
Att konstruera med stål - Läromedel för konstruktörer omfattar:

- Modul 1 **Allmänna grunder**
- Modul 2 **Material och komponenter**
- Modul 3 **Konceptuell utformning**
- Modul 4 **Bärverksanalys**
- Modul 5 **Tvärsnittsbärförmåga**
- Modul 6 **Stabilitet för stänger och balkar**
- Modul 7 **Kallformade profiler**
- Modul 8 **Utmattning**
- Modul 9 **Brottmekanik**
- Modul 10 **Förband**
- Modul 11 **Bärförmåga vid brand**
- Modul 12 **Tillverkning, montering och kontroll**

Materialet har tillkommit med bistånd från följande institutioner och företag:

SSAB Tunnpååt AB

www.ssabtunnplat.com

SSAB Oxelösund AB

www.oxelosund.ssab.se

Outokumpu Stainless AB

www.outokumpu.com

Plannja AB

www.plannja.se

Banverket

www.banverket.se

Skanska Sverige AB

www.skanska.se

**SBUF-Svenska Byggbranschens
Utvecklingsfond**

www.sbuf.se

KTH-Kungliga Tekniska Högskolan

www.kth.se

LTU-Luleå tekniska universitet

www.ltu.se

SBI-Stålbyggnadsinstitutet

www.sbi.se

Björn Wahlströms Fond

Redaktör: Ove Lagerqvist
Grafisk form: KENSAN Technologies

Förord

I *Att konstruera med stål* har svenska forskare och experter samlats för att ta fram ett läromedel som med sina tolv fristående moduler täcker det mesta en stålkonstruktör kan råka ut för i sin vardag. *Att konstruera med stål* är tänkt för teknologer som studerar på en nivå motsvarande de avslutande årskurserna av en svensk civilingenjörsutbildning, men kan i sin helhet eller i delar även användas för kortare, koncentrerade kurser riktade mot redan yrkesverksamma konstruktörer och beräkningsingenjörer.

Fenomenet utmattning började uppträda i stor skala i samband med järnvägsnätets utbyggnad i Europa från mitten av 1800-talet. Relativt tidigt identifierades utmattningens viktigaste belastningsparametrar och de dimensioneringsmetoder som då utvecklades ligger till grund för de vanligaste av dagens normerade metoder.

I Europa utkämpades två världskrig under första hälften av 1900-talet och liksom på många andra områden tog utvecklingen inte någon större fart förrän under 1900-talets senare hälft. De till synes gåtfulla haverier som drabbade de första civila jetdriva passagerarflygplanen (eller reoplan, som det hette på den tiden), de Havilland Comet 4, på 1950-talet, visade sig bero på utmattning. Dessa och liknande haverier bidrog starkt till omfattande undersökningar kring fenomenet världen över.

Utmattning var (och är) en empirisk vetenskap och efterhand som alltmer avancerad provnings- och mätutrustning utvecklades, producerades stora mängder utmattningsdata för allehanda konstruktioner och detaljer, speciellt svetsade sådana eftersom svetsförband genomgående är dimensionerande för utmattning. Nya typer av mikroskop erbjöd också metallfysikaliska observationer med aldrig tidigare skådad upplösnings- och förstöringsgrad.

Med brottmekaniken utvecklades metoder för att studera utmattningsbrottets olika faser, såsom en utmattningssprickas initiering, tillväxt och slutbrott i stället för att som tidigare enbart den totala livslängden. I dag kan man göra mycket kvalificerade livslängdsberäkningar för olika typer av spektrumbelastning m m.

Den traditionella utmattningsgränsen uppträder vid ca 2-5 millioner belastningscykler. Utmattningssprickor kan emellertid tillväxa under den traditionella utmattningsgränsen, fastän mycket långsamt, och i dag publiceras utmattningsdata för miljarder belastningscykler och mer.

Som redan antytts, är utmattningsfenomenets yttersta metallfysikaliska mekanism, efter snart ett och ett halvt sekels utmattande, fortfarande okänd. Efter varje genombrott på mikroskopins område har den kritiska händelsen, i den mån en sådan existerar, alltid visat sig ligga bortom den nya horisonten.

Sammantaget kommer utmattning inom överskådlig framtid att förbli empirisk och behovet av utmattningsdata för gamla och nya belastnings- och konstruktionsfall att kvarstå.

Avsnittet om utmattning ger bakgrund och översikt av dagens metoder för dimensionering mot utmattning med huvudsaklig inriktning på de normerade metoderna för konstruktionsstål i Eurokod 3.

Luleå i december 2005

Kjell Eriksson

Att konstruera med stål är framtagen utifrån allmänna förutsättningar och utan hänsyn till de särskilda förhållanden som kan föreligga i ett enskilt fall. Användaren måste göra en egen bedömning inför varje enskilt fall. Utgivare och författare påtar sig således inte något ansvar för eventuella skador som, direkt eller indirekt, kan uppstå till följd av tillämpning av innehållet.

Copyright 2006

Författarna

SBI-Stålbyggnadsinstitutet, Vasagatan 52, 111 20 Stockholm

LTU-Luleå tekniska universitet, 971 87 Luleå

KTH-Kungliga Tekniska Högskolan, 100 44 Stockholm

ISBN 91 7127 043 4

Första upplagan - Tredje tryckningen

Tryck: E-Print AB, Stockholm, 2013

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Fenomenet	1
1.3	Belastningsparametrar	2
1.4	Provning och data	4
1.5	Spänningskoncentration	6
1.6	Anvisningsverkan	8
2	Svetsförband	11
2.1	Svetsgenspänningar	12
2.2	Faktorer som påverkar svetsförbands utmattningshållfasthet	15
2.2.1	Reduktion av svetsgenspänningar	15
2.2.2	Avspänningsglödning	15
2.2.3	Materialegenskaper	16
2.2.4	Utförande	17
2.2.5	Storlekseffekter	18
2.2.6	Konstruktiva anvisningar	19
2.3	Metoder för höjd utmattningshållfasthet	19
2.3.1	Allmänt	19
2.3.2	Reducerad spänningskoncentration	20
2.3.3	Lokal återsmältning	20
2.3.4	Kompressiv egen-spänning	21
2.3.5	Kontrollerad överbelastning	22
2.3.6	Punktvarmning	22
2.3.7	Kommentarer till metoderna	23
3	Dimensionering	25
3.1	Inledning	25
3.2	Livslängdsberäkning	26
3.2.1	Palmgren-Miners delskaderegeln	26
3.3	Spänningscykelräkning	28
3.3.1	Regndroppsmetoden	28
3.3.2	Reservoirmetoden	30
3.3.3	Kommentar till cykelräkningsmetoderna	31
4	Deformationsstyrd utmattning	33
4.1	Inledning	33
4.2	Samverkan	33
4.3	Balkförbanden	34
4.4	Påkänningar	35
4.5	Utmattningsskador	35
4.6	Förspänning	36
4.7	Nitpåkänning	36
4.8	Karakteristika	37
4.9	Riktlinjer	38
4.9.1	Inspektion	38

4.9.2	Åtgärder	38
4.9.3	Förstärkning	39
5	Svensk och Europeisk standard	41
5.1	Allmänt	41
5.2	Grundläggande krav och metoder	41
5.3	Dimensioneringsmetoder	41
5.4	Spänning av utmattningslast.....	43
5.4.1	Fackverk av rör	43
5.5	Spänningsberäkning	43
5.6	Spänningsvidd.....	44
5.6.1	Allmänt.....	44
5.6.2	Dimensioneringsvärden för nominell spänningsvidd	44
5.6.3	Dimensioneringsvärden för modifierad nominell spänningsvidd	44
5.6.4	Dimensioneringsvärden för spänningsvidd för svetsförband i rörprofiler....	44
5.6.5	Dimensioneringsvärden för spänningsvidd vid geometriska spänningar....	44
5.7	Utmattningshållfasthet.....	44
5.7.1	Allmänt.....	44
5.7.2	Förbandsklasser	47
5.7.3	Modifiering av last och utmattningshållfasthet.....	48
5.8	Verifiering av säkerhet mot utmattning	48
5.9	Bilagor	49
5.9.1	Bilaga A. Lastparametrar och verifiering	49
5.9.2	Bilaga B. Utmattningshållfasthet, geometrisk spänningsmetod.....	51
5.9.3	Bilaga C. Nationell bilaga.....	52
6	Referenser	55
6.1	Standard för provning och dimensionering	55
6.2	Handböcker	55
6.3	Artiklar	55
6.4	Litteratur.....	55

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Utmattning började studeras redan på 1830-talet i England under industrialismens gryning. På kontinenten undersökte Wöhler utmattningsbrott i hjulaxlar som inträffade under järnvägarnas utbyggnad från mitten av förr-förra seklet. Med järnvägen kom för första gången i historien konstruktioner och detaljer att utsättas för i tiden varierande laster i sådant antal att renodlade utmattningsbrott kunde uppträda.

Wöhler fastlade de viktigaste faktorerna som är avgörande för utmattning och hans synsätt ligger till grund för de vanligaste dimensioneringsmetoderna i dagens nationella och internationella beräkningsnormer.

Trots snart två hundra års studier är utmattning den med vid marginal vanligaste haveriorsaken för konstruktioner av metalliska material. I offentliga och publika tekniska utredningar uppskattas den totala kostnaden för utmattningsbrott till storleksordningen procent av ett lands BNP.

Mycket stora forskningsinsatser har ägnats utmattning nationellt och internationellt för att öka förståelsen för processen som sådan och för att skapa underlag för dimensionering. Brottmekanikens framväxt, sedan 1950-talet, har inneburit stora framsteg för förståelsen av utmattningsfenomenet.

Trots omfattande insatser världen över är emellertid utmattningens yttersta metallfysikaliska mekanism fortfarande okänd. Detta innebär att utmattning till syvende og sist är en empirisk vetenskap även om analytiska metoder i stor utsträckning och framgångsrikt används för den praktiska behandlingen av utmattningsproblem.

1.2 Fenomenet

I en konstruktion som under lång tid är utsatt för en i tiden någorlunda regelbundet varierande last, kan det materialtekniska fenomenet *utmattning* uppträda och konstruktionen sägs vara *utmattningsbelastad*.

Utmattning är en komplex process där huvud dragen kan beskrivas som

- kärnbildning av en spricka av mikroskopisk storlek,

- sprickans stabila tillväxt till makroskopisk storlek under ett stort antal belastningscykler, vanligen följt av
- plötslig och snabb spricktillväxt som i regel leder till haveri.

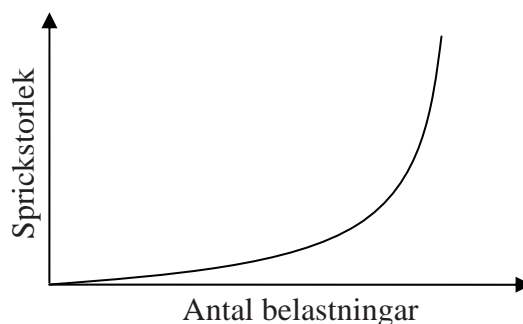
Förloppet inträffar vid s_k laststyrd utmattning.

I praktiken kan utmattning efter ett visst antal belastningar å ena sidan medföra överdriven deformation hos en konstruktion eller dess plötsliga kollaps. I rör och behållare kan läckage inträffa före brott.

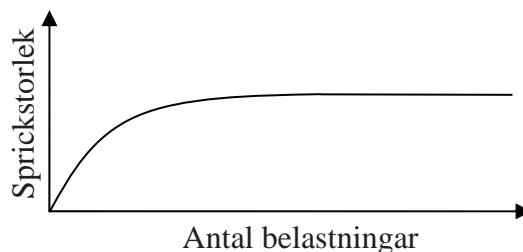
Å andra sidan kan omfattande sprickbildning förekomma i vissa typer av konstruktioner utan att de varken deformeras märkbart eller att deras lastbärande förmåga reduceras i nämnvärd grad. Förloppet kan inträffa vid s_k deformationsstyrd utmattning.

Antalet belastningar till kritiska händelser vid utmattning kan variera inom mycket vida gränser, alltifrån ett hundratal till vanligen miljontals belastningar.

I Figur 1.1 visas principiellt sambanden mellan en utmattningssprickas storlek och antal belastningar för fallen a) laststyrd och b) deformationsstyrd utmattning.



a) laststyrd utmattning



b) deformationsstyrd utmattning

Figur 1.1 Spricktillväxt vid utmattning.

Notera att en utmattningsspricka växer accelererande vid laststyrd utmattning eftersom spänningen i restvärsnittet framför eller omkring en spricka ständigt ökar. Vid deformationsstyrd ut-