



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R68:1977¹

**Utmattningshållfasthet
för anläggnings-
konstruktioner**

Kent Gylltoft

Lennart Elfgren

Byggforskningen

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

Rapport R68:1977

UTMATTNINGSHÅLLFASTHET FÖR ANLÄGGNINGSKONSTRUKTIONER

En inventering

Kent Gylltoft

Lennart Elfgren

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750133-5 från Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen för konstruktionsteknik vid Högskolan i Luleå

Nyckelord

anläggningar
broar
vägar
fundament
betongkonstruktioner
stålkonstruktioner
utmattningshållfasthet
dimensionering

UDK 624.04
624/627
624.012.4
624.014.2

R68:1977
ISBN 91-540-2750-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1977

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD

SAMMANFATTNING

I	INLEDNING	7
11.	BAKGRUND	7
12.	INNEHÅLLSÖVERSIKT	9
13.	KONSTRUKTIONER SOM UTSÄTTS FÖR UTMATTANDE LASTER	10
14.	NÅGRA GRUNDBEGREPP	12
14.1	Laster	12
14.2	Wöhler-diagram	13
14.3	Haigh-diagram. Goodman-diagram	15
15.	REFERENSER	19
II	UTMATTNING AV STÅLKONSTRUKTIONER	20
21.	ALLMÄNT	20
21.1	Bakgrund	20
21.2	Historik	21
22.	UTMATTNINGSFÖRLOPP I STÅL	23
22.1	Utmattningsförloppets karaktär	23
22.2	Sprickinitiering	26
22.3	Spricktillväxt	29
23.	UTMATTNINGSHÅLLFASTHET I SLÅTA PROVKROPPAR	39
23.1	Materialhållfasthet	39
23.2	Ytbeskaffenhet	40
23.3	Volymseffekt	42
23.4	Spänningsbild	43
23.5	Belastningshastighet	51
23.6	Inverkan av varierande spänningsamplitud	53
23.7	Temperaturens inverkan	59
24.	INVERKAN AV SPÄNNINGSKONCENTRATIONER PÅ UTMATTNINGSHÅLLFASTHETEN	60
25.	SVETSAR OCH SVETSADE KONSTRUKTIONER	64
25.1	Allmänt	64
25.2	Faktorer som påverkar utmattningshåll- fastheten i svetsar	65
25.3	Metoder att öka utmattningshållfastheten i svetsar	71

26. FORSKNINGSBEHOV AVSEENDE UTMATTNING AV STÅLKONSTRUKTIONER	76
27. REFERENSER	79
III UTMATTNING AV ARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER	90
31. ALLMÄNT	90
31.1 Bakgrund	90
31.2 Historik	91
31.3 Litteratursammanställningar	92
32. BETONG	94
32.1 Utmattning av betong utsatt för tryckspänning	94
32.2 Utmattning av betong utsatt för böjspänning	102
32.3 Betongens deformationsegenskaper	106
33. ARMERING	111
33.1 Armeringsstänger	111
33.2 Svetsat armeringsnät	123
33.3 Spännarmering	125
34. ARMERAD BETONG	127
34.1 Utmattningsbrottets karaktär	127
34.2 Tryckbrott, böjbrott	128
34.3 Skjuvbrott, förankringsbrott	131
35. SPÄNNBETONG	138
36. FORSKNINGSBEHOV AVSEENDE UTMATTNING AV ARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER	141
36.1 Exempel på pågående och planerad forskning	141
36.2 Behov av ytterligare forskning	143
37. REFERENSER	147

FÖRORD

Denna skrift behandlar utmattningshållfasthet i anläggningskonstruktioner. Anläggningskonstruktioner avser i detta fall konstruktioner utförda både i stål och armerad betong. Målsättningen med projektet har varit att inom ämnesområdet ge en översikt dels över tillgänglig kunskap och dels över områden där ytterligare kunskap behövs. För att begränsa framställningens omfattning har det varit nödvändigt att behandla refererade forskningsprojekt mycket knapphändigt.

Projektet har genomförts vid Avdelningen för Konstruktionsteknik vid Högskolan i Luleå med stöd av Statens råd för byggnadsforskning. Utredningsarbetet har utförts av civiling Kent Gylltoft under ledning av docent Lennart Elfgren. Föreliggande rapport har huvudsakligen skrivits av Kent Gylltoft.

Värdefulla synpunkter på rapportinnehållet har lämnats av dr ing Knut Aas-Jacobsen Norge, tekn dr Hans Andersson vid Statens Provningsanstalt, prof Rolf Baehre vid Avd för Stålbyggnad KTH, civiling Oscar Beijer vid Cement- och Betonginstitutet, civiling Lennart Bergquist vid Gränges Oxelösunds Järnverk, övering Lennart Borup vid SJ Centralförvaltning, tekn dr Bo Edlund vid Inst för Konstruktionsteknik, Stål- och Träbyggnad CTH, laborator Sigge Eggwertz vid Flygtekniska Försöksanstalten, civiling Jan Eriksson vid Försvarets Forskningsanstalt, tekn dr Göran Fagerlund vid Cement och Betonginstitutet, civiling Ulf Arne Girhammar vid Avd för Konstruktionsteknik LuH, civiling Anders Granström vid Stålbyggnadsinstitutet, fil mag Hans Hoffstedt vid Jernkontoret, tekn dr Åke Holmberg vid Centerlöf & Holmberg AB, tekn lic Lars Jarfall vid Saab Scania AB, civiling Bruno Kraft vid Svenska Cellulosa AB, tekn lic Bertil Larsson vid ASEA, bergsing Lars Melin vid Avd för Bearbetningsteknik LuH, civiling Jan-Olof Sperle

vid Stora Kopparberg Domnarvets Jernverk, civiling
K-G Sundin vid Avd för Maskinkonstruktion Hållfast-
hetslära LuH, tekn dr Ralejs Tepfers vid Avd för
Byggnadsmaterial och Avd för Husbyggnadsteknik CTH,
tekn lic Tor-Ulf Weck vid Ministeriet för inrikes-
ärendena Finland, tekn lic Bo Westerberg vid AB
Jacobson & Widmark, civiling Hans Åström vid Avd
för Konstruktionsmaterial LuH samt civiling Per-
Olof Östlund vid LKAB.

På avsnittet om forskningsbehov för armerad betong
har synpunkter även erhållits från deltagarna i
"Nordiska Betongförbundets Utmattningsseminarium"
vilket hölls i Luleå 1977-03-23. [36-4].

Maskinutskrift har utförts av Birgitta Wikström
och Doris Karlsson.

Luleå i mars 1977

Kent Gylltoft

Lennart Elfgren

SAMMANFATTNING

Rapporten behandlar utmattningshållfasthet i anläggningskonstruktioner av både stål och betong. Exempel på sådana konstruktioner är broar, vägar och flygfält, järnvägsslipers, kran- och traversbanor, transportanläggningar, maskinfundament, marina konstruktioner, vindkraftverk mm.

Innehållet i rapporten är uppdelat i tre delar. Efter en kortfattad allmän del följer två huvuddelar som behandlar utmattning i stålkonstruktioner respektive betongkonstruktioner.

Syftet är att inom ämnesområdet ge en översikt dels över tillgänglig kunskap och dels över områden där ytterligare kunskap behövs.

Existerande teorier för utmattning har hittills huvudsakligen tillämpats på enkla kroppar. Någon fullständig teori för utmattningsförloppet i sammansatta konstruktioner finns för närvarande ej. Detta gäller såväl konstruktioner av stål som betong. Nuvarande dimensionering sker därför med tillämpning av empiriska samband baserade på provning.

Framtida forskning bör inriktas mot att i ökad utsträckning även omfatta provning av större konstruktioner och konstruktionselement under inverkan av laster och yttre betingelser som efterliknar verkligheten i så hög grad som möjligt.

I. INLEDNING

11. BAKGRUND

Utmattningsbrott kan inträffa i en konstruktion som utsätts för upprepad lastpåverkan ett stort antal gånger. Hållfastheten vid utmattningsbrott är härvid vanligen väsentligt lägre än den hållfasthet en konstruktion uppvisar när den belastas med en konstant last eller belastas med en hög last vid ett enstaka tillfälle.

Byggnads- och anläggningskonstruktioner utsätts för och påverkats av vind och vågor, trafiklast, maskiner i arbete, kranar och traverser i rörelse, upprepad tvångsinverkan på grund av temperatur- och fuktvariationer mm. Alla dessa varierande laster kan ge upphov till utmattningsbrott.

Problem som rör utmattning inom byggnads- och anläggningsverksamheten har fått en ökad betydelse under senare år. Flera skäl finns till detta.

- Dimensionerings- och analysmetoder har förbättrats och förfinats. Förr användes i många fall relativt grova beräkningsmetoder i kombination med höga säkerhetsfaktorer. I dessa säkerhetsfaktorer togs viss hänsyn till risken för utmattningsbrott. I våra dagars förfinade metoder måste säkerheten mot utmattning beaktas separat. Detta kräver ökad kunskap om utmattningshållfastheten.
- Materialkvaliteterna förbättras och allt högre värden uppnås på t ex den statiska brotthållfastheten. Ofta medför emellertid en högre brotthållfasthet att materialet blir sprödare och att utmattningshållfastheten relativt sett blir lägre.

Nya typer av konstruktioner byggs där ut-
mattande laster uppträder i större omfatt-
ning än vad som tidigare varit vanligt.

12. INNEHÅLLSÖVERSIKT

Denna rapport är uppdelad i tre delar.

Del I innehåller en inledande presentation av ämnesområdet. Här ges exempel på konstruktioner där utmattning kan vara särskilt aktuellt. Dessutom förklaras de vanligaste grundbegreppen.

Del II behandlar utmattning av stålkonstruktioner. Här ges först en kortfattad historisk bakgrund. Därefter behandlas utmattningsförloppets karaktär, utmattningshållfasthet i släta provkroppar och inverkan av spänningskoncentrationer. Svetsar och svetsade konstruktioner behandlas i ett avsnitt. Avslutningsvis diskuteras på basis av den presenterade inventeringen behovet av ytterligare forskning.

Del III behandlar utmattning av betongkonstruktioner. Efter ett inledande avsnitt diskuteras utmattning av betong respektive utmattning av armering. Därefter behandlas armerad betong och spännbetong. Avslutningsvis diskuteras på basis av den presenterade inventeringen behovet av ytterligare forskning.

13. KONSTRUKTIONER SOM UTSÄTTS FÖR UTMATTANDE LASTER

I detta kapitel exemplifieras några typer av byggnads och anläggningskonstruktioner där utmattande laster kan uppträda.

Broar - I väg- och järnvägsbroar uppträder utmattande laster som måste beaktas vid dimensioneringen. Speciellt vid broar där trafiklasten är stor i förhållande till brons egenvikt är problemet aktuellt.

Vägar och flygfält - Betongfarbanor i vägar och flytfält utsätts för utmattande laster vid trafikbelastning. Utemiljöns skiftande förhållanden innebär här ökade påfrestningar på betong och armering. Risken för korrosion måste beaktas i sprickor som öppnar och sluter sig mer eller mindre vid varje lastangrepp.

Betongslipers - Slipers för järnvägar börjar framställas i förespänd betong. Utmattningshållfastheten är här avgörande för elementens livslängd.

Kran- och traversbanor - Denna typ av konstruktion är hårt utsatt för utmattande laster. Brott i denna typ av konstruktion beror till största delen på utmattning och stränga regler för inspektion och periodvis återkommande provbelastningar finns därför.

Transportanläggningar - Transportband och utlastningsanordningar vid fabriker, terminaler och hamnar utsätts ofta för en hård nedslitning. Utmattning kan här förkorta livslängden ytterligare.

Maskinfundament - Fundament för maskiner i verkstads-, gruv- och trävarubranschen utsätts ofta för dynamiska laster. För vissa fundament har man uppenbara svårigheter att erhålla fullgoda konstruktioner. Tungakvarnar för framställning av pellets inom gruvindustrin är ett exempel härpå.

Marina konstruktioner - Fyrorn, oljeborrorn, borrhullformor, lagringscisterner etc utsatta för vågkrafter är en ny typ av konstruktioner där hänsyn till utmattning måste tas. Inverkan av ett växlande vattentryck kan ha en avsevärd inverkan på utmattningshållfastheten hos betongkonstruktioner

Vindkraftverk - I den strävan som finns att utnyttja vinden som en energikälla kommer vindkraftverk att bli aktuella. Höga master och torn kommer härvid att bli påverkade av väsentliga vindkrafter.

14. NÅGRA GRUNDBEGREPP

14.1 Laster

För att ge ordning och stadga åt framställningen ges nedan definitioner av begreppen statisk och dynamisk last, engångs- och flergångslast samt utmattningslast. Definitionerna är hämtade från ett förslag till "Allmänna bestämmelser för bärande konstruktioner (AK 75)" utarbetat av Nordiska kommittén för byggbestämmelser (NBK) [14-1].

Dynamisk last - En last som orsakar en acceleration av betydelse i aktuell konstruktion eller konstruktionsdel sägs vara dynamisk.

Statisk last - En last som inte är dynamisk sägs vara statisk.

Engångslast - En last som endast uppträder en enda gång benämns engångslast.

Flergångslast - En last som uppträder mer än en gång, benämns flergångslast.

Utmattningslast - En flergångslast med så många lastvariationer att utmattningsbrott kan uppträda i en konstruktion benämns utmattningslast.

De olika typerna av laster illustreras i Fig 14.1 [14-2].

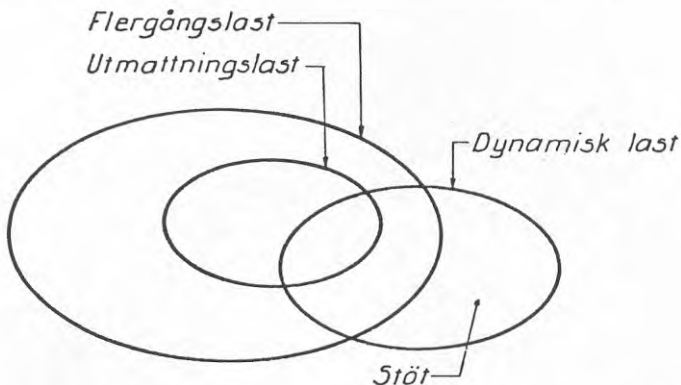


Fig 14.1 Olika lasttyper enligt Åkerlund [14-2].

Lasternas variation är ett väsentligt problemområde. Här har hittills mycket få undersökningar genomförts. Två svenska projekt inom detta område har dock nyligen rapporterats. I det ena projektet har Per Christiansson studerat lastvariationerna för landsvägsbroar [14-3] och i det andra har Oscar Beijer studerat temperatur och fuktrörelser i fasadskivor av betong [14-4].

14.2 Wöhler-diagram

Den första, mer kända grafiska presentationen av utmattningshållfasthet gjordes av Wöhler. Han utförde försök med roterande viktbelastade axlar, fig 14.2 och erhöll på detta sätt en sinusformad spänning i inspänningssnittet som växlade mellan tryck och drag, fig 14.3.

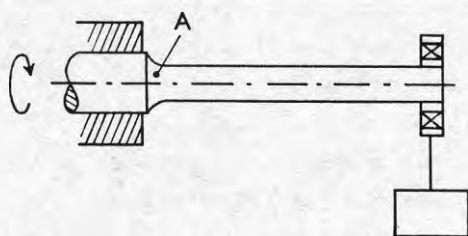


Fig 14.2 Viktbelastad axel [14-5]

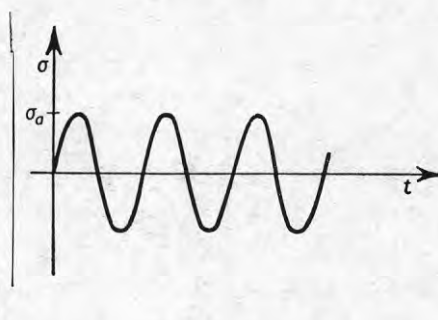


Fig 14.3 Samband spänningslivslängd [14-5]

Efter ett visst antal varv N brister provet. Om ett förnyat prov göres med en mindre pålagd spänning σ_a så uthärdar provet fler belastningscyklar N . Om ett större antal prov av samma material utförs kan ett samband mellan spänningsamplitud och livslängd (uttryckt i antal belastningscyklar N) uppställas. Ett sådant diagram som visas i fig 14.4 kallas Wöhler-diagram eller S-N-diagram. (Sress level, Number of cycles).

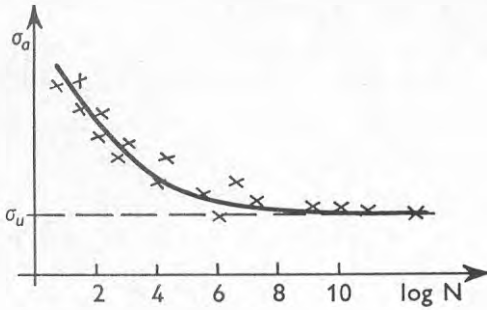


Fig 14.4 Wöhlerdiagram eller S-N-diagram
[14-5]

Diagrammet visar att det finns en gränsspänning σ_u där kurvan asymptotiskt närmar sig en horisontell linje. Om $\sigma_a < \sigma_u$ inträffar aldrig utmattningsbrott. Spänningen σ_u kallas materialets utmattningsgräns.

I jämförelse med statistiska prov, är spridningen av försöksresultat större vid utmattningsprov. Detta beror på att betydligt fler faktorer inverkar på utmattningshållfastheten. Wöhlerkurvan i fig 14.4 är på bästa sätt anpassad till försöksresultaten. Detta medför att värden på kurvan innebär en brott-risk på 50%. Ett Wöhlerdiagram på mera allmän form, där även sannolikheten för brott finns med, visas i fig 14.5. Ett dylikt diagram brukar benämnas P-S-N-diagram (Probability of failure, Stress level, Number of cycles).

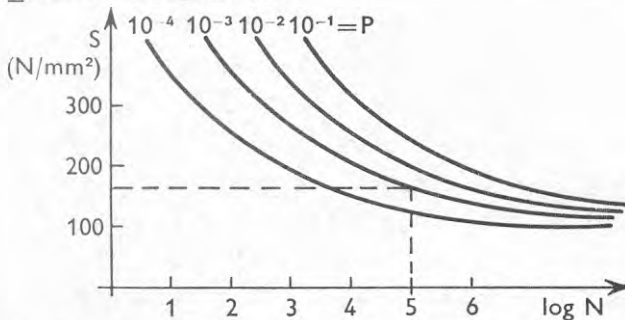


Fig 14.5 P-S-N-diagram [14-5].

Värden som exempelvis ligger på kurva 10^{-3} ger brott med en sannolikhet på 10^{-3} .

14.3 Haigh-diagram. Goodman-diagram

En växlande spänning enligt fig 14.3 kan vara överlagrad en konstant spänning, som då brukar kallas medelspanning σ_m (fig 14.6). Specialfallet med $\sigma_m = \sigma_a$ kallas pulserande spänning.

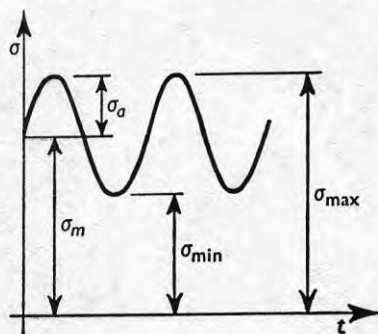


Fig 14.6 [14-5].

Principiellt finner man att vid ett oförändrat antal lastcykler så minskar amplituden med ökande medelspanning. Detta kan presenteras i ett S-S-diagram eller Haigh-diagram (fig 14.7).

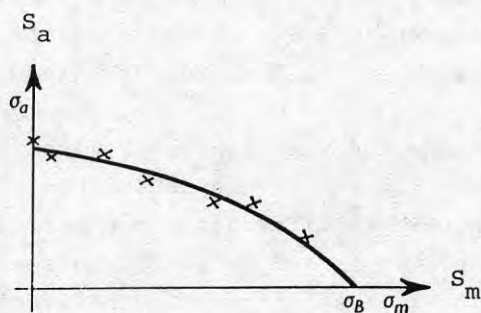


Fig 14.7 S-S-diagram [14-5].

Den maximala spänningen som kan uppnås är materialets statistiska brottgräns σ_B .

Ett annat presentationssätt utgör Goodman-diagrammet (fig 14.8) där σ_{\max} och σ_{\min} är avsett som funktion av σ_m .

$$(\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a, \sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a)$$

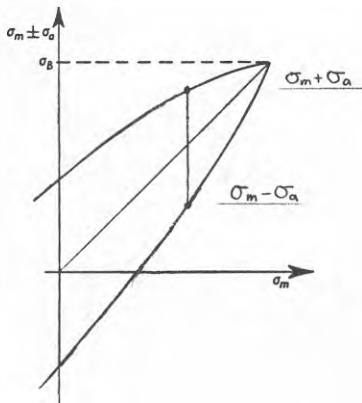


Fig 14.8 Goodman-diagram.

För att grafiskt fullständigt beskriva spänningsamplituden S_a som funktion av medelspänningen S_m och antalet lastcykler N , krävs en tredimensionell bild, där brottvillkoret (med 50% sannolikhet för brott) representeras av en yta i rummet (fig 14.9).

När det gäller svetsade konstruktioner har många forskare kommit fram till att medelspänningsnivån ej inverkar på utmattningshållfastheten och att det endast är spänningsvidden S_r som är av betydelse (fig 14.10). I sådana fall kan utmattningshållfastheten redovisas i diagram enligt fig 14.11 där spänningsvidden S_r är avsett som funktion av N .

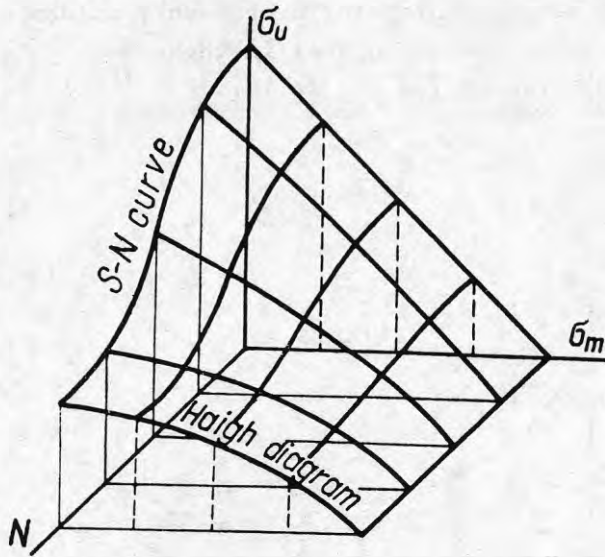


Fig 14.9 Kombinerat S-N-diagram och S-S-diagram
(Haigh diagram) [14-6].

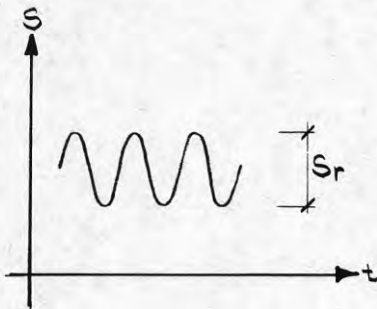


Fig 14.10

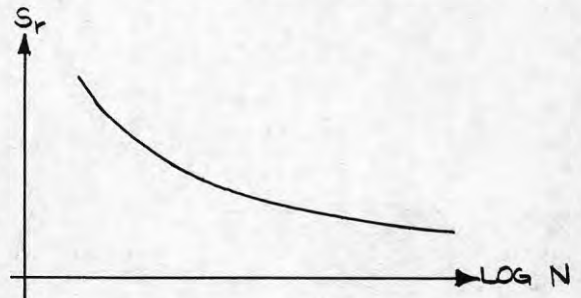


Fig 14.11 S_r -N-diagram.

Tas även sannolikheten för brott med i bilden så representeras utmattningshållfastheten väl av ett $P-S_r-N$ -diagram enligt fig 14.12.

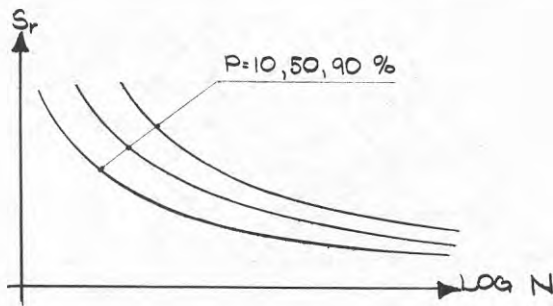


Fig 14.12 $P-S_r-N$ -diagram.

15. REFERENSER

- [14-1] Allmänna bestämmelser för bärande konstruktioner (AK 75). Statens Planverk, Säkerhetsgruppen 53 sid, Förslag 1975-03-17, Stockholm 1975.
- [14-2] Åkerlund Sture: Utmattning. Kapitel A i kompendiet "Bärande konstruktioner FK 1, del 1", Tekniska Högskolan i Lund, Inst för byggnadsteknik II, TLTH/VBV, sid A1/1-A6-1, Lund 1976.
- [14-3] Christiansson Per: Probabilistic models for calculation of load spectra and load effect spectra for highway bridges. Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Report 71, 264 sid, Lund, March 1976.
- [14-4] Beijer Oscar: Temperatur- och fuktrörelser i fasadskivor av betong. Cement- och betonginstitutet CBI-forskning research 8:76, 217 sid, Stockholm 1976.
- [14-5] Hult Jan: Hållfasthetslära. Almqvist & Wiksell/Gebbers Förlag AB, 411 sid, Uppsala 1968.
- [14-6] Sors L: Fatigue design of machine components. Pergamon Press, 105 pp, 1971.

II UTMATTNING AV STÅLKONSTRUKTIONER

21. ALLMÄNT

21.1 Bakgrund

Utmattning av stålkonstruktioner är en komplex företeelse. Utmattningsförloppet består av ett antal steg från det att en första spricka initieras till dess att slutligt brott inträffar.

Utmattningsförloppet styrs av flera faktorer. Dessa kan höra samman med förhållanden såväl utanför som inne i konstruktionen.

De viktigaste yttre faktorerna är lastpåverkningar av olika slag, men temperatur och omgivande atmosfär inverkar också (bl a genom korrosionsangrepp).

Bland de inre faktorerna kan nämnas: spänningsbild, materialegenskaper, geometrisk utformning inklusive "brottanvisningar". Dessa har betydelse för såväl osvetsade som svetsade konstruktioner.

Det faktum att så många faktorer påverkar utmattningshållfastheten är en av orsakerna till att man ännu ej lyckats uppställa någon komplett teori för utmattningsfenomenet. Nuvarande dimensionering sker därför huvudsakligen med tillämpning av empiriska samband baserade på provningar. På senare tid har dock även brottmekaniska resonemang med gott resultat börjat tillämpas på utmattningshållfastheten.

Utmattningsbrott anses vara den helt dominerande haveriorsaken i maskinkonstruktioner [21-1]. Allteftersom utvecklingen mot lättare stålkonstruktioner med högre materialhållfasthet framskrider, kommer utmattningshållfastheten säkerligen också att bli avgörande för alltfler byggnads- och anläggningskonstruktioner.

21.2 Historik

I samband med ångmaskinens tillkomst och den begynnande industrialiseringen i västerlandet började materialbrott bli vanliga i konstruktionsdelar som utsattes för upprepade laster. Brotten uppträdde vid låga påkänningar och inträffade ofta i sådana punkter av en konstruktion där dimensionen ändrades. Dessa brott oroadе givetvis dåtidens konstruktörer och man utförde försök för att studera fenomenet. Engelsmannen W A J Albert gjorde t ex 1830 [21-2], [21-3] provbelastningar av smidda kättingar avsedda för lyftanordningar i gruvor. I vissa fall belastade han med upp till 10^5 lastcykler.

En konstruktionsdel som var speciellt utsatt för den aktuella brottypen var axlarna i järnvägsvagnar. Inom detta område gjordes en stor pionjärinsats för att klarlägga utmattningsbrottet av A Wöhler (1819-1914) [21-4].

Wöhler fick 1847 ansvaret för drift och underhåll av järnvägarna i Niederschlesien - Mähren. Under 23 år i Frankfurt-ander-Oder genomförde han en stor serie experiment rörande utmattningshållfastheten hos järnvägsaxlar [21-5], se fig 21.1.

Wöhler fann att spänningsamplituderna hade stor betydelse för utmattningshållfastheten. Han fann vidare att det fanns en undre påkänningsgräns, utmattningsgränsen, under vilken utmattning ej inträffade oberoende av hur många lastcykler en konstruktion utsattes för.

Efter Wöhler har ett stort antal utmattningsprov på stål och stålkonstruktioner utförts i bland annat USA, Japan och i de ledande industriländerna i Europa. Även Sverige har medverkat. En känd svensk föregångsman är Arvid Palmgren (1890-1971) [21-6]. Palmgren verkade under en stor del av sitt liv vid Svenska Kullagerfabriken AB (SKF) i Göteborg. Han är upphovsman till en ofta tillämpad kumulativ delskadeteori ("Palmgren-Miners delskadepotes") [21-11].

Bland framstående centra för nutida forskning rörande utmattning av stål inom byggnads- anläggningsområdet kan nämnas Lehigh University i Pennsylvania, USA. En stor del av de provningar som ligger till grund för utmattningsreglerna i den svenska byggsvetsnormen [21-7] har utförts där. Bland andra centra för stål-utmattning i allmänhet bör nämnas Batell Memorial Institute i Columbus, Ohio, Laboratorium für Betriebsfestigkeit i Darmstadt, Mechanical Engineering Laboratory i Glasgow, National Physical Laboratory i London samt The Welding Institute i Cambridge.

Historien visar således att det främst är trafikmedlens utveckling som påskyndat utmattningsforskningen. Det är därför naturligt att i våra dagar finna mycket av den mest avancerade formen av utmattningsforskning i samband med flygplanstillverkning. Se t ex Jarfall [21-8], Eggwertz [21-9][21-10] m fl publikationer. Denna forskning gäller dock ofta lättmetaller, där nitning eller skruvning används som sammanfogningsmetod.

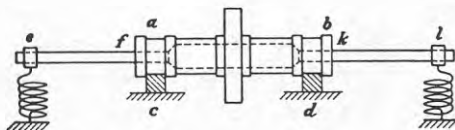


Fig 21.1 Belastningsmaskin använd av Wöhler för utmattningsförsök [21-4]. En cylinder ab roterar på rullarna c och d med hastigheten ca 15 varv/minut. Två axlar ef och kl är fästade i cylindern och utsätts för böjande moment av fjädrar fästade i rullagren e och l. Axlar med 9-12 cm diameter provades.

22. UTMATTNINGSFÖRLOPP I STÅL

22.1 Utmattningsförloppets karaktär

När ett stålmaterial utsätts för varierande spänningar vid en viss nivå och med ett sådant antal att brott till sist uppstår, säger man att stålet utmattas.

Ju lägre spänningsamplitud som påläggs desto fler lastcykler kan materialet uthärda. Se fig 22.1. Om spänningsnivån sänks under en viss gräns (σ_u) inträffar aldrig brottet. Stålmaterialet säges ha en utmattningsgräns.

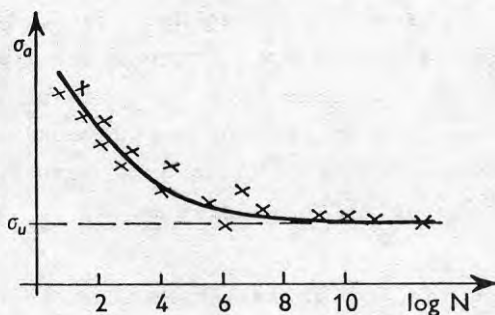


Fig 22.1 Sambandet mellan spänningsamplituden σ_a och antal lastcykler N . Wöhlerkurva eller S-N-diagram (Stress-Number of cycles). σ_u är utmattningsgränsen [21-1].

Utmattningsförloppet består i princip av tre skeden. Först initieras mikrosprickor i materialet. Detta sker vid olika former av diskontinuiteter i materialet som ger upphov till spänningskoncentrationer. Därefter tillväxer sprickorna mer och mer. Slutligen blir spänningen i den kvarvarande ospruckna delen så stor, att den "statiska" brottgränsen uppnås.

Gränsen mellan sprickinitieringsskedet och spricktillväxtskedet är något oklar. Gränsen kan anses uppnådd då sprickan upptäcks med blotta ögat. Den kan också anses uppnådd redan då ett elektronmikroskop avslöjar sprickan. Utvecklingen tycks emellertid gå emot att sprickinitieringsskedet anses försumbart och att brottmekaniska spricktillväxtteorier kan användas både för initierings- och tillväxtskedet (åtminstone för svetsar).

Ett studium av brottytan hos ett provstycke kan många gånger ge mycket information om hur utmattningsförloppet hos det aktuella provstycket har utvecklats. I fig 22.2 visas som ett exempel brottytan hos bakaxeln till en bil. Man kan här urskilja tre zoner. Den första släta zonen omfattar initieringspunkten samt den del där sprickutbredningen gått långsamt. I den andra zonen som är mindre slät, har sprickutbredningen gått snabbare. Man kan där tydligare se hur sprickorna har utvecklats. Slutligen uppvisar den tredje zonen en grov struktur, där det statiska "restbrottet" har ägt rum.

Utmattning vid korta livslängder kan sägas vara en särskild form av utmattning, s k tøjningsutmattning (eng: low cycle fatigue). Tøjningsomfånget, elastiskt och plastiskt, ersätter här spänningsamplituden som primär storhet för utmattningshållfastheten. Grundläggande samband finns föreslagna av Manson och Coffin (Manson-Coffins lag). Se exempelvis Formelsamling i Hållfasthetslära [24-1] samt [22-24]-[22-27] för vidare studium.

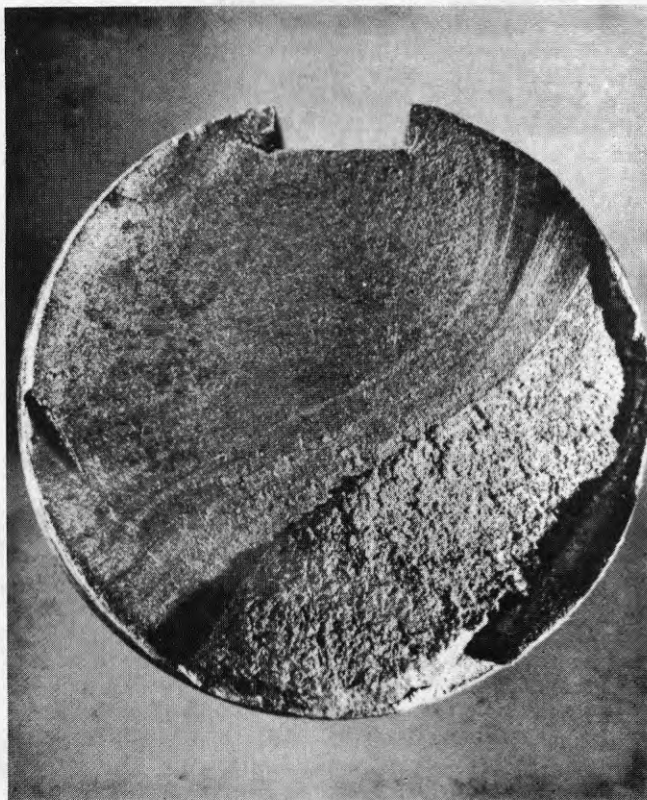


Fig 22.2 Utmattningsbrott av en bakaxel till en bil. Brottet har initierats i axelns övre del [22-1].

22.2 Sprickinitiering

Utmattningssprickor initieras i anslutning till diskontinuiteter av olika slag i stålmaterial. (KG Sundin [22-2]).

Vid exempelvis spröda material kan sprickor initieras i korngränserna beroende på att olika korn har olika mekaniska egenskaper [22-3].

För duktila material har många forskningsresultat visat att initieringen styrs av en komplicerad mekanism med dislokationsrörelse som viktig beståndsdel. Glidning (plastisk deformation) sker vid belastning längs vissa fördelaktigt orienterade kristallplan. Deformationshårdnande i glidytan gör att glidprocessen ej är helt reversibel. Glidningen överförs därför till nya atomplan efter hand. Därigenom uppstår diskontinuiteter även i ytan på materialet (fig 22.3).

Härefter kan sprickor initieras antingen genom anvisningsverkan från utbildade ytojämheter eller genom öppning av något glidplan utsatt för normalspänning [22-3], [22-5],[22-2].

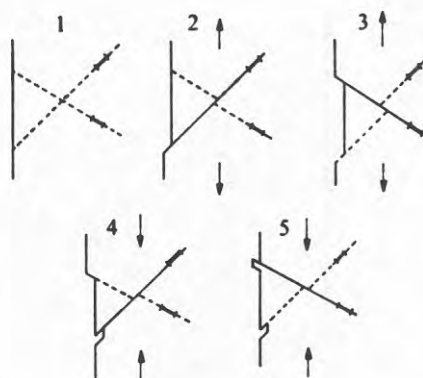


Fig 22.3 Modell för utbildning av ut- och inskjutningar vid växlande belastning. (Hämtad från [22-4], [22-3]).

De allra flesta stålmaterial som används i tekniska konstruktioner är legerade för att öka hållfastheten. De främmande atomerna fungerar som låsningar i atomgittret vid rörelse. Detta orsakar lokala spänningskoncentrationer varvid atomgittret kan brista och initiera en utmattnings-spricka [22-6] [22-2].

Vid inhomogeniteter av olika slag, såsom slagpartiklar, porer eller andra inneslutningar och "materialfel" uppstår spänningskoncentrationer varvid sprickor bildas. Ju skarpare diskontinuiteten är desto större är sannolikheten att en spricka uppstår. Hur farlig en viss diskontinuitet är beror på om den samverkar med andra och kanske farligare diskontinuiteter eller ej. Exempelvis har materialets renhet (slaggar etc) stor inverkan på utmattningshållfastheten i kullager, medan inverkan är försumbar i svetsar.

Ett känsligt område för sprickinitiering är ytskiktet. Här inverkar ytans beskaffenhet (repor etc). Försök med provkroppar utan några "yttre spänningskoncentrationer" har visat att sprickorna oftast initieras vid ytan. Frost et al [22-3] omnämner utmattningsförsök där ytskiktet på provkropparna skalats bort efter viss tid. Det fortsatta försöket uppvisar en högre livslängd än om provet fortsatts utan behandling (förutsatt att samma spänningsnivå används). Om proceduren (att skala bort ytskiktet) upprepas så håller provstycket i princip så länge som det finns material att skala bort.

Att ytskiktet är ett viktigt område visas även av att en ökning av ythårdheten, antingen metallurgisk eller genom ytbearbetning, ökar utmattningshållfastheten i ett provstycke. Ytterligare bevis för att sprickinitieringen ofta sker i ytskiktet är att utmattningshållfastheten kan ökas genom anbringande av tryckspänningar i ytskiktet (nitrering, kulblästring, tryckrullning etc).

Försök har visat att vid enaxlig belastning i duktila material uppstår sprickor i 45° riktning mot ytan. Skjuvspänningen anses också av många forskare vara styrande för sprickinitieringen i dessa material. Detta avspeglar sig även i de kriterier för sprickinitiering som används. Trescas och von Mises kriterier, vilka är baserade på skjuvning i materialet förekommer ofta i litteraturen. Kanske är von Mises deviationsarbetshypotes den allra bästa. (Se även avsnitt 23.4 "Spänningsbild").

Givetvis ger även makrodiskontinuiteter såsom hål och tvärsektionsövergångar upphov till sprickinitiering. Vid svetsade konstruktioner är svetsen av naturliga skäl ofta den svaga länken. Svetsen kan ge upphov till geometriska brottanvisningar. Även inhomogeniteter i själva svetsgodset med omgivande uppsmält material kan ge brottanvisningar. Svetsningen i sig själv bidrar ju till att bygga in exempelvis porer och slagginneslutningar i svetsgodset. Oftast initieras sprickorna i fattningskanten mellan svetsgodset och omgivande material.

22.3 Spricktillväxt

Om målsättningen vid dimensionering av konstruktioner vore att helt undvika mikrosprickor, så skulle problematiken med spricktillväxt vara ointressant. En sådan målsättning vore kanske möjlig för små välslipade provstavar, men då det gäller vanliga typer av konstruktioner, med alla dess inhomogeniteter och sprickanvisningar, måste småsprickor tillåtas uppstå.

Detta gör spricktillväxten till ett centralt område vid studier av utmattningshållfasthet. Livslängden beror ju till stor del av hur snabbt sprickorna utvecklar sig från initieringspunkten till dess att statistiskt "restbrott" inträffar på grund av sektion minsningen vid sprickutbredningen.

Propageringen kan sägas ske i två faser av något olika karaktär [22-2]. I första fasen växer sprickan i 45° -riktningen på grund av skjuvspänningen. Detta skede kan sägas vara en fortsättning av initieringsprocessen. Då sprickan har växt en bit in i materialet börjar normalspänningen att göra sig gällande och sprickan tenderar att byta riktning. Här börjar den andra fasen som karakteriseras av att sprickans tillväxtriktning är vinkelrät mot den pålagda spänningen.

Det finns i litteraturen ett stort antal "formler" för sprickutbredning. Formulerna har olika uppbyggnad och bakgrund med mer eller mindre troliga antaganden som bakgrund. Några av dem kan beskrivas teoretiskt. Alla "formlerna" kan betraktas som korrekta för det försöksunderlag som "formeln" framtagits för. Resultaten påverkas av bl a provkroppens utseende, materialkvalitet och spänningsbild. En typisk kurva för spricktillväxten i relation till antalet spänningsväxlingar visas i fig 22.4. Översikter av området spricktillväxt ges t ex av Frost et al [22-3], Härkegård [22-8], Christensen et al [22-9], Plumbridge och Ryder [22-10] och Plumbridge [22-11].

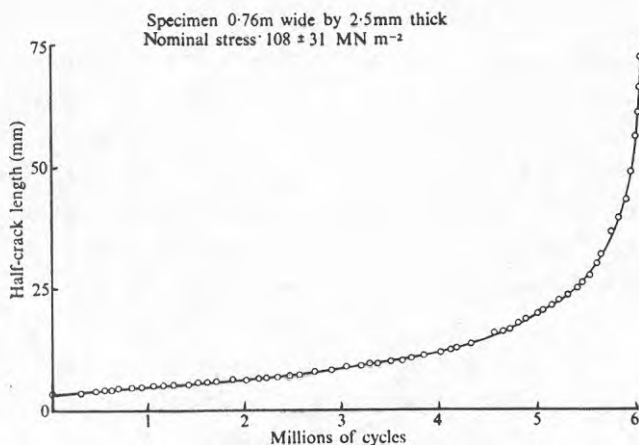


Fig 22.4 Tillväxtkurva för en mittspricka i ett prov av mjukstål ([22-7], [22-3]).

Då lasten varierar cykliskt kommer sprickan att tillväxa ett litet stycke ("inkrement") vid varje belastningscykel (stabil spricktillväxt). Härigenom får ytan i mikroskala ett årsringsliknande utseende ("striation"). Dessa linjer kan dock ej ses med blotta ögat. Lämpligen bör svepelektromikroskop användas. Fig 22.5 visar ett exempel. De årsringsliknande linjer som man kan se på en brottyta med blotta ögat har uppstått då sprickan stått stilla en tid. Linjerna kallas "rastlinjer" (efter tyskans Rastlinien = vila (sig)), och kan exempelvis uppstå om lastamplituden sänks tillfälligt. Fig 22.6 visar en "rastlinje".

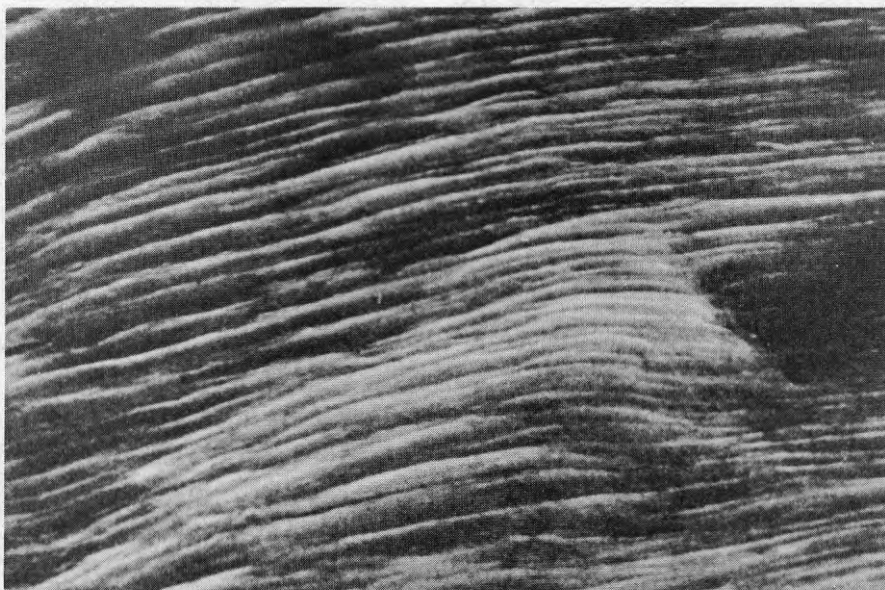


Fig 22.5 Utmattningsstriationer, stål förstoring 5000 gånger [22-12].

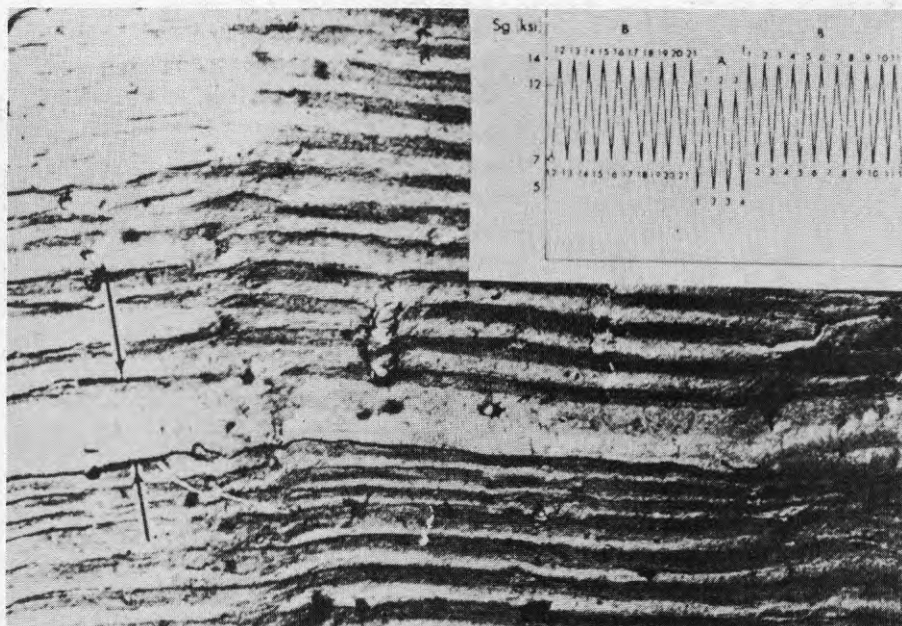


Fig 22.6 Utmattningsstriationer med en rastlinje, aluminiumlegering förstoring 7500 gånger [22-12].

Vissa forskare har använt sig av brottmekanikens lagar för att förklara spricktillväxten. Enligt Janne Carlsson [22-12] kan sambandet mellan spricktillväxthastigheten och "spänningsintensiteten" åskådliggöras av fig 22.7. K_I i figuren definieras av uttrycket $K_I = \sigma_\infty \cdot \sqrt{\pi a} \cdot f(a)$.

Här är σ_∞ en enaxlig spänning verkande vinkelrätt mot sprickan och på sådant avstånd att spänningskoncentrationen vid sprickan ej inverkar. a står för halva sprickstorleken och $f(a)$ är en dimensionslös funktion som beror av geometri och belastningstyp. ΔK_I avser variationen av spänningsintensitetsfaktorn då lasten (σ_∞) varierar. Endast dragen spänning medräknas. da/dN är spricktillväxten per belastningscykel. ΔK_I diskuteras även av Irwin i [22-13], [22-14].

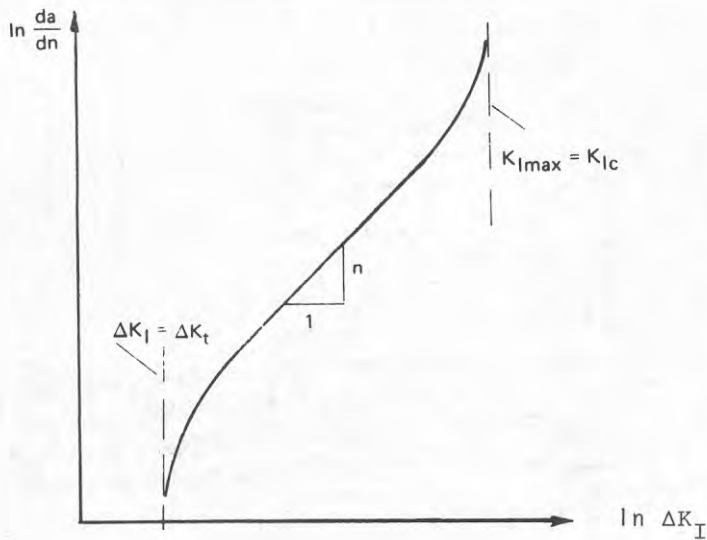


Fig 22.7 Tillväxthastighet för utmattningsbelastad spricka [22-12]. da/dN är spricktillväxt per belastningscykel och ΔK_I är spänningsintensitetsvidden.

Carlsson delar upp kurvan i fig 22.7 i tre områden. Tröskelområdet finns längst till vänster med asymptoten $\Delta K_I = \Delta K_t$. För mindre ΔK_I -värden fås ingen spricktillväxt. Jämför med kapitel 24 "icke propagerande sprickor". Detta att spricktillväxt ej sker vid små spänningsintensiteter kan också förklara stålmaterialets utmattningsgräns, "Wöhlerkurvans" horisontella del. I mellanområdet har försök visat att approximativt ett linjärt samband råder. Om linjens lutning kallas n fås ekv 22.1:

$$\ln (da/dN) = n \ln (\Delta K_I) + \ln C \quad (22.1a)$$

eller

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_I)^n \quad (22.1b)$$

Coch n är materialkonstanter. Denna ekvation kallas också vanligen Paris' lag [22-15]. Det tredje området, instabilitetsområdet, kännetecknas av att sprickans tillväxthastighet går asymptotiskt mot oändligheten då maximalvärdet på K_I går mot ett gränsvärde K_{Ic} .

Som ett exempel på användningen av brottmekanik vid utmattning redovisas delar av en undersökning som utförts med svetsade stål balkar av Fisher et al [22-16]. Balkarnas liv och fläns är hopfogade med kälsvets. Studien omfattar sprickutvecklingen av de porer (luftblåsor) som finns i kälsvetsar på de aktuella balkarna.

En omskrivning av ekv 22.1b ger

$$\frac{dN}{da} = \frac{1}{C [\Delta \sigma_{\infty} \pi^{1/2} f(a)]^n} a^{-n/2} \quad (22.2)$$

Denna ekvation kan integreras under förutsättning att $\Delta\sigma_\infty$ och $f(a)$ är konstanta under hela sprick-tillväxten. ($f(a)$ är oberoende av a). Då erhålls:

$$N_{ij} = \frac{1}{C\alpha[\Delta\sigma_\infty\pi^{1/2}f(a)]^n} (a_i^{-\alpha} - a_j^{-\alpha}) \quad (22.3)$$

där antalet belastningscykler N_{ij} fås för en spricka som utvecklar sig från storleken a_i till storleken a_j .
 $\alpha = (n/2) - 1$.

För provkroppar med lika initial och slutlig sprickstorlek och i övrigt belastade under identiska förhållanden kan ekvation (22.3) omskrivas som

$$N_{ij} = C^1 \Delta\sigma_\infty^{-n} \quad (22.4)$$

där

$$C^1 = \frac{1}{C\alpha[f(a)\pi^{1/2}]^n} (a_i^{-\alpha} - a_j^{-\alpha}) \quad (22.5)$$

Logaritmering av ekvation (22.4) ger

$$\log N_{ij} = \log C^1 - n \log (\Delta\sigma_\infty) \quad (22.6)$$

Formel 22.6 känner vi igen. Den kan sägas utgöra regressionslinjen för försöksvärden inprickade i ett S-N diagram med log-log-skala (lutande raka delen av en wöhlerkurva). Konstanterna C^1 och n kan således bestämmas ur försöksdata. Se fig 22.8 där regressionslinjen för utmattningsbrott orsakad av inneslutna porer finns inritad.

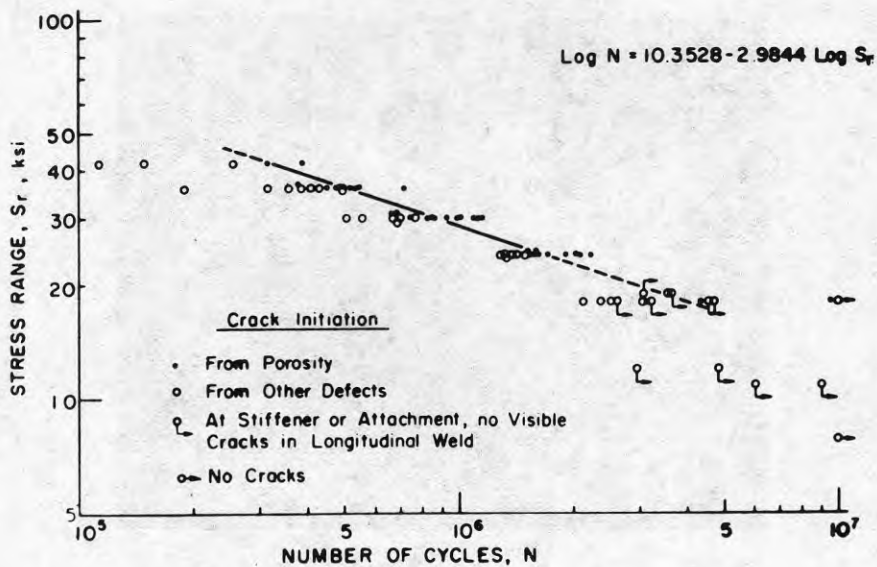


Fig 22.8 S-N-diagram. Ur regressionslinjen för brottpunkter orsakade av sprickor, initierade vid inneslutna porer, kan konstanterna C^1 och n bestämmas [22-16].

Fig 22.9 visar en innesluten blåsa kring vilken en spricka tillväxt cirkelformigt. Dessa försök finns även rapporterade i [22-17] och [22-18].

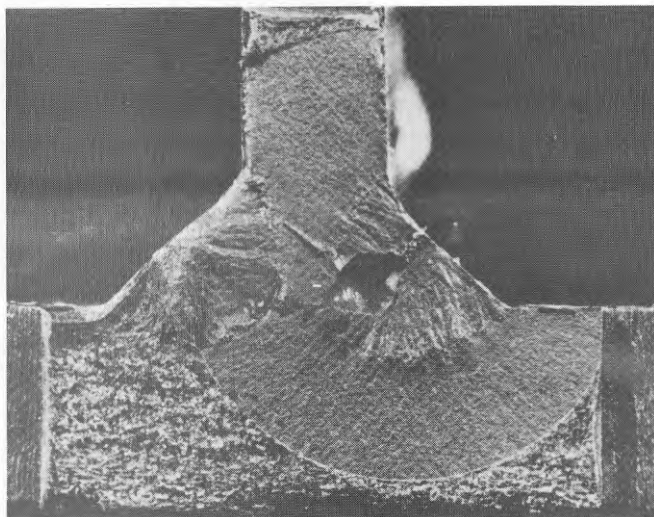


Fig 22.9 Sprickutbredning kring en innesluten blåsa [22-16].

Genom att bestämma a_i och a_j kan även konstanten C fås fram.

Fisher et al har bestämt a_i som ett medelvärde av radien i uppmätta porstorlekar. Slutlig sprickstorlek antogs förevara då sprickan nådde underkanten av balkflänsen. På så sätt bestämdes konstanterna C till $2,05 \cdot 10^{-10}$ och n till 3 varvid Paris' lag kunde skrivas:

$$da/dN = 2,05 \cdot 10^{-10} \Delta K_I^3 \quad (22.7)$$

Sorten på sprickutbredningshastigheten da/dN är inch/cycle och för ΔK_I , $\text{ksi}\sqrt{\text{m}}$.

Ekvation 22.7 är i fig 22.10 jämförd med försöksresultat från andra forskare [22-19]-[22-21]. Linjen är dock extrapolerad för högre värden på sprickutbredningshastigheten.

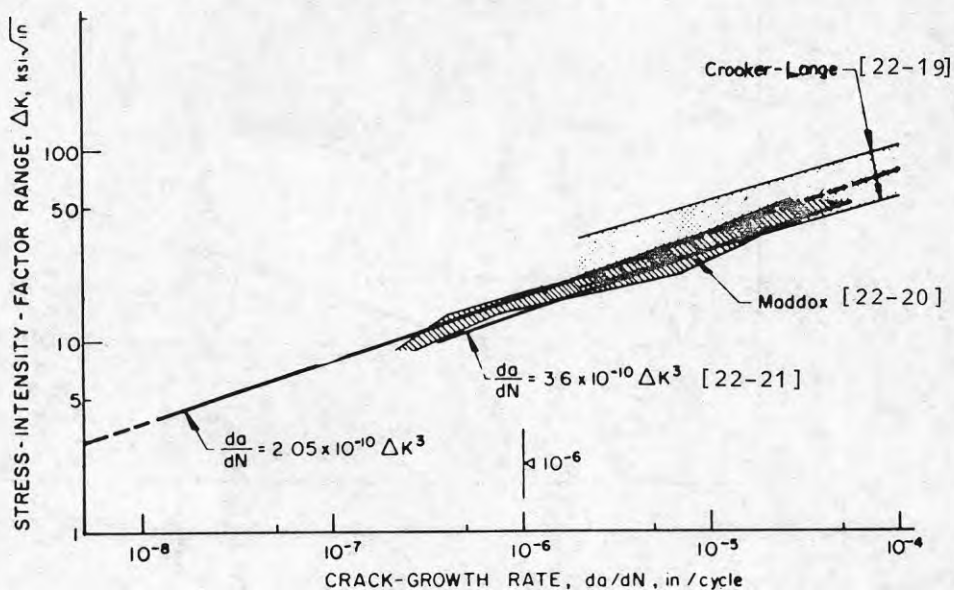


Fig 22.10 Förhållandet mellan spänningsintensitetsvidden och sprickutbredningshastigheten för sprickor med rund utbredningsform [22-16].

De redovisade provningsresultaten uppvisar ett relativt entydigt samband mellan spänningsintensitetsfaktorns spänningsvidd ΔK_I och spricktillväxthastigheten da/dN . Konstanterna tycks vara relativt oberoende av materialkvaliteten. Försöksvärden av större omfattning saknas dock för de lägre spricktillväxthastigheterna (mindre än 10^{-6} inch/cykel), vid vilka enligt [22-16] mer än 75% av konstruktionens livstid förekommer.

Vid mycket små värden på spänningsintensitetsvidden planar kurvan ut och sprickutbredningshastigheten går asymptotiskt mot noll se fig 22.11. Jämför med tröskelområdet enligt fig 22.7.

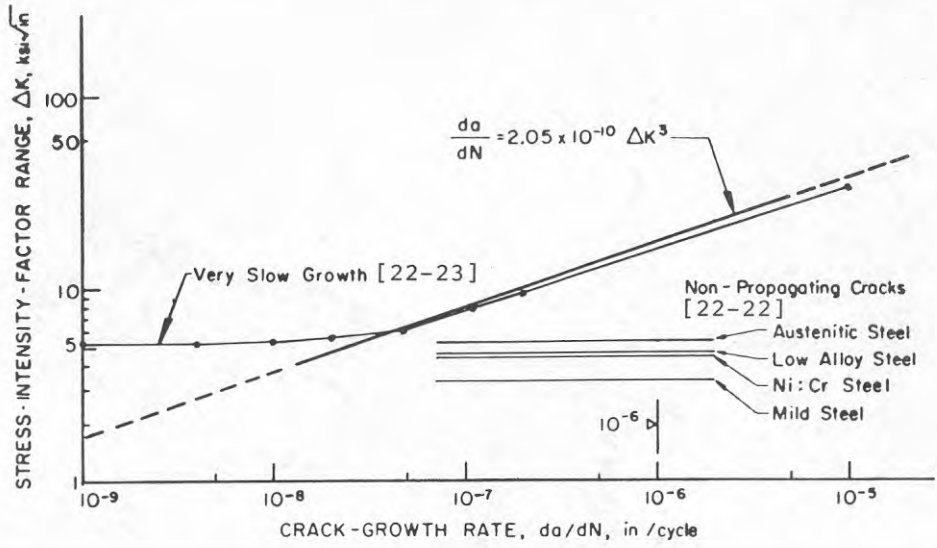


Fig 22.11. Sprickutbredningshastigheten vid små värden på spänningsintensitetsvidden [22-16].

23. UTMATTNINGSHÅLLFASTHET I SLÅTA PROVKROPPAR

Vid bestämning av utmattningshållfastheten för en konstruktion är provning av välslipade provstavar utskurna ur det aktuella konstruktionsmaterialet av grundläggande betydelse. Provstavarna utmattningstestas inomhus i rumstemperatur med en viss provningsteknik och med medelspänningen lika med noll. Härvid erhålls punkter på en "Wöhlerkurva" (se fig 22.1), varvid utmattningsgränsen och utmattningshållfastheten vid ett visst antal lastcykler kan bestämmas under vissa betingelser.

Förutom av den rena materialhållfastheten påverkas utmattningshållfastheten av sådana faktorer som provkroppens storlek och ytfinish, spänningsbild, belastningarnas hastighet och ordningsföljd, men även av temperatur och omgivande atmosfär. Inverkan av flertalet av dessa faktorer skall fortsättningsvis beröras. Andra mycket viktiga faktorer som inverkan av geometrisk utformning och materialfel, diskuteras i kapitel 24.

23.1 Materialhållfasthet

Utmattningshållfastheten för ett stålmaterial ökar med ökande statisk hållfasthet. Som exempel anges i tabell 23.1 typiska värden enligt Frost-Marsh-Pook [22-3].

Tabell 23.1

Material	Dragbrotthållfasthet (Mpa)	Utmattningshållfasthet (Mpa)
Mjuka stål	465	±230
Nickel-kromlegerat stål	1000	±510

Observera att spänningsvidden är relativt hög i förhållande till draghållfastheten. Denna relation gäller för stål med en draghållfasthet mindre än 1100 Mpa, oavsett om hållfastheten har ökats genom ändring i den kemiska sammansättningen eller genom värmebehandling eller kallbearbetning.

För mycket höghållfasta stål med en brottgräns större än 1100 Mpa ökar inte utmattningshållfastheten nämnvärt med dragbrotthållfastheten. Se värden angivna av Boyd [23-1] i tabell 23.2.

Tabell 23.2

Material	Dragbrotthållfasthet (Mpa)	Utmattningshållfasthet (Mpa)(vid roterande böjning)
I	930	± 510
II	2000	± 770

Det kan tilläggas att dessa provbitar var uttagna längs bearbetningsriktningen. För provbitar tvärs bearbetningsriktningen registrerades en utmattningshållfasthet på cirka ± 460 Mpa för båda stälarna.

Allmänt gäller dessutom för ett material med hög utmattningshållfasthet att det skall vara homogent och finkornigt och innehålla ett minimum av slagger.

23.2 Ytbeskaffenhet

Ytskiktets beskaffenhet påverkar i hög grad utmattningshållfastheten. Vi konstaterade i avsnitt 22.2 att mikrosprickor bildas företrädesvis vid ytan. Detta exemplifieras symboliskt i fig 23.1 där parametern κ anger hur mycket lägre utmattningshållfastheten är vid den aktuella ytbeskaffenheten än vid den polerade normprovstaven [21-1].

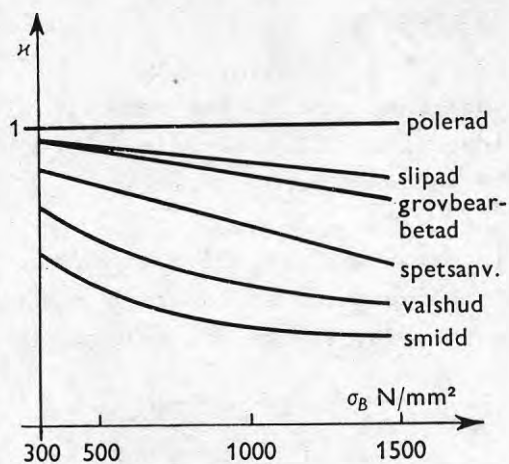


Fig 23.1 Ytbeskaffenhetens inverkan på utmattnings-hållfastheten [21-1].

Figuren anger också att yteffekten blir mera markerad vid ökande brottlast. Ju hårdare och sprödare ett material är ju mindre blir förmågan att genom plastisk deformation utjämna höga spänningstoppar vid repor och andra yteffekter.

23.3 Volymseffekt

Då en provkropp ökar i volym, minskar den relativa utmattningshållfastheten. Detta beror på att en större provkropp innehåller flera materialfel som kan utvecklas till en genomgående spricka.

Av i princip samma skäl uppvisar en provkropp utsatt för växlande böjspänning en längre livslängd än en provkropp utsatt för tryck- och dragspänning, fig 23.2.

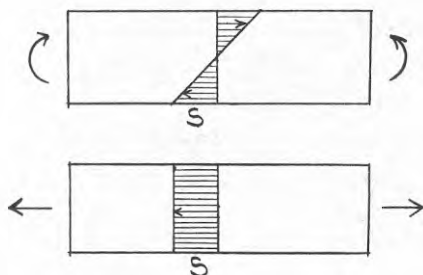


Fig 23.2 Prov utsatt för böjspänning resp normalspänning.

Skillnaden är dock inte så stor som den statistiska spänningsvolymsteorin enligt ovan skulle ge. Detta sammanhänger med att brottet ofta initieras i ytskiktet där spänningarna är lika stora oavsett om provet utsätts för böjspänningar eller normalspänningar.

I anvisade provstavar existerar knappast någon volymseffekt. Detta beror på att en spänningstopp finns inom ett litet område just intill anvisningen och att sprickan börjar i detta lilla område oberoende av den resterande volymen. Detsamma gäller för svetsar.

23.4 Spänningsbild

Provstavar utsätts vanligen endast för normalpåkänningar i en riktning och med växlande spänningsamplitud. Ibland överlagras den växlande spänningen av en konstant medelspänning. I detta avsnitt diskuteras inverkan av en överlagrad medelspänning, men även utmattningshållfastheten för skjuvspänningar med eller utan överlagrad medelskjuvspänning samt kombinerade spänningar.

Utmattningshållfastheten minskar med ökande överlagrad medelspänning. Övre gräns för medelspänning är materialets dragbrottgräns. I tabell 23.3 [22-1] finns detta redovisat för ett stort antal ståltyper. Dessa värden har sammanställts i fig 23.3 [22-1].

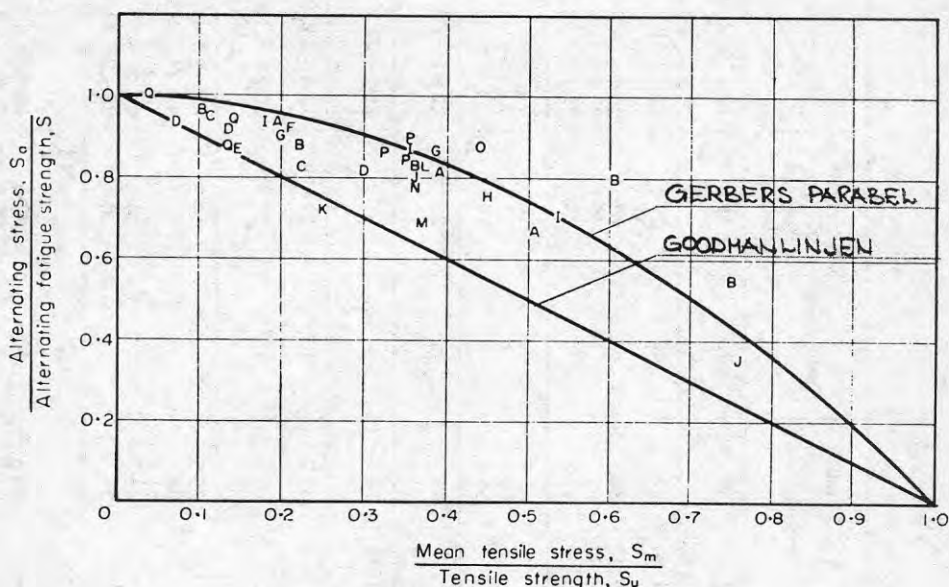


Fig 23.3 Dimensionslöst diagram där förhållandet S_a/S spänningsvidd/(spänningsvidden vid medelspänningen noll) är avsatt mot förhållandet S_m/S_u medelspänning/draghållfastheten. Haighdiagram. Bokstavssymbolerna anges i tabell 23.3 [22-1].

Ofta används det så kallade Goodmandiagrammet för redovisning av medelspänningens inverkan. Ett sådant visas principiellt i fig 23.4

Tabell 23.3 Inverkan på utmattningshållfastheten för stål av en överlagrad medeldragsspänning [22-1]

Material	Tensile strength tons/in ²	Endurance	Alternating fatigue strength tons/in ²	Fluctuating fatigue strength tons/in ²	Symbol in Fig 23.3	Source
Ni Cr Mo steel	56	10 ⁷	31	10 ± 29, 20 ± 27, 30 ± 22	I	O'Connor and Morrison
Ni Cr Mo steel SAE 4340	87	10 ⁷	29.5	21.5 ± 21.5	K	Oberg and Ward
SAE 2330	70.5		31	26 ± 26	L	
SAE 8630	54.5		29.5	20.5 ± 20.5	M	
	65		30	23.5 ± 23.5	N	
	47.5		24	21 ± 21	O	
Ni steel	45.5 50 55	10 ⁷	16 17.5 19.5	6 ± 14 7 ± 16.5 2 ± 19.5	Q	Moore and Jasper
Cr Mo steel	49	10 ⁷	22	22 ± 16.5	H	Hempel and Krug
Ni Cr Mo steel SAE 4340	70.5	1.5 × 10 ⁷	31	25.5 ± 25.5, 53.5 ± 11	J	Trapp and Schwartz
Mild steel	25.2	10 ⁶	13	12.8 ± 8.7, 9.9 ± 10.7, 5 ± 12.2	A	Haigh
Mild steel	26.5	10 ⁷	12.3	20 ± 6.8, 16.1 ± 9.9, 9.6 ± 10.3, 5.9 ± 10.9, 2.8 ± 11.8	B	Gough and Wood
St 52 0.17% C 1.4% Mn	35.5	2 × 10 ⁶	19.5	4 ± 18.5, 8 ± 16	C	Pomp and Hempel
0.44% C 1.7% Mn	56		25.5	4 ± 24, 7.5 ± 23.5, 17 ± 21	D	
0.64% C	51		19.5	7.5 ± 17	E	
4.2% Ni 0.96% Cr	43		23.5	9 ± 21.5	F	
3.5% Ni 0.77% Cr	57		30	22 ± 26, 11.5 ± 27	G	
4% Cr 8% Ni 7% Mn						
Austenitic: cold worked 10% cold worked 20% cold worked 30%	56.5 61.5 68	10 ⁷	22.5 25.5 25.5	20 ± 20 21.5 ± 21.5 22 ± 22	P	

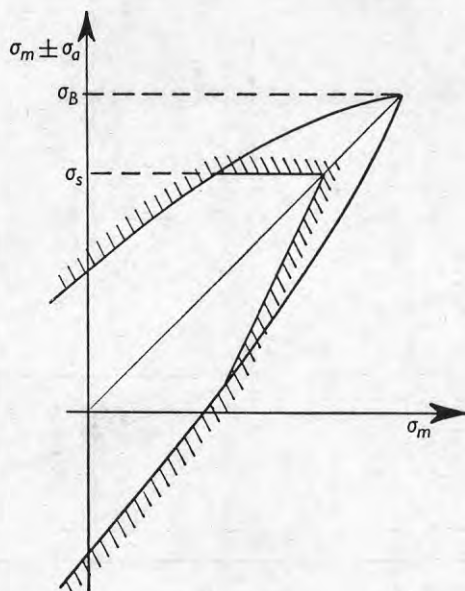
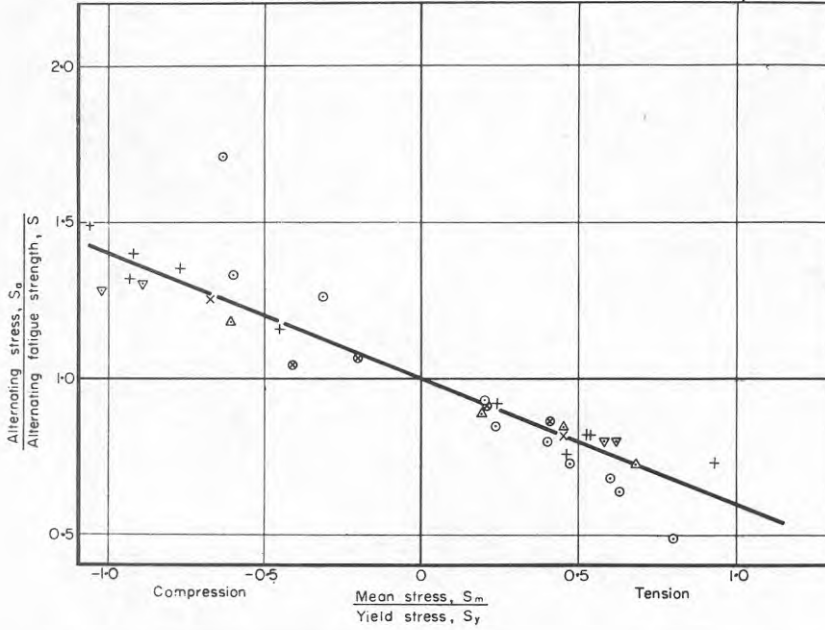


Fig 23.4 Goodmandiagram. Maximi- och minimispänningar är $\sigma_m \pm \sigma_a$, där σ_m är medelspänningen och σ_a spänningsamplituden. Här kan också begränsningen mht flytspänning σ_s inritas [21-1].

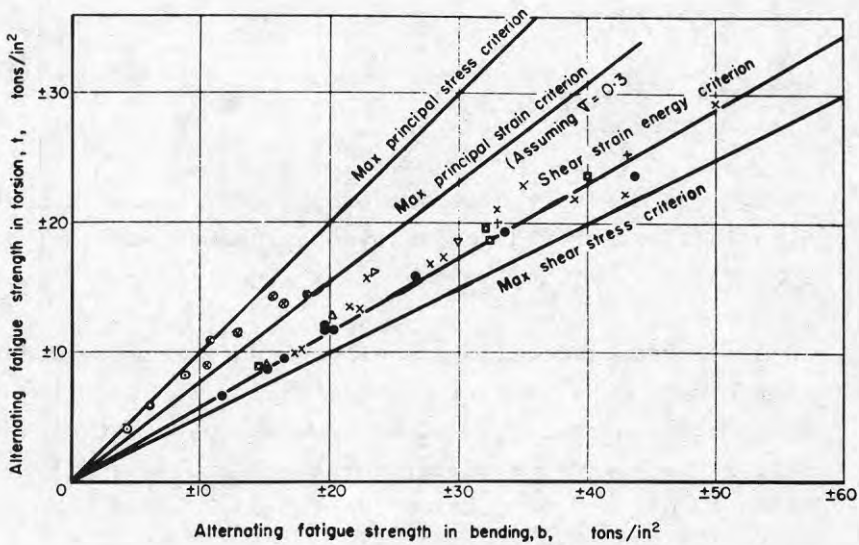
Den ogynnsamma inverkan av en överlagrad dragmedelspänning skiftar till en gynnsam inverkan på utmattningshållfastheten då en tryckmedelspänning överlagrar en växelspanning. Fig 23.5 [22-1] visar exempel på detta för några olika metaller.



- Woodward, Gunn and Forrest, Aluminium Alloys to BS1476
 - ⊗ O'Connor and Morrison Ni.Cr.Mo. Steel
 - + Nishihara and Sakurai, C. Steels
 - △ Nishihara and Kojima, Duralumin
 - ▽ Ros and Eichinger, Mild Steel
 - × Newmark *et al.* Aluminium Alloy 24S-T
- } From G. Sines

Fig 23.5 Dimensionslöst diagram där förhållandet S_a/S spänningsamplitud/(spänningsamplitud vid medelspanningen noll) är avsatt mot förhållandet S_m/S_y medelspanning/flytspänning [22-1].

Vad gäller utmattningshållfastheten vid ren skjuvning med en skjuvspänning växlande symmetriskt kring noll-linjen, visar försöksresultat att samma lagar är giltiga som för den statiska hållfastheten. Här avses relationen mellan skjuvspänningar och böjnormalspänningar. I fig 23.6 är en jämförelse gjord mellan utmattningshållfastheten vid ren böjning respektive vid ren vridning av gjutjärn och av stål. Dessutom är några kända brotthypoteser inlagda [22-1].



- Steels, Ludwik
- × Steels, Gough, Pollard and Clenshaw
- + Steels, Frith
- △ Steels, Nishihara and Kawamoto
- ▽ Steels, Findley
- ▷ Steels, Williams
- ⊠ Steels, Morrison, Crossland and Parry
- ⊙ Cast Irons, Ludwik
- ⊗ Cast Irons, Gough, Pollard and Clenshaw
- ⊕ Cast Irons, Nishihara and Kawamoto

Fig 23.6 Jämförelse mellan utmattningshållfastheten vid böjning och vridning för järn och stål. Ur [22-1].

"Shear strain energy criterion" deviationsarbetsprincipen eller von Mises hypotes överensstämmer bäst med försöksresultaten för stål. Von Mises hypotes kan skrivas som

$$\sigma_e^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1 \quad (23.1)$$

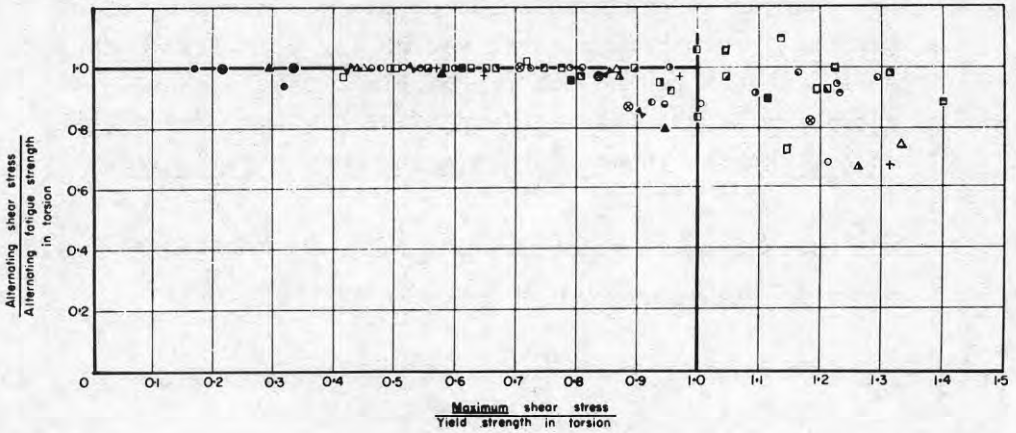
där σ_e kallas effektivspänning och $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ är de tre huvudspänningarna.

I det plana spänningstillståndet ($\sigma_3 = 0$) kan ekvation (23.1) skrivas som

$$\sigma_e^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + 3\tau_{12}^2 \quad (23.2)$$

Enligt von Mises hypotes är förhållandet mellan utmattningshållfasthet vid ren skjuvspänning och vid ren böjspänning $1/\sqrt{3} \approx 0,6$.

En överlagrad medelskjuvspänning på en växelskjuvspänning har, i motsats till vad som gäller för normalspänningar, synnerligen liten inverkan på utmattningshållfastheten. Detta gäller förutsatt att "skjuvflytspänningen" inte överskrids (se fig 23.7 [22-1] och Smith [23-2]).



- | | | | |
|--|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> + Cr-Ni Steel, Quenched-Tempered ⊙ Siemens-Martin Steel ⊙ Baustahl, Soft □ Schmieder Bronze A, as rolled △ Aluminium Alloy 17ST ▲ Aluminium Alloy 27ST ▲ Aluminium Alloy 53ST ■ Mild Steel, Hot-Rolled ■ 0.6% C Steel, Quenched-Tempered ○ Si-Mn Steel, Quenched-Tempered ● Cr-V Steel, Quenched-Tempered ● Brass, 60 Cu-40 Zn, as Rolled ● Copper, Commercially Pure, Cold Rolled ● Duralumin, as Rolled | <ul style="list-style-type: none"> } P. Ludwik and J. Krystok } Aluminium Co. of America } G. A. Hankins } H. F. Moore and R. E. Lewis | <ul style="list-style-type: none"> ○ Malleable Iron, Untempered ○ Malleable Iron, Tempered ● Beryllium Bronze, 97.6% Be-2.38% Cu ⚡ 0.9% C Steel, Quenched-Tempered ⚡ Cr-V Steel, Quenched-Tempered □ SAE 3140 Steel, Quenched-Tempered ■ SAE 3140 Steel, as Hot-Rolled ■ Tobin Bronze, Cold-Rolled ■ 1.2% C Steel, Normalized ■ 3.5% Ni Steel, Special Treatment "A" ■ 3.5% Ni Steel, Special Treatment "D" ■ 0.49% C Steel, Normalized ■ 0.46% C Steel, Quenched-Drawn | <ul style="list-style-type: none"> } A. Pomp and M. Hempel } J. B. Johnson } J. O. Smith } H. F. Moore and T. M. Jasper } D. J. McAdam, Jr. |
|--|--|--|--|

Fig 23.7 Dimensionslöst diagram för duktila metaller vid vridning [22-1], [23-2].

Som framgår av fig 23.6 ansluter sig von Mises hypotes bäst till försöksresultatet vad gäller förhållandet mellan ren skjuvning och ren böjning. Det ligger då närmast till att anta att von Mises hypotes även skulle vara fruktbar vid kombinerad skjuv- och böjspänning.

Von Mises hypotes enligt ekvation (23.2) innebär som grafisk representation en ellips, se fig 23.8.

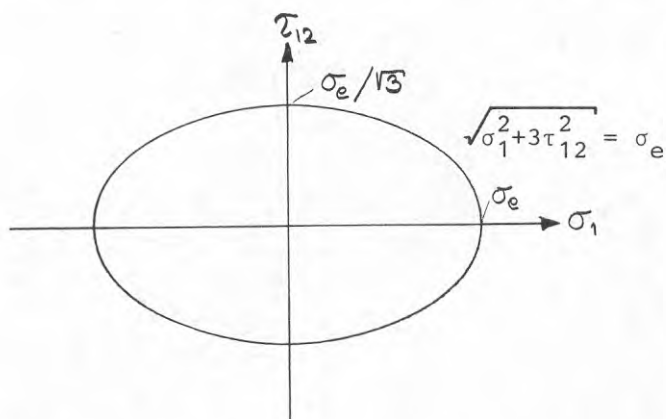


Fig 23.8 Grafisk representation av ekv (23.2).

En empirisk ansats som ansluter till von Mises hypotes har föreslagits av Gough m fl [23-3].

$$\left[\frac{\sigma_{a,akt}(N,0)}{\sigma_a(N,0)} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{a,akt}(N,0)}{\tau_a(N,0)} \right]^2 \leq 1 \quad (23.3)$$

där $\sigma_{a,akt}(N,0)$ respektive $\tau_{a,akt}(N,0)$ är den aktuella alternerande spänningen och $\sigma_a(N,0)$ respektive $\tau_a(N,0)$ utmattningshållfastheten vid ren böjning respektive ren vridning, alla för ett visst antal lastväxlingar N och med mittspänning $\sigma_m = \tau_m = 0$, (se även [23-4]). Ekvation (23.3) beskriver (p.s.s som ekv (23.2)) en ellips i en kvadrant. Provningsresultat som styrker detta påstående visas i fig 23.9 (hämtad från [22-3], [23-3]).

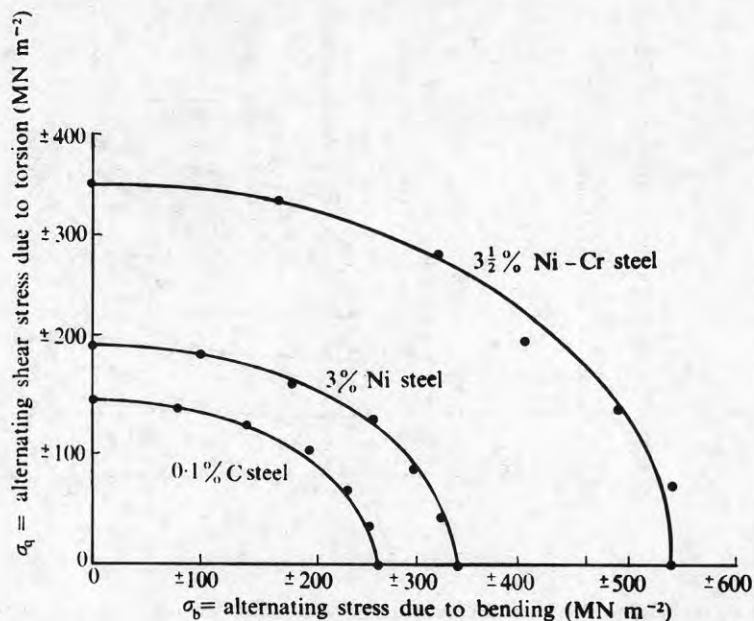


Fig 23.9 Utmattningsgränsen för 3 ståltyper under påverkan av växlande kombinerad böj- och skjuvspänning [22-3], [23-3].

Den empiriska ansatsen enligt ekvation 23.3 ansluter således mycket väl till erhållna försöksresultat. Vad gäller nuvarande svenska stålnormer (StBK-N2) så ansluter de i princip till ekv 23.3 i avseende på kombinerade spänningstillstånd.

23.5 Belastningshastighet

Inverkan av belastningshastigheten vid provningar av utmattningshållfastheten torde ha liten eller ingen betydelse vid de frekvenser som är aktuella för anläggningskonstruktioner förutsatt att ej korrosion är aktuell. Se fig 23.10.

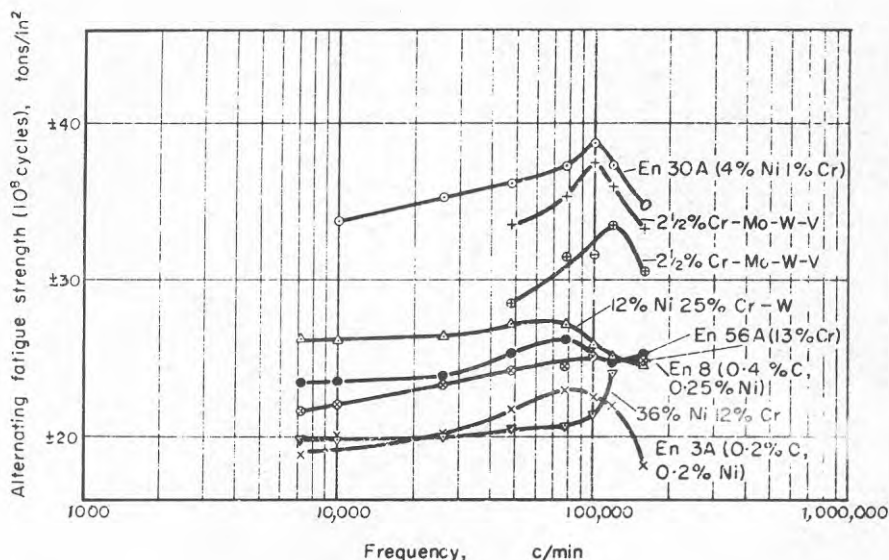


Fig 23.10 Belastningshastighetens inverkan på utmattning av stål. (Hämtad från [22-1], [23-5].)

Jämför även med resultaten i tabell 23.4 ([22-3], [23-6]), som visar inverkan av frekvensen på utmattningshållfastheten för några metaller.

Tabell 23.4

	Fatigue limit (MN m ⁻²)		
	25 Hz	167 Hz	500 Hz
SAE 1020 steel	±215	±215	±230
Stainless steel	±415	±435	±480
SAE 4140 steel	±675	±680	±700
Rail steel	±345	±345	±350
Grey cast iron	±70	±70	±77
Alloy cast iron	±180	±180	±200
Brass†	±140	±165	±185
Aluminium alloy†	±105	±105	±120

† Fatigue strength at 5×10^7 cycles.

Belastningshastigheten torde således ej inverka på utmattningshållfastheten vid frekvenser mindre än 200 Hz.

23.6 Inverkan av varierande spänningsamplitud

Utmattningsförsök genomförs vanligen med en konstant spänningsamplitud för varje provbit. Emellertid uppvisar verkliga konstruktioner ett lastspänningsförlopp, väsentligt mer komplicerat, se fig 23.11.

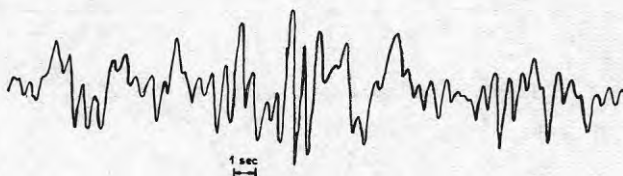
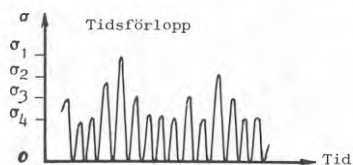


Fig 23.11 Exempel på spänningsförlopp i en anläggningskonstruktion. Spänningen varierar slumpartat med tiden.

Ur ett spänningsförlopp enligt ovan kan man ta ut antalet spänningscykler med en viss amplitud. Genom att gå igenom samtliga förekommande amplituder kan man ställa upp ett lastspektrum där spänningsamplituden anges i förhållande till antalet lastcykler vid resp amplitud. Detta kan göras på olika sätt, se till exempel fig 23.12. Utgående från lastspektrumet kan sedan Palmgrens delskadehypotes tillämpas.

Förutsättningar (I detta speciella ex antages σ_{\min} alltid = 0)



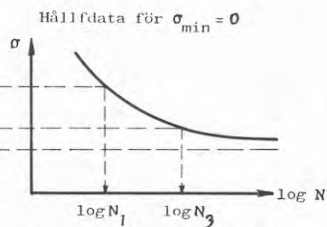
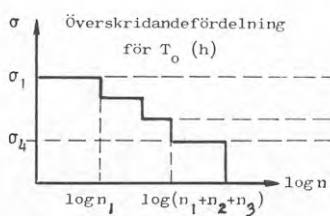
Under tiden T_0 (h)
uppnås eller överskrides

σ_1 : n_1 ögr

σ_2 : $n_1 + n_2$ "

σ_3 : $n_1 + n_2 + n_3$ "

σ_4 : $n_1 + n_2 + n_3 + n_4$ "



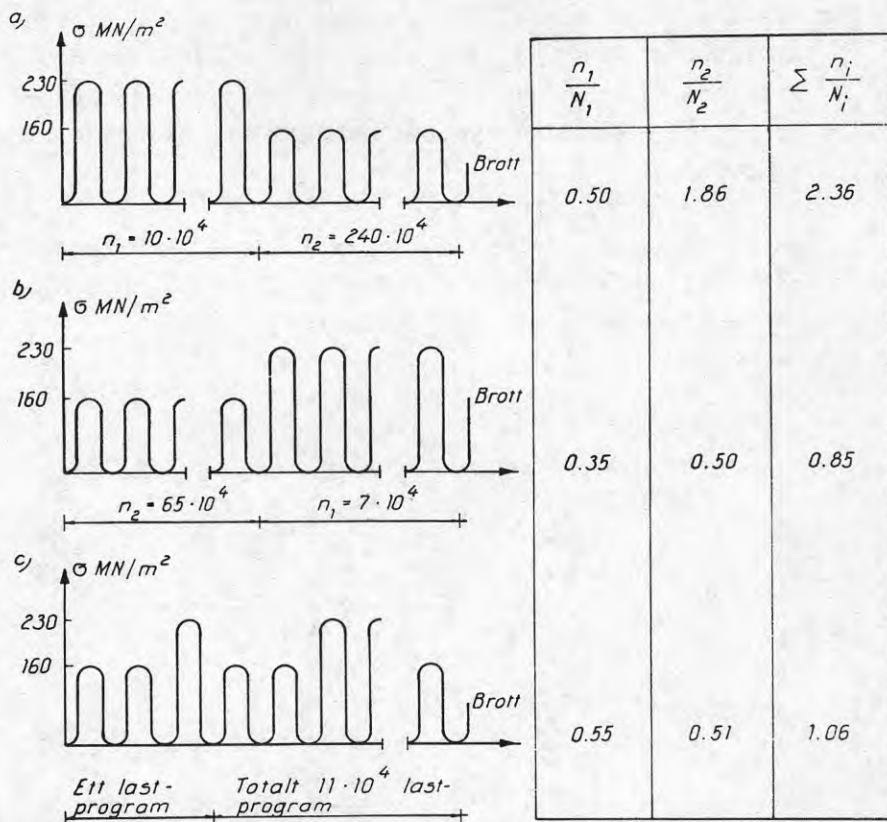
A. Palmgrens delskadehypotes (1924)

Brott inträffar då $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$

Beräknad livslängd, $T = \frac{T_0}{\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3}}$

Fig 23.12 Palmgrens delskadehypotes där n_i är aktuella cykler vid spänningsnivån i och N_i livslängden vid spänningsnivån i . (Hämtad från Jarfall [23-7].)

Palmgrens delskadehypotes är den enklaste av alla existerande kumulativa delskadeteorier. Den tar ingen hänsyn till i vilken ordning olika spänningsamplituder förekommer. Att detta har betydelse kan enklast konstateras genom en tvåstegstest, där två spänningsamplituder påläggs med ordningsföljd enligt fig 23.13.



Varje lastprogram omfattar

$\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ stor lastväxling} \\ \frac{N_2}{N_1} \sim 6 \text{ små lastväxlingar (endast två är utritade)} \end{array} \right.$

Fig 23.13 Tvåstegslast utförd av Plantema[23-14][23-8].

Resultatet visar att livslängden ökar om den stora amplituden först påläggs respektive minskar om den lilla amplituden anbringas först. Bäst överensstämmelse med Palmgrens hypotes erhålls vid blandade amplituder.

Detta förklaras delvis av Jarfall [23-7], som refererar till försök gjorda av Schijve [23-9], med en spricktillväxtteori, se fig 23.14.

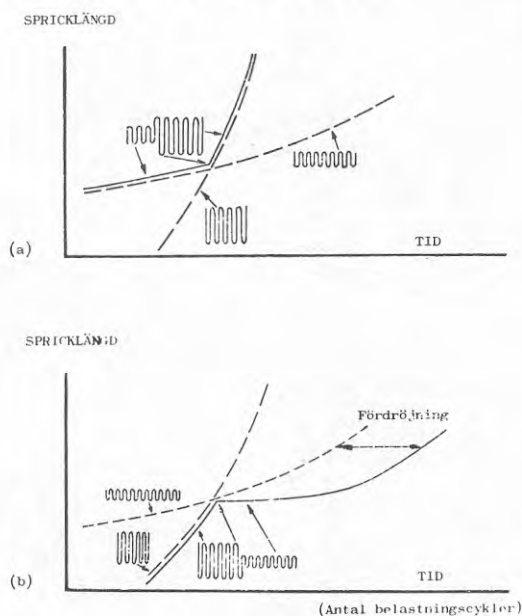


Fig 23.14 Spricktillväxt vid stegvis förändring av påkänningsamplituden [23-7], [23-9].

Enligt denna teori så innebär en ökning av amplituden, att spricktillväxthastigheten omedelbart ökar till det värde som motsvaras av den större amplituden (23.14a). En plötslig minskning av amplituden, däremot, resulterar i att spricktillväxten avstannar, för att efter en viloperiod accelerera upp till den hastighet som motsvaras av den lägre påkänningsamplituden (23.14b).

En sannolik förklaring till detta beteende är att den större påkänningen efterlämnar ett restspänningstillstånd samt en zon av kallbearbetat material vid sprickspetsen [23-7].

Jarfall diskuterar också spektrumprovning med vilket menas utmattningsprov där provföremålet utsättes för en blandning av olika belastningar, med en fördelning till storlek och antal som anses motsvara verkliga driftförhållanden. Man simulerar ett visst lastspektrum (belastningskollektiv). Teorier för kumulativ skadeverkan testas genom spektrumprovning. Exempel på spektrumprov anges i fig 23.15.

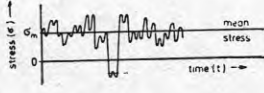

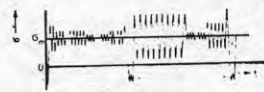

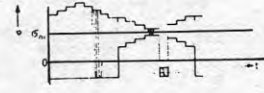
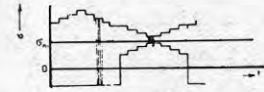
	Belastningssekvens	Förtydligande	Relativ livslängd
a		Driftsimulationsprov med randomiserad sekvens av maxima och minima Oregelbundenhetsfaktor = 0,8	1
b		Driftsimulationsprov med randomiserad sekvens av hela belastningscykler Oregelbundenhetsfaktor = 1,0	0,9
c		Förenklat driftsimulationsprov med programmerad sekvens av olika flygningar och Hi Lo Hi-sekvens inom varje flygning	0,8
d		Förenklat driftsimulationsprov med programmerad sekvens av olika flygningar och Lo Hi Lo-sekvens inom varje flygning	1,6
e		Blockprogramprov med "inblockade" start landningscykler och markrullningscykler i ett separat block	4,1
f		Blockprogramprov med "inblockade" start landningscykler medan övriga markrullningscykler försummas	6,8
Beräknad livslängd enligt Palmgrens delskadehypotes			2,7

Fig 23.15 Spektrumprov. Samma lastspektrum (belastningskollektiv) men med olika ordningsföljd mellan belastningarna [23-7], [23-10].

Man konstaterar att blockprogramproven stämmer dåligt med "verkligheten" och Jarfall anger därför att stor försiktighet måste iakttas vid tillämpningen av äldre spektrumprovresultat, eftersom dessa härrör från blockprogramprov. Se även [21-8], [23-13].

En klar bild av tendensen över inverkan av belastningarnas ordningsföljd ger fig 23.16. Proven gäller aluminiumlegeringar. (Några säkra slutsatser beträffande stål kan därför ej dras).

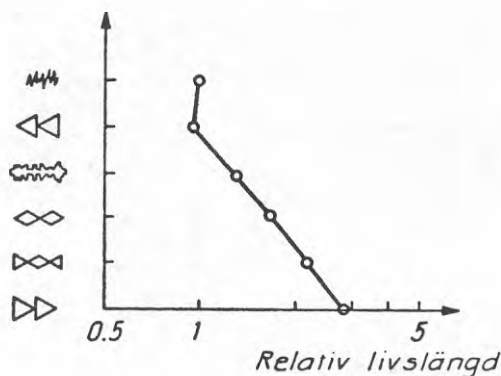


Fig 23.16 Spektrumprov på aluminiumlegeringar utförda av NASA [23-8], [23-11].

Belastningarnas ordningsföljd framgår av de schematiska symbolerna för lastvariation bakom vilka döljer sig åtta lastnivåer. Abskissan är 1 för "random last".

En slumpvis varierande last ("random last") har normalt en viss karaktär trots dess slumpmässighet. Det kan gälla vissa gränser på amplitud och frekvens mellan vilka lasten varierar. För att i någon mån kunna beskriva och kvantifiera "random-lasten" bör statistiska begrepp och metoder användas.

23.7 Temperaturens inverkan

Utmattningshållfastheten ökar nästan utan undantag vid minskande temperatur (räknat från rumstemperatur) både för släta provkroppar och för provstavar med brottanvisningar (Forrest [22-1]). Dock måste risken för sprödbrott vid låga temperaturer beaktas.

Däremot sjunker utmattningshållfastheten vid temperaturer över 450-500°C, vilket torde bero på krypning. Viss ökning av hållfastheten kan dock spåras vid något lägre temperaturer, se fig 23.17.

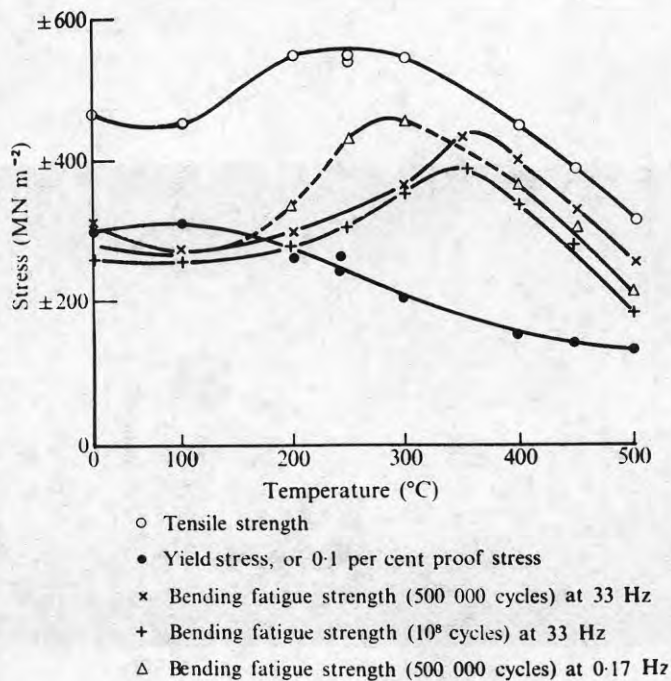


Fig 23.17 Temperaturens inverkan på draghållfastheten och på utmattningshållfastheten vid växlande böjspänning för ett stål med kolhalt 0,17%. (Hämtad från [22-3], [23-12]).

24. INVERKAN AV SPÄNNINGSKONCENTRATIONER PÅ UTMATTNINGSHÅLLFASTHETEN

Mycket få konstruktioner har en oförändrad tvärsektion längs hela sin längd. De allra flesta innehåller diskontinuiteter i någon form. Dessa kan utgöras av tvärsektionsändringar eller av anslutningar till andra konstruktioner. De kan även utgöras av hål, svetsar och dylikt. Mindre diskontinuiteter såsom upphöjningar, nedsänkningar eller inneslutningar inverkar i princip på samma sätt. Alla ger de upphov till variationer i spänningstillståndet hos tvärsektionen (spänningskoncentrationer), vilka beror på storleken och formen hos diskontinuiteten.

Sprickor initieras således vid diskontinuiteter som fig 24.1 visar exempel på. (Se även avsnitt 22.2).

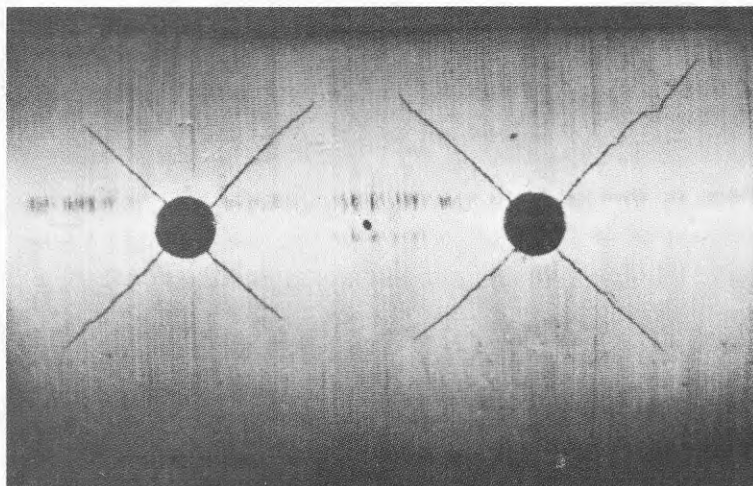


Fig 24.1 Utmattningssprickor vid hål i en axel utsatt för växlande vridspänningar [22-3].

Diskontinuiteter har större inverkan på utmattningsbelastade konstruktioner än på statiskt belastade konstruktioner. I fig 24.2 visas vad som kan hända vid upprepade belastning i dragen plattstång med hål.

Kurva a) visar den elasticitetsteoretiska påkänningsfördelningen och kurva b) den fördelning som erhålls sedan en viss utjämnning skett på grund av flytning. Vid avlastning följer påkänningsändringarna de elasticitetsteoretiska värdena och i den obelastade stången finns därför restpåkänningar enligt kurva c). Om belastningen fortsätter att variera med samma amplitud kommer påkänningarna att variera mellan kurvorna b) och c). Påkänningsvariationernas amplitud blir alltså den, som erhålls enligt elasticitetsteorin [23-8]. Spänningsvariationen $\Delta\sigma$ vid utmattningsbelastning är således större än den maximalspänning σ_s som uppstår vid statisk belastning.

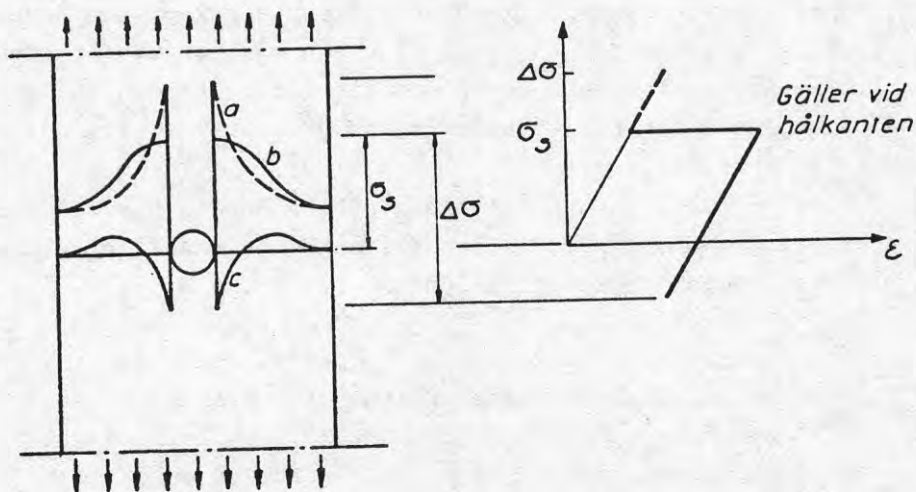


Fig 24.2 Spänningsförhållande i en dragen plattstång med hål [23-8].

Förhållandet mellan maxspänningen vid diskontinuiteten och den nominella spänningen (kraft/tvärsnittsarea) kallas spänningskoncentrationsfaktorn eller formfaktorn K_t .

Emellertid är hållfasthetsreduktionen vid utmattning något mindre än vad som svarar mot denna faktor. Detta beror främst på att den höga spänningen är koncentrerad till en mycket liten volym. Därför kan man definiera en utmattningshållfasthetsreduktionsfaktor eller anvisnings-faktor K_f (K_f = förhållandet i utmattningshållfasthet för en konstruktion med respektive utan diskontinuitet).

Samband mellan K_t och K_f finns uppställda i litteraturen[24-1]. Dessa varierar för olika typer av diskontinuiteter, men man kan dock visa att då anvisningen blir skarpare, går anvisningsfaktorn mot ett ändligt värde [21-1].

Man har även studerat sprickor som inte utbreder sig. Ju skarpare anvisningen är (högre K_t -värde) desto lägre är spänningsvidden vid vilken en spricka uppstår. Emellertid finns en gräns för K_t över vilken en spricka visserligen uppstår, men spänningen är för liten för att den skall fortplanta sig till ett fullständigt brott, se fig 24.3.

Figuren tyder på att K_t -värden större än 3-4 har oförändrad inverkan på utmattningshållfastheten. Andra resultat anger talen 4-5 som gräns för K_t [22-3].

Vid studiet av samband mellan K_t och K_f (formfaktorns inverkan på utmattningshållfastheten), framkommer ett förhållande som har väsentlig betydelse, nämligen att den spänningsvidd som erfordras för att få en spricka med ett visst djup att fortplanta sig är oberoende av draghållfastheten och den rena utmattningshållfastheten för stålet. (Med ren utmattningshållfasthet avses här utmattningshållfastheten för polerade provstavar) [22-3].

Jämför även med sprickinitiering och sprickutbredning i kapitel 22.

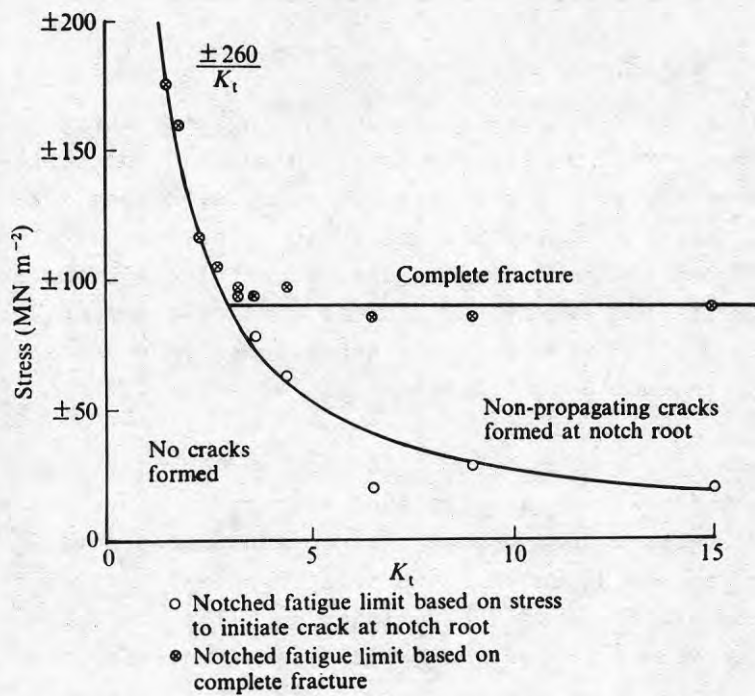


Fig 24.3 Alternierende spänning avsatt mot K_t för mjuka stål utsatt för böjning [22-3].

25. SVETSAR OCH SVETSADE KONSTRUKTIONER

25.1 Allmänt

Den allra största delen av de anläggningskonstruktioner som byggs i stål i våra dagar är hopfogade genom svetsning. Den vanligaste brottorsaken i svetsade konstruktioner anses vara utmattning. Brottet uppstår i de flesta fall härvid i någon av svetsarna. Utmattning i svetsar framstår därför som ett mycket viktigt forskningsområde. Detta avspeglas också i de relativt stora forskningsinsatser som gjorts inom detta område.

Svetsade konstruktioner är i jämförelse med osvetsade konstruktioner mer känsliga för utmattning. Detta beror på att svetsarna ger upphov till en mängd brottanvisningar genom ojämnheter i svetsytan och fel i svetsgodset. Dessutom sker materialförändringar av olika slag (bl a väteförsprödning) i övergången till grundmaterialet. Detta orsakar mikrosprickor redan vid avsvälningen p g a egenspanningar.

Brottmekaniska lagar är på senare tid flitigt använda för att förutsäga livslängden hos svetsade konstruktioner. Dessa lagar reglerar hur en spricka tillväxer vid upprepad belastning. Att denna metod kan vara fruktbar beror på att mikrosprickor finns i svetsen redan innan någon last påläggs.

För litteratursökning hänvisas även till Alpsten och Dahlin [25-1].

Utmattning i svetsar och svetsade konstruktioner behandlas bl a även av Gurney [25-20].

25.2 Faktorer som påverkar utmattningshållfastheten i svetsar

Ett fundamentalt förhållande för utmattningshållfastheten hos en svets är vilken svetsförbandstyp som används och hur svetsarna belastas; är det en stum- eller kälsvets; är den kraftöverförande eller ej; påläggs belastningen längs eller tvärs svetsen. (Se exempelvis de förbandstyper som finns återgivna i Byggsvetsnormen [25-2] under rubriken "3:33 Förbandsfaktor K_x ").

Det mest grundläggande sambandet vid utmattning av stålkonstruktioner är förhållandet mellan spänningsamplituden och antalet lastcykler (Wöhler-kurvor). Provningar på svetsade provstavar o dyl har också visat att om medelspänningen ökas så förkortas livslängden, förutsatt att spänningsamplituden hålls konstant (Goodman-diagram). Vid provningar på större svetsade konstruktioner däremot har många forskare funnit medelspänningens inverkan så liten att den kan försummas. Istället har spänningsvidden ($\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$) visat sig vara mest signifikant. Detta har visats av bl a Fisher et al [25-3], [25-19]. Fisher har under de senaste åren genomfört mycket omfattande provserier på svetsade balkar. Provresultaten har genom sin mångfald kunnat bearbetas statistiskt varvid god uppfattning av olika faktorerers inverkan har erhållits. I figur 25.1 är försöksresultaten för några olika balktyper inritade i ett S-N-diagram.

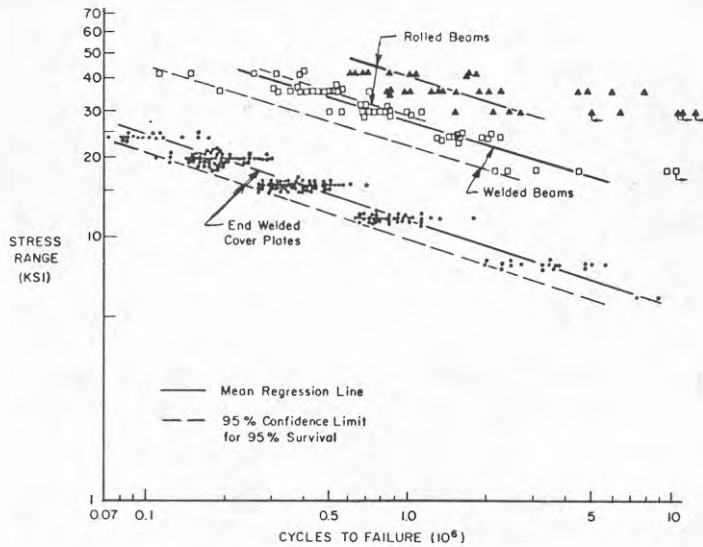


Fig 25.1 Förhållande mellan spänningsvidden och antal lastväxlingar till brott. S-N-diagram. Medelutmattningshållfasthet och 95% konfidensgräns för valsade (rolled), svetsade (welded) balkar och för svetsade balkar med ändsvetsade påläggplåtar (end welded cover plates) [25-3].

Förhållandet att endast spänningsvidden inverkar (och ej medelspänningen), har också lagts till grund för den svenska byggsvetsnormen StBK-N2 [25-2]. Fenomenet kan förklaras med att stora egenspanningar byggs in i svetsen vid avsvalning. Området vid spetsen av de mikrosprickor som tillväxer under utmattningsförloppet får flytspänning. När sedan en växlande spänning påläggs får sprickspetsområdet en spänningsvariation mellan σ_s och $(\sigma_s - \sigma_r)$, oberoende av "den yttre medelspänningen". Även i makroskala har uppmätts egenspanningar efter avsvalning av storleksordningen sträckgränsen för svetsmaterialet (se bl a [25-4]).

Inverkan av enstaka överlast har studerats av Abtahi-Albrecht-Irwin [25-18]. De har gjort försök med provstavar som var försedda med påsvetsade anslutningsplåtar. Belastningen utgjordes av pulserande dragspänning med konstant amplitud samt en periodiskt återkommande överlast som uppgick till 75 % av flytspänningen. Fenomenet har aktualitet i vägbroar av svetsat stål där dispens lämnas då och då för överfart av tunga fordon. Försöken visade att utmattningshållfastheten ökade om överlasten endast återkom var 1000:e cykel eller mindre. Däremot minskade utmattningshållfastheten då överlasten återkom tätare än var 100:e cykel. Ökningen av utmattningshållfastheten vid sparsamt återkommande överlaster anses bero på att sprickutbredningshastigheten för sprickspetsen bromsas upp något i det område intill sprickspetsen som "deformationshårdnar" då överlasten uppträder.

Stålmaterialet i balkarna som provats av Fisher et al (fig 25.1) hade sträckgränsen 36 ksi - 100 ksi (253 - 703 Mpa). Ingen signifikant skillnad mellan stålsorter med olika hållfastheter kunde upptäckas. Den relativa känsligheten för brottanvisningar ökar således med ökande statisk stålhållfasthet.

Pollard och Cover [25-5] har inventerat litteratur som avser utmattning i svetsar. Här konstateras att för en given svetstyp bestäms utmattningshållfastheten till största delen av svetsens geometri. Försök visar att brottet oftast börjar just i övergången mellan svets och grundmaterial (fattningskanten) och att de brottanvisningar som finns där ger upphov till en väsentlig nedsättning av hållfastheten. Se fig 25.2 hämtad från Friis [25-6].

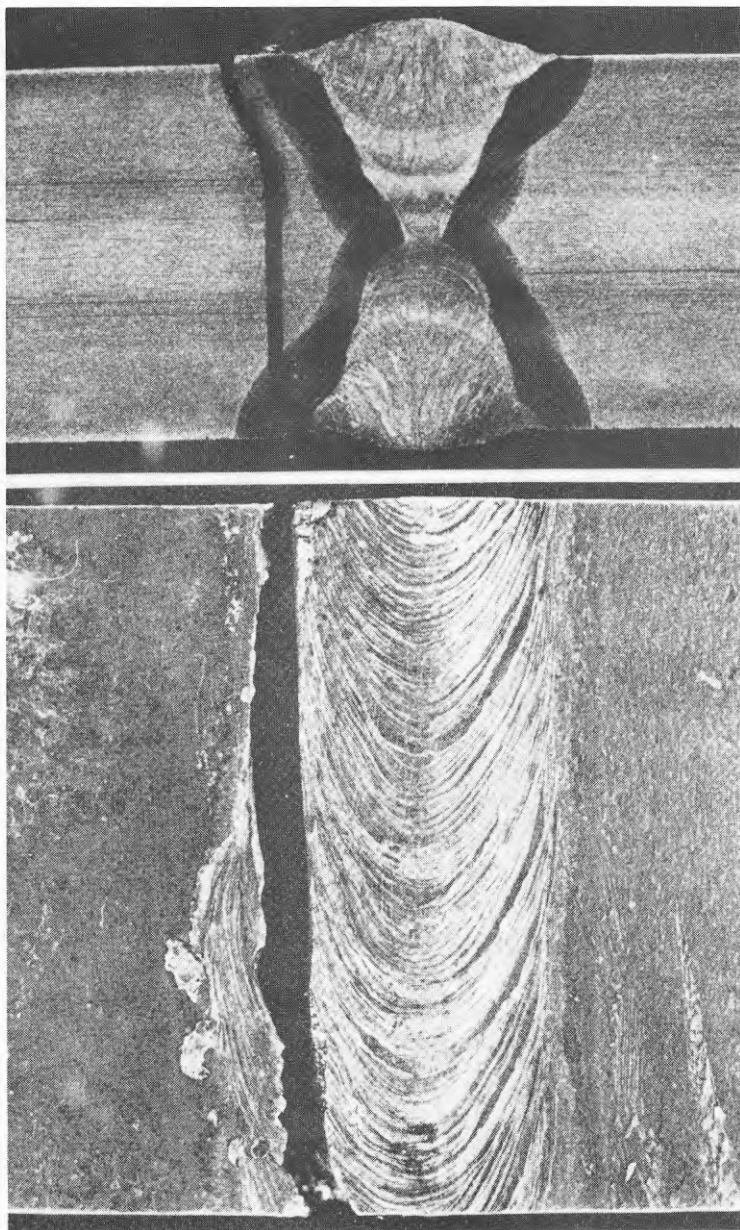


Fig 25.2 Typiskt brott i fattningskanten mellan svets och grundmaterial. (Basisk elektrod i stål med $\sigma_{su} \geq 400$ Mpa). [25-6].

Brottanvisningar uppkommer i både stum- och källsvetsar, och kan orsakas av inbränningar eller smältdiken i fättningskanten eller helt enkelt av den vinkel som uppstår mellan svetsgods och grundmaterial. Figur 25.3 visar hur utmattningshållfastheten ökar då vinkeln mellan svets och grundmaterial ger minskande brottanvisning (ökande θ) Ibland uppstår också brottanvisningar genom bindfel mellan svetsgods och grundmaterial orsakat av för liten uppsmältning vid svetsningen.

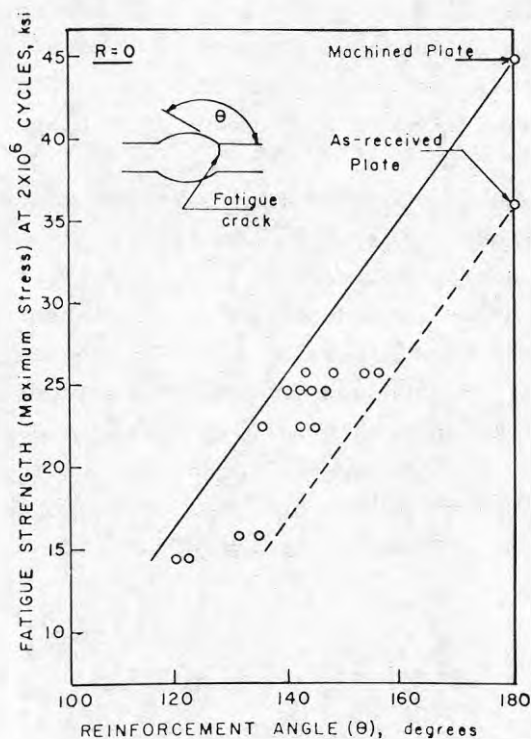


Fig 25.3 Utmattningshållfastheten hos stumsvetsar som funktion av vinkeln mellan svetsgods och grundmaterial vid axiell pulserande dragkraft [25-5] .

Även om övergången mellan svetsgods och grundmaterial slipas ner så innehåller denna zon ändå diskontinuiteter av skiftande slag (inneslutningar, mikro-sprickor ofta orsakade av väteförsprödning i kombination med egenpåspanningar vid avsvälningen). Själva svetsgodset innehåller också defekter som ger upphov till utmattningsprickor.

Mikrostrukturen hos svetsgods och svetspåverkat material har enligt Pollard och Cover [25-5] en jämförelsevis liten inverkan på utmattningshållfastheten. Vissa svenska forskare [25-7][25-8] anser dock att klar inverkan finns. De har genom provning visat, att de svetsar erhöill bäst utmattningshållfasthet som var utförda med svetselktroder som gav en finkornig struktur i svetsen.

Även ytbehandlingsmetoder för rostskydd kan ha inverkan på utmattningshållfastheten hos både svetsat och osvetsat stål. En svensk provserie har t ex visat att en varmförzinkning medfört en reducering av storleksordningen 35% i stumsvetsförband. (Larsson [25-9]). Reduceringen kan hänföras till zinkbeläggningsens spröda legeringsskikt. Nyare engelska undersökningar redovisar endast en reducering på 5-10 % för svetsförband. Reduceringsprocenten beror dock mycket på hur stor anvisningsverkan provkroppen har i oförzinkat tillstånd.

25.3 Metoder att öka utmattningshållfastheten i svetsar

I avsnitt 25.2 påpekades att grundmaterialets kapacitet har mycket liten eller ingen inverkan på utmattningshållfastheten i svetsar. Om således inte svetsarnas utmattningshållfasthet kan ökas, innebär det en viss begränsning av användningen av höghållfasta stål. Den höga materialhållfastheten kan ju då inte utnyttjas till fullo i utmattningsbelastade svetsade konstruktioner. Utvecklingen av de mikrolegerade och de seghärdade stålen har därför drivit på forskningen för att öka utmattningshållfastheten i svetsar.

Ett flertal sådana metoder finns [25-5]. Två huvudgrupper kan urskiljas; dels de som förbättrar svetsens geometri och godhet, dels de som åstadkommer gynnsamma tryckegenspänningar i svetsen.

Slipning och TIG-behandling (förklaras närmare nedan) förbättrar båda svetsgeometrin. Vad svetsmetoden beträffar ger automatiska svetsmetoder både bättre ytgeometri och mindre svetsdefekter och därmed högre utmattningshållfasthet än vad som erhålls vid manuell svetsning. En mycket enkel förbättringsmetod är att använda svets-elektroder som ger en jämn övergång mellan svets och grundmaterial (se även [25-6]). Denna metod är dock svår att få tillräckligt effektiv. Rutilelektroder har dock visat sig ge bättre utmattningshållfasthet än basiska elektroder [25-10] (se även [25-11] där man vid en provning konstaterade det motsatta förhållandet). En annan mycket bra elektrodtyp är en mikrolegerad zirkonbasisk högbyteselektrod. De goda egenskaperna hos denna elektrod beror på att den ger svetsen en finkornig struktur [25-7][25-8].

Hamring är en av de mera påtagliga metoderna i den andra gruppen, alltså att bygga in gynnsamma tryckegenspänningar. Flera metoder finns också där man

genom uppvärmning och avsvälning på olika sätt åstadkommer tryckspänningar i svetsen genom att utnyttja residualsänningar [25-5].

Harrison [25-13] har gjort en ekonomisk jämförelse mellan tre av de vanligast använda metoderna, nämligen hamring, TIG-behandling och fullständig slipning. Relationstalen blir 1/3/110, där således fullständig slipning är den klart dyraste och hamring den billigaste. Kostnaden för slipning kan dock vara något överdriven och en undersökning pågår inom IVF (Institutet för Verkstads-tekniskForskning) som kanske klargör kostnadsbilden bättre. TIG-behandlingen bör förklaras något. Metoden finns presenterad i [25-12].

TIG står för Tungsten Inert Gas, dvs volfram-ädelgas. Behandlingen innebär att man återuppsmälter den ursprungliga svetsens fattningskant mot grundmaterialet. Metoden medför förutom att den geometriska anvisningen minskar, också att slagginneslutningar och porer från svetsningen anlägsnas i den uppsmälta zonen. I fig 25.4 visas en kälsvets före och efter TIG-behandling av ena fattningskanten.

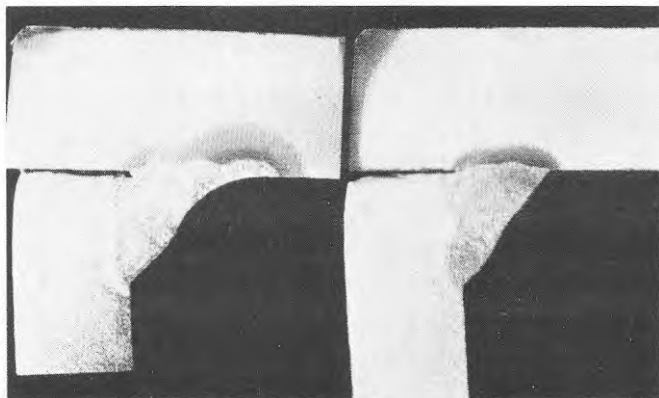


Fig 25.4 Kälsvets före och efter TIG-behandling [25-12].

Sonander och Sperle [25-10] har i fig 25.5 gjort en sammanställning av provningsresultat hämtade från [25-13] - [25-16] och [25-6]. Man har där studerat inverkan av de tre behandlingsmetoderna på svetsförband i två stålqualiteter.

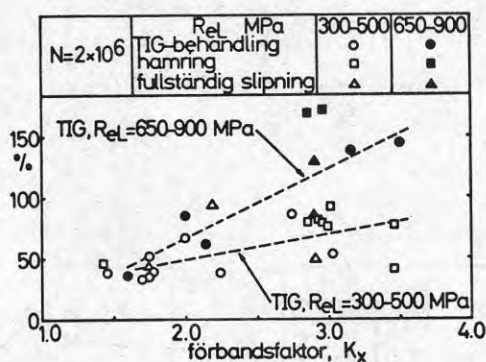


Fig 25.5 Efterbehandlingsmetodens inverkan på olika förbandstyper (olika K_x-faktor) och stålqualiteter [25-10].

Diagrammet anger den procentuella förbättring i utmattningshållfasthet som kan erhållas vid $N = 2 \cdot 10^6$ cykler. Förbättringen anges som funktion av svetsförbandets anvisningsverkan (K_x) i obehandlat tillstånd. Provunderlaget är indelat i två sträckgränsintervaller. Spridningen är stor särskilt vad gäller hamring och slipning men Sonander-Sperle drar ändå vissa slutsatser:

- Den procentuella ökningen i utmattningshållfasthet ökar med ökande K_x -värde.
- Förbättringen tycks öka med ökande hållfasthet hos grundmaterialet, åtminstone vid högre K_x -värden (jämför de båda streckade linjerna för TIG-behandlingen).

Båda dessa tendenser verkar rimliga då det bör finnas mer att hämta i utmattningshållfasthet ju högre anvisningsverkan är och ju högre hållfasthet materialet har.

Sonander-Sperle har även gjort egna provningar där effekten av TIG-behandlingen på svetsade balkar i hög-hållfasta stål har undersökts, se fig 25.6 och 25.7.

Två ståltyper användes; dels OX 802 ($R_{eL} \geq 690$ MPa, $R_m = 780-930$ MPa) och dels DOMEX 400 (SIS 2142 $R_{eL} \geq 390$ MPa, $R_m \geq 530$ MPa).

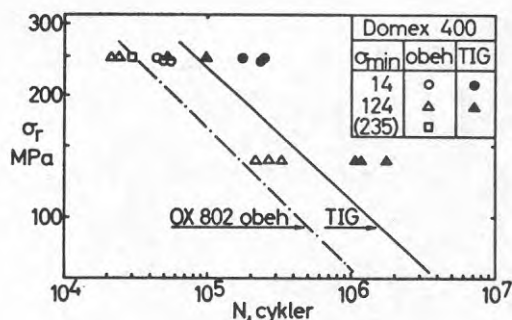
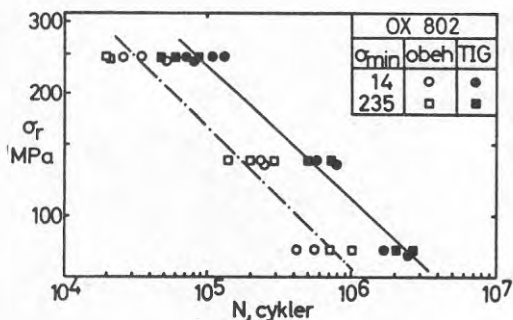


Fig 25.6 Resultat av utmattningsförsök på obehandlade och TIG-behandlade balkar i OX 802 [25-10].

Fig 25.7 Hittills erhållna resultat av utmattningsförsök på obehandlade och TIG-behandlade balkar i DOMEX 400 [25-10].

Resultaten visar klart att TIG-behandlingen har en mycket gynnsam inverkan. Vid given spänningsvidd blir livslängden 2,6 - 3,1 gånger större för OX 802-balkarna. DOMEX 400-balkarna uppvisar en motsvarande ökning i livslängden och uppvisar dessutom en något högre utmattningshållfasthet generellt sett.

Millington [25-17] anger att under förutsättning att TIG-behandlingen kan utföras på ett riktigt sätt syns livslängden bli fördubblad. Detta bekräftas mer än väl av Sonander-Sperle.

Avslutningsvis bör tilläggas att det är en relativt allmän uppfattning att den vanligaste orsaken till utmattningsproblem beror på dåligt utförda svetsar. Detta är oftast okänt för de människor som utför svetsarbetet. En mycket fruktbar "metod" att öka utmattningshållfastheten i svetsar vore således att genom bättre information öka medvetandet om utmattningsproblematiken hos människorna i produktionsledet.

26. FORSKNINGSBEHOV AVSEENDE UTMÄTTNING AV
 STÅLKONSTRUKTIONER

Nuvarande regler för dimensionering vid utmattning är empiriskt framtagna. Tillåtna påkänningar för respektive material och konstruktionstyp har således bestämts genom provning. På senare tid har brottmekaniska lagar börjat användas i utmattningsforskningen. Med dessa lagar har teorier för utmattningsförloppet kunnat uppställas för enklare typer av konstruktioner under väldefinierade förhållanden. Emellertid uppvisar de i praktiken förekommande konstruktionerna och förhållandena kring dem en stor variationsrikedom. Detta gäller särskilt inom byggnadsindustrin. Ett flertal faktorer såsom lastpåverkan, material, konstruktionsutformning, yttre omständigheter (miljö etc) inverkar på utmattningshållfastheten. Ämnet utmattningshållfasthet är således mycket komplext. Detta har gjort att man trots stora forskningsinsatser ej har fått fram någon komplett teori för utmattningsförloppet. Ett övergripande mål för utmattningsforskningen bör vara att ta fram en sådan teori. Detta fordrar dock ett mycket stort arbete inom flera områden. Om en komplett teori funnes, så skulle nya material och nya konstruktionstyper kunna bemästras med en mycket begränsad mängd provningar. F n måste mycket omfattande provningar utföras, innan nya konstruktionstyper i nya materialkvaliteter kan användas i praktiskt dimensioneringsarbete.

En hel del kunskap finns således vid utmattning i enkla konstruktioner (provstavar o dyl) under väldefinierade förhållanden. Däremot bör ökad tyngd i forskningen läggas vid att applicera dessa kunskaper på stora mer komplicerade konstruktioner och konstruktionselement. I dessa kan utmattningshållfastheten studeras under mera realistiska förhållanden vid inverkan av det stora antalet faktorer som i praktiken påverkar utmattningshållfastheten. Statistiska metoder bör så långt möjligt användas både vid planering av försök och vid utvärdering av resultat.

Fleraxliga spänningsfördelningar och egenspanningar kan fås att inverka på ett riktigt sätt i större konstruktioner. En stor del av detta forskningsarbete måste dock utföras med hjälp av mindre provkroppar. Både svetsade och icke svetsade konstruktioner måste undersökas. För att teoretiskt bestämma spänningstillståndet är finit elementmetod ett bra "verktyg".

Utvecklingen har medfört införande och successiv övergång till stålmaterial med allt högre hållfasthet (mikrolegerade stål, seghärdade stål etc). Utmattningshållfastheten ökar dock ej med materialhållfastheten i t ex svetsade konstruktioner. För att den höga materialhållfastheten effektivt skall kunna nyttiggöras i utmattningsbelastade konstruktioner måste detaljutformningen av konstruktionerna förbättras. Svetsmetoder och efterbehandlingsmetoder bör utvecklas, samtidigt som nya konstruktionslösningar framtas.

Högre materialhållfasthet leder till ökad användning av mycket tunnväggiga konstruktioner varvid medverkande bredden i överkritiska området måste studeras även under utmattningspåverkan.

Utmattning vid låga lastcykeltal bör undersökas ytterligare. Viktiga frågor är här när dimensionering med hänsyn till utmattning skall göras samt säkerhetsfaktorer i detta lastområde. Frågan om när gränslastmetoder kan användas bör även studeras bättre.

Framtida provningar bör i ökad utsträckning utföras under inverkan av mera verklighetstrogna laster. Tidigare utmattningsprovningar har i huvudsak utförts med en last som svänger med konstant amplitud. I verkligheten utsätts konstruktionerna för en slumpvis varierande last (naturkrafter etc). Dagens avancerade provningsutrustning erbjuder möjlighet att utföra provningar med sådana laster. Här kan t ex spricktillväxt vid varierande last undersökas.

Inverkan av yttre omständigheter, miljö bör utredas bättre (korrosiv miljö, kyla etc). Korrosionsutmattning vid långa livslängder är ett centralt och svårlöst problem i offshorekonstruktioner. Svårigheten är att få korrosionen att inverka på ett riktigt sätt vid accelererade laboratorieförsök. En vanlig metod för att minska korrosionens inverkan är att använda katodiskt skydd. Även "korrosionströga stål" röner ökat intresse.

Inom maskinkonstruktionsområdet fästes stort intresse vid hur utmattningsprickor initieras. Byggnadskonstruktioner däremot innehåller normalt fler mikrosprickor och slagginneslutningar (t ex i svetsar). Mikrosprickorna börjar tillväxa så snart lasten påförs. Byggnadsforskningen bör därför inriktas mot ett studium av hur spricktillväxten sker särskilt i eller i anslutning till svetsar. Brottmekaniska lagar ger en god grund för detta studium. Detta kan då ge underlag för dimensioneringsmetoder av "fail-safe-typen", d v s att konstruktionen är "säker" även om ett litet fel (spricka) uppstått. Här är spricktillväxthastighet, brottrisker och inspektionsintervall samt säkerhetsfrågor centrala begrepp.

Vad gäller nuvarande dimensioneringsmetoder (StBK-N2 etc) bör underlaget för bedömning av förbandsfaktorn K_x förbättras. Svårigheter finns även för vissa konstruktioner att bestämma spänningskollektivparametern p (t ex för vindlast på skorstenar).

En ökad tyngd måste läggas vid att bättre klargöra olika defekters inverkan på utmattningshållfastheten (svetsfel, ytdefekter etc), samt att utreda sambandet mellan hållfasthet, kvalitet och tillverkningskostnader.

Se även [26-1] som innehåller förslag till många konkreta forskningsuppgifter som avser utmattning.

27. REFERENSER

- [21-1] Hult Jan: Hållfasthetslära. Almqvist & Wiksell/Gebbers Förlag AB, 411 sid, Uppsala 1968.
- [21-2] Frost NE, Marsh KJ, Pook LP: Metal fatigue, Clarendon Press, 499 pp, Oxford 1974.
- [21-3] Albert NAJ: Archiev Miner. Geognosie Berg. Hüttenkunde, Vol 10, P 215, 1838. (Referensen hämtad från [21-2]).
- [21-4] Timoshenko Stephen P: History of strength of materials. Mc Graws-Hill, 452 pp, New York, 1953.
- [21-5] Wöhler A: Zeitschrift für das Bauwesen, vol 8, pp 641-652, 1858, vol 10, pp 583-616, 1860, vol 13, pp 233, 1863, vol 16, pp 67-84, 1866, vol 20, pp 73-106, 1870. (Referensen hämtad från [21-2] och [21-4]).
- [21-6] Hult Jan: Arvid Palmgren, 1890-1971, Minnes-teckning. Kungl Vetenskaps- och Vitterhets-Samhället i Göteborg, Årsbok 1972, sid 63-70, Göteborg 1972.
- [21-7] Byggsvetsnorm, StBK-N2. Utgiven av Statens Stålbyggnadskommitté och Svetskommissionen hos AB Svensk Byggtjänst, 133 sid, Stockholm 1974.
- [21-8] Jarfall Lars: Dimensionering mot utmattnig. Mekanresultat tillhörande serien Hållfasthetsdimensionering, Sveriges Mekanresultat, Stockholm, beräknas publiceras under 1977.

- [21-9] Eggwertz Sigge: Reliability analysis of wing panel considering test results from initiation of first and subsequent fatigue cracks. FFA Flygtekniska Försöksanstalten, Technical Note HU-1745, 80 sid, Stockholm 1975.

Denna skrift finns också publicerad i ICAF Doc No 801, International Committee on Aeronautical Fatigue: Problems with fatigue in aircraft. Proceedings of the eighth Symposium and Colloquium held at Lausanne 2-5 June 1975, sid 1.1/1 - 1.1/74.

- [21-10] Eggwertz Sigge, Lindsjö Göran: Influence of detected crack length at inspections on probability of fatigue failure of wing panel. FFA Flygtekniska Försöksanstalten, Technical Note HU-1745, Part 2, 34 sid, Stockholm 1975.
- [21-11] Palmgren Arvid: Die Lebensdauer von Kullagern, VDI-Zeitschrift (Verein Deutscher Ingenieure), Vol 68, pp 339-341, 1924.
(Referensen hämtad från [23-13]).
- [22-1] Forrest P G: Fatigue of Metals. Pergamon Press 425 pp, Oxford 1962, 1970.
- [22-2] K G Sundin: Utmattning vid fleraxlig belastning. En litteraturstudie. Högskolan i Luleå, Teknisk Rapport 1976:35 T, 20 sid, Luleå 1976.
- [22-3] Frost N E, Marsh K J, Pook L P: Metal fatigue. Clarendon Press 499 pp, Oxford 1974.
- [22-4] Coffrell A H, Hull D: Proc. R. Soc. A 242, 211, 1957. (Referensen hämtad från [22-3]).
- [22-5] Wood W A: Acta metall 11, 643, 1963. (Referensen hämtad från [22-2]).

- [22-6] Wood W A: Technical elasticity and elastic fatigue. Engineering Fracture Mechanics 1976, Vol 8, pp 69-80. (Referensen hämtad från [22-2]).
- [22-7] Frost N E: International Conference of fracture vol 3, P.1433 Sendai, Japan, 1965. (Referensen hämtad från [22-3]).
- [22-8] Härkegård G: Spricktillväxt under utmattningsbelastning - en översikt. TRITA-HFL-001. Publ nr 191, Inst för Hållfasthetslära KTH, Stockholm 1973. (Referensen hämtad från [22-2]).
- [22-9] Christensen R H, Harmon R B: Fatigue crack propagation, P.5 ASTM, S.T.P. 415, 1967. (Referensen hämtad från [22-3]).
- [22-10] Plumbridge W J, Ryder D A: The metallography of fatigue, Metall Rev 1969 14. 119. (Referensen hämtad från [22-2]).
- [22-11] Plumbridge W J: Review. Fatigue crack propagation in metallic and polymeric materials. J Mater Sci 1972 7p 939. (Referensen hämtad från [22-2]).
- [22-12] Janne Carlsson: Brottmekanik. Ingenjörsvetenskapliga Förlaget ISBN 91-7284-060-9, 292 sid, Stockholm 1976.
- [22-13] Irwin G R: Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. Transactions, ASME Series E, Vol 24, No 3 pp 361-364, 1957. (Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-14] Irwin G R: Handbuch der Physik. Vol 79, s 551-590, Springer-Verlag, Berlin 1958. (Referensen hämtad från [22-12]).

- [22-15] Paris P C: The Fracture Mechanics Approach to Fatigue. Proc., Tenth Sagamore Army Materials Research Conferense. Syracuse University Press, p 107, Syracuse 1964. (Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-16] Hirt M A, Howard, Needles, Tammen, Bergenhoff, Fisher J W: Fatigue behavior of welded beams. Highway Research Record, No 400 pp 4-15, 1972
- [22-17] Fisher J W, Frank K H, Hirt M A, McNamee B M. Effect of Weldments on the Fatigue Strength of Steel Beams. NCHRP, Report 102, 114 pp, 1970.
- [22-18] Hirt M A, Yen B T, Fisher J W: Fatigue Strength of rolled and Welded Steel Beams. ASCE, Journal Struct. Div., Vol 97, No ST 7, pp 1897-1911, 1971.
- [22-19] Crooker T W, Lange E A: How Yield Strength and Fracture Toughness Considerations Can Influence Fatigue Design Procedures for Structural Steels. Welding Research Supplement, Vol 49, No 10, pp 488-496, 1970. (Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-20] Maddox S J: Fatigue Crack Propagation in Weld Metal and Heat Affected Zone Material. The Welding Institute, Member's Rept E/29/69, 1969. (Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-21] Barson J M: Fatigue-Crack Propagation in Steels of Various Yield Strengths. U.S. Steel Corp. Applied Research laboratory, Monroeville, Pennsylvania 1971. (Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-22] Harrison J D: An Analysis of Data on Non-Propagating Fatigue Cracks on a Fracture Mechanics Basis. Metal Construction and British Welding Jour, Vol 2, No 3, pp 93-98, 1970. (Referensen hämtad från [22-16]).

- [22-23] Paris P C: Testing for Very Slow Growth of Fatigue Cracks. Closed loop, MTS Systems Corp, Vol 2, No 5, pp 11-14, 1970.
(Referensen hämtad från [22-16]).
- [22-24] Erhard Kreml: The influence of state of stress on low-cycle fatigue of structural materials: A literature survey and interpretive report. ASTM Special Technical Publication 549, 46 pp, Gibbsboro, N.J. 1974.
- [22-25] Sperle Jan-Olof: Utmattning vid låga lastcykel-tal. Jernkontorets forskning, Slutrapport för forskningsuppgift 477/72, D 145, 39 sid, 1975.
- [22-26] Manson S S: Termal stress and low-cycle fatigue. McGraw-Hill, 404 pp, New York, 1966.
- [22-27] Manson S S: Fatigue: A complex subject - some simple approximations (The William M Murray Lecture, 1964). Experimental Mechanics, (Journal of the society for experimental stress analysis), Westport, Connecticut, Vol 5, No 7, pp 193 - 226, July 1965.
- [23-1] Boyd R K: Proc Instn mech Engrs, 179, 733, 1965
(Referensen hämtad från [22-3]).
- [23-2] Smith J O: Effect of Range of Stress on Fatigue Strength. University of Illinois, Engg.Expt. Station Bulletin 334, 1942. (Referensen hämtad från [22-1]).
- [23-3] Gough H J, Pollard H V, Clenshaw W J: Aero Research Concil, R och M, 2522, H.M.S.O, 1951
(Referensen hämtad från [22-3]).
- [23-4] Girhammar Ulf Arne: Belastningens betydelse vid utmattning av metaller. Ett seminarieföredrag. Högskolan i Luleå, Avd för Hållfasthetslära, Teknisk rapport, 1976:71 T, 30 sid, Luleå 1976.

- [23-5] Lomas T W, Ward J O, Rait J R, Colbeck E W: The Influence of Frequency of Vibration on the Endurance Limit of Ferrons Alloys of Speeds up to 150 000 Cycles per Minute Using a Pneumatic Resonance System. Inst Mech Engrs Int Conference on Fatigue, 375, 1956. (Referensen hämtad från [22-1]).
- [23-6] Krouse G N: Proc Am Soc Test Mater 34, 156, 1934. (Referensen hämtad från [22-3]).
- [23-7] Jarfall Lars: Livslängdsberäkning - kumulativ skadeverkan vid utmattning. Väg- och vattenbyggarren nr 10, sid 57-59, 1974.
- [23-8] Åkerlund Sture m fl: Kompendium i Bärande konstruktioner FK1, del 1, Lunds Tekniska Högskola, TLTH/VBV Lund, 1976.
- [23-9] Schijve J: The accumulation of fatigue damage in aircraft materials and structures. AGARD-AG-157. (Referensen hämtad från [23-7]).
- [23-10] Jacoby G H: Comparation of fatigue lives under conventional program loading. ASTM STP 462, pp 184-202. (Referensen hämtad från [23-7]).
- [23-11] Fatigue - an interdisciplinary approach. Syracuse University Press 1974 (Referensen hämtad från [23-8]).
- [23-12] Allen N P, Forrest P G: International Conference on fatigue, Institution of Mechanical Engineers, P327, 1956. (Referensen hämtad från [22-3]).
- [23-13] Herzog Max: Die Betriebsfestigkeit von Baustahl der Güteklassen St 37, St 44 und St E 70 nach Vielstufenversuchen. Der Stahlbau, Vol 45, Heft 8, pp 243-250, 1976.

- [23-14] Plantema F J: Colloquium on fatigue. International union of theoretical and applied mechanics (IUTAM), Stockholm maj 1955.
- [24-1] Hedner Gert (red): Formelsamling i hållfasthetslära. 7:e uppl, Publ nr 104, Institutionen för hållfasthetslära, Kungliga tekniska högskolan, 342 sid, Stockholm 1973.
- [25-1] Alpsten Göran, Dahlin Olle: Fatigue Strength of Welds - A literature Survey 1968 to 1973. SBI Stålbyggnadsinstitutet, Report 62:1, Stockholm mars 1974.
- [25-2] Byggsvetsnorm, StBK-N2. Utgiven av Statens Stålbyggnadskommitté och Svetskommissionen hos AB Svensk Byggtjänst, 133 sid, Stockholm 1974.
- [25-3] Fisher John W, Frank Karl H, Hirt Manfred A, McNamee Bernard M: Effect of weldments on the fatigue strength of steel beams. National Cooperative Highway Research Program, Report 102, 118 pp Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania 1970.
- [25-4] Roström Karl-Gustav: Spänningar i fartygsvetsar - Några försöksresultat. Föredrag vid Svetskommissionens höstmöte den 28 nov 1973 i Stockholm, Svetsen, årg 34, nr 5, Sept 1975.
- [25-5] Pollard B, Cover RJ: Fatigue of Steel Weldments. Welding Journal, 51, no 11, pp 544s - 554s, nov 1972.
- [25-6] Friis L-E: Utmattningshållfastheten hos svetsförband i mikrolegerade stål. Slutrapport för forskningsuppgift 448/69, D 41, Jernkontorets forskning, Stockholm 1969.

- [25-7] Friis L-E, Steneroth ER: Fatigue strength of welded joints in mild and high-strength structural steels. Ur Jernkontorets Annualer, Nr 4, vol 152, sid 157-169, 1968.
- [25-8] Hultgren Axel: Metallografisk undersökning av utmattningsprovade stålstavvar med stumsvets. Ur Jernkontorets Annualer, nr 4, vol 152, sid 170-178, 1968.
- [25-9] Larsson Börje: Utmattningsprovning av varmförzinkat, svetsat stål. Svetsen, årg 33, nr 6, 137-148, nov 1974.
- [25-10] Sonander C, Sperle JO: Metoder att höja bärformågan hos utmattningsbelastade stålkonstruktioner. Väg- och vattenbyggaren nr 10, sid 61-63, 1974.
- [25-11] Nilsson Hans, Larsson Börje, Westerlund R: Utmattningsundersökning av svetsade provstavar. Stiftelsen för Skeppsbyggnadsteknisk Forskning, Rapport nr 46, 60 sid, Göteborg 1965.
- [25-12] Nordh BA, Sonander C, Sperle JO: Anvisningar för TIG-behandling av svetsar för höjning av utmattningshållfastheten, Stålbyggnadsinstitutet Publikation 46, 14 sid, Stockholm 1974.
- [25-13] Harrison JD: A summary of techniques for improving the fatigue strength of welded structures and an estimate of their cost. The Welding Institute Contract Report C 215/12/69, september 1969.
(Referensen hämtad från [25-10]).
- [25-14] Takahashi K: Effect of external geometry of reinforcement on the fatigue strength of a welded joint. IIW-doc XIII-531-69.
(Referensen hämtad från [25-10]).

- [25-15] Harrison JD: Techniques for improving the fatigue strength of welded high strength steels. The Welding Institute Contract Report C 215/7/68, maj 1968.
(Referensen hämtad från [25-10]).
- [25-16] Asnis AE, Ivashchenko GA: Improving the resistance of welded joints to alternating loads. Automatic Welding 10, 1967.
(Referensen hämtad från [25-10]).
- [25-17] Millington D: TIG-dressing to improve fatigue properties in welded high-strength steels. Metal Construction, number 4, April 1973.
- [25-18] Abtahi Ali, Albrecht Pedro, Irwin George R: Fatigue of periodically overloaded stiffener detail. ASCE, Journal Struc Div, Vol 102, No ST 11, nov, pp 2103-2119, New York 1976.
- [25-19] Fisher John W, Albrecht Pedro A, Yen Ben T, Klingerman David J, Mc Namee Bernard M: National Cooperative Highway Research Program, Report 147, 90 pp, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania 1974.
- [25-20] Gurney T R: Fatigue of welded structures. Cambridge University Press, 294 pp 1968.
- [26- 1] Svetskommissionen AG 46: Lista med "förslag till angelägna FoU-uppgifter" inom ämnet "Konstruktionsteknologi, Svetsade konstruktioner". 11 sid, 1975-12-05.
- Skrifter till vilka hänvisning ej sker i den löpande texten:
- [27-1] Bäckman T: Utmattningsprovning av stål SIS 2174. Jernkontorets Annaler, Vol 148, Nr 7, sid 452-469, 1964.

- [27-2] Brockenbrough R L, Owens D E: In-plane fatigue strength of plates with laminar discontinuities. AISC Engineering Journal, No 3 (13) pp 68-75, 1976. (Referensen hämtad från [27-6]).
- [27-3] Eriksson Hans: Utmattningshållfasthet hos svetsförband i stål, förstudie. Kungl Tekniska Högskolan, Inst för Svetsteknologi, Rapport nr 202, 44 sid, Stockholm 1975. (Referensen hämtad från en intern publikationslista).
- [27-4] Eriksson Hans: Spricktillväxt i utmattningsbelastade svetsförband - En förstudie. Kungl Tekniska Högskolan, Inst för Svetsteknologi, 32 sid, Stockholm September 1976.
- [27-5] Galambos Charles F: Fatigue, fracture and stress corrosion problems of highway bridges. International Road Federation, World survey of current research and development on roads and road transport, pp 332-365, Washington 1972.
- [27-6] Granström Anders: Utmattning av excentriskt belastad kranbanebalk med pipe i fläns. Stålbbyggnadsinstitutet, Rapport 15:11, planerad publicering 1977.
- [27-7] Gylltoft Kent, Elfgren Lennart: Utmattningshållfasthet för fundament i stål och betong. En kortfattad översikt. Högskolan i Luleå, Teknisk Rapport 1977:22 T, 14 sid, Luleå mars 1977.
- [27-8] Lundberg Bo: Fatigue life of airplane structures. Flygtekniska Försöksanstalten, Report 60, 151 sid, Stockholm 1955.

- [27-9] Marshall P W: General considerations for tubular joint design. The Welding Institute, Welding in offshore constructions, International Conference, Newcastle 26-28 February 1974, Volume 1, The Papers, pp 10-34, Cambridge 1974.
- [27-10] Marshall P W: Problems in long-life fatigue assessment for fixed offshore structures. Preprint 2638 from ASCE National Water Resources and Ocean Engineering Convention, San Diego, California April 5-8, 24 pp, 1976.
- [27-11] Morgan J W, Beck V R: Sheet metal roof failures by repeated loading. Australian Department of Housing and Construction, Housing Research Branch, technical report No 2, 32 pp, Melbourne, 1975.
- [27-12] Nissfolk Birger: Utmattningshållfasthet vid tunnplåtsförband 1. Byggforskningen, Rapport R 55:1976, 141 sid, Stockholm 1976.
- [27-13] Sperle Jan-Olof: Medelspänningens inverkan på utmattningshållfastheten för svetsförband. Kungl Tekniska Högskolan, Inst för Svetsteknologi, planerad publicering 1977.
- [27-14] The Welding Institute: Fatigue of welded structures. Proceedings of the conference, 6-9 July 1970 in Cambridge, Volume 1, 182 pp, Volume 2, pp 183-405, Cambridge 1971.
- [27-15] Wise S, Gurney TR, Maddox S J: The proposed new code of practice for the design of welded structures subject to fatigue loading. The Welding Institute, Conference Proceedings, 16-18 November 1971, Vol 1, Papers, pp 52-61, Cambridge 1971.

III UTMATTNING AV ARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER

31. ALLMÄNT

31.1 Bakgrund

Intresset för utmattning av armerade betongkonstruktioner har ökat kraftigt de senaste åren [31-1]. Detta kan sägas ha sin grund i följande förhållanden.

- . Högre materialhållfastheter vad avser statisk last, samt förfinade beräknings- dimensioneringsmetoder har medfört en utveckling mot allt smäckrare konstruktioner. Detta innebär att relativa andelen rörlig last ökar vilket i sin tur medför att utmattning kan uppträda.
- . Den högre "statiska" materialhållfastheten, främst vad gäller armeringsstål, för också med sig att andra faktorerers inverkan gör sig gällande i högre grad än tidigare. Exempelvis innebär förekomsten av spänningskoncentrationer vid kammar och svet-sar, att utmattningshållfastheten för armeringen ej ökar proportionellt mot den statiska hållfastheten. För att kunna utnyttja de höga materialkvaliteterna måste således utmattning studeras.
- . I nya typer av konstruktioner, som exempelvis marina konstruktioner, skorstenar och torn (vindkraftverk) vilka utsätts för vind och vågkrafter, är utmattningsfenomenet påtagligt.
- . Andra konstruktionstyper såsom fundament för maskiner, kvarnar, turbiner etc, har visserligen funnits en längre tid men medvetandet om utmattningsproblematiken har i allmänhet ej funnits. Problem med exempelvis deformationer i maskinfundament har först på senare tid börjat kopplas till utmattning.

31.2 Historik

Forskning angående utmattningshållfasthet av armerade betongkonstruktioner har pågått sedan sekelskiftet. De första kända rapporterna i ämnet publicerades 1898 i Frankrike av Considère [31-2] och De Joly [31-3]. I USA publicerade Van Ornum de första rapporterna 1903 [31-4] och 1907 [31-5]. Under de kommande decennierna gjordes forskningsinsatser i flera länder. Vi har här bland annat namn som Clemmer och Hatt i USA och Probst och Mehmel i Tyskland [31-6]-[31-9].

Forskningsarbetet i äldre tider har ett klart historiskt intresse och det gav dåtidens konstruktörer ökad tilltro till sina konstruktioner. Det kvarstående praktiska värdet är dock begränsat då man arbetade med nu föråldrade materialkvaliteter.

På senare tid har i många länder mycket arbete lagts ner på forskning angående utmattningshållfasthet av betongkonstruktioner. De största insatserna har gjorts i USA, Canada, Japan och i de ledande industriländerna i Europa. Man har arbetat med att utreda vilken inverkan olika faktorer har på utmattningshållfastheten. Flera faktorerers inverkan är helt klarlagda. I många fall har man endast lyckats visa att en viss variabel har inverkan och i vilken riktning den verkar. Frågan om hur stor inverkan är kvarstår emellertid ofta olöst.

På grund av det stora antal faktorer som kan påverka utmattningshållfastheten samt den relativt stora spridning som kännetecknar utmattningsförsök, så tvingas man att utföra relativt stora försöksserier. Dessa måste sedan behandlas med statistiska metoder. Det är framförallt i USA som man haft resurser nog att utföra dylika försöksserier.

En central "institution" för ämnet utmattningshållfasthet i betong utgör American Concrete Institute och dess kommitté för utmattningshållfasthet, ACI Committee 215, Fatigue of Concrete. Kommittén bildades år 1947.

Den har bland annat granskat och även publicerat resultat från utmattningsforskning, den har påvisat luckor i kunskaperna vad gäller utmattning och den har initierat och stimulerat till fortsatt forskning för att fylla dessa luckor.

31.3 Litteratursammanställningar

Under åren har flera undersökningar av övergripande art publicerats. Här anges några av de viktigaste.

- . År 1957 Rowe RE: "An appreciation of the work carried out on fatigue in prestressed concrete structures" [31-10]. Rowe ger en översikt av forskningen beträffande utmattningshållfastheten i spännbetongkonstruktioner.
- . År 1958 Nordby Gene M: "Fatigue of Concrete - A Review of Research" [31-11]. Nordby går igenom mer än 100 publikationer utgivna från sekelskiftet och framåt. Han summerar de viktigaste undersökningarna och inriktar sig på att ange de då kända egenskaperna vid utmattning av betong och armerade betongkonstruktioner. Nordby ger referenshänvisningar till litteratursammanställningar av äldre datum.
- . År 1960 ACI Committee 215: "Fatigue of concrete" [31-17]. Bibliografin innehåller 114 referenser till rapporter publicerade mellan åren 1898-1958. Ett kort sammandrag finns också till varje referens.
- . År 1965 Murdock John W: "A critical review of research on fatigue of plain concrete" [31-12]. Murdocks rapport liknar Nordbys. Dock har Murdock i större utsträckning angivit behov av ytterligare forskning.
- . År 1969 Westerberg Bo: "Utmattning av betong och armerad betong. En litteraturöversikt" [31-13]. Westerberg har gjort summeringar av drygt 50 uppsatser publicerade t o m 1967. En sammanställning av de viktigaste egenskaperna vad gäller utmattning av betong och armerad betong finns även.

- . År 1970 Freitag W: "Das Ermüdungsverhalten des Betons" [31-14]. Freitag fastställer vilken kunskap som finns och var forskningen står vad avser utmattning av armerad betong.
- . År 1974 Abeles Symposium: "Fatigue of concrete" [31-15]. Abeles Symposium består av 15 uppsatser vilka presenterades vid symposiets sessioner i Hollywood i november 1972 samt i Atlantic City i mars 1973.
- . År 1974 ACI Committee 215: "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading" [31-16]. Rapporten utgör en sammanställning av vetandet beträffande utmattning av betongkonstruktioner. Den visar också vägen för praktiskt konstruktionsarbete. En värdefull referenslista på drygt 100 uppsatser och rapporter av senare datum finns medtagen.

Ovan har givits exempel på viktiga rapporter av övergripande natur. Förutom dessa finns många värdefulla sammanfattningar i rapporter vilka huvudsakligen behandlar någon speciell del av området betongutmattning. Exempel på detta är: Aas-Jakobsen [31-18], Tepfers [31-19], Grönqvist [31-20], Weck [31-21], Jhamb [31-22].

I den fortsatta framställningen görs uppdelningen i betong, armering, armerad betong och spännbetong, varefter angelägna forskningsbehov anges.

32. BETONG

I detta kapitel behandlas utmattningssegenskaperna hos materialet betong och de faktorer som påverkar dessa. Refererade forskningsresultat är utförda såväl på oarmerade provkroppar (kuber, cylindrar, prismor) som på armerade betongkonstruktioner (balkar, pelare etc).

Utmattningssegenskaperna för armering och för samverkan betong-armering behandlas i kapitel 33 och 34.

32.1 Utmattning av betong utsatt för tryckspänning

Utmattningsförsök på oarmerade provkroppar (kuber, cylindrar, prismor), har gjorts i stor mängd. Åtskilliga överarmerade balkar har också provats. I dessa får man vanligtvis tryckbrott i betongen. Denna brotttyp är i princip densamma som för en betongkub utsatt för excentrisk tryckspänning.

Till skillnad från de flesta stålmaterial, verkar det som betongmaterialet ej har någon utmattningsgräns, i varje fall inte för färre antal lastväxlingar än 10^7 . "Wöhlerkurvan", där maximispänningen är avsatt mot logaritmen av antal lastväxlingar, synes bäst representeras av en rät linje.

Ett typiskt exempel visas i fig 32.1, som även ger en bild av spridningen.

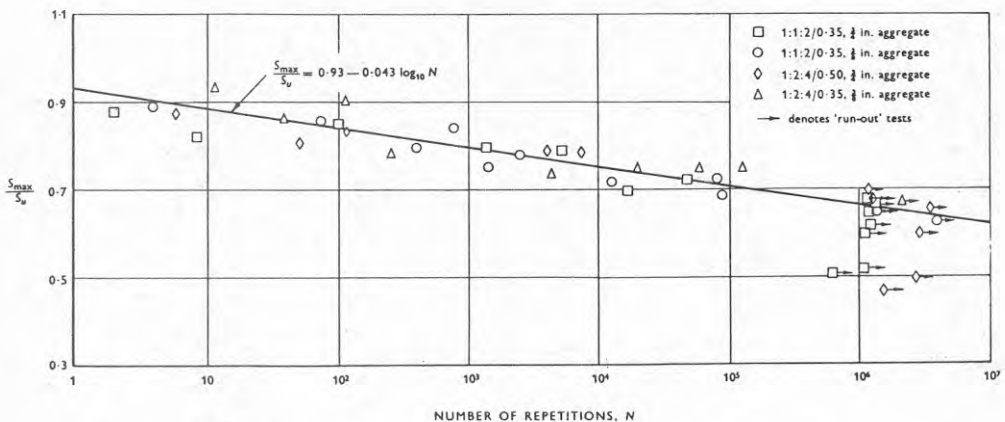


Fig 32.1 "Wöhlerkurva" för oarmerad betong.
Bennett and Muir 1967 [32-1].

Utmattningshållfastheten anges oftast som maximalspänningen (σ_{\max}) i procent av den statistiska hållfastheten. Tryckutmattningshållfastheten har sammanfattats av Westerberg [31-13] till 57-67% av den statistiska hållfastheten vid 2 miljoner lastväxlingar och minimilasten noll.

Den i fig 32.1 utritade regressionslinjen anger en brottsannolikhet på 50%. Då spridningen är stor kan det ofta vara värdefullt att lägga in andra linjer, som representerar andra brottsannolikheter (t ex 5, 10, 90, 95%).

En av de mest påtagliga faktorer som påverkar utmattningshållfastheten är minimispänningen. Detta är logiskt, ty antag att vi ökar minimispänningen så mycket att den blir lika med maximispänningen. Då har vi statisk last och $\sigma_{\max}/\sigma_{\text{Brott, Stat.}} = 1,0$. Minimispänningens inverkan kan åskådliggöras med ett sk modifierat Goodmandiagram för ett fixt antal lastväxlingar. I fig 32.2 som är hämtad från Aas-Jakobsen [31-18] visas en sammanställning av några forskningsresultat.

Aas-Jakobsen anger även en formel med vilken utmattningshållfastheten kan beräknas:

$$\sigma_{\max} = f_c [(1,0 - 0,0634(1,0 - \sigma_{\min}/\sigma_{\max}) \cdot 10^{\log n}] \quad (32.1)$$

σ_{\max} = maximispänning i varje lastcykel (avser centriskt belastade prover).

σ_{\min} = minimispänning i varje lastcykel

f_c = statisk brotthållfasthet

n = antal lastcykler

Formeln är framtagen så att den överensstämmer med resultat rapporterade av flera forskare.

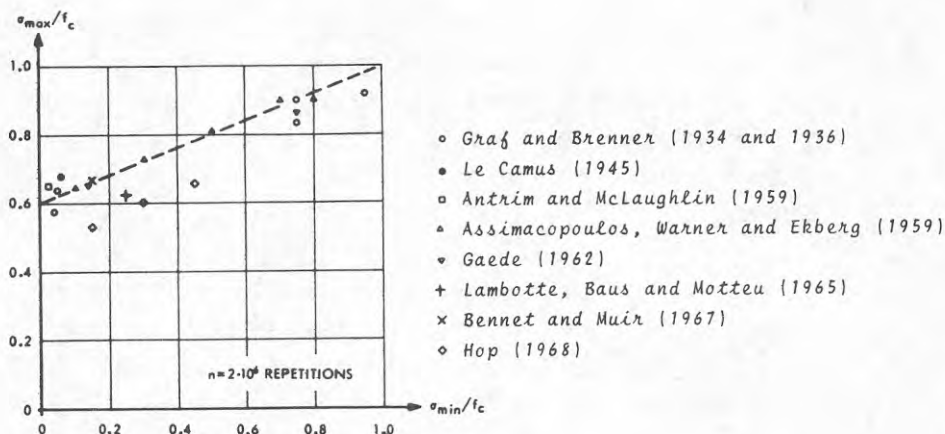


Fig 32.2 Relationen mellan utmattningshållfastheten σ_{\max}/f_c och minimispänningen σ_{\min}/f_c . f_c är statistisk brotthållfasthet. (Observera att här valts minimispänningen istället för medelspänningen på abscissaaxeln) [31-18].

Inverkan av lastexcentriciteten på utmattningstryckhållfastheten kan exemplifieras av fig 32.3 hämtad från försök utförda av Ople och Hulsbos (1966) [32-2].

De studerade betongprismorna är av storleken 4"x6"x12". I figuren är försöksresultaten uppdelade i tre grupper beroende på lastexcentriciteten ($e = 0$, $e = 1/3"$, $e = 1"$). Lastexcentriciteten $e = 1"$ ($e/h = 1/6$) innebär att spänningen är noll i ena kanten och σ_{\max} i den andra. Ur figuren fås att utmattningshållfastheten för centrisk last ($e = 0$) efter 2 miljoner lastväxlingar är 0,65 av den statistiska hållfastheten.

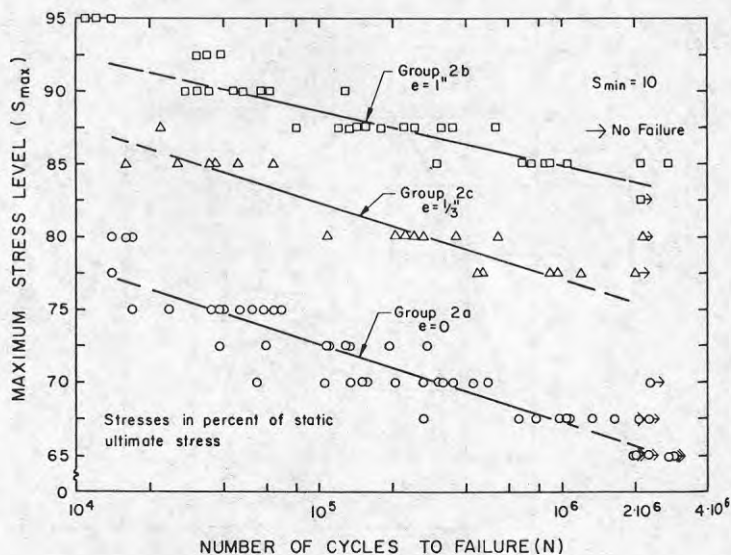


Fig 32.3 Utmattningshållfasthet i centriskt och excentriskt tryckta prismor. På ordnat-axeln är avsatt förhållandet mellan maximalspänningar i ena kanten och statiska hållfastheten [32-2].

Utmattningshållfastheten (maximalspänningen i den mest tryckta kanten) ökar således med ökande excentricitet. ACI Committee 215 [31-16] anger att detta är i överensstämmelse med statiska försök där man visat att spänningsgradienten bromsar de inre mikrosprickornas tillväxttakt. ACI kommittén menar dock att det för excentrisk last är påkrävt att använda samma tillåtna spänning som för centrisk last.

Aas-Jakobsen [31-18] vill utnyttja den ovan konstaterade hållfasthetsökningen vid excentrisk last enligt figur 32.4.

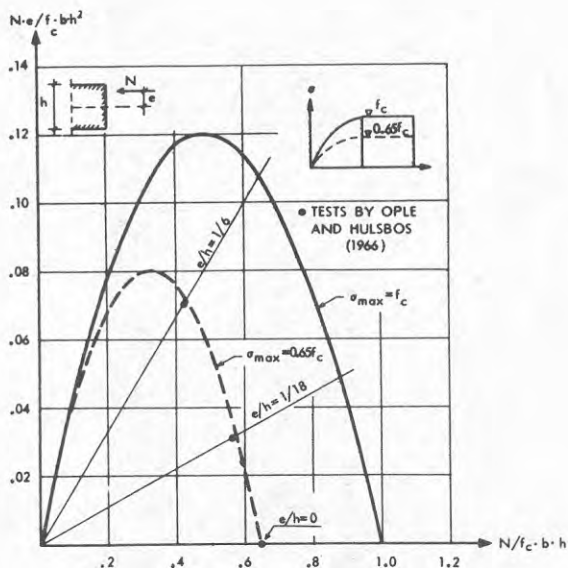


Fig 32.4 Förhållande mellan momentkapacitet och normalkraft i oarmerade betongprismor [31-18].

I figuren har förhållandet mellan momentkapacitet och normalkraft uppställts. Detta har gjorts med förutsättning att dragen del av tvärsnittet ej medräknas och att $N = f_c b (h - 2e)$. (Detta är i princip samma beräkningsmetod som användes för bl a tillåten jordtryckslast för grundplattor med excentrisk last). En "fiktiv" spänning antages lika fördelad över hela den yta som är symmetrisk kring den excentriska lasten. Detta göres trots att spänningen i verkligheten är högre i ena kanten och lägre i den andra.

Vid 2 miljoner lastcykler fick man i fig 32.3 för centrisk last ($3=0$) en utmattningshållfasthet på 0,65 av statisk last. Aas-Jakobsen antar då en reducerad spänningstöjningskurva där $\sigma_{\max} = 0,65 f_c$. Motsvarande kurva för förhållande moment-normalkraft är streckad i fig 32.4. Resultaten från Ople-Hulsbos har inprickats och visar god överensstämmelse. Figuren in-

dikerar således att utmattningskapaciteten för excentriskt tryckta prismor skulle kunna beräknas genom att använda en reducerad spänningstöjningskurva och sätta den enligt ovan beräknade "fiktiva" spänningen lika med utmattningshållfastheten för centrisk last. Observera att den verkliga kantspänningen blir större än den "fiktiva" spänningen varvid den större kantspänningen vid excentrisk belastning, som är möjlig enligt fig 32.3 utnyttjas.

Vid statisk belastning är det allmänt känt att tryckhållfastheten ökar väsentligt om provkroppen utsätts för ett omgivande sidotryck [32-8]. Denna ökning blir ännu större för utmattningslast, åtminstone vid begränsad storlek på maximalspänningen. Takhar-Jordaan-Gamble [31-15d] har gjort försök på tryckutmattning av betongcylindrar med eller utan omgivande sidotryck (fig 32.5). Den hållfasthetsökning som figuren utvisar förklarar forskarna med att spänningsomlagring sker vid de punkter där mikrosprickorna utbreder sig på det hydrostatiska trycket.

Betongleder i ändan av pelare i broar är ett exempel på en betongkonstruktion som utsätts för utmattande laster under fleraxiellt tryck. Konstruktionen har behandlats av Herzog [32-5].

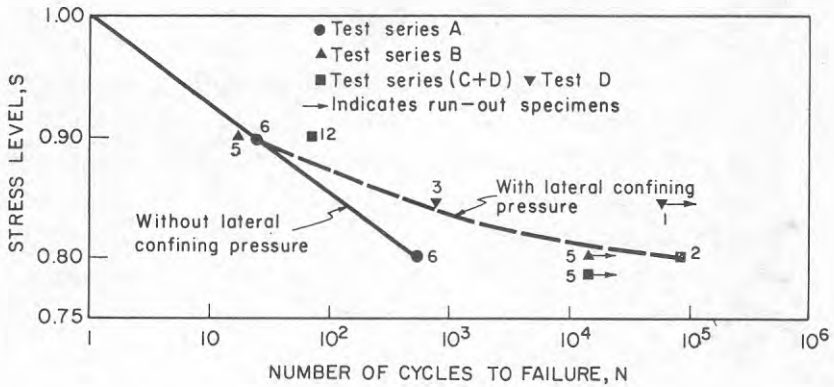


Fig 32.5 S-N kurva för provkroppar med och utan omgivande sidotryck. Siffrorna intill punkterna talar om antal provkroppar av vilka medelvärdet för antal lastväxlingar bildas. Sidotrycket för provserie A är noll, för B: $13,8 \text{ MN/m}^2$, för serie C och D: $6,9 \text{ MN/m}^2$. Spänningsnivån S är uttryckt i del av den statistiska brotthållfastheten för enaxiellt resp triaxiellt spänningstillstånd [31-15d].

Belastningsfrekvensen har i allmänhet liten inverkan på utmattningshållfastheten, förutsatt att maximispänningen är lägre än 0,75 av statisk hållfasthet [31-16]. Vid högre spänningsnivåer gör sig krypfenomen gällande. I en undersökning av Award-Hilsdorf [31-15a] utförd med lågcyklig utmattning, har man som hypotes att tidsberoende skada endast ackumuleras av växlande last som överskrider långtidshållfastheten (lågcyklig utmattning avser påläggning av höga spänningsnivåer vilket leder till utmattningsbrott vid ett relativt litet lastväxlingstal). Man antar även att den totala skadan är sammansatt av en lastväxlingsskada och en tidsberoende skada. Dessa hypoteser där man även använder Palmgren-Miners delskadehypotes som grund visar god överensstämmelse vid jämförelse med erhållna försöksresultat.

Detta resulterar i en minskning av utmattningshållfastheten vid en minskning av belastningshastigheten.

Vad gäller inverkan av betongsammansättning och hållfasthetsklass, tycks det som om proportionalitet skulle råda. Dvs betongkvalitén har liten inverkan på utmattningshållfastheten, om denna uttrycks i förhållande till den statiska hållfastheten. Se exempelvis fig 32.1 (Bennett-Muir).

Tryckhållfastheten vid utmattning av lätballastbetong behandlas bl a av Tepfers et al [32-9].

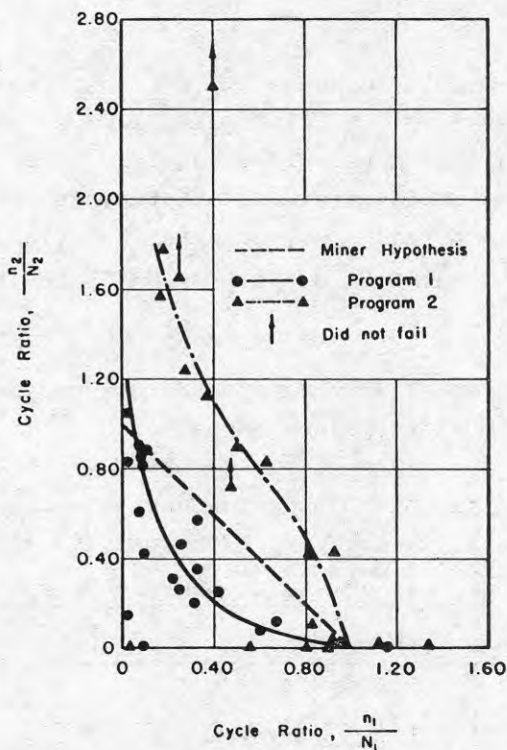
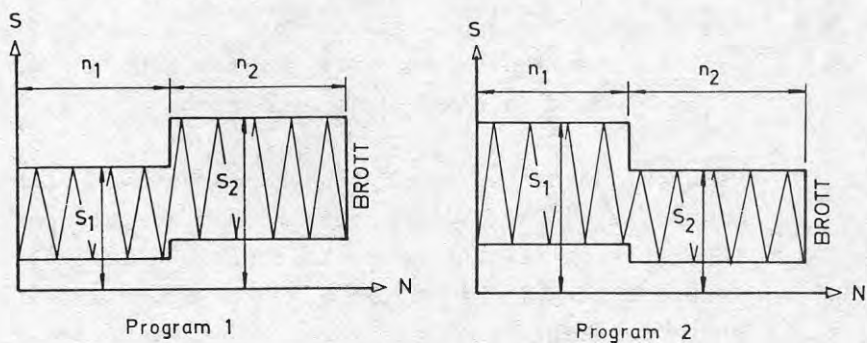
32.2 Utmattning av betong utsatt för böjspänning
Åtskilliga försök har utförts med böjning av oarmerade betongtvärsnitt. Begränsande blir ju här betongens draghållfasthet, vilket innebär att det man egentligen undersöker blir betongens utmattningshållfasthet vid excentrisk dragkraft (Ren dragprovning av betong är nästan inte alls genomförd). Ett exempel på praktiska konstruktioner där böjning av oarmerad betong blir aktuell är i betongbeläggningar för vägar, flytfält etc. Den stora materialmängd som dessa typer av konstruktioner innehåller, kan förklara den relativt stora forskningsinsatsen på området. Det verkar som om man vid böjutmattning kommit längre än vid tryckutmattning med kartläggningen av olika faktorerers inverkan.

Westerberg [31-13] har gjort en sammanställning av utmattningsegenskaperna både för böjspänning och tryckspänning, och konstaterar att egenskaperna vid böjning och tryck överensstämmer på nästan alla punkter som han studerat.

Egenskaperna för böjutmattning avseende den principiella Wöhlerkurvan, minimilasten, lastexcentricitet, omgivande sidotryck, belastningsfrekvens, betongsammanställning och hållfasthetsklass är således i princip oförändrade från vad som sades i avsnitt 32.1. Detta under förutsättning att böjutmattningshållfastheten uttrycks i förhållande till den statiska böjbrotthållfastheten.

Tilläggas kan att ACI-kommittén [31-16] anger utmattningshållfastheten vid 10 miljoner lastväxlingar till ungefär 55% av statisk last, oavsett om provkropparna är påverkade av tryck, drag- eller böjspänning.

Inverkan av varierande lastnivå har studerats av Hilsdorf och Kesler [32-3]. Se fig 32.6 hämtad från Westerberg [31-13].



n_1 och n_2 enligt ovan

N_1 = antal lastväxl. till brott vid konst. bel.nivå S_1

N_2 = " " " " " " " " " " S_2

Fig 32.6 Böjutmattning med varierande belastningsnivå samt jämförelse med Palmgren-Minerhypotesen [32-3][31-13].

Palmgren-Miner's hypotes innebär som tidigare angetts att $\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$. Av figuren framgår att livslängden är beroende av vilken spänning som påförs först. I en annan försöksserie växlade belastningen med jämna mellanrum mellan två olika värden. Här erhöles bättre överensstämmelse med Palmgren-Minerhypotesen.

Viloperiodernas inverkan studerades även av Hilsdorf och Kesler [32-3]. Det anges att kortare viloperioder innebär en viss ökning av utmattningshållfastheten. Längre viloperioder gav ingen ytterligare ökning. Andra forskares resultat visar ingen signifikant inverkan, se Raithby-Galloway [31-15b].

Tepfers et al [32-4] undersökte olika belastningskurvformers inverkan på utmattningshållfasthet och deformation. Man fann att den rektangulära belastningskurvformen snabbast orsakade utmattningsbrott. Därefter kom sinusformen. Prov utsatta för triangelformig last höll längst av dessa tre. Detta kan bero på krypeffekten.

Palmgren-Minerhypotesen har även studerats av Abeles et al [31-15k] för spännbetongbalkar.

Fukthaltens inverkan på böjutmattningshållfastheten har bl a studerats av Raithby och Galloway [31-15b].

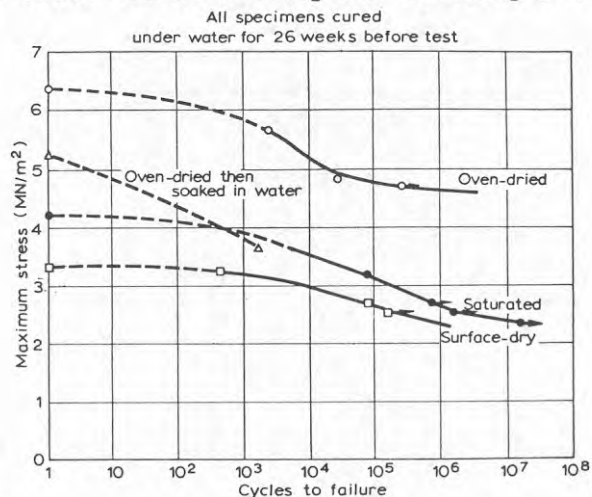


Fig 32.7 Inverkan av fukthaltsförhållande på utmattningshållfastheten i betong [31-15b].

Här provades betongprismor under olika fuktbetingelser. Alla provkroppar hade härdat under vatten. Sedan hade vissa torkats i värmeugn och provats. Vissa hade efter ugnstorkning åter vattenlagrats före provning. Vissa hade torkat i rumstemperatur under en tid så de var yttorra och slutligen den sista gruppen hade provats genomblöta.

Vi ser i fig 32.7 att de ugnstorkade har väsentligt bättre utmattningshållfasthet än de övriga, men att viss skillnad även finns mellan dem. Svårigheten är dock att exakt bestämma fukthalten på olika djup under ytan för de provkroppar som ej är helt genomblöta.

De höga hållfasthetsvärdena för ugnstorkade provkroppar förklarar Raithby-Galloway med den ökade inre friktionen orsakad av krympningen under torkningen. Förhållandet att yttorra provkroppar har **sämre** hållfasthet än genomblöta föreslås förklaras av töjningskillnader mellan yttre och inre delar, orsakad av fuktgradienten.

Betongens ålder och härdningsförhållande vid provningstillfället har i och för sig en avgörande betydelse både på den statiska brotthållfastheten och på utmattningshållfastheten. Raithby-Galloway [31-15b] anger för någon betongkvalitet en medellivslängd som vid 2 års ålder var 2.000 gånger större än livslängden vid 4 veckors ålder. För samma provserie kan dock utmattningshållfastheten ställas i relation till statisk hållfasthet med motsvarande ålder enligt fig 32.8.

Försöket tyder på god följsamhet mellan utmattnings- och statisk hållfasthet, även för skiftande betongkvaliteter.

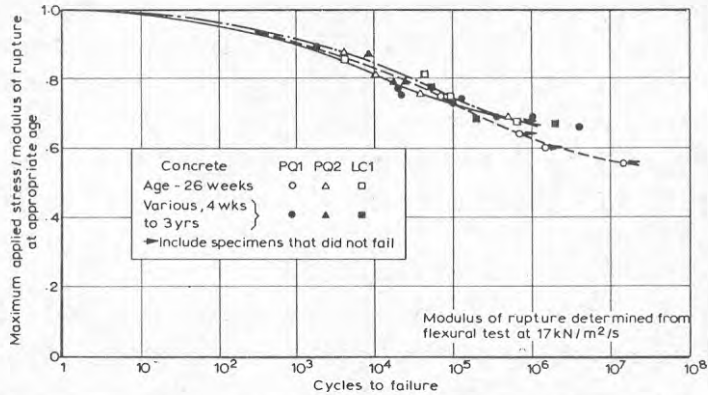


Fig 32.8 Utmattningshållfasthet relaterad till statistisk hållfasthet vid motsvarande ålder. Draghållfastheten vid 28 dygn än för betongkvaliteten PQ1:3,50 MN/m², PQ2:3,48 MN/m², LC1: 2,00 MN/m² [31-15]

32.3 Betongens deformationsegenskaper

Betongens deformation är viktig att känna till av flera skäl. Påtagligast är väl för att undvika oacceptabla deformationer vid brukslast. Dessutom måste spänningsomfördelning mellan betong och tryckarmering beaktas. Deformationsegenskaperna bestämmer även tillskottspåkänningarna p g a deformationen hos slanka tryckta konstruktioner.

Om betong utsätts för upprepad lastpåläggning av viss storlek, så ökar deformationerna succesivt. En väsentligt större deformation erhålls än den som uppnåddes vid den första lastpåläggningen. Figur 32.9 visar ett typiskt exempel på detta.

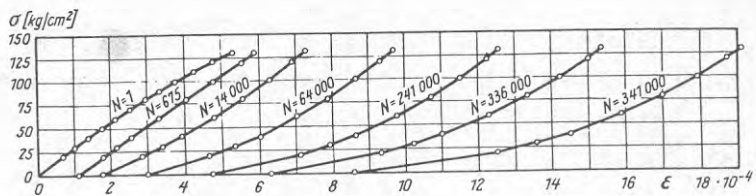


Fig 32.9 Spänningstöjningskurva vid upprepad lastpåläggning. Hämtad från [31-9][32-13].

Diagrammet visar det typiska förhållandet att kurvformen för en viss belastningscykel ändras under provets gång. Vid ett litet antal lastväxlingar böjer den svagt åt töjningsaxeln. Då antalet lastväxlingar ökar är kurvan relativt rak. I närheten av utmattningsbrottet börjar kurvan kröka åt andra hållet (mot spänningsaxeln). Samtidigt ökar deformationen i den enskilda lastcykeln. Även deformationen mellan de enskilda lastcyklerna ökar. Denna kvarvarande töjning kan kallas plastisk deformation.

Figur 32.10 visar principen för hur den plastiska deformationen ökar med antalet lastcykler.

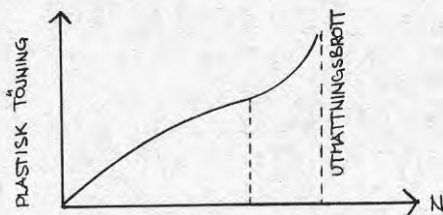


Fig 32.10 Ökning av den plastiska deformationen i närheten av brott i princip enligt Gaede [32-6] [31-18].

Då brott närmar sig, börjar synliga utmattningssprickor slå upp. (Små mikrosprickor kan däremot konstateras med hjälp av akustisk mätutrustning redan vid första pålastningen). Den plastiska töjningen ökar alltmer per belastningscykel och kurvan ändrar krökningsriktning.

Utmattningsförloppet fortsätter mot brott. Spänningsomlagringar uppträder i tvärsnittet där så är möjligt. Delar av tvärsnittet med de högsta spänningstopparna spricker, och lasten omlagras till delar med mindre spänning. Betongmassan blir mer och mer uppluckrad av sprickor varvid utmattningsbrottet är ett faktum.

Aas-Jakobsen [31-18] har som huvudsyfte för en undersökning haft att studera hållfasthets- och deformationsegenskaperna vid upprepad last hos betongelement, vilka var konstruerade att brista i tryckzonen. Undersökningen omfattade 10 prismor, 6 förspända balkar och 12 pelare.

Tryckzonen i konstruktionselement har normalt en spänningsgradient. Genom att dela upp tryckzonen i strimlor där varje strimla approximativt har centrisk last kan problemet i först hand begränsas till ett studium av en centriskt tryckt betongsektion.

På basis av egna försök uppställer Aas-Jakobsen en modell för spänningstöjningsrelationen i betong utsatt för upprepad last (fig 32.11).

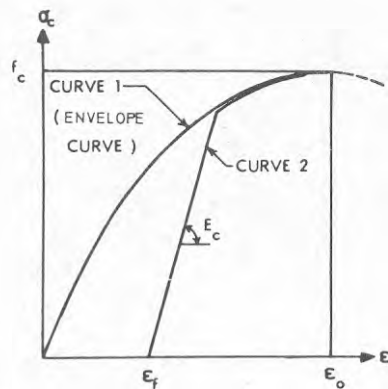


Fig 32.11 Relation mellan spänning och töjning i betong lastad till brott [31-18].

Kurva 1 beskriver relationen vid orörda (jungfruliga) provkroppar belastade statistiskt direkt till brott.

Kurvan har följande empiriska utseende:

$$\sigma_c = f_c [3(\epsilon/\epsilon_0) - 2(\epsilon/\epsilon_0)^{1,5}] \quad (32.2)$$

där f_c är statisk brotthållfasthet. Stukningen ϵ_0 har genom försök bestämts till 2,3‰ för prismor och balkar och till 2,9‰ för pelare. Skillnaden anges kunna bero på olika härdningsbetingelser.

Ekvation 32.2 gäller för $\epsilon \leq \epsilon_0$. För större ϵ antas en konstant spänning fram till brotttöjning (3,5‰).

Kurva 2 beskriver spänningstöjningsrelationen för en provkropp utsatt för tidigare upprepad last. Denna föregående lasthistoria representeras av en plastisk töjning ϵ_f . Kurva 2 är nästan rak tills den böjer av och följer kurva 1. Kurva 1 utgör således en övre begränsning för spänningstöjningsrelationen och kan kallas för en envelop.

Den raka delen av kurvan 2 kan skrivas

$$\sigma_c = E_c (\epsilon - \epsilon_f) \quad (32.3)$$

E_c har genom provningar bestämts till 1100 f_c för prismor och balkar och till 800 f_c för pelare.

Med hjälp av ekvation (32.2) och (32.3) kan spänningstöjningsrelationen vid en enskild lastcykel bestämmas för en centriskt tryckt betongsektion vilken utsatts för en godtycklig lasthistoria. Denna lasthistoria beskrives av den plastiska töjningen ϵ_f .

Andra forskare Gaede [32-6] och Mehmehl och Kern [32-7] har studerat den plastiska töjningen orsakad av upprepad last.

Aas-Jakobsen ställer med egna försök som grund upp följande förhållande mellan plastisk töjning ϵ_f och antal lastväxlingar n :

$$\epsilon_f = 0,020 \frac{\sigma_{\max}}{f_c - \sigma_{\max}} \sqrt[4]{n} \quad (32.4)$$

En användning av de tre ekvationerna (32.2) (32.3) (32.4) ger möjlighet att beskriva spänningstöjningsrelationen för centriskt tryckta betongsektioner som utsätts för en godtyckligt varierande upprepad lastpåläggning. Lastspektrumet får då uppdelas i ett antal bitar inom vilka maximispänningen är oförändrad.

Aas-Jakobsen testar metoden på egna försök och konstaterar god överensstämmelse. Maximispänningen hölls därvid konstant för det enskilda provet. "Lasthistorien" åstadkomms genom att utsätta provet för en viss långtidslast varvid ϵ_f uppmättes.

Övergången från en centriskt tryckt betongsektion till en "godtycklig" tryckspänningsfördelning görs som tidigare nämnts genom en indelning av tryckzonen i strimlor som var för sig utgör en centriskt tryckt sektion. Aas-Jakobsen jämför egna försöksresultat på balkar och pelare med en genomförd databeräkningsmetod som är framtagen enligt ovan. Här tycks överensstämmelse uppnås.

33. ARMERING

De flesta grundläggande egenskaperna för utmattning av stål i allmänhet finns även redovisade i del II.

Det är möjligt att göra en uppdelning av armering i tre grupper: 1 armeringsstänger, 2 svetsat armeringsnät, 3 spännarmering. Många egenskaper är gemensamma för de tre grupperna. För svetsat armeringsnät tillkommer inverkan av svetsförbindningen mellan längs- och tvärgående trådar eller stänger. Vid spännarmering måste bl a extra uppmärksamhet ägnas frågor rörande vidhäftning längs armeringen och ändförankring av armeringsstängerna.

Gemensamma egenskaper för de tre grupperna redovisas i huvudsak under 33.1. Speciella egenskaper för svetsat armeringsnät och för spännarmering behandlas i avsnitt 33.2 respektive 33.3.

33.1 Armeringsstänger

Armeringsstänger finns dels med slät yta, dels med kammar eller profileringar för att öka vidhäftningen till betongen. Den viktigaste skillnaden mellan släta stänger kontra kamstänger och profilerade stänger är de spänningskoncentrationer som kammar eller profileringar ger upphov till. Spänningskoncentrationerna reducerar utmattningshållfastheten.

De flesta armeringsstänger har till skillnad från betongen en "utmattningsgräns". D v s om spänningsvariationen hålls under en viss nivå, kan den upprepas "oändligt" många gånger utan att brott sker. Förutsättningen för detta är materialets förmåga att "deformationshårdna" vid upprepad belastning. Figur 33.1 visar några typiska Wöhlerkurvor för armeringsstänger. Utmattningsgränsen tycks finnas vid en miljon lastväxlingar.

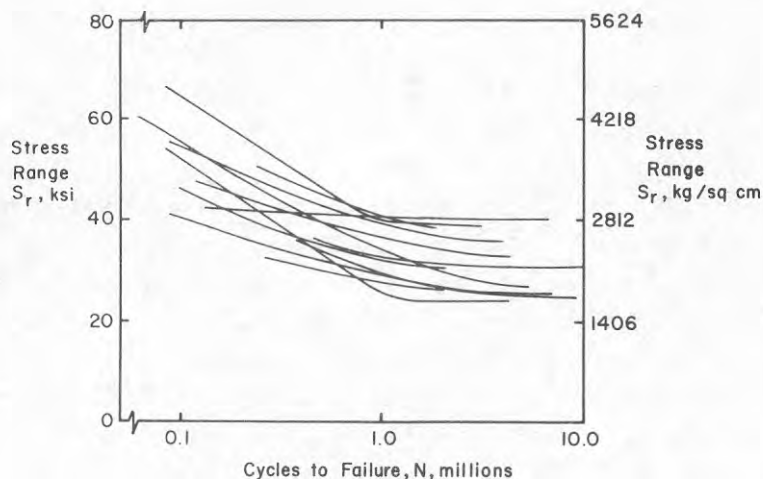


Fig 33.1 "Wöhlerkurvor" för armeringsstänger av varierande typ. Hämtad ur [31-16].

Den parameter som bäst bestämmer livslängden är spänningsvidden $d v s$, skillnaden mellan högsta och lägsta spänning. Förutom denna finns åtskilliga andra faktorer som också påverkar utmattningshållfastheten i mer eller mindre hög grad. De viktigaste är minimispänning, stångens ytkarakteristika, stångdimension, statisk draghållfasthet, bockning och svetsning. Även det faktum att stängerna är ingjutna i betong samt konstruktionstypen på de element i vilka armeringen används påverkar utmattningshållfastheten.

Åtskilliga andra faktorer har också inverkan på utmattningshållfastheten. Bestickande för många av faktorerna (även mycket centrala sådana) är att olika forskare ofta kommer till olika resultat. Detta sammanhänger med att för varje ny faktor som införs, så ökar spridningen i försöksresultaten. En förutsättning för att nöjaktigt kunna urskilja faktorerna är att försöksmaterialet är någorlunda stort. Statistiska me-

toder (variansanalys, multipel regressionsanalys) bör härvid användas vid planering och utvärdering av försöken. Sådana undersökningar har utförts företrädesvis i USA och Canada där John M Hanson och Ishwan C Jhamb är centrala namn inom detta fält.

Vad beträffar ingjutningens inverkan har skiftande resultat framkommit. Vissa resultat uppvisar en minskning av utmattningshållfastheten vid ingjutning, medan andra visar en ökning. Jhamb et al [31-22] föreslår följande anledning till minskning resp ökning:

Minskning: att en spänningsgradient uppkommer i armeringsstången vid böjprovning i t ex balken.

Ökning: att betongen upptar en viss dragkraft att sannolikheten för att armeringsstångens svagaste punkt skall överensstämma med en betongspricka är liten att betongsprickorna inte sluter sig helt vid avlastning p g a att små betongkorn sätter sig i vägen. Detta resulterar i en högre minimispänning och därmed lägre spänningsvidd.

Ytterligare anledningar till minskning respektive ökning ges av Tor-Ulf Weck [31-21]. Relativt sena undersökningar (Soretz [33-1], Wascheidt [33-2], Jhamb et al [31-22]) visar att skillnaden mellan utmattningshållfastheten i ingjutet och icke ingjutet tillstånd inte är så stor om kammarna på armeringsstångerna är så utformade att de säkerställer en god vidhäftning mellan stål och betong. Jhamb [31-22] definierar en parameter för relativ

kamarea (f_R):

$$f_R = \frac{\text{kamarea projicerad p\aa st\angens tv\arsnitt}}{(\text{st\angdiameter}) \cdot (\text{kamavst\and})}$$

Fig 33.2 visar en sammanst\alling av (f_R):s inverkan:

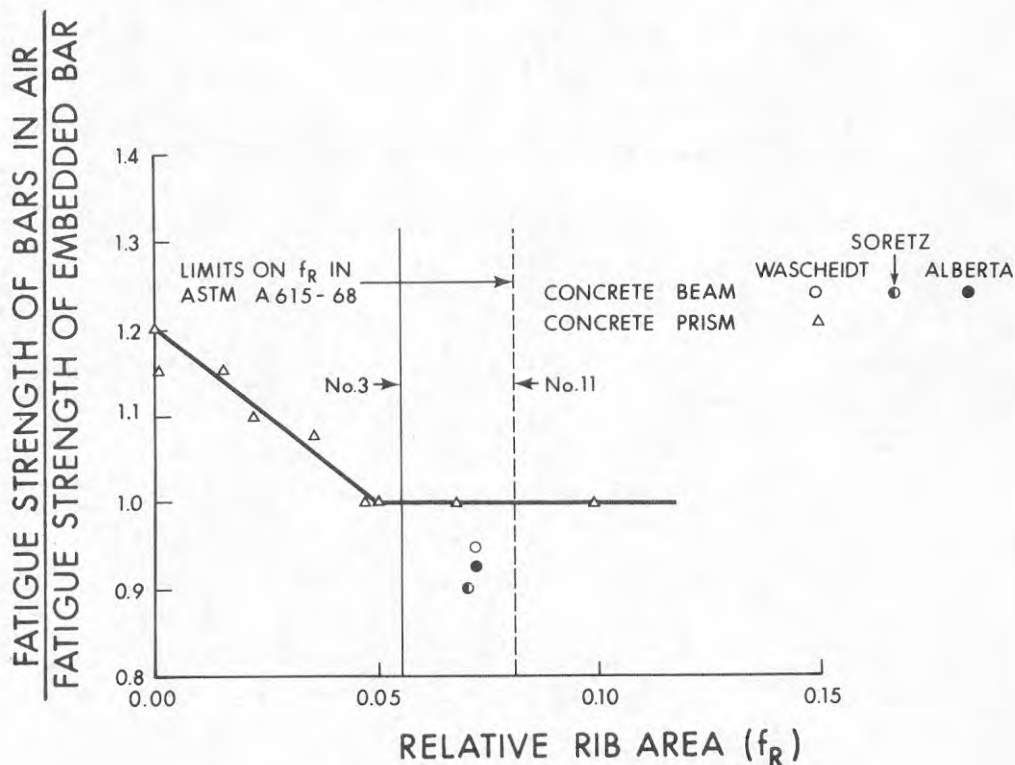


Fig 33.2 Inverkan av ingjutning avsett mot relativ kamarea (f_R) Ordinatateln: utmattningsh\allfastheten f\or st\anger provade fritt dividerat med resultatet vid ingjutna st\anger [31-22].

Vid v\arden p\aa den relativa kamarean (f_R) mindre \aa n 0,05, minskar h\allfastheten vid ingjutning. Detta anges bero p\aa f\or d\allig vidh\aftning vid ingjutning. F\or

$f_R > 0,05$ ökar istället utmattningshållfastheten vid ingjutning med 5-10 % enligt vissa försöksresultat. Inom detta område ligger också flertalet nu tillverkade armeringsstänger.

Även om minimispänningens inverkan råder delade meningar. I två stora undersökningar [31-15e] och [33-3] från USA och Canada har man dock fått en signifikant inverkan av minimispänningens nivå. Inverkan anses kunna representeras av ett modifierat Goodmandiagram, där en ökande minimispänning medför minskad spänningsamplitud vid oförändrad livslängd.

Armeringsstångernas ytkarakteristika är en innehållsrik och viktig faktor [31-22]. Viktigast är här kammarnas utformning. Övergången mellan stång och kam måste ske mjukt, d v s med en stor övergångsradi. Jhamb har i fig 33.2 redovisat resultat från teoretiska beräkningar med finita elementmetoden.

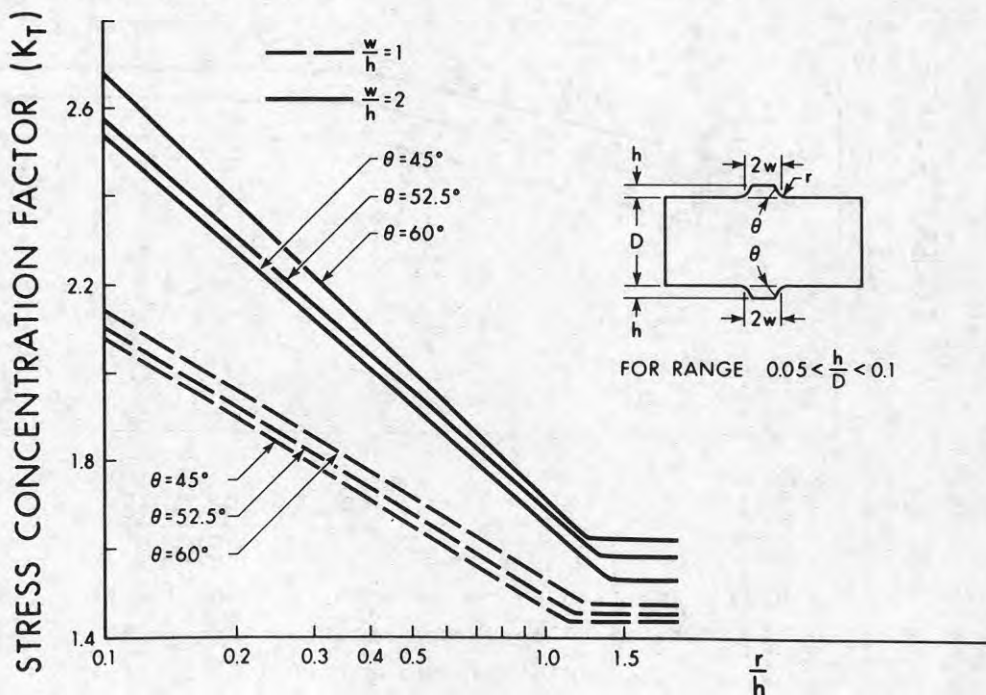


Fig 33.2 Effekt av kamutformning på spänningskoncentrationen [31-22].

Här har förhållandet mellan övergångsradien och kamhöjden (r/h) avsatts mot den teoretiskt framtagna spänningskoncentrationsfaktorn K_T . K_T är förhållandet mellan spänningen vid kambörjan och spänningen i stängen mellan kammar. Ett värde på r/h strax över 1 tycks vara eftersträfvansvärt. Att öka radien ytterligare ger ej någon förbättring. Även kamsidans lutning (θ) och kammens längd/höjdförhållande (w/h) har betydelse.

I fig 33.3 styrks delvis ovanstående teoretiska spänningskoncentrationsberäkningar. Här finns sammanställt resultat från flera utförda provningar som visar att spänningsvidden är störst för $r/h \geq 1$.

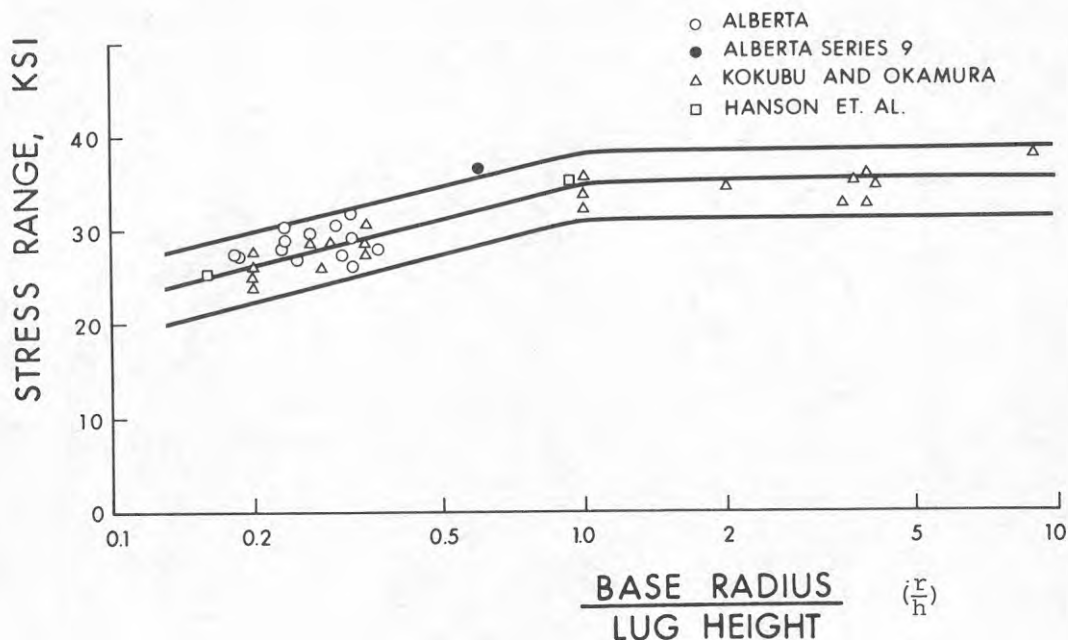


Fig 33.3 Inverkan av r/h på utmattningshållfastheten. Alla värden omräknade att gälla för en minimispänning på 0,1 av brott-hållfastheten. Betr definition av r/h : se fig 33.2 [31-22].

Kamstängerna har normalt både tvärgående och längsgående kammar. Det anses av många att just korsningspunkterna mellan längs- och tvärgående kammar skulle vara särskilt känsliga för utmattningsinitiering. Flera stålverk har även börjat tillverka stänger utan dessa korsningar mellan kammarna. Stora provserier från USA och Canada har dock ej kunnat upptäcka inverkan av dessa korsningspunkter. Man har här fått flertalet brottinitieringar på andra ställen.

Många forskare menar att en snedställning av kammarna ger ökad utmattningshållfasthet. I Tyskland används ofta "kallvriden" armering, rippen TORSTAHL. De är formade så att både längs- och tvärgående kammar bildar viss vinkel med armeringsjärnets längdaxel. Se fig 33.4.

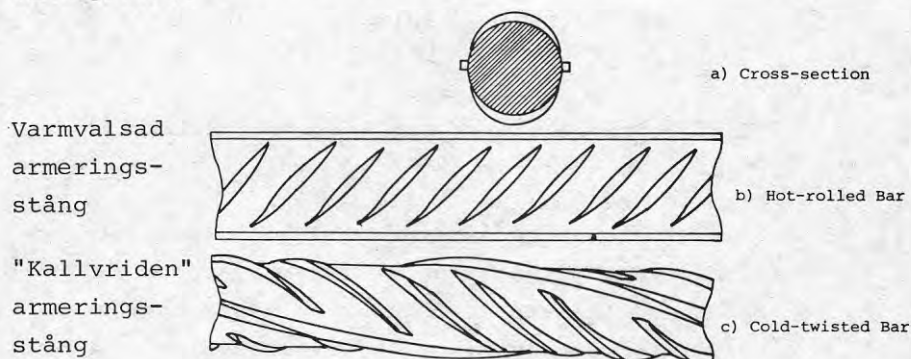


Fig 33.4 Armeringsstänger med sneda kammar.
Soretz [31-15c].

Förslitningsgraden på de valsar som användes vid tillverkningen av kamstänger borde ha betydelse. Ingen forskare har dock med statistisk säkerhet visat att så är fallet.

Avkolning av ytskiktet kan uppstå vid valsningen av armeringsstängerna. Härvid fås ett ytskikt med lägre hållfasthet i vilket utmattningsprickor lättare skulle kunna initieras. Fig 33.5 visar ett typiskt

exempel på hur kolhalten och hårdheten varierar med djupet från ytan.

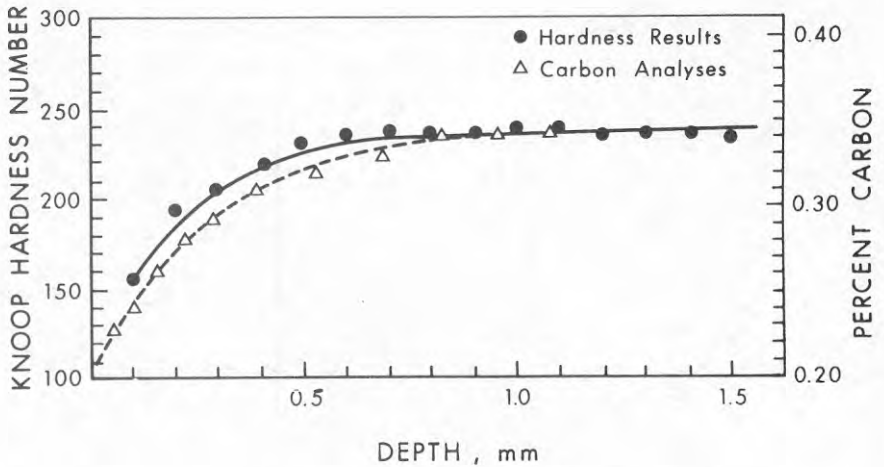


Fig 33.5 Hårdhetens- och kolmängdens variation med djupet från ytan [31-22].

Inverkan av valshud och måttligt rostangrepp visar dock ej signifikant inverkan.

Att en större stängdiameter ger något lägre utmattningshållfasthet har visats i flera rapporter [31-16]. Här har man främst som förklaring den spänningsgradient som uppkommer vid böjdragprovning av armeringsstål. Detta torde medföra att brottet oftast skulle initieras i underkanten på armeringsstångerna, vilket dock ej inträffar i alla undersökningar. Se [31-21]. Även volymeffekten skulle kunna åberopas. Jhamb [31-22] provade alla sina armeringsstänger ej ingjutna med en ren dragkraft. Hans förklaring till ovanstående var att grövre stänger har grövre mikrostruktur och därmed lägre utmattningshållfasthet. Uppmärksantalet måste också fästas vid att de mindre armeringsstångsdiametrarna kan ha blivit mer eller mindre kallbearbetade, p g a att stålet hinner kallna under valsningen.

En ökning av den statiska sträck- och brottgränsen hos stålmaterialiet innebär i allmänhet ej någon ökning av utmattningshållfastheten för kamstål. Detta kan bero på den stora mängd spänningskoncentrationer och dylikt som förekommer vid kammarna. Dessa ned-sättande faktorer verkar kraftigare vid högre statisk hållfasthet. (Hanson och Jhamb).

Däremot märks en signifikant inverkan av sträck-brottgränsen för släta armeringsstänger och en klar inverkan för polerade stålprover uttagna från mitten av armeringsstången. Här förbättrades utmattnings-hållfastheten linjärt med den statiska brotthållfastheten.

Detta skulle innebära att en hög materialkvalité ej kan utnyttjas vad gäller kamstänger och profilerade stänger utsatta för utmattningslast. Här avses förmågan att uthärda normala spänningsvidder. Vid lågcyklig utmattning där höga maximispänningar kan bli aktuella ger dock en högre materialkvalité fördel. Maximispänningen får ju aldrig överskrida statisk hållfasthet.

Inverkan av bockning av armeringsstänger är påfallande. Två undersökningar har studerat detta [33-4] [33-5]. Man fann exempelvis för kamstänger en sänkning av utmattningshållfastheten med 50 % i förhållande till en rak stång. Detta gällde en 45° bock med krökningsradie på 3 till 4 gånger stångdiametern. Kamstänger påverkas dock mer av bockning än släta stänger, vilket kan bero på att vissa kammar deformerar av bockningsverktyget.

Burton och Hognestad [33-6] har undersökt inverkan av häftsvetsning på utmattningshållfastheten. Man studerade utmattningshållfastheten för stänger till vilka byglarna dels najats fast, dels punktsvetsats fast. Man fann att hållfastheten minskade med en tredjedel vid svetsningen, fig 33.6. Se även [33-10] - [33-13].

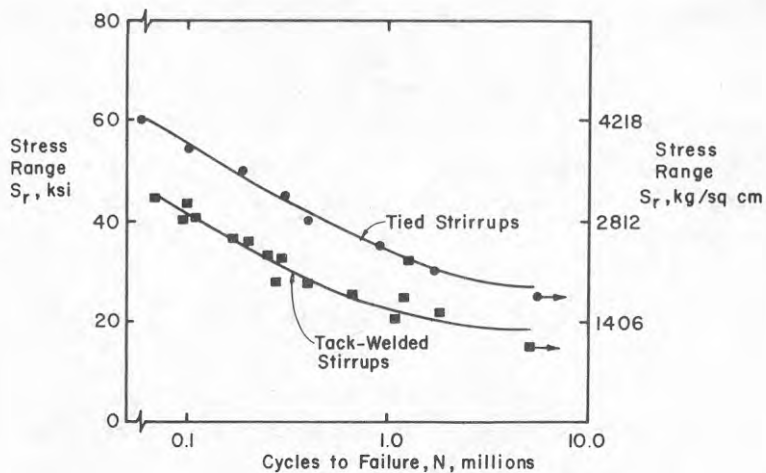


Fig 33.6 Inverkan av punktsvetsade byglar på Grade 60-stänger [31-16].

Ovanstående visar att utmattningshållfastheten beror till varierande grad av en mängd faktorer. Dessa ger upphov till stor spridning i försöksresultaten. Figur 33.7 visar en sammanställning av flertalet försöksresultat utförda med Nordamerikanska armeringsstänger.

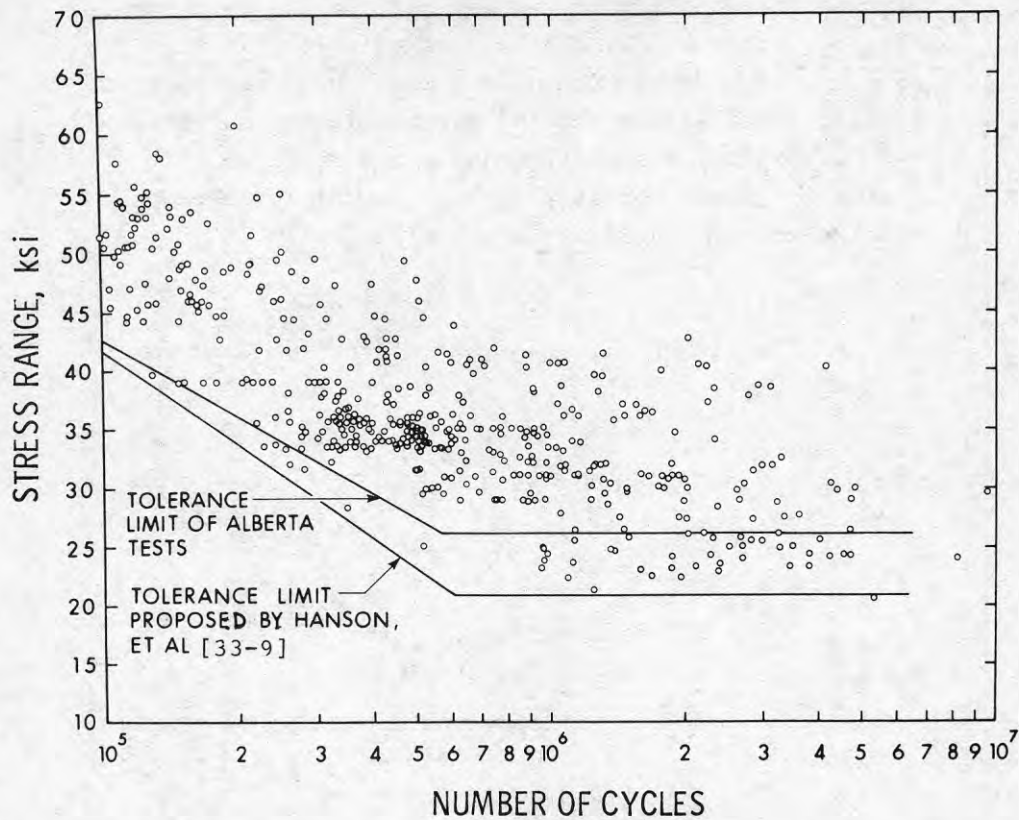


Fig 33.7 Sammanställning av försöksresultat från Nordamerika
 Toleransgränsen föreslagen från Alberta (Jhamb et al) gäller en enstaka provserie.
 Toleransgränsen föreslagen av Hanson et al gäller också en enstaka provserie, men kan även utsträckas att representera en lägsta toleransgräns för alla resultaten i sammanställningen [31-22].

Testresultaten omfattar stänger med tre hållfasthetsklasser; Grade 40, 60 och 75, stängdiametrar mellan $\phi 5 - \phi 11$ och minimispänningar mellan $-0,1$ till $+0,3$ av statisk flytgräns. Siffrorna för hållfasthetsklasserna (40, 60 och 75) avser flytgränserna med sorten ksi. Hanson och Jhamb förestår var sin formel för begränsning av spänningsvidden vid brukslast:

$$S_r = [40 - 19 (\log N - 5)] (1,13 - 0,67 \frac{S_{\min}}{f_y}) \quad \text{Hanson et al} \quad (33.1)$$

$$S_r = [45,5 - 21,5 (\log N - 5)] / (1 + \frac{2}{3} \frac{S_{\min}}{f_y}) \quad \text{Jhamb et al} \quad (33.2)$$

där S_r = spänningsvidd i ksi

N = antal lastväxlingar

S_{\min} = minimispänning (positiv vid dragning,
negativ vid tryck)

f_y = flytgräns

Värdet på S_r vid $N = 10^6$ får användas även för högre värden på N .

Formlerna föreslås att gälla för alla armeringsstänger som uppfyller de amerikanska bestämmelserna för armeringsstänger.

Ovanstående försöksresultat omfattar dels ingjuten armering, dels armering som inte är ingjuten. Hanson et al [33-9] provade armeringen ingjuten i balkar, medan Jhamb et al [31-22] utförde prov med fria armeringsjärn.

Svenska kamstål har undersökts av Nils-Ove Grönqvist [31-20]. Figur 33.8 visar en sammanställning av en provserie där armeringskvalitén och kamutformingen samt tillverkningsvalsarnas förslitningsgrad studerats.

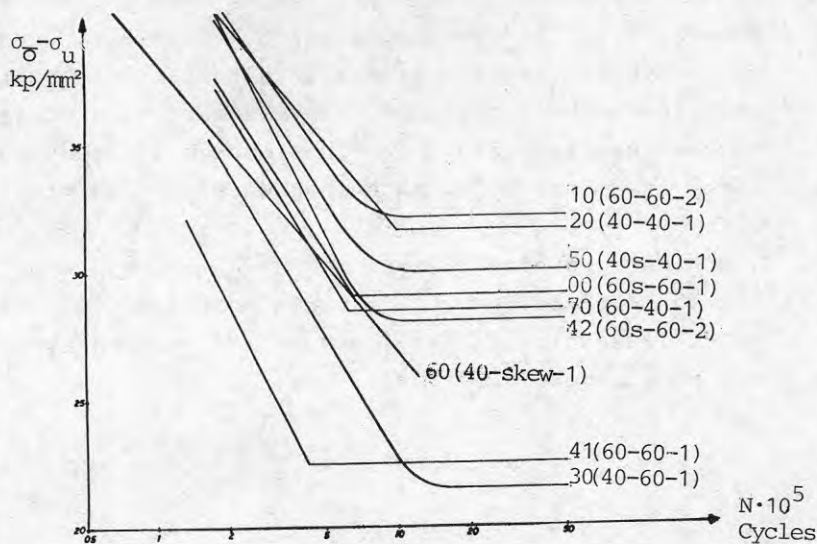


Fig 33.8 S-N-diagram för 50 % brottsannolikhet.

Spänningsvidden är avsatt mot antal lastväxlingar. Siffrorna inom parentes avser: (armeringskvalitet - kamutformning normalt tillhörande resp kvalitet - valsarnas förslitningsgrad 1 = nya, 2 = väl använda). [31-20].

Stor spridning råder mellan olika grupper och det är svårt att upptäcka någon signifikant tendens.

33.2 Svetsat armeringsnät

Armeringsnät består av trådar eller stänger släta eller profilerade. Dessa läggs i två riktningar och hopsvetsas i korsningspunkterna med motståndssvetsning. Härvid fås svetsförbindningar som varierar med statistisk spridning. Vissa punkter svetsas hårdare samman än andra. Större förskjutningskraft mellan de längs- och tvärgående stängerna kan då upptas. Å andra sidan minskar samtidigt utmattningshållfastheten p g a att den större inträngningen mellan stängerna ger upphov till ogynnsamma spänningskoncentrationer.

Användningsområdet för armeringsnät är mycket stort exempelvis till vägbeläggningar och flygfält. Även i många byggnadskonstruktioner är alternativet armeringsnät ekonomiskt intressant. En viss intuitiv rädsla för svetsade armeringsnät finns dock bland konstruktörer i samband med utmattningsbelastade konstruktioner.

I USA har provningar gjorts av Hawkins och Heaton [31-15 i] på svetsat trådarmeringsnät (welded wire fabric). Resultaten har jämförts med utmattningsförsök på stänger i fig 33.9.

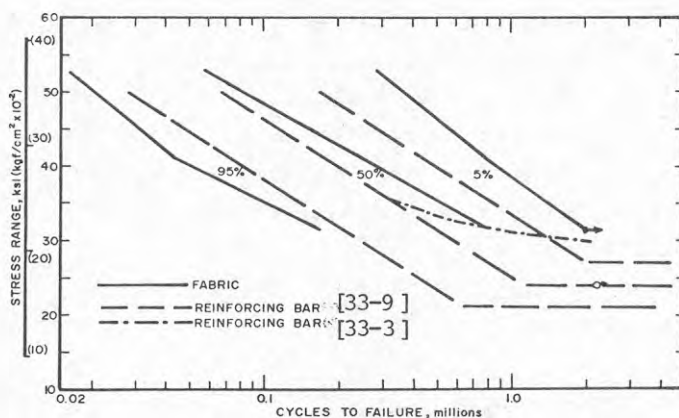


Fig 33.9 Jämförelse mellan utmattningsresultat för trådarmeringsnät och profilerade armeringsstänger. Resultaten för stängerna är hämtade från Hawkins och Heaton [31-15i] samt från Hanson et al [33-9] och Mac Gregor et al [33-3].

Provningsen är utförd i området "före utmattningsgrän- sen". Resultatet visar en större spridning för armeringsnät än för stänger. I medeltal fås dock något större utmattningshållfasthet för näten än för stängerna.

En undersökning av Pasko [33-7][31-15] är utförd med provbitar uttagna ur svetsade armeringsnät av profilerade stänger. Resultatet av detta har jämförts med Hansons försöksserie [33-9] på osvetsade profilerade stänger. Här uppvisar Paskos provserie t o m bättre utmattningshållfasthet. Detta tyder i alla fall på att inverkan av svetsningen ej behöver adderas till inverkan av profileringen.

33.3 Spännarmering

Spännarmering, här behandlat ytterst summariskt, förekommer i tre olika huvudtyper: trådar (strängar), kablar (linor, vajrar) och stänger. Alla innehåller höghållfast stål. Dessa har något olika utmattningsegenskaper.

Spännarmeringen utföres ibland med någon ytbehandling t ex förzinkning föranlett av att fullständig kringgjutning ibland är omöjlig (ex vid förankringspunkterna).

Ev ändförankringars utförande är av stor betydelse för utmattningshållfastheten. Brott uppkommer ofta p g a nötning under utmattningsförloppet.

Spännlinor som är sammansatta av ett antal trådar har ett speciellt problem. De består då av en rak mittentråd samt ett antal omgivande trådar som är virade runt mittentråden. Detta innebär att mittentråd och omgivande trådar får olika deformation då linan sträcks (och därmed även olika maximispänning). En nötning mellan trådarna uppstår då linan sträcks och slakas upprepade gånger.

Nötning kan även uppstå mellan sidotrådar. Cullimore [33-8] angav detta som orsak till att han vid provning erhöll lägre utmattningshållfasthet för linor än för enstaka trådar. Cullimore kunde ej heller upptäcka någon utmattningsgräns för linorna.

Vidhäftning mellan spännarmering och betong är mer eller mindre god beroende på vilket spännarmerings-system som används. Ibland finns ingen vidhäftning alls. Detta inverkar på utmattningshållfastheten i princip på samma sätt som gäller "vanliga" armeringsstänger provade med eller utan omgivande betong. Se även nedan kap 35 "ingjutning".

För vidare information hänvisas till [31-16] som även innehåller ytterligare referenser.

Detta kapitel behandlar i huvudsak utmattningsfenomen som har sin grund i samverkan på olika sätt mellan betong och armering. Efter en summarisk översikt av utmattningsbrottets karaktär behandlas tryck- och böjbrott, samt skjuv- och förankringsbrott.

34.1 Utmattningsbrottets karaktär

Betong är ett komplext material och i cementpastan finns alltid en viss mängd mikrosprickor orsakad av bl a krympning. När betongen tillförs energi genom upprepad lastpåläggning fortsätter mikrosprickorna att utbreda sig. Nya sprickor bildas även. Dessa bildas ofta som vidhäftningsbrott mellan cementpastan och ballasten [31-13]. Sprickor initieras även vid luftblåsor och överhuvudtaget vid svaghetsställen där spänningskoncentrationer förekommer.

Vid upprepad pålastning utbreder sig mikrosprickorna alltmer. De förenar sig till större sprickor. Sprickmönstret vid utmattningsbrott får oftast en mer finfördelad karaktär jämfört med statistiskt brott.

Betongen blir under utmattningsförloppet alltmer uppluckrad av sprickor. Deformationerna ökar alltmer i både "längsled" och "tvärlid" tills det slutliga brottet sker [32-4].

Utmattningsförloppet i tryckt betong tar relativt lång tid. Brottet kan förutspås genom kraftiga sprickbildnings- och deformationsökningar.

Denna brottyyp skiljer sig från utmattningsbrott orsakat av dragbrott i armeringen. Armeringsstålet går till brott utan att nämnvärd töjning dessförinnan skett.

34.2 Tryckbrott, böjbrott

Tryckbrott och böjtryckbrott i överarmerade balkar bestäms av betongens egenskaper vid tryckpåkänningar och har behandlats i kapitel 32.

Uppmärksamhet bör dock riktas mot den spänningsomlagring som uppstår i ett tryckarmerat tvärsnitt under utmattningsförloppet. Betongen får större deformation än stålet vilket innebär att tryckkraften successivt överflyttas från betongen till tryckarmeringen. Detta innebär att en pulserande trycklast efter en tid kan åstadkomma dragspänningar i "betongtryckzonen" vid de lägsta tryckspänningsnivåerna. Härvid kan ogynnsam uppsprickning av betongtryckzonen uppstå. Se även ett beräkningsexempel i fig 34.1 av Aas-Jakobsen.

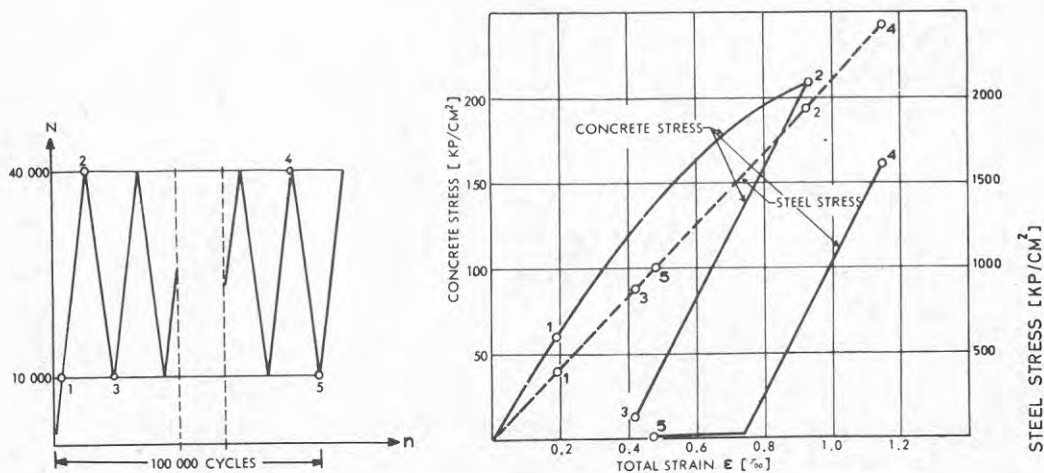


Fig 34.1 Exempel på beräknade spänningar och töjningar i stål och betong [31-18].

Böjdragbrott med brott i armeringen har behandlats i kapitel 33. Ett kompletterande problem är dock om utformningen och storleken av betongelementen i vilka armeringen ingjutes, har någon inverkan på armeringens hållfasthet. Här har undersökningar gjorts för vissa elementutformningar.

Hanson et al [31-15e] har varierat effektiva höjden i T-balkar (15, 25 och 45 cm). Någon signifikant inverkan på armeringens utmattningshållfasthet kunde ej konstateras.

Soretz [31-15c] gjorde prov på sex olika balktyper, se fig 34.2.

Balkarna B hade 14% bättre hållfasthet än balkarna A. Mellan B och C kunde ingen signifikant skillnad upptäckas. Dock hade B större spridning än C. Balktypen B (och i viss mån A) användes för första gången av Rehm [33-4] som använde denna balktyp generellt vid armeringstester. Rehm studerade även inverkan av bockning hos armeringen. Även Tor-Ulf Weck [31-21] har gjort prov med denna vinkelformiga balktyp. Även om krökningsradien på armeringsbocken i balkmitt ej görs för liten, visar försöken att brotten uppstår på ställen där bockningsverktygen anbringats.

En jämförelse mellan de tre balktyperna D,E,F i Soretz försök visar ingen signifikant skillnad.

Sprickbredden har i någon mån studerats vid utmattningsprov. Såsom vid statisk belastning ger kamstålsarmering mindre sprickbredder än slätstålsarmering.

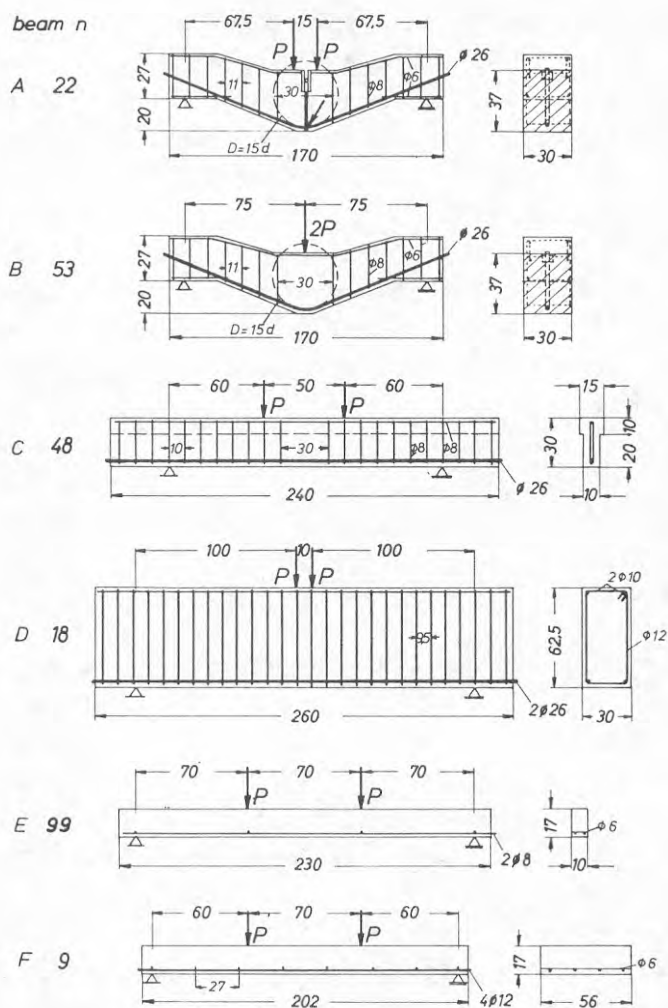


Fig 34.2 Balkutforming av provade balkar. Balktyp A-F.
 (Siffran efter balktyp avser antalet provade balkar) [31-15c].

34.3 Skjuvbrott, förankringsbrott

Dessa brottyper är undersökta i betydligt mindre omfattning än böjbrott. De undersökningar som gjorts visar ibland mycket låg utmattningshållfasthet i förhållande till motsvarande statisk hållfasthet.

Tabell 34.1 visar en sammanställning av uppgifter i huvudsak hämtade från Westerberg [31-13] och Hawkins [31-15j]. Utmattningshållfastheten anges i % av statisk hållfasthet.

Tabell 34.1 Utmattningshållfasthet i % av statisk hållfasthet
Skjuvning, balkar utan skjuvarmering.

le Camus 1946	[34-1]	48%	10^6 lastväxlingar
Chang och Kesler 1958	[34-2][34-3]	50%, 63%	10^6 "
Stelson och Cernica 1958	[34-4]	65%	66000 lastväxlingar
ACI Committee 215, 1960	[31-17]	40%	rekommendation
Verna och Stelson 1962	[34-5]	47%	10^6 lastväxlingar
Higai 1970	[34-6]	55%	
Westerberg 1973	[34-7]	58%	10^6 "

Skjuvning, balkar med skjuvarmering

Le Camus 1946	[34-1]	41-47%	10^6 lastväxlingar
---------------	--------	--------	----------------------

Förankringsbrott

Verna och Stelson	1962	[34-5]	40%	75000 "
Verna och Stelson	1963	[34-8]	55%	55000 "
Barnoff	1970	[34-9]	65%	10^6 "

Verna och Stelson [34-5] provade 60 st armerade betongbalkar utan skjuvarmering. Man erhöill fyra olika brotttyper: skjuvbrott, förankringsbrott, tryckbrott och armeringsbrott. (Fig 34.3 hämtad från [31-13]).

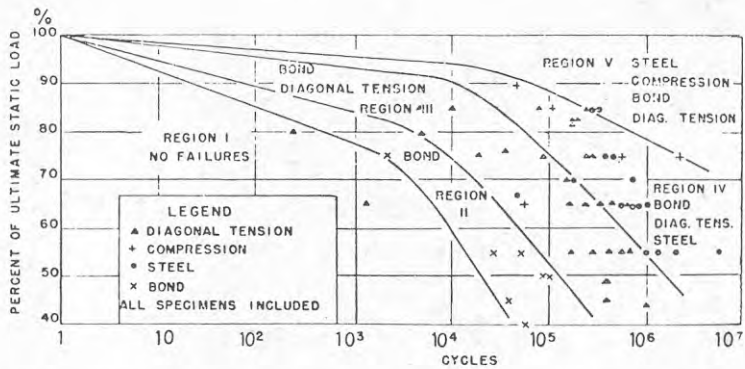


Fig 34.3 Belastningsnivå och antal lastväxlingar vid olika typer av utmattningsbrott hos armerade balkar (skjuvbrott, tryckbrott, armeringsbrott och förankringsbrott). [34-5][31-13].

Utmattningshållfasthetens förhållande till resp statisk hållfasthet för olika brottyper är avsatta mot antalet lastväxlingar. Värdena har delats in i områden (regioner) efter brotttyp. Det framgår att förankringsbrott har lägst relativ utmattningshållfasthet. Därefter kommer skjuvbrott som näst lägst.

Hawkins [31-15j] har gått igenom tidigare publikationer angående utmattningsförsök på skjuvning och förankring och har även tillsammans med sina medhjälpare gjort egna försök.

Vid dessa försök erhöles som lägsta värden på utmattningshållfastheten vid förankringsbrott 40% av statisk hållfasthet. Endast maximalspänningen anses vara av betydelse. Inkrypningen av armeringen vid balkände har uppmätts. Denna börjar efter ett antal lastväxlingar och fortsätter sedan nästan linjärt med lastväxlingarna till brott. Balkutformningar där spjälkning längs armeringen lätt kan utbildas har lägre förankringshållfasthet. Någon inverkan av ingjutningslängden, armeringens kamhöjd samt belastningshastigheten på den relativa utmattningshållfastheten kunde ej upptäckas. (Utmattningshållfastheten relateras då till den statiska hållfastheten. Alla förankringsbrott föregicks av böjsprickor i balkarna.

Utmattningshållfastheten vid förankring har i Sverige provats av Tepfers [31-19]. Huvudsyftet med denna undersökning var att få fram en armeringsskarv som är jämsstark med oskarvad armering. Detta föreslogs ske genom omlottnläggning samt omslutande spiralarmering. Utmattningshållfastheten har undersökts både utan och med spiralarmering.

Tepfers har vid en teoretisk beräkning av armeringsskarven utan spiralarmering gjort följande förutsättningar: spänningsfördelningen längs skarven är likformigt fördelad och lika som vid statisk last. Brottet antas ske som dragbrott i en omgivande betongring. Tepfers har vid tidigare försök konstaterat att draghållfastheten och tryckhållfastheten för betong är lika i förhållande till resp statisk hållfasthet. Medelspänningens inverkan kunde karakteriseras med ett Goodman-diagram.

Den teoretiska beräkningsmodellen har prövats på cirka 40 st balkar. Relativt god överensstämmelse med den teoretiska modellen erhöles. Värden på utmattningshållfastheten ner mot 60% statisk hållfasthet uppmättes.

En försöksserie på 18 andra balkar gjordes även med en föreslagen spiralarmering runt armeringsskarven. Här erhöles skarv som är minst jämstark med armeringen i övrigt.

För skjuvbrott anger Hawkins [31-15j] att maximala huvuddragspänningen vid icke skjuvarmerade balkar bör begränsas till 50% av statisk hållfasthet. När maximiskjuvspänningen för skjuvarmerade balkar överskrider 60% av statisk skjuvhållfasthet bör ej betongens bidrag räknas med. All tvärkraft tas då upp av skjuvbygglarna. Byglarnas töjning har uppmätts vid försök och redan efter ett mindre antal lastväxlingar får byglarna en töjning som motsvarar en mycket hög spänning. Det antogs att huvuddelen av tvärkraften upptas av byglarna så snart sprickorna börjar slå upp i balkarnas dragzon.

Vid höga lastnivåer bestäms således skjuvutmattningskapaciteten av bygelarmeringen. Spänningsviddens förhållande till antalet lastväxlingar utgör den bästa beskrivningen. Bygelarmeringen är dessutom avsevärt försvagad av bockningen. (Jfr avsnitt 33.1). Brottet i byglarna uppstår normalt i bockningen. Hawkins anger således att skjuvkapaciteten skall baseras på den spänningsvidd som erhålles i balkklivsarmeringen under förutsättning att betongen ej medverkar. Spänningsvidden skall begränsas till hälften av vad som tillåtes vid utmattning av obockad armering.

Hawkins anger även att förankringsbrott och skjuvbrott inte är oberoende av varandra. Ett brott i skjuvområdet på en balk utgörs ofta av kombinationer av skjuv- och förankringsbrott, men även böjsprickor inverkar starkt.

Vid dimensionering av armerade betongkonstruktioner bör således inte bara böjspänningssnitt studeras för utmattning. I ännu högre grad bör en utmattningsbeaktelse göras på "skjuvspänningsområdet".

I Sverige har Westerberg [34-7] provat utmattningshållfastheten vid skjuvning. Provet omfattade 22 balkar både med och utan skjuvarmering.

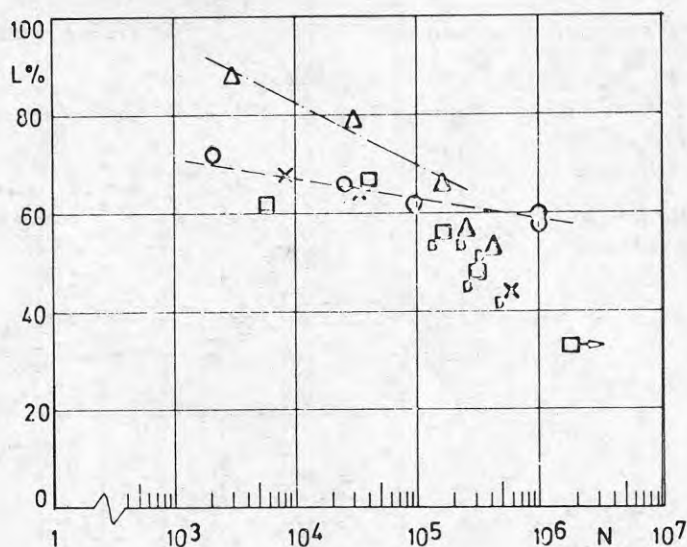


Fig 34.4 Sammanställning av försöksresultat. L är lastnivån i procent av statisk brottlast för respektive balktyp. N är antalet lastväxlingar \triangle = bygelarmerad balktyp, O, \square och X = icke skjuvarmerade balktyper. "B" betecknar böjbrott, pil betecknar balk som ej fått utmattningsbrott. I övrigt gäller skjuvbrott [34-7].

Balkarna var dimensionerade för att få statistiskt skjuvbrott. Trots det fick vissa balkar brott i böjdragarmeringen.

Minsta skjuvbrottvärdet 58% är inte särskilt lågt. Däremot erhöles böjbrott i dragarmeringen vid anmärkningsvärt låga nivåer (44-57%). Westerberg anger som möjlig orsak att påkänningsdifferens förelåg mellan armeringsstängerna i en och samma balk. Fig 34.4 visar även att skjuvarmerade balkar har högre relativ hållfasthet åtminstone vid ett mindre antal lastväxlingar.

Ett relativt stort antal mätdata på deformationer erhöles vid denna provning. En fackverksmodell användes för att teoretiskt beräkna dessa.

Frågan om hur den statiska hållfastheten påverkas av ett antal föregående lastväxlingar har studerats av Verna och Stelson [34-8][31-13] för olika brottyper.

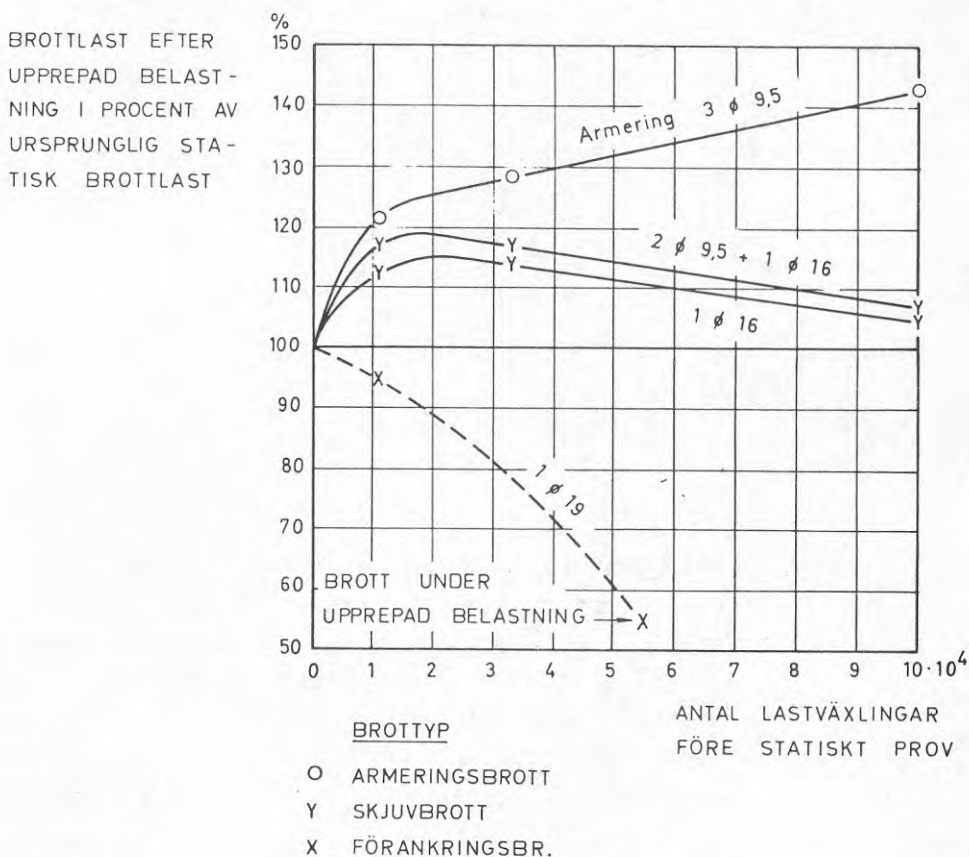


Fig 34.5 Upprepad belastnings inverkan på bärförmågan hos armerade balkar [34-8][31-13].

Försöken visar att endast det statiska förankringsbrottet påverkas menligt av föregående lastväxlingar.

Försök med dragning av armeringsjärn utförda av Grönqvist [31-20] indikerar också att den statiska hållfastheten ej påverkas av tidigare upprepade lastpåläggning.

Med anledning av risken för jordskalv längs Nordamerikas västkust pågår sedan några år vid University of California, Berkeley, studier av konstruktioner som utsätts för varierande, upprepade laster av olika slag. Stål- och betongkonstruktioner undersöks härvid under cyklisk belastning varvid speciellt styvhetsreduktionen studeras. Utmattningsområdet vid låga last-cykel-tal är ett väsentligt delområde [34-10], [34-11]. Bland annat har Shao-Yeh Ma under ledning av Vitelmo Bertero och Egor Popov undersökt de problem som uppträder vid balk-pelarfästningar i betongkonstruktioner. Härvid har förankringsfrågor och frågor rörande den tvärkraftsupptagande förmågan studerats experimentellt och med finit element metod [34-12]. Beträffande vidhäftningen har man konstaterat att en större vidhäftningspåkänning kan upptas i en tryckt stånggäde än i en dragen stånggäde. Brott i vidhäftningen fann man i hög grad vara beroende av belastningsförloppet. Brott-förloppet beror av såväl de maximala spänningar som uppträder som av de töjningar som erhålls vid på- och avlastningar i det inelastiska området.

Frågan om utmattningshållfasthet i armerade betongkonstruktioner behandlas även i [27-7].

35. SPÄNNBETONG

Spännbetong skiljer sig från slakarmerad betong genom att armeringen i spännbetong har en spännkraft även utan yttre belastning. Spännbetongen utförs dessutom normalt med högre materialkvaliteter. Spännarmering är också ofta speciell i förhållande till vanlig ospänd armering. Detta har behandlats summariskt i avsnitt 33.3.

Spännbetong och betong med ospänd armering skiljer sig således i vissa avseenden. Till stora delar är dock egenskaperna lika. I detta kapitel behandlas mycket kortfattat de speciella egenskaperna hos spännbetong.

Rowe [31-10] hävdar i en översikt år 1957 att utmattningshållfastheten för spännbetongen är mycket god, åtminstone så länge betongen hålls osprucken. Rowe varnar dock för att betongens krympning och krypning eller stålets relaxation kan medverka till uppsprickning. För spruckna tvärsnitt anger han att spännarmeringens utmattningsegenskaper normalt är avgörande.

Tidigare svenska normer för dimensionering av spännbetong tillät ej uppsprickning av betongen i dragzonen. I de nuvarande normerna accepteras dock en viss uppsprickning varvid problemet med utmattning i spännarmeringen blir mera påtagligt.

Nordby [31-11] påpekar ett speciellt förhållande för spännbetongen vid utmattning. Spänningsvariationen i spännarmeringen är relativt liten men verkar kring en hög medelnivå.

ACI Committee 215 [31-16] anser att spänningsbilden vid böjspänningar i spännbetong är mycket komplex i jämförelse med slakarmerad betong. Detta beror på att böjsprickor måste uppkomma för att utmattning i armeringen skall vara aktuell. Därför måste analyser som beaktar uppsprickningen användas. ACI hänvisar till följandeskrifter [35-1] - [35-5] [31-15m]. För böjtryckbrott i betongen

gäller samma förhållanden som för slakarmerad betong. Spänningsvidden för dragarmering begränsas till 10% av spännstålets brotthållfasthet för linor och stänger och till 12% för trådar. Detta under förutsättning att minimispänningen begränsas till 60% av draghållfastheten. ACI anger dock vissa rapporter som indikerar att högre värden skulle vara möjliga [31-15m] [35-6]. Om spännarmeringen ej är direkt kringgjuten skall utmattning i ändförankringen eller i ev skarvning beaktas i särskilt hög grad. Som riktvärde anger ACI att utmattningshållfastheten bör begränsas till hälften av vad som gäller för spännarmering i övrigt.

De flesta provningar av spännarmering har utförts fritt i luften (utan ingjutning). Vid ingjutning har flera forskare erhållit lägre utmattningshållfasthet [35-7] [35-6]. Abeles et al [31-15k] menar att detta är beroende av spännarmeringens vidhäftning till betongen. Försök där vidhäftningen var utmärkt visar en viss ökning av utmattningshållfastheten vid ingjutning. Vid ordinär vidhäftning erhöles ingen förändring. Då vidhäftningen gjordes mycket dålig blev även spännarmeringens utmattningshållfasthet väsentligt lägre. Detta beror på att stora sprickor slår upp som förorsakar lokala dragspänningstoppar. Dessutom uppstår friktion mellan stål och betong vid varje lastväxling.

Vid dålig vidhäftning måste större kraft upptas i ändförankringarna. Dessa har betydligt sämre utmattningshållfasthet än spännarmeringen i övrigt [35-10].

I spännarmerade konstruktioner där både spänd och ospänd armering användes uppstår frågan om medelspänningens inverkan. Bennett [31-15n] har visat att denna inverkan kan grundas på ett modifierat Goodmandiagram.

Utmattningshållfastheten vid skjuvning kan enligt ACI betraktas i princip på samma sätt som för slakarmerad

betong. Relativt sena undersökningar [35-6] [35-8] har visat att förspända balkar har anmärkningsvärt hög utmattningshållfasthet vid skjuvning, även under mycket prövande lastbetingelser.

Vad gäller vidhäftningsbrott i spännarmeringen anser Nordby [31-11] att detta är sällsynt och endast inträffar under ogynnsamma omständigheter. Emellertid är denna brottypp ofta avgörande i vissa konstruktioner.

Konstruktioner utförda i förespänd betong där armeringen består av linor eller trådar vilka saknar ändförankringar är känsliga för vidhäftningsbrott då armeringens förankringssträcka är kort. Ett exempel på detta är järnvägsslipers av förespänd betong.

Den statiska brotthållfastheten är enligt Abeles [35-9] opåverkad av en föregående upprepad lastpåläggning, (förutsatt att inte utmattningsbrott inträffade då).

Se även [35-11], [35-12], [35-13].

36. FORSKNINGSBEHOV AVSEENDE UTMATTNING AV
 ARMERADE BETONGKONSTRUKTIONER

Nedan ges först exempel på pågående och planerad forskning angående utmattning av armerade betongkonstruktioner. Därefter redovisas områden inom ämnet där ytterligare forskningsinsatser bedöms vara angelägna. Här upptas även sådana områden där forskning redan pågår eftersom resultatet av denna ännu ej kan överblickas.

36.1 Exempel på pågående och planerad forskning

Information om pågående forskningsprojekt i de nordiska länderna lämnades vid ~~det~~ Nordiska Betongforskningsmöte som ägde rum i Oslo i augusti 1976.

I Sverige pågår vid Chalmers tekniska högskola i Göteborg två undersökningar. Ralejs Tepfers vid Avdelningen för Husbyggnadsteknik arbetar med båda. I den ena undersöks betongens utmattning orsakad av omväxlande tryck- och dragspänningar i betongkuber [36-2]. I den andra undersökningen studeras delskadehypotesers tillämplighet vid utmattning av betong [36-3].

Vid Forskningsinstitutet for Cement og Betong (FCB) i Trondheim, Norge studeras "utmattning av armert betong". O Haugland, A Hofsføy/S Hafskjold genomför detta projekt. Man planerar att undersöka utmattningsegenskaperna för armerade betongkonstruktioner utsatta för upprepade och varierande laster (vågkrafter). Dessutom avser man att studera vilken effekt upprepad/varierande last har på vattenfyllda sprickor i betong. Vissa inledande försök på armeringsjärn har redan utförts.

K Waagaard och B Pedersen arbetar vid Det Norske Veritas i Oslo med "utmattning av armert betong". Huvudsyftet med undersökningen är att framta och utveckla beräkningsmetoder och konstruktionskriterier för offshore betongkonstruktioner utsatta för utmattningslast av varierande slag. Som mest angeläget att utreda nämns utmattningskapacitet i betongtryckzonen vid reversibla laster samt effekten av portryck i betong.

I Danmark vid Danmarks Tekniske Højskole Afdelingen för Bærende Konstruktioner, genomförs vissa utmattningsförsök som en del av en större undersökning avseende skjuvning i armerade betongbalkar.

Vid Helsingfors tekniska högskola i Finland studeras armeringsstänger med speciellt hög utmattningshållfasthet vilka provas i saltvatten och i betong. Detta utföres av Antti Kari vid metallurgiska laboratoriet.

Försök avseende vridningsutmattning av förspända betonglådsbalkar har utförts i England av Arthur Edwards. Provningsen utfördes vid Imperial College i London.

Författarna besökte Cement and Concrete Association i april 1976. Härvid uppgav R E Rowe att man väntar sig forskningsuppdrag avseende utmattning av betongkonstruktioner inom den närmaste tiden. Dr Rowe omtalade även att man f n arbetar med utmattning vid universiteten i Leeds och Cardiff.

Information om pågående och planerad forskning i USA erhöles vid en betongkongress i Mexico City i november 1976 [36-1]. Kongressen arrangerades av American Concrete Institute (ACI) i samarbete med Instituto Mexicano del Cemento Y del Concreto, A.C (IMCYC).

Vid ett möte med Committee 215 - Fatigue of Concrete framkom följande:

Neil Hawkins meddelade att planer finns i Seattle på att göra utmattningsprover på betongkonstruktioner under vatten i en trycktank.

Surendra Shah avser att tillbringa ett nio-månaders sabbatsår i Delft i Holland. Han skall där bl a undersöka utmattning av fiberarmerad betong.

Utmattningsförsök med järnvägssliprar av betong har enligt Neil Hawkins utförts vid Portland Cement Association (PCA) i Skokie, Illinois.

Paul Zia meddelade att man vid University of North Caroline utfört sprickbreddsmätningar på förespända balkar vid utmattningsförsök.

Vid PCA har förespända balkar innehållande 22 spännlinor provats. Man erhöll härvid något lägre utmattningshållfasthet än vid tidigare försök med små provkroppar. Detta förklarades med storlekseffekten.

Även utmattningsförsök på förankring av bultar i betong har utförts, bl a i Texas av Carl Franke.

Dessutom diskuterades i kommittén huruvida det var lämpligt att bilda "sub-kommitteer" till Committee 215. Dessa underkommitteer skulle då arbeta med frågor rörande off-shore konstruktioner, sprickbredder och epoxibehandlade armeringsstänger.

36.2 Behov av ytterligare forskning

Ett övergripande och långsiktigt mål bör liksom för stålkonstruktioner vara att få fram en komplett teori för utmattningsförloppet (se kap 26, första stycket).

Vid tidigare undersökningar som gällt utmattning av armerade betongkonstruktioner har i stor utsträckning relativt små provkroppar använts. De enskilda materialegenskaperna hos betong och armering är också relativt väl kända. Mindre kända är dock samverkansproblem mellan betong och armering samt dess utmattningsegenskaper i normala konstruktioner. Generellt bör således en större andel av framtida försök utföras på större konstruktioner där samverkanssegenskaper mellan betong och armering undersöks.

Dock återstår många enskilda materialegenskaper som ej är tillräckligt utredda i samband med utmattning. Som exempel kan nämnas användning av rostfri eller höghållfast armering, skarv- eller häftsvetsad armering etc. Även kamutformningens inverkan bör utredas bättre.

Betong utsatt för spänningar i flera riktningar är ett eftersatt område samt då spänningen växlar mellan tryck och drag. Ett specialfall är betong utsatt för vatten-tryck av utmattningskaraktär vilket har aktualitet i offshorekonstruktioner. Här är det viktigt att få veta hur betongen uppför sig vid pulserande tryckspänning då den samtidigt upprepade gånger utsätts för spänningar som orsakar uppsprickning av betongen samt hur vatten-trycket inverkar på detta.

"Wöhlerkurvans" båda ändar måste utredas bättre. Lågcyklisk utmattningsföreteelse förekommer bl a vid jordbävningar medan högcyklisk utmattningsföreteelse förekommer i offshorekonstruktioner, fundament till maskinkonstruktioner etc.

Flertalet utmattningsförsök har hittills utförts med en belastning som för varje provstycke varierat mellan två lastnivåer. Man bör nu undersöka hur en oregelbundet varierande lastinverkan påverkar utmattningshållfastheten. Även viloperioder mellan lasterna bör förekomma. Härvid undersöks Palmgren-Miners delskadehypotes. Detta är nödvändigt för att materialen skall kunna utnyttjas i verkliga konstruktioner på ett riktigt sätt.

I jämförelse med böjning av armerade betongtvärsnitt är problem som sammanhänger med skjuvning och förankring undersökta i betydligt mindre grad. Forskningsinsatser bör läggas på att undersöka dessa problem. Eftersom flera brottfenomen hänger samman vore det önskvärt att undersöka sammansatta brotteffekter där både skjuvning, förankring och böjning uppträder. En utökning av problemet där även vridning inverkar anses angelägen.

Provningarna bör utföras på så verklighetstroga konstruktioner som möjligt, där dimensioneringen utförs enligt aktuella normer. Detta för att inte någon speciell brotttyp skall framhåvas.

Utmattning av armerade betongkonstruktioner är en komplex företeelse. Åtskilliga faktorer påverkar utmattningshållfastheten. Denna inverkan är ofta utredd till riktning men ej till storlek. Dvs man vet att en viss faktor inverkar åt något håll men man vet ofta inte hur mycket den inverkar.

De mekanismer som verkar vid utmattningsbrott är trots omfattande forskning ej helt klarlagda. Det borde t ex undersökas huruvida brottmekaniska lagar skulle kunna användas även för betong.

Deformationsegenskaperna hos armerad betong utsatt för upprepad lastpåverkan är ett stort område där mycket är kvar att göra. Detta anses vara en mycket angelägen forskningsuppgift.

Sprickbredden bör studeras. Detta är angeläget bl a för konstruktioner i vissa miljöer där korrosion av armeringen kan bli aktuell, exempelvis marina konstruktioner. För dessa konstruktioner är korrosionens inverkan på armeringens utmattningshållfasthet ett mycket viktigt område, som fordrar stora forskningsinsatser. Här är frågan om belastningshastighetens inverkan mycket väsentlig. Även rostskyddsmetoder för armering, som t ex epoxibehandling bör undersökas.

Spännbetongkonstruktioner bör undersökas ytterligare. Nuvarande spännbetongnormer tillåter uppsprickning av betongen i dragzonen. Detta innebär att utmattning i spännarmeringen blir mera påtaglig. Skarvings- och förankringsanordningar för spännarmeringen bör undersökas. Mer data för vissa delar av S-N-kurvorna för armeringen samt för spännkraftsminskningen under utmattningsförloppet bör framtas. Uppsprickning av betongen, vidhäftning-förankring av spännarmeringen är centrala fenomen i spännbetongkonstruktioner vilka bör studeras ytterligare liksom frågan om skjuvning under samtidig axiellast. Jämförelse mellan före- och efterspända konstruktioner bör göras.

Utvecklingen går mot en ökad användning av delvis förspända konstruktioner där ovanstående problem accentueras. För dessa konstruktioner måste därtill samspelet mellan spänd och ospänd armering i samma tvärsnitt särskilt studeras.

Material med högre hållfasthet samt nya materialsammansättningar (som t ex. "fiberbetong") utvecklas där utmattningsegenskaperna måste utredas.

Införande av nya konstruktionstyper kräver nya forskningsinsatser. Offshore konstruktioner och vindkraftverk är exempel på konstruktioner som klart är påverkade av utmattningslast. Järnvägssliprar är också en konstruktion som är kraftigt utsatt för utmattningslast. Övergången till betongslipers ställer krav på ytterligare forskning.

Även i många befintliga konstruktionstyper har utmattningsproblem uppdagats. Det kan exempelvis gälla fundament för maskiner, kvarnar, turbiner etc. Här är både hållfasthets- och deformationsegenskaperna viktiga.

Övergången till alltmer tunnväggiga betongkonstruktioner för med sig att faran för utmattningslast ökar.

Mer utförliga metoder att beakta utmattningslast vid dimensioneringen krävs. Säkerhetsaspekter samt frågan om när utmattningslast vid små lastcykeltal överhuvudtaget blir aktuell är viktiga områden som kräver ökade insatser.

Frågan om behovet av ytterligare forskning behandlas även i [36-4].

37. REFERENSER

- [31-1] Westerberg Bo: Utmattning av betongkonstruktioner. Föredrag vid Dansk Selskab for Bygningsstatik 1975-01-04, 39 sid.
- [31-2] Considère M: Influence des armatures métalliques sur les propriétés des mortiers et bétons. Compte Rendu, l'Académie des Sciences, V.127, pp 992-995, 1898. (Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-3] De Joly: La Resistance et L'Élasticité des Ciments Portland. Annales, Ponts et Chaussées, Memoires, V.16, Series 7, pp 198-244, 1898. (Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-4] Van Ornum J L: Fatigue of Cement Products. Transactions, ASCE, V 51, p 443, 1903. (Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-5] Van Ornum J L: Fatigue of Concrete. Transactions, ASCE V 58, pp 294-320, 1907. (Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-6] Clemmer H F: Fatigue of Concrete. Proceedings, ASTM, v 22, pp 409-419, 1922.

Se även:

Bulletin 18, Illinois Division of Highways,
s 16-18, jan 1922

Engineering News Record, vol 90, jan 11,
s 57, 1923.

Bulletin 21, Illinois Division of Highways,
s 22-25, jan 1924

Transactions, ASCE, vol 87, s 1180-1222, 1924.
(Referenserna hämtade från [31-13]).

- [31-7] Hatt W K: Researches in Concrete. Bulletin 24, Purdue University, s 44-55, 1925.

Se även:

Proceedings, ACI, vol 18, s 167-173, 1922.

" , ASTM, vol 23, part II, s 329-340, 1923.

Proceedings, Highway Research Board, vol 4,
s 47-60, 1924.

Proceedings, Highway Research Board, vol 5,
s 112-118, 1925.

Proceedings, ACI, vol 22, s 364-385, 1926.

Bulletin 34 Purdue University, s 34-53, 94-95,
1928.

(Referenserna hämtade från [31-13]).

- [31-8] Probst E: Untersuchungen über den Einfluss wiederholter Belastungen auf Elastizität und Festigkeit von Beton und Eisenbeton. Zeitschrift, Technische Hochschule Karlsruhe, 1925.
(Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-9] Mehmel A: Untersuchungen über den Einfluss häufig wiederholter Druckbeanspruchungen auf Druckelastizität und Druckfestigkeit von Beton. Mitteilungen, Institut für Beton und Eisenbeton an der Technischen Hochschule, 74 pp, Karlsruhe 1926.
(Referensen hämtad från [31-17]).
- [31-10] Rowe R E: An appreciation of the work carried out on fatigue in prestressed concrete structures. Magazine of Concrete Research, vol 9, No 25, Cement and Concrete Association, pp 3-8, London 1957.
- [31-11] Nordby, Gene M: Fatigue of Concrete - A Review of Research. Journal of the American Concrete Institute, Vol 30, No 2, pp 191-219, aug 1958.
- [31-12] Murdock John W: A critical review of research on fatigue of plain concrete. Bulletin 475, Engineering Experiment station, University of Illinois, Urbana, 25 pp, 1965.
- [31-13] Westerberg Bo: Utmattning av betong och armerad betong - En litteraturöversikt. Rapport 22/69 från Byggforskningen, 68 sidor, Stockholm 1969.

[31-14] Freitag W: Das Ermüdungsverhalten des Betons. Stand der Kenntnisse und der Forschung. Beton 5 och Beton. 6, sid 192-194, 247-252, 1970.

[31-15] Abeles Symposium: Fatigue of Concrete. ACI Publication SP-41, 350 pp, Detroit 1974.

De 15 följande referenserna utgör delar i Abeles Symposium [31-15].

[31-15a] Awad M E, Hilsdorf H K: Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained loads, pp 1-14.

[31-15b] Raithby KD, Galloway JW: Effects of moisture condition, age, and rate of loading on fatigue of plain concrete, pp 15-34.

[31-15c] Soretz S: Contribution to the fatigue strength of reinforced concrete, pp 35-58.

[31-15d] Takhar SS, Jordaan IJ, Gamble BR: Fatigue of concrete under lateral confining pressure, pp 58-70.

[31-15e] Hanson JM, Somes MF, Helgason T: Investigation of design factors affecting fatigue strength of reinforcing bars - test program, pp 71-106.

[31-15f] Helgason T, Hanson JM: Investigation of design factors affecting fatigue strength of reinforcing bars - statistical analysis, pp 107-138.

[31-15g] Jhamb IC, MacGregor JG: Effect of surface characteristics on fatigue strength of reinforcing steel, pp 139-168.

[31-15h] Jhamb IC, MacGregor JG: Stress concentrations caused by reinforcing bar deformations, pp 169-182.

[31-15i] Hawkins NM, Heaton LW: Fatigue characteristics of welded wire fabric, pp 183-202.

- [31-15j] Hawkins NM: Fatigue characteristics in bond and shear of reinforced concrete beams, pp 203-236.
- [31-15k] Abeles PW, Brown II EI, Hu CH: Fatigue resistance of under-reinforced prestressed beams subjected to different stress ranges; Miner's hypothesis, pp 239-278.
- [31-15m] Abeles PW, Brown II EI, Hu CH: Behavior of under-reinforced prestressed concrete beams subjected to different stress ranges, pp 279-300.
- [31-15n] Bennett EW: Fatigue of reinforcement in beams with limited prestress, pp 301-314.
- [31-15p] Hawkins NM: Fatigue strength of concrete slabs reinforced with wire fabric, pp 315-330.
- [31-15q] Batchelor B. dev, Hewitt BE: Are composite bridge slabs too conservatively designed? - Fatigue studies, pp 331-346.
- [31-16] ACI Committee 215: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. ACI Journal, Proceedings Vol 71, No 3, pp 97-121, march 1974.
- [31-17] ACI Committee 215: Fatigue of Concrete. ACI Bibliography No 3. American Concrete Institute, 38 pp, Detroit 1960.
- [31-18] Aas-Jakobsen Knut: Fatigue of concrete beams and columns. Bulletin No 70-1, Institutt for Betongkonstruksjoner, Norges Tekniske Högskole, 148 sid, Trondheim september 1970.

- [31-19] Tepfers Ralejs: A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars. Avd för Betongbyggnad, Chalmers Tekniska Högskola, Publ 73:2, 328 sid, Göteborg 1973.
- [31-20] Grönqvist Nils-Ove: Fatigue strength of reinforcing bars. ACI Publication SP-26, Concrete bridge design, Vol 2, pp 1011-1059, Detroit 1971.
Se även:
Static strength of reinforcing bars formerly subjected to pulsating load. Samma publikation, pp 1060-1099.
- [31-21] Weck Tor-Ulf: Utmattning av armerade betongbalkar samt utmattningsbelastningar på broar. Institutionen för Konstruktionsteknik, Helsingfors Tekniska Högskola, 157 sid, Otnäs 1975.
- [31-22] Jhamb IC, MacGregor JG: Fatigue of reinforcing bars. Structural Engineering Report No 39, Department of Civil Engineering, The University of Alberta, pp 225, Edmonton, Alberta 1972.
- [32-1] Bennett EW, Muir SE St J: Some fatigue tests of highstrength concrete in axial compression. Magazine of Concrete Research, Vol 19, No 59, pp 113-117, Cement and Concrete Association, Slough 1967.
- [32-2] Ople FS, Hulsbos CL: Probable fatigue life of plain concrete with stress gradient. ACI Journal, Proceedings, Vol 63, No 2, pp 59-81, Detroit 1966.

- [32-3] Hilsdorf HK, Kesler CE: Fatigue Strength of Concrete under Varying Flexural Stresses. ACI Journal, Proc, Vol 63, No 10, pp 1059-1075, Okt Detroit 1966.
- [32-4] Tepfers Ralejs, Görlin Jan, Samuelsson Tommy: Concrete subjected to pulsating load and pulsating deformation of different pulse waveforms. Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Byggnadsteknik Byggnadsakustik och Byggnadskonstruktion 72:13, 39 sidor, Göteborg 1972.
- [32-5] Herzog Max: Traglast und Rotationsfähigkeit von Betongelenken. Strassen- und Tiefbau, Vol 30, Heft 10, 5 pp, 1976.
- [32-6] Gaede K: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 144, 1962.
(Referensen hämtad från [31-18]).
- [32-7] Mehmel A, Kern E: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Strandbelastung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 153, 1962.
(Referensen hämtad från [31-18]).
- [32-8] Östlund Per-Olof, Elfgrén Lennart: Inverkan av fleraxiell last och temperatur på betong. Forskningsrapport TULEA 1976:05, Högskolan i Luleå, 86 pp, Luleå 1976.
- [32-9] Kutti Tomas, Öqvist Björn: Utmattningshållfasthet för lättballastbetong. Chalmers tekniska högskola, Avd för Byggnadsteknik, 75:4, Examensarbete, Göteborg maj 1975.

- [33-1] Soretz S: Fatigue Behavior of High Yield Stress Reinforcement. Concrete and Construction Engineering, Vol 60, No 7, pp 272-280, 1965.
(Referensen hämtad från [31-22]).
- [33-2] Wascheidt M: Zur Frage der Dauerschwingfestigkeit von Betonstählen in einbetonierten Zustand (On the Fatigue Strength of Embedded Concrete Reinforcing Steels). Doctoral Thesis, Technical University of Aachen, Germany 1965, also abbreviated version, Technische Mitteilungen Krupp-Forschungsberichte, Vol 24, No 4, pp 173-196, 1966.
(Referensen hämtad från [31-22]).
- [33-3] MacGregor JG, Jhamb IC, Nuttall N: Fatigue Strength of Hot Rolled Deformed Reinforcing Bars, ACI Journal, Proceedings, Vol 68, No 3, pp 169-179, 1971.
- [33-4] Rehm Gallus: Contributions to the Problem of the Fatigue Strength of Steel Bars for Concrete Reinforcement. Preliminary Publication, 6th Congress of the IABSE (Stockholm 1960), International Association for Bridge and Structural Engineering, pp 35-46, Zürich 1960.
(Referensen hämtad från [31-16]).
- [33-5] Pfister JF, Hognestad Eivind: High Strength Bars as Concrete Reinforcement, Part 6, Fatigue Tests. Journal, PCA Research and Development Laboratories, Vol 6, No 1, pp 65-84, 1964. Also, Development Department Bulletin No D74, Portland Cement Association.
(Referensen hämtad från [31-16]).

- [33-6] Burton KT, Hognestad Eivind: Fatigue Test of Reinforcing Bars-Tack Welding of Stirrups. ACI Journal, Proceedings, Vol 64, No 5, pp 244-252, 1967. Also, Development Department Bulletin No D116, Portland Cement Association. (Referensen hämtad från [31-16]).
- [33-7] Pasko TJ: Final Report on Effect of Welding on Fatigue life of High Strength Reinforcing Steel Used in Continuously Reinforced Concrete Pavements. Pavement Systems Group, Federal Highway Administration, Washington 1971. (Referensen hämtad från [31-15i]).
- [33-8] Cullimore MSG: The Fatigue Strength of High Tensile Steel Wire Cable Subjected to Stress Fluctuations of Small Amplitude. "Mémoires, Abhandlungen, Publications", 32-1, International Association for Bridge and Structural Engineering, pp 49-56, Zürich 1972.
- [33-9] Hanson JM, Somes NF, Helgason TH, Corley WG, Hognestad E: Fatigue Strength of High Yield Reinforcing Bars. Interim Report, National Cooperative Highway Research Program, Project No 4-7, Highway Research Board, 45 pp, Februari 1970. (Referensen hämtad från [31-22]). ([31-15e] utgör en förkortad version av denna skrift).
- [33-10] Teunissen NLGM, van Lent PH: De metallurgische lasbaarheid van hoogwaardig betonstaal med betrekking tot de kruislasverbinding (Högvärdigt armeringsståls metallurgiska svetsbarhet med avseende på häftsvetsning av korsförband). Las-techniek 39 (1973):7, s 176-181, Delft 1973. (Referensen hämtad från [33-12]).

- [33-11] Teunissen NLGM, van Lent PH: Metallografisch en mechanisch onderzoek aan kruislasverbindingen in hoogwaardig betonstaal (Metallografisk och mekanisk undersökning av häftsvetsade förband i högvärdigt armeringsstål). Lastechniek 39 (1973):8, s 196-201, Delft 1973.
(Referensen hämtad från [33-12]).
- [33-12] Hoffstedt Hans: Referat av två holländska artiklar om häftsvetsning av armeringsstål ([33-10], [33-11]). Jernkontoret 1973-10-01. Intern skrift.
- [33-13] Teunissen NLGM, van Lent PH: Lasbaarheid van betonstaal met betrekking tot de overlapsverbinding. Lastechniek 40 (1974):6, s 174-179, Delft 1974
- [34-1] Le Camus B: Recherches sur le comportement du béton et du béton armé soumis a des efforts répétés. Compte Rendu des Recherches Effectuées en 1945-1946, Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics, s 25-45 Paris.
(Referensen hämtad från [31-17]).
- [34-2] Chang TS, Kesler CE: Static and Fatigue Strength in Shear of Beams with Tensile Reinforcement. ACI Journal, Vol 29, No 12, Proceedings Vol 54, pp 1033-1058, Detroit, 1958.
(Referensen hämtad från [31-17]).
- [34-3] Chang TS, Kesler CE: Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams. ACI Journal, Vol 30, No 2, (Proceedings Vol 55), pp 245-254, Detroit 1958.
(Referensen hämtad från [31-17]).

- [34-4] Stelson TE, Cernica JN: Fatigue Properties of Concrete Beams. ACI Journal, Vol 30, No 2, (Proceedings Vol 55), pp 255-259, Detroit 1958.
(Referensen hämtad från [31-17]).
- [34-5] Verna JR, Stelson TE: Failure of Small Reinforced Concrete Beams under Repeated loads. ACI Journal, Vol 58, No 10, pp 1489-1503, Detroit 1962.
(Referensen hämtad från [31-13]).
- [34-6] Higai T: On the Shear Failure of Reinforced Concrete Beams Subjected to Repeated Loading. Presented at 14th Meeting of Japan Congress on Materials Research, Kyoto 1970.
(Referensen hämtad från [31-15j]).
- [34-7] Westerberg Bo: Utmattningsförsök på armerade betongbalkar. Kungl Tekniska Högskolan, Institutionen för Brobyggnad, Publikation 73:1, 192 sid, Stockholm 1973.
- [34-8] Verna JR, Stelson TE: Repeated Loading Effect on Ultimate Static Strength of Concrete Beams. ACI Journal, Vol 59, No 6, pp 743-749, Detroit 1963.
(Referensen hämtad från [31-13]).
- [34-9] Barnoff RM: Bond fatigue Strength of Reinforced Concrete Beams, presented at ACI Committee 408 meeting, april, New York 1970.
(Referensen hämtad från [31-15j]).

- [34-10] Elfgren, L: American structural engineering research. A report from an academic year in the United States and Canada 1972-1973. Technical Report 1975:08T, University of Luleå, 62 pp, Luleå 1974.
- [34-11] Bertero VV: Research needs in limit design of reinforced concrete structures. Report EERC 71-4, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 45 pp, Berkeley, June 1971.
- [34-12] Ma S-Y M, Bertero VV, Popov EP: Experimental and analytical studies on the hysteretic behavior of reinforced concrete rectangular and T-beams. Report EERC 76-2, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, 254 pp, Berkeley, May 1976.
- [35-1] ACI Committee 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71). American Concrete Institute, 78 pp, Detroit 1971. Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71). American Concrete Institute, 96 pp, Detroit 1971.
- [35-2] Ekberg CE Jr, Walther RE, Slutter RG: Fatigue Resistance of Prestressed Concrete Beams in Bending. Proceedings, ASCE Vol 83, ST 4, pp 1304-1 to 1304-17, New York 1957.
- [35-3] Hilmes JB, Ekberg CE: Statistical Analysis of the Fatigue Characteristics of Underreinforced Prestressed Concrete Flexural Members. Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames 1965.
(Referensen hämtad från [31-16]).

- [35-4] Abeles Paul W, Barton Furman W, Brown Earl I.II: Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Bridge Beams. First International Symposium on Concrete Bridge Design, SP-23, American Concrete Institute, pp 579-599, Detroit 1969.
- [35-5] Abeles Paul W, Brown Earl I.II: The Expected Fatigue life of Prestressed Concrete Highway Bridges as Related to the Expected Load Spectrum. Second International Symposium on Concrete Bridge Design, SP-26, American Concrete Institute, pp 962-1010, Detroit 1971.
- [35-6] Hanson John M, Hulsbos Cornie L, Van Horn David A: Fatigue Tests of Prestressed concrete I-Beams. Proceedings, ASCE, Vol 96, ST 11, pp 2443-2464, New York 1970.
(Referensen hämtad från [31-16]).
- [35-7] Warner RF, Hulsbos CL: Probable Fatigue life of Prestressed Concrete Beams. Journal Prestressed Concrete Institute, Vol 11, No 2, pp 16-39, April 1966.
(Referensen hämtad från [31-16]).
- [35-8] Hanson John M, Hulsbos CL: Fatigue Tests of Two Prestressed Concrete I-Beams with Inclined Cracks. Highway Research Record, Highway Research Board, No 103, pp 14-30, Washington 1965.
(Referensen hämtad från [31-16]).
- [35-9] Abeles PW: Static and Fatigue Tests on Partially Prestressed Concrete Constructions. ACI Journal, Vol 26, No 4, (Proceedings Vol 51), pp 361-376, Detroit 1954.
(Referensen hämtad från [31-17]).

- [35-10] Brøndum-Nielsen Troels: Effect of prestress on the damping of concrete. Effect of grouting on the fatigue strength of post-tensioned concrete beams. Afdelingen for bærende konstruktioner, Danmarks tekniske højskole, Rapport nr R51, 12 sid, 1974.
- [35-11] Brøndum-Nielsen Troels: Partial prestressing. Rapport nr R 76, Afdelingen for bærende konstruktioner, Danmarks tekniske højskole, Polyteknisk Forlag, 28 sid, Lyngby 1976.
- [35-12] Brøndum-Nielsen Troels: Uddrag af "Structural concrete". Structural Research Laboratory, Technical university of Denmark, Polyteknisk Forlag, pp 65-95, Lyngby 1973.
- [35-13] Herzog Max: Betriebsfestigkeit von Stahlbeton, Spannbeton und teilweise vorgespanntem Betong. Die Bautechnik, 54 Jahrgang, heft 3, s 73 - 80, Berlin 1977.
- [36-1] Elfgren Lennart: Studieresa till Mexico City, Hösten 1976. Högskolan i Luleå, Avdelningen för Konstruktionsteknik, Skrift 76:5, 29 sid, Luleå november 1976.
- [36-2] Hermansson Ingemar: Utmattning av betong utsatt för pulserande drag- och tryckpåkänning. Chalmers tekniska högskola, Avd för Byggnadsteknik, 75:3, Examensarbete, 78 sid, Göteborg april 1975.

- [36-3] Fridén Claes, Georgsson Leif: Studium av Palmgren-Miners delskadehypotes giltighet vid utmattning av betong. Chalmers tekniska högskola, Avd för Husbyggnadsteknik, Publ 76:16, Examensarbete, 38 sid, Göteborg december 1976.
- [36-4] Utmattning av betongkonstruktioner. Rapport från Nordiska Betongförbundets forskningsseminarium i Luleå 1977-03-23. Högskolan i Luleå, Avd för Konstruktionsteknik, Planerad utgivning i juni 1977.

**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 750133-5 från
Statens råd för byggnadsforskning till Avdelningen för konstruk-
tionsteknik, Högskolan i Luleå**

R68: 1977

ISBN 91-540-2750-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

**Art.nr: 6600668
Abonnemangsgrupp:
V. Anläggningsteknik**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm
Telefon 08-24 28 60**

Cirkapris: 39 kr + moms