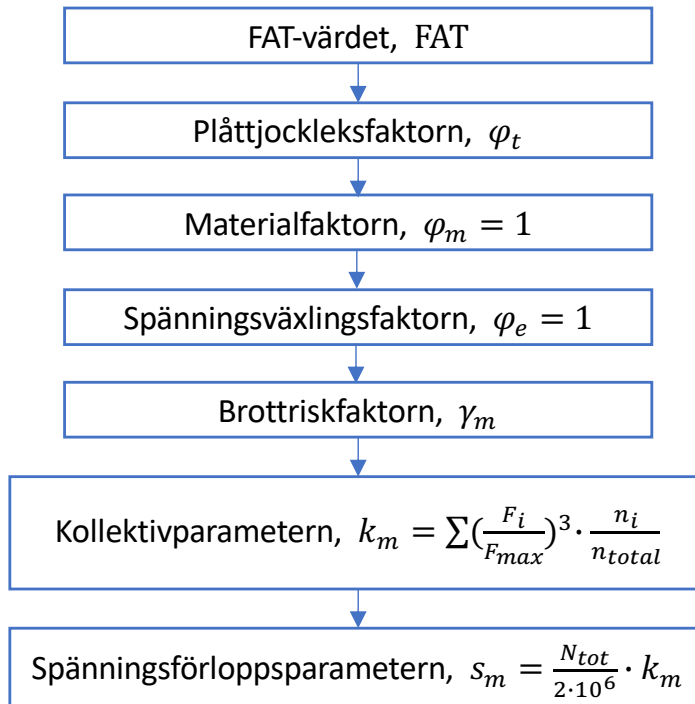
Nedan visas ett utdrag ur den tabell i Eurokod 3 som anger förbandsklassen (d v s FAT-värdet):

Förbandsklass	Konstruktionsdetalj		Beskrivning	Krav
80	$t < 50$ mm	alla t [mm]	Kors- eller T-förband 1) Brott i fattningskanten i stumsvetsar med full genomsvetsning och alla förband med partiell genomsvetsning.	1) Kontrollerad och befunnen fri från diskontinuiteter och felplacering utöver toleranserna i EN 1090. 2) Använd modifierade nominella spänningar vid beräkning av $\Delta\sigma$. 3) Vid förband med partiell genomsvetsning krävs två utvärderingar. För det första bedöms spricka vid roten med spänningar definierade i kapitel 5, med förbandsklass 36* för $\Delta\sigma_w$ och förbandsklass 80 för $\Delta\sigma_w$. För det andra bedöms spricka vid fattningskanten genom att bestämma $\Delta\sigma$ i den belastande plåten Detalj 1) till 3) : Felplaceringen mellan de lastöverförande plåtarna bör inte överstiga 15 % av den mellanliggande plåtens tjocklek.
71	$50 < t \leq 80$	alla t		
63	$80 < t \leq 100$	alla t		
56	$100 < t \leq 120$	alla t		
56	$t > 120$	$t \leq 20$		
50	$120 < t \leq 200$	$t > 20$		
45	$200 < t \leq 300$	$20 < t \leq 30$		
45	$t > 300$	$t > 30$		
40	$t > 300$	$t > 50$		
Som detalj 1 i tabell 8.5	vek panel 		2) Brott i fattningskanten från kanten av den påsvetsade detaljen mot plåten med spänningstoppar vid svetsarnas ändrar på grund av lokal deformation i plåten.	
36*			3) Brott i roten i stumsvetsar med partiell genomsvetsning i T-svets eller källsvetsförband och i T-svets med effektivt full genomsvetsning.	
Som detalj 1 i tabell 8.5	 belastad area i huvudplåt: lutning = 1/2		Svetsade överlappsskarvar: 4) Källsvetsad överlappsskarv.	4) $\Delta\sigma$ i huvudplåten beräknas på den area som visas i skissen. 5) $\Delta\sigma$ beräknas i de överlappande plåtarna. Detalj 4) och 5) : Svetsar avslutas mer än 10 mm från plåtkanten.
45*			Överlappsskarv: 5) Källsvetsad överlappsskarv.	Skjuvsprickor i svetsen bör kontrolleras med detalj 8).
	$t_c < t$	$t_c \geq t$	Påläggsplåtar i balkar och plåtbalkar: 6) Ändpartier i svetsar vid påläggsplåtar, lagda i en eller flera strängar, med eller utan tvärgående	6) Om påläggsplåten är bredare än flänsen behövs en tvärgående svets vid änden. Denna svets bör slipas noga för att avlägsna smältidke. Minsta länrad nå pålägsplåten
56*	$t \leq 20$	-		
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$		
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$		
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$		

SS-EN 1993 Eurokod 3: Stålkonstruktioner kan beställas på www.sis.se

Beräkningsgång för svetsutmattning (enligt SSAB:s Design handbook)

I en verklig konstruktion måste man reducera FAT-värdet beroende på ett antal andra faktorer enligt nedan. Då man har ett reducerat lastspektrum med en beräknad kollektivparameter k_m blir den tillåtna spänningsvidden högre jämfört med fullt lastspektrum (konstant spänningsvidd) då $k_m = 1$. Vidare är alltid materialfaktorn $\varphi_m = 1$ och spänningsväxlingsfaktorn $\varphi_e = 1$ för svetsat material.



$$\text{Tillåten spänningsvidd blir: } \Delta\sigma_{till} = FAT \cdot \frac{\varphi_t \cdot \varphi_m \cdot \varphi_e}{\gamma_m} \cdot S_m^{-\frac{1}{3}}$$

$$\text{Vid fullt spektrum blir: } N_{till} = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{FAT \cdot \varphi_t \cdot \varphi_m \cdot \varphi_e}{\gamma_m \cdot \Delta\sigma} \right)^3$$

Då $\Delta\sigma_{till}$ beräknats jämförs den med nominell spänningsvidd $\Delta\sigma$ som beräknats för hand eller med hjälp av FEM-verktyg.

Plåttjockleksfaktorn, φ_t

Tjockleksfaktorn utgår från en referensplåttjocklek på 15 mm.
Tunnare plåtar än 15 mm ger en något högre tillåten spänning.

$$\varphi_t = \left(\frac{15}{t}\right)^n$$

Joint category	Condition	n
Cruciform joints, transverse T-joints, plates with transverse attachments, ends of longitudinal stiffeners	As-welded	0,15
Cruciform joints, transverse T-joints, plates with transverse attachments, ends of longitudinal stiffeners	Post-treated weld	0,1
Transverse butt weld	As-welded	0,1
Machined butt weld reinforcements, longitudinal welds or attachments to plate edges	All	0
Non-welded parent material	All	0

Materialfaktorn, φ_m

För grundmaterial är tillåten spänning till viss mån materialberoende.
För svetspåverkat material sätts denna emellertid alltid till $\varphi_m = 1$

Spänningsväxlingsfaktorn, φ_e

För grundmaterial är tillåten spänning beroende av spänningen medelnivå. Högre tillåten spänning fås om en större del av spänningsvariationen ligger på trycksidan. För svetspåverkat material sätts denna emellertid alltid till $\varphi_e = 1$

Brottriskfaktorn, γ_m

Önskas lägre brottrisknivå än ca 1:100 ges brottriskfaktorn ett högre värde än 1.

Consequence of failure	Partial safety factor γ_m	Approximate failure risk
Negligible	1.0	10^{-2}
Less serious	1.1	10^{-3}
Serious	1,21	10^{-4}
Very serious	1.32	10^{-5}

Kollektivparametern, k_m

Då man har ett reducerat lastspektrum beräknas kollektivparameter k_m som ger en högre tillåten spänningsvidd jämfört med fullt lastspektrum (konstant spänningsvidd) då $k_m = 1$.

$$k_m = \sum \left(\frac{F_i}{F_{max}} \right)^3 \cdot \frac{n_i}{n_{total}}$$

Range pair values from field measurement			Calculated values	
i	(MPa)	$n_i^{(1)}$ (load cycles)	k_{3i} ($\Delta\sigma_{ref} = \Delta\sigma_1 = 600\text{MPa}$)	Accumulated number of load cycles ⁽²⁾
1	600	3	$5,80 \cdot 10^{-5}$	3
2	500	11	$1,23 \cdot 10^{-4}$	14
3	400	70	$4,01 \cdot 10^{-4}$	84
4	300	201	$4,85 \cdot 10^{-4}$	285
5	200	511	$3,66 \cdot 10^{-4}$	796
6	100	913	$8,17 \cdot 10^{-5}$	1709
7	50	5015	$5,61 \cdot 10^{-5}$	6724
8	20	15025	$1,08 \cdot 10^{-5}$	21749
9	10	30012	$2,68 \cdot 10^{-6}$	51761
	Sum:	51761 $=n_t$	0,00158 $=k_3$	

Tabellen visar ett exempel på ett reducerat lastkollektiv med beräknad k_m (i tabellen kallad k_3)