



ALUNORD

Week 41, 2009

CONSTRUCTION in ALUMINIUM – Part II
by Anders Kristensen

Program

- The fatigue failure
- Example – bicycle handlebar
- Example – simulation

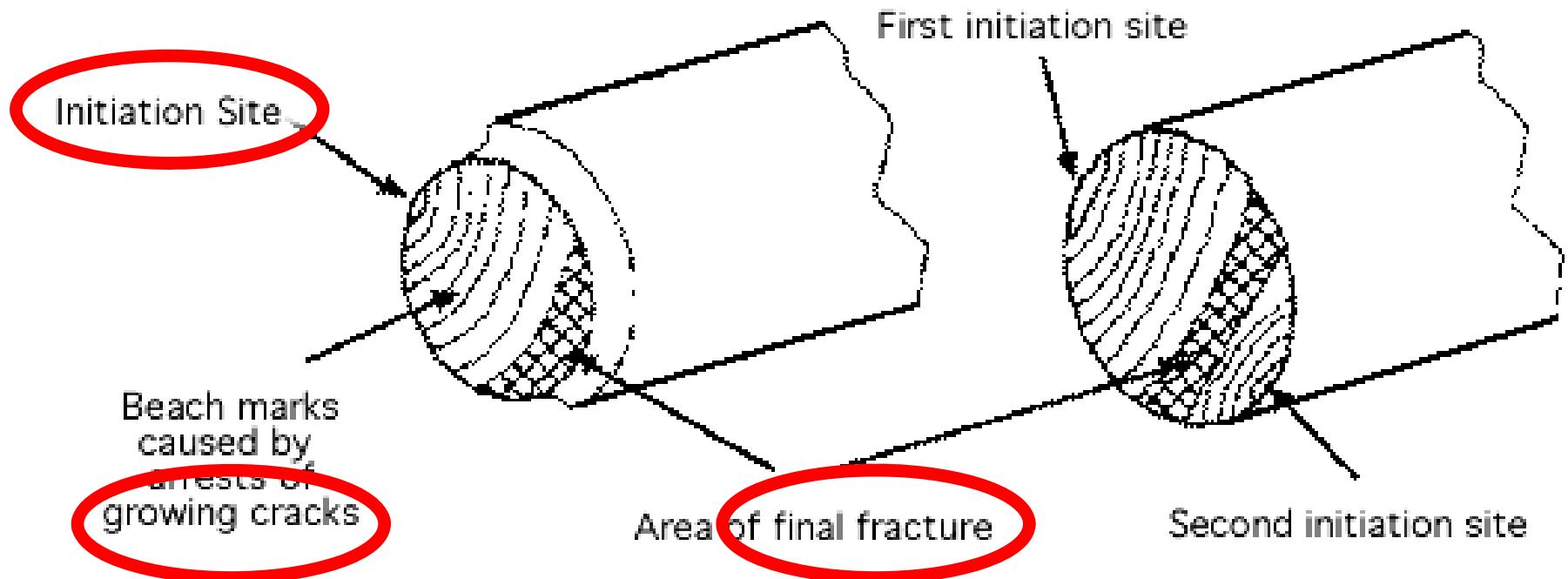
Characterization of Fatigue

- Fatigue - a distinct failure mode:
 - Apparently brittle even in ductile materials
 - Sudden and catastrophic
 - Result of initiation and propagation of a crack
 - Fatigue is failure due to time-varying stresses

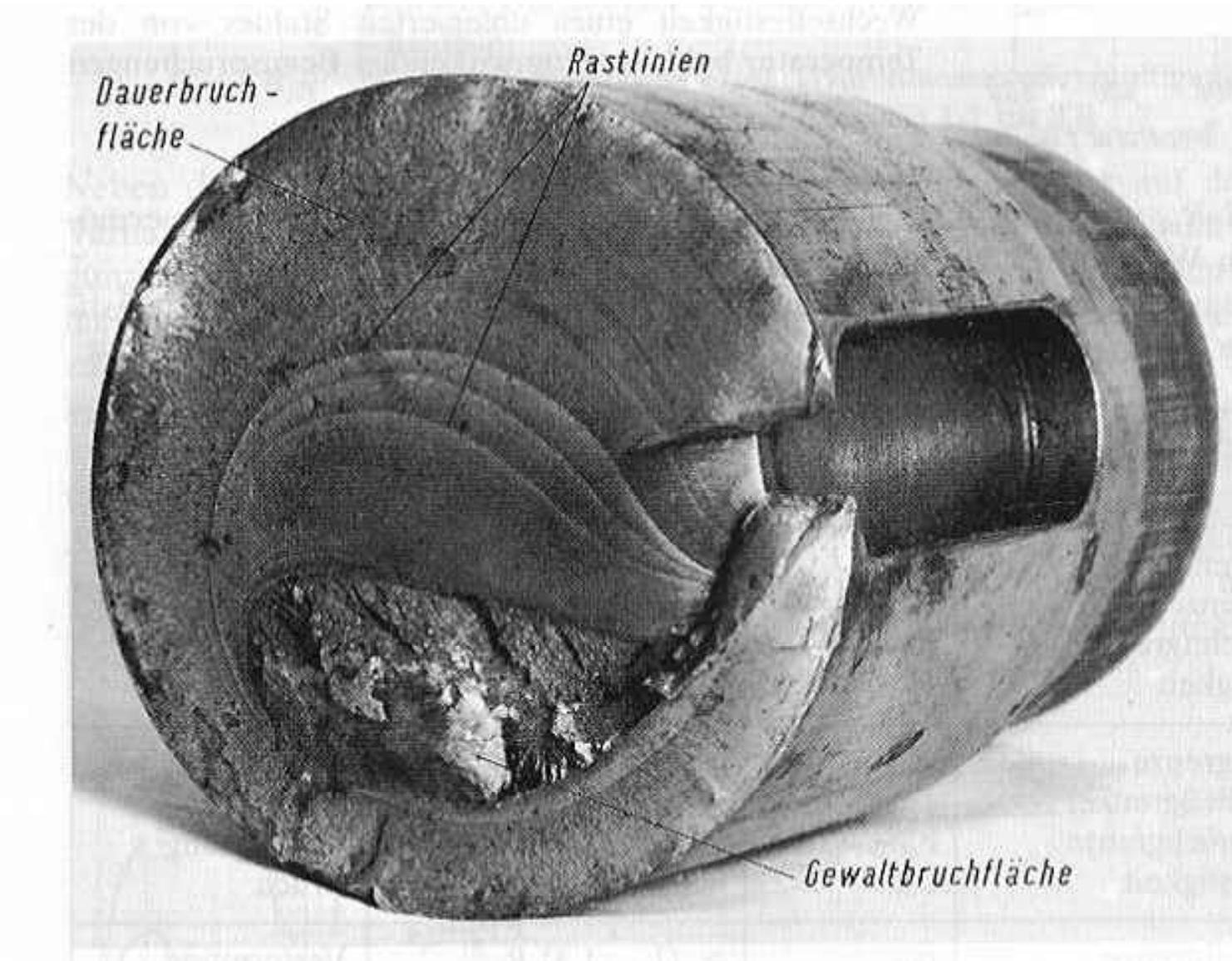
Fatigue failure

- Fatigue failures more common than static
- Due to multiple loadings of material
- Always begins at crack
- Occurs in three stages
 - Crack initiation
 - Crack propagation
 - Fracture

Fatigue failure

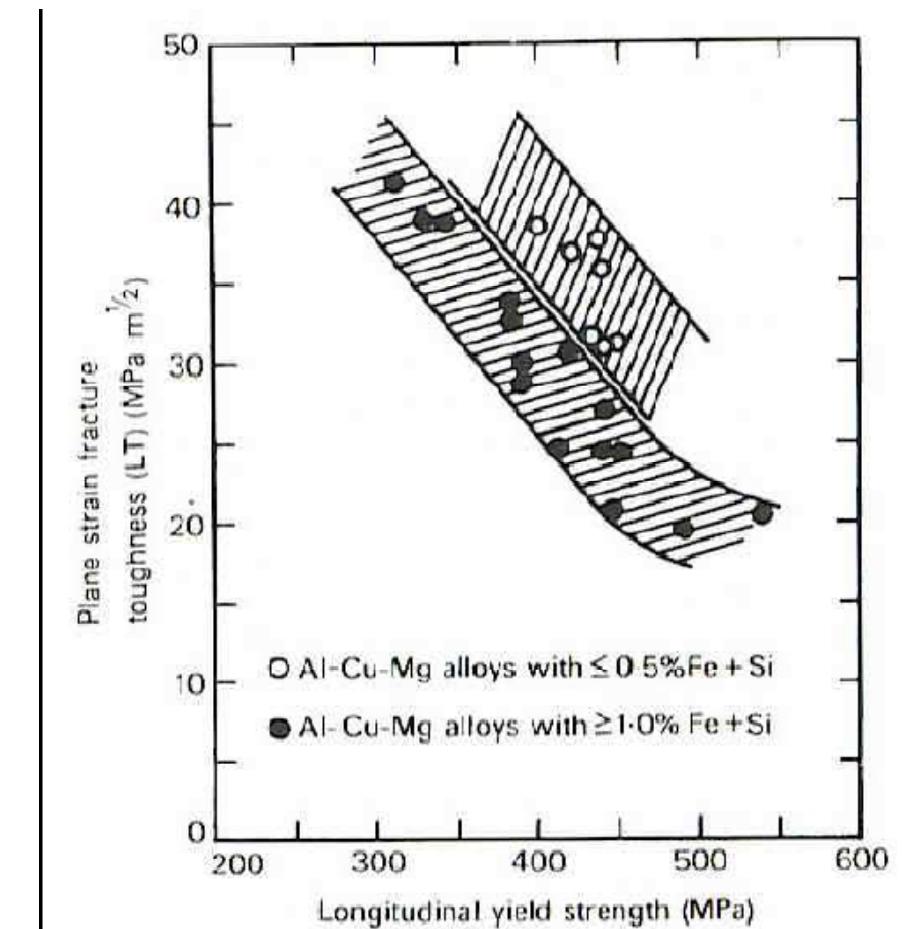


Fatigue failure



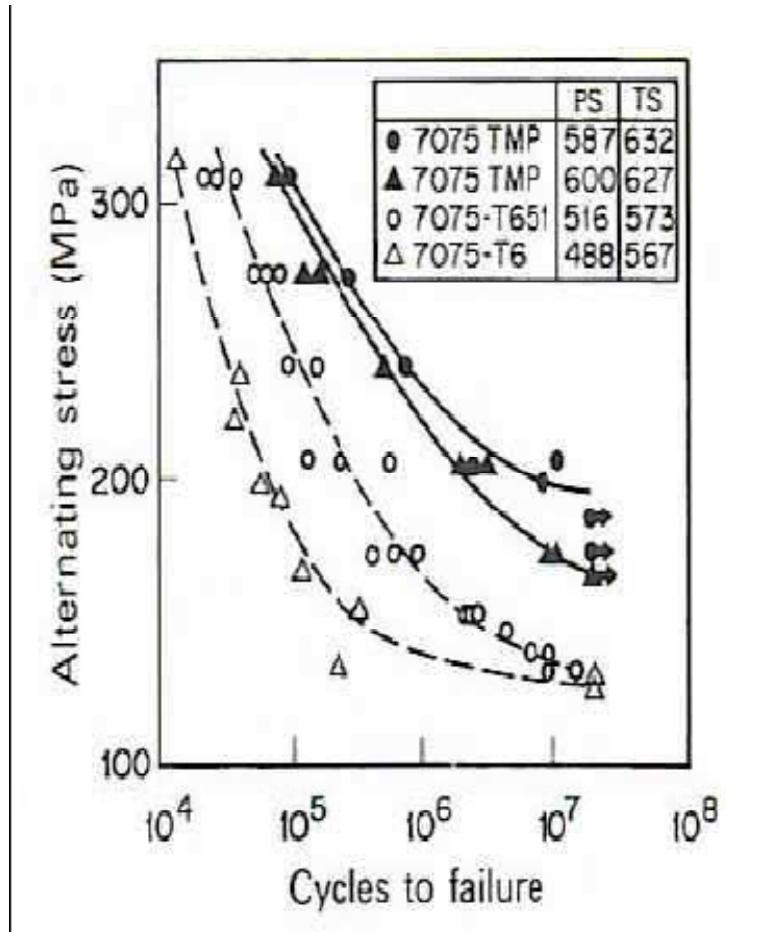
Fatigue considerations

- Toughness is resistance of material to fracture (in the presence of cracks).
- Crack extension is due to nucleation of crack by decohesion at second phase particle-matrix interface.
- Toughness is greatest in underaged condition and decrease as ageing proceeds to peak strength.
- Note: Reducing Fe and Si (impurities) greatly improves the toughness.



Fatigue considerations

- The improvement in tensile strength is not always accompanied with increased fatigue strength in non-ferrous alloys.
- The more an alloy is dependent upon precipitation-hardening for its tensile strength, the lower its fatigue ratio (endurance limit : tensile strength) becomes.
- Age-hardened aluminium alloys possess disappointing fatigue properties due to localised straining of precipitates under cyclic stressing. Improved by more uniformly dispersed precipitates to prevent coarse slips formation.
- An increase in dislocation density by thermo mechanical processing helps to improve fatigue performance



Microstructure-Fatigue Relationships

- Three major factors.
 - 1: geometry of the specimen (previous slide); anything on the surface that is a site of stress concentration will promote crack formation (shorten the time required for nucleation of cracks).
 - 2: defects in the material; anything inside the material that can reduce the stress and/or strain required to nucleate a crack (shorten the time required for nucleation of cracks).
 - 3: dislocation slip characteristics; if dislocation glide is confined to particular slip planes (called planar slip) then dislocations can pile up at any grain boundary or phase boundary. The head of the pile-up is a stress concentration which can initiate a crack.

Casting porosity affects fatigue

*Gravity cast
versus
squeeze cast
versus
wrought
Al-7010*

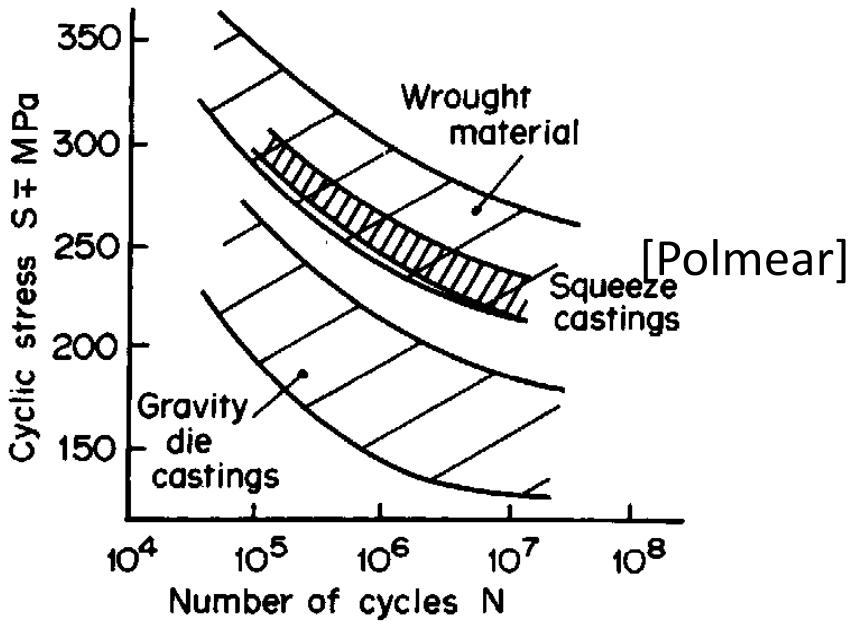


Fig. 4.9 Fatigue (S/N) curves for alloy 7010 in wrought, gravity diecast and squeeze-cast conditions (from Chadwick, G. A., *Metals and Materials*, 2, 693, 1986)

- Casting tends to result in porosity. *Pores are effective sites for nucleation of fatigue cracks.* Castings thus tend to have lower fatigue resistance (as measured by S-N curves) than wrought materials.
- Casting technologies, such as *squeeze casting*, that reduce porosity tend to eliminate this difference.

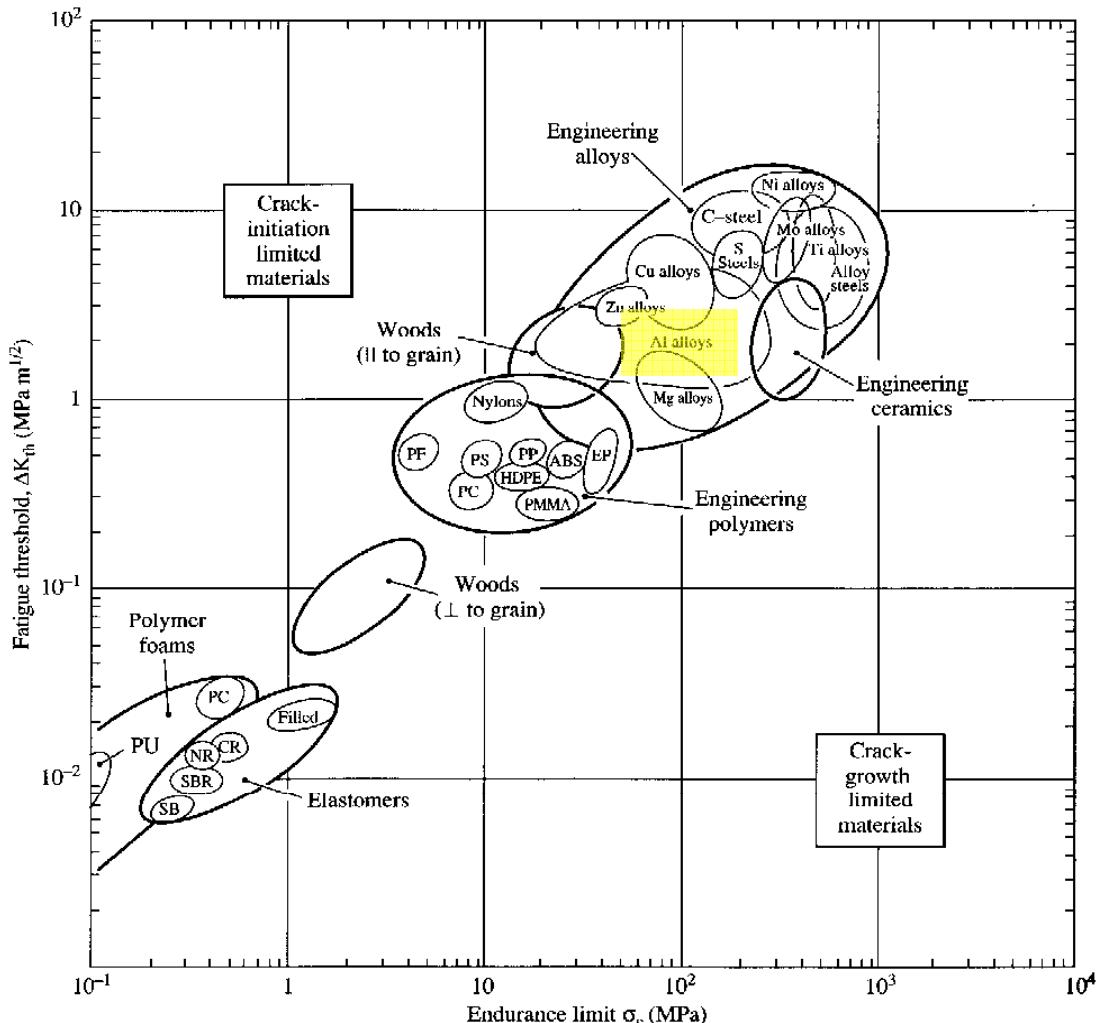
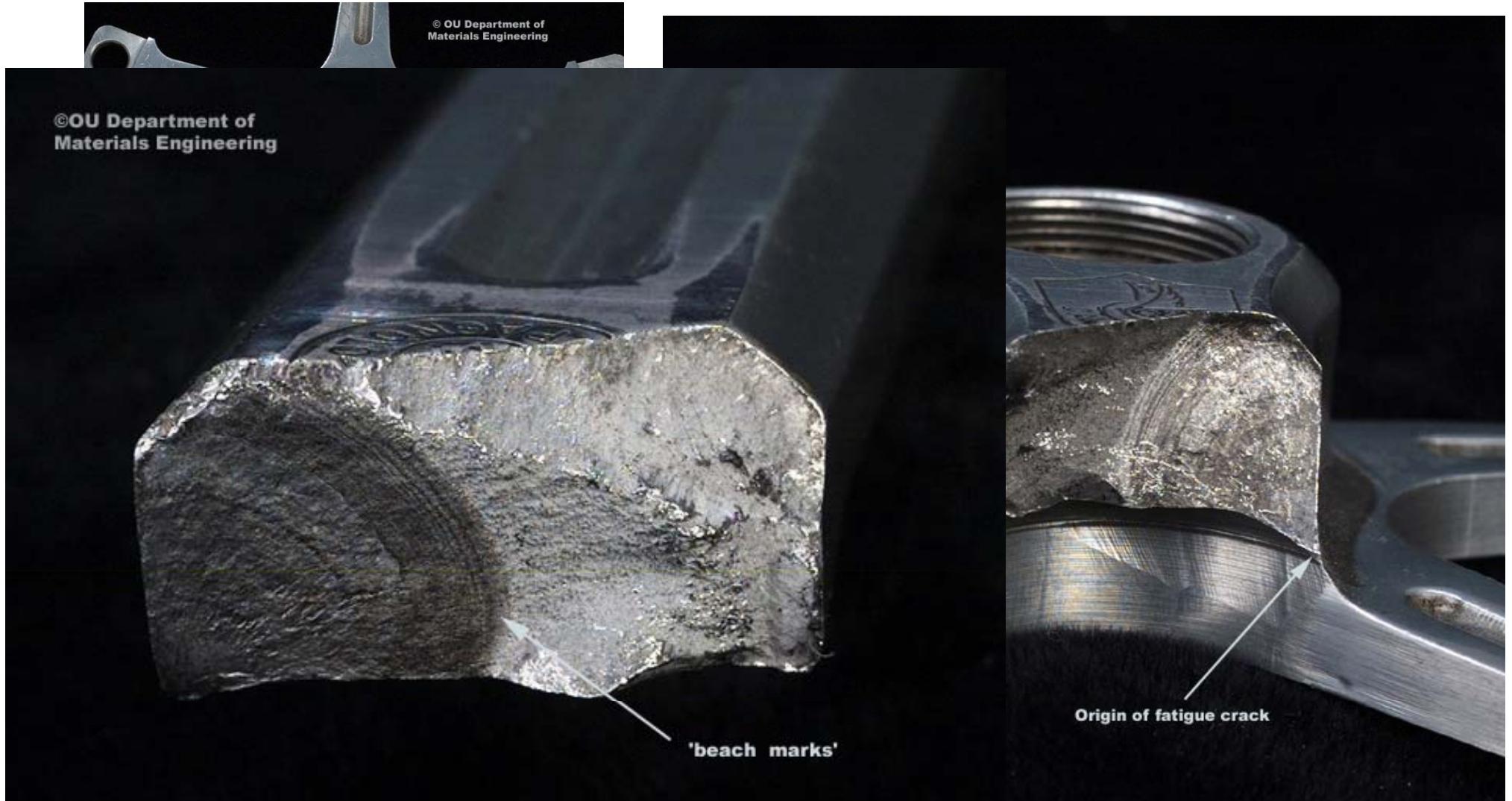


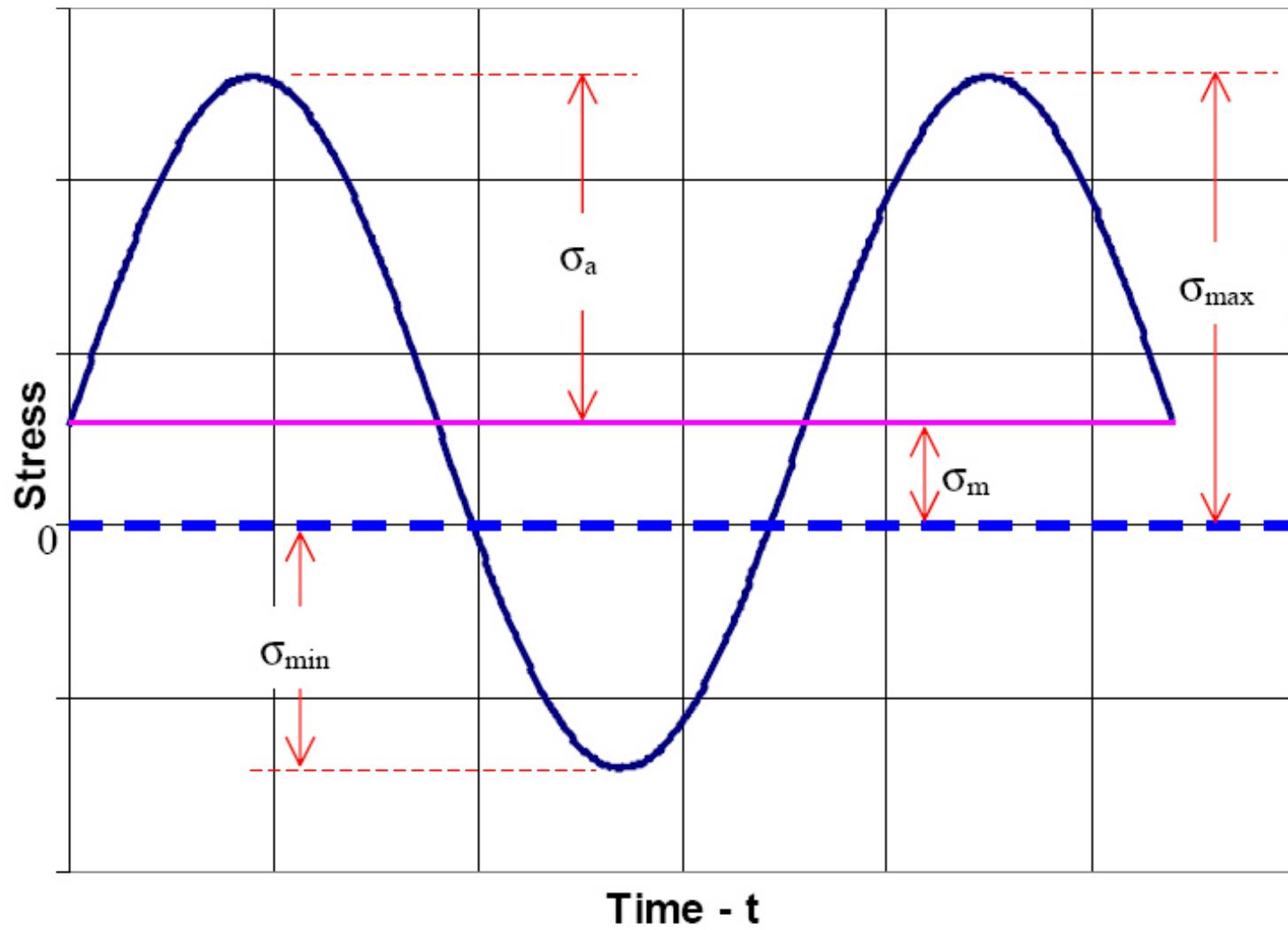
Figure 12.22

A material property chart displaying the fatigue threshold stress intensity (ΔK_{th} , obtained at $R = 0$) vs. endurance limit (σ_e , appropriate for $R = -1$). Although these two properties correlate for the several material classes, there are some subtleties. Ceramics, for example, have relatively high values of the ratio $\sigma_e/\Delta K_{th}$. Thus, they are more prone to crack-growth-limited fatigue fracture (extrinsic fatigue, cf. Fig. 12.21). Conversely, materials having high values of ΔK_{th} vis-à-vis σ_e (e.g., some of the tough metals) are more prone to intrinsic fatigue, which involves nucleation of the fatigue cracks that result in fracture (also see Fig. 12.21). (Adapted from N. A. Fleck, K. J. Kang, and M. F. Ashby, "The Cyclic Properties of Engineering Materials," *Acta Metall. et Mater.*, 42, 365, Copyright 1994, with permission from Elsevier Science.)

Fatigue failure



Non-Symmetrical Cyclic Stress



Fatigue considerations

- Aluminum alloys
 - S_e' (S_f at 10^8 cycles)
 - = $0.4 S_{ut}$ for $S_{ut} < 330$ MPa
 - = 130 MPa for all other values of S_{ut}

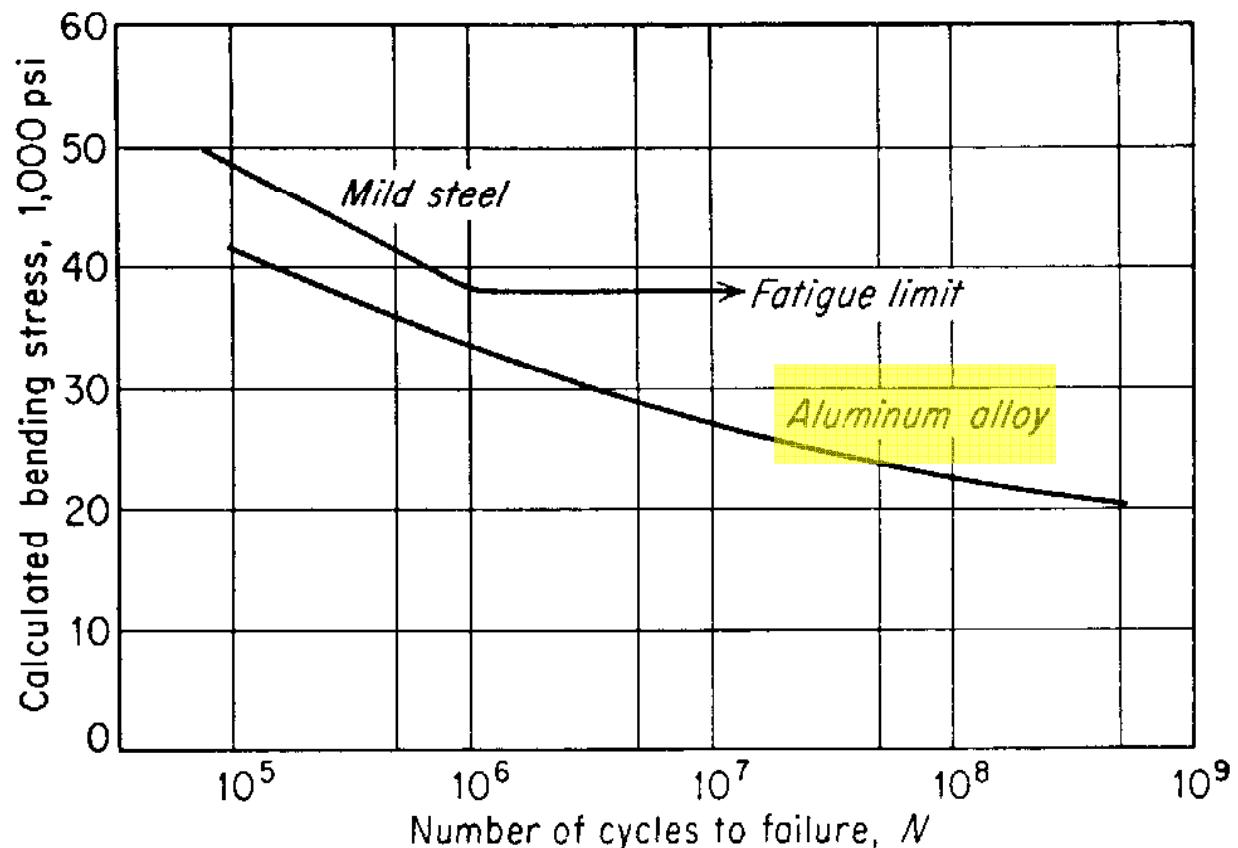
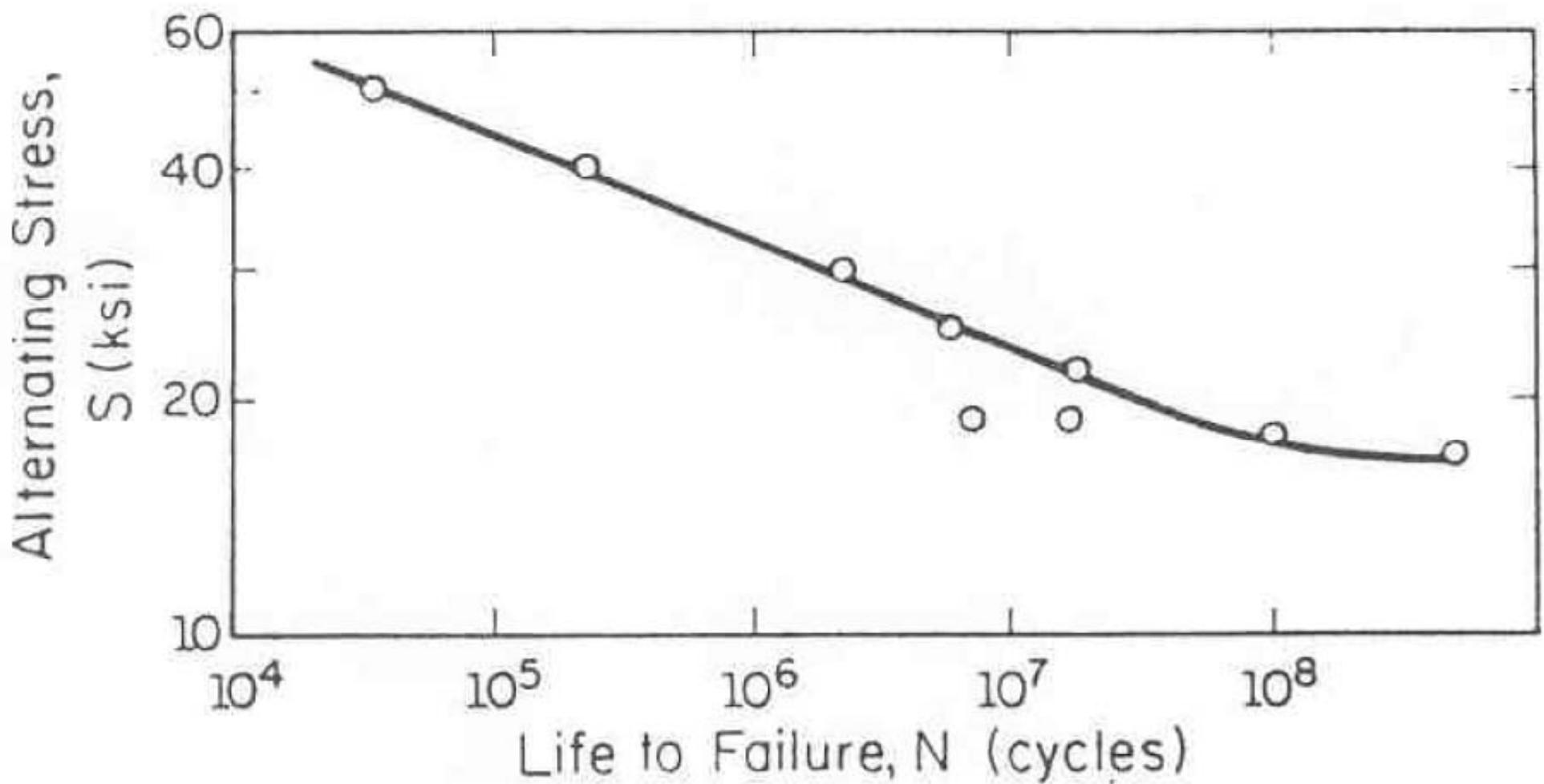


Figure 12-3 Typical fatigue curves for ferrous and nonferrous metals.



2024-T4 Aluminum

Endurance Limit

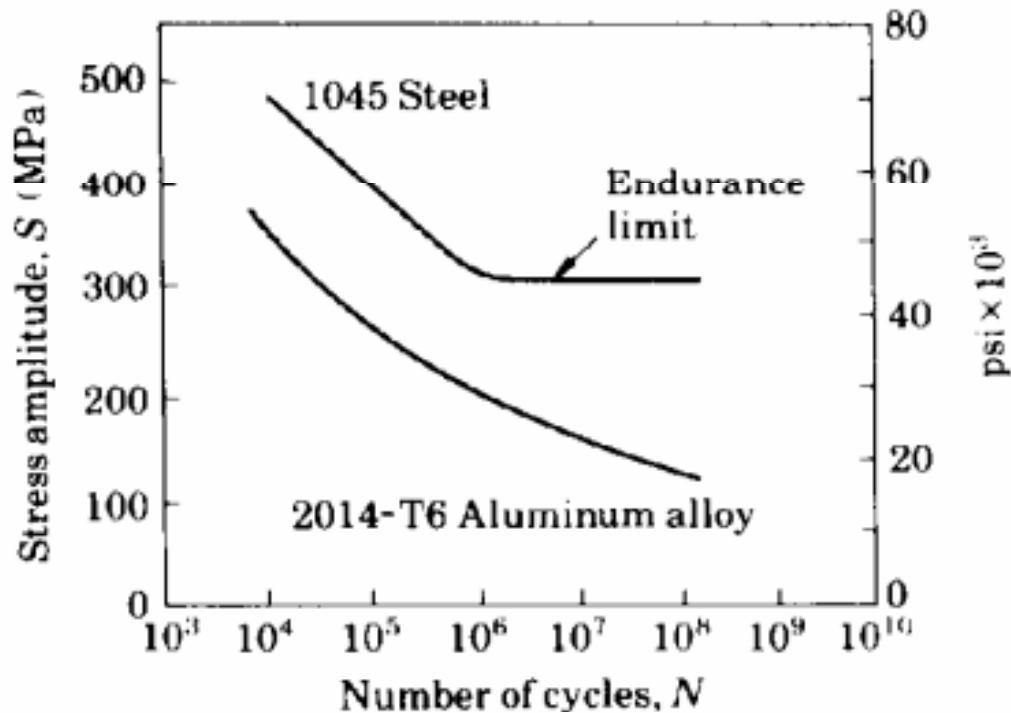


FIGURE 2.17

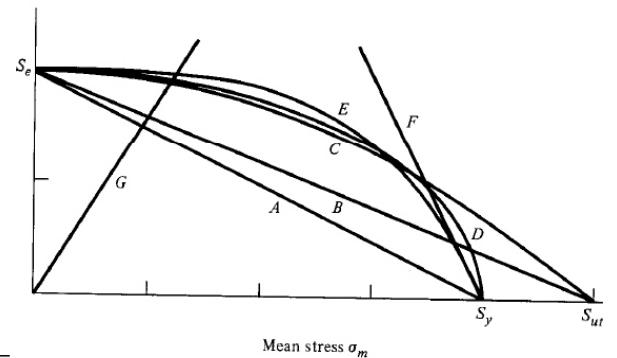
Typical S - N curves for two metals. Note that, unlike steel, aluminum does not have an endurance limit.

Serope Kalpakjian. Manufacturing Engineering and Technology, 3rd Edition. Addison-Wesley Publishing Co. 1995.

Fatigue Models

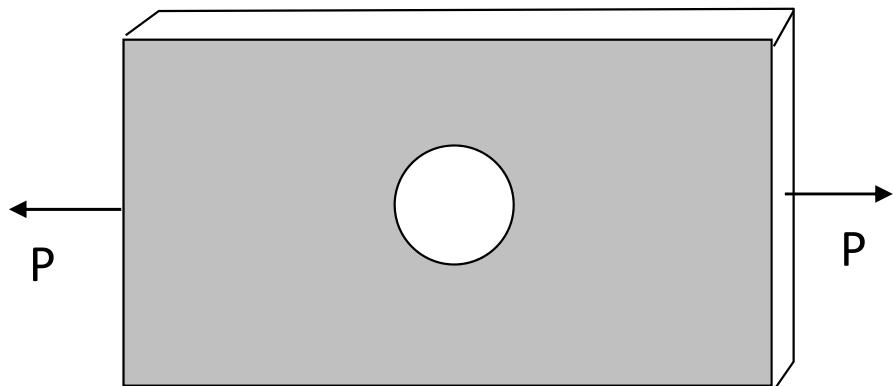
- Mean stress has a significant effect on fatigue behavior.
 - Mean stress models:
 - Haigh
 - Goodman
 - Smith
 - Soderberg
 - ASME Elliptic
 - Bagci
 - Yielding (Langer)
- Tensile mean stress decreases life (are bad).
- Compressive mean stresses increase life (good).

| | THEORY | BASIC FORMULA |
|---|-------------------|---|
| A | Soderberg | $\frac{n\sigma_a}{S_e} + \frac{n\sigma_m}{S_y} = 1$ |
| B | Goodman | $\frac{n\sigma_a}{S_e} + \frac{n\sigma_m}{S_{ut}} = 1$ |
| C | Gerber | $\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$ |
| D | ASME elliptic | $\left(\frac{n\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1$ |
| E | Bagci | $\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^4 = 1$ |
| F | Yielding (Langer) | $\frac{n}{S_y} (\sigma_a + \sigma_m) = 1$ |



Notches and Stress Concentrations

- Notch is a general term for any stress riser
- For fatigue (dynamic) loading use fatigue stress-concentration factor, K_f
- Brittle materials are more notch sensitive
- Notch sensitivity decreases as notch radius decreases
- $K_f = 1 + q(K_t - 1)$
- q is notch sensitivity and is function of material and notch size



Recall in static loading (brittle failure)

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_{nom}$$

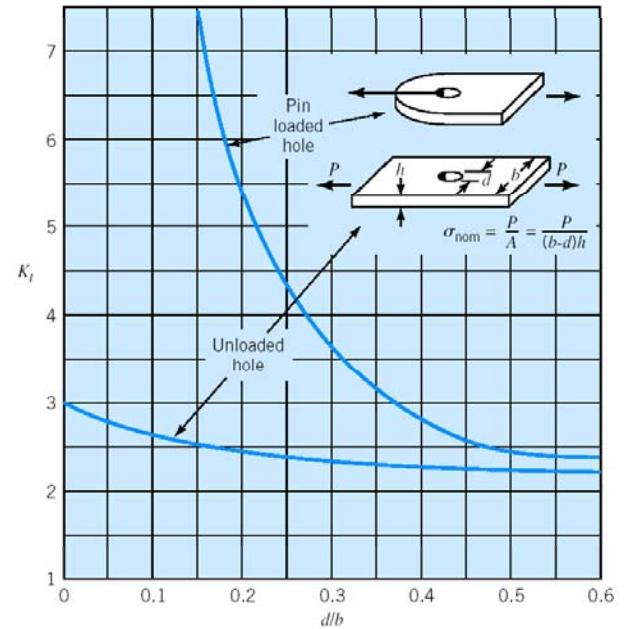
Fatigue failure:

$$\sigma_{m-\max} = K_f \sigma_{m-nom}$$

$$\sigma_{a-\max} = K_f \sigma_{a-nom}$$

K_f also depends on loading

$$\frac{\sigma_{em-\max}}{S_{ut}} + \frac{\sigma_{ea-\max}}{S_n} = \frac{1}{n}$$



$$K_f = 1 + (K_t - 1)q$$

q : Notch sensitivity factor

$q = 1$; Very sensitive

(ultra strong materials)

$q = 0$; Not sensitive

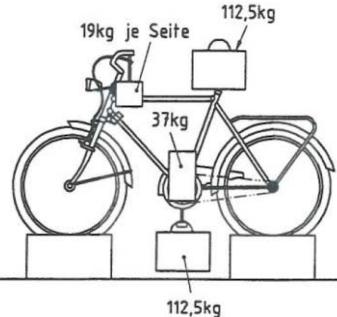
(ultra weak materials)

Example – bicycle handlebar



Example – bicycle handlebar

| DEUTSCHE NORM | | April 2000 |
|--|---|--------------------------|
| | Fahrräder Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfverfahren | EN 14764 DIN 79100 |
| ICS 43.150 | Ersatz für DIN 79100-2 : 1998-10; mit DIN ISO 8090: 2000-02 | |
| Bicycles – Safety requirements and test methods | Ersatz für DIN 79100 : 1984-03 | |
| Cycles – Exigences de sécurité et méthodes d'essai | | |
| Beginn der Gültigkeit | | |
| Diese Norm gilt ab 1. April 2000 | | |
| Daneben gilt DIN 79100-2 : 1998-10 noch bis zum 1. September 2000 | | |
| Inhalt | | |
| Vorwort | 1 | Seite |
| 1 Anwendungsbereich | 2 | |
| 2 Normative Verweisungen | 2 | |
| 3 Begriffe | 3 | |
| 4 Sicherheitstechnische Anforderungen | 3 | |
| 5 Prüfungen | 3 | |
| 6 Benutzerinformation | 34 | |
| 7 Kennzeichnung | 34 | |
| Anhang A (informativ) Verfahren zur Ermittlung der Bremskraftlinie | 36 | |
| Anhang B (informativ) Literaturhinweise | 37 | |

| 4 Sicherheitstechnische Anforderungen | 5 Prüfverfahren |
|---|---|
|  <p>Bild 2: Prüfeinrichtung für die statische Prüfung</p> | <p>5.2.1.2 Prüfeinrichtung</p> <p>Die Prüfeinrichtung (siehe Bild 2) besteht aus einer Stütze mit einem Ausleger, an dem das Fahrrad bei vertikaler Stellung in der Höhe beweglich befestigt wird, und zwei 300 mm hohen Laufraduntersätzen. Nachfolgend aufgeführte Gewichte sind vorzusehen:</p> <p>ein Gewicht von 112,5 kg (67,5 kg) mit Zapfen zum Aufsetzen auf das Sitzrohr;</p> <p>ein Gewicht von 112,5 kg (67,5 kg) mit Aufsteckbügel für ein Pedal;</p> <p>ein Gewicht von 37 kg (22 kg) mit Aufsteckbügel für ein Pedal;</p> <p>zwei Gewichte von je 19 kg (11,5 kg) mit Aufhängehaken für einen Lenkergriff.</p> |

Example – bicycle handlebar

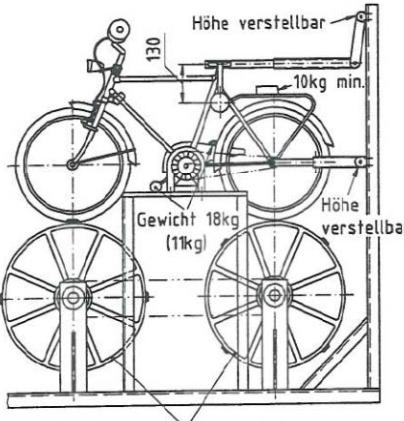
| 4 Sicherheitstechnische Anforderungen | 5 Prüfverfahren |
|---|---|
|  <p>Höhe verstellbar 130 10kg min. Gewicht 18kg (11kg) Höhe verstellbar Trommeldurchmesser 760 Gewicht 6,75kg(4kg) Gewicht 18kg(10,75kg) Gewicht 6,75kg(4kg) Gewicht 18kg(10,75kg)</p> <p>Bild 3: Prüfeinrichtung für die dynamische Prüfung</p> | <p>Nachfolgend aufgeführte Gewichte sind vorzusehen:</p> <p>ein Gewicht von 36 kg (21,5 kg) mit Zapfen zum Aufsetzen auf das Sitzrohr, aufgeteilt in zwei Gewichtsstücke, die seitlich pendelnd angehängt sind;</p> <p>zwei Gewichte von je 18 kg (11 kg) mit Befestigungseinrichtung für die Pedalaufnahme in den Tretkurbeln;</p> <p>zwei Gewichte von je 6,75 kg (4 kg) mit Befestigungseinrichtung für einen Lenkergriff;</p> <p>ein Gewicht von 10, 18 oder 25 kg mit einer Grundfläche von 240 mm x 240 mm für die Belastungsstufen 18 und 25 nach DIN 79121.</p> <p>5.2.2.3 Durchführung der Prüfung</p> <p>Das Fahrrad wird so auf der Prüleinrichtung befestigt, daß es sich frei nach oben und unten bewegen kann.</p> <p>Die Gewichte von je 18 kg (11 kg) werden in den Pedalaufnahmen der Tretkurbelarme angebracht. Das Gewicht von 36 kg (21,5 kg) wird auf das Sitzrohr aufgesetzt.</p> <p>Die Gewichte von je 6,75 kg (4 kg) werden an den Lenkergriffen, das Gewicht von 10, 18 oder 25 kg auf der Mitte des Gepäckträgers befestigt, wenn das Fahrrad mit einem Gepäckträger ausgestattet ist. Danach wird der Antrieb eingeschaltet.</p> <p>Die Prüfdauer beträgt 6 h.</p> |

Tabelle 2: Prüfkräfte für die Rahmenprüfung

| Prüfkraft Rahmen | Anzahl der Schwingspiele |
|------------------|--------------------------|
| 850 N (500 N) | 100 000 |

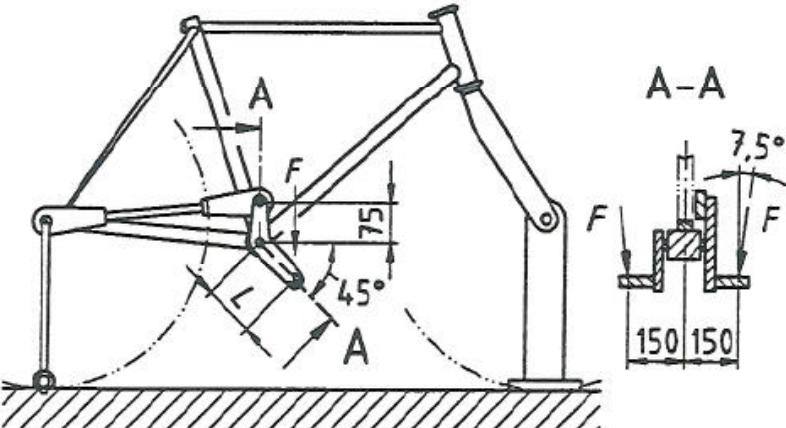
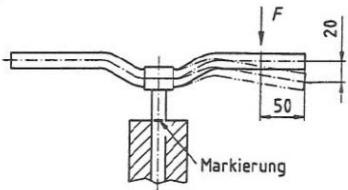


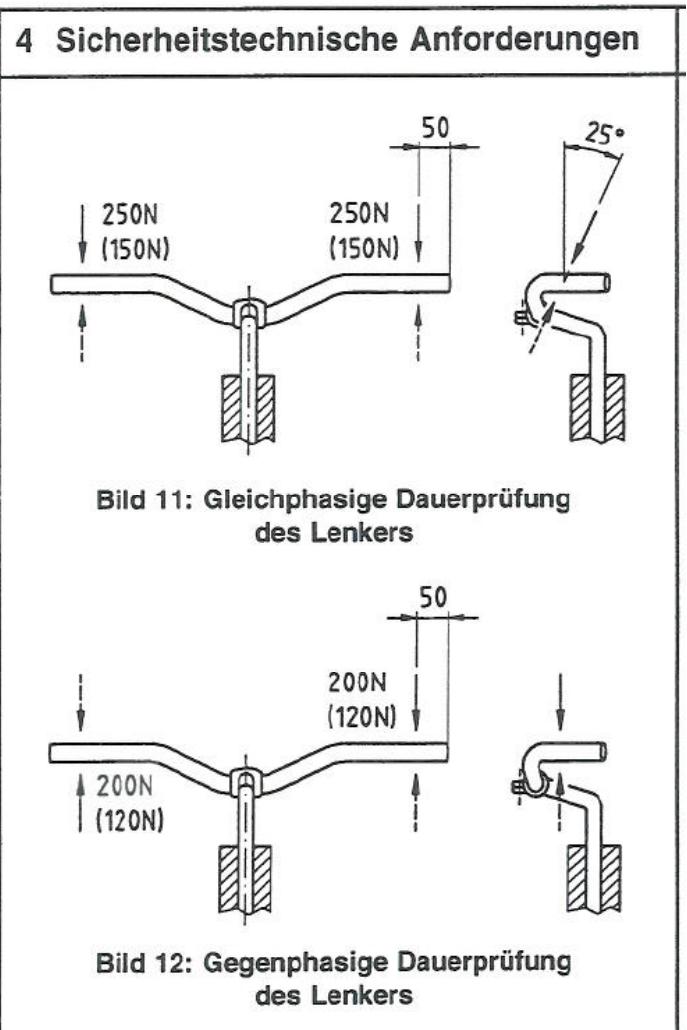
Bild 5: Prüfeinrichtung für die dynamische Prüfung des Rahmens

Example – bicycle handlebar

| 4 Sicherheitstechnische Anforderungen | 5 Prüfverfahren |
|---|---|
| <p>4.5.2 Statische Festigkeit</p> <p>Die Anforderungen an die Lenker-Vorbau-Kombination gelten als erfüllt, wenn bei der Prüfung eine statische Prüfkraft von 600 N (360 N) mit max. 20 mm bleibender Auslenkung des Kraftangriffspunktes ausgehalten wird.</p>  <p>Bild 10: Prüfeinrichtung für die statische Prüfung des Lenkers und des Vorbaus</p> | <p>5.5.2 Statische Prüfung</p> <p>Es wird eine noch nicht benutzte Lenker-Vorbau-Kombination geprüft, die bei der statischen Prüfung des fertigmontierten Fahrrades verwendet wurde.</p> <p>Sofern Lenkerbügel und passender Vorbau nicht stoffschüssig verbunden sind, werden sie nach der Oberflächenbehandlung zusammengebaut, wobei die Griffe in einer Ebene senkrecht zur Achse des Lenkers oder des Vorbauschaftes auszurichten sind.</p> <p>Die Prüfeinrichtung hat eine geeignete Einspannbohrung zur Aufnahme des Lenker- oder Vorbauschaftes.</p> <p>Der Lenker- oder Vorbauschaft wird bis zur Markierung der Mindesteinstekttiefe in die Einrichtung eingesetzt und festgespannt.</p> <p>Die Prüfkraft von 600 N (360 N) wird nach Bild 10 parallel zur Lenker- oder Vorbau-Schaftachse aufgebracht.</p> <p>Hat ein Lenker mehrere mögliche Griffpositionen, so ist die Prüfkraft so einzuleiten, dass dadurch die größtmöglichen Momente für Vorbauschaft und Lenkerbügel auftreten. Anschließend wird diese Prüfung auf der anderen Lenkerseite wiederholt.</p> <p>Die Prüfdauer beträgt mindestens 2 min.</p> <p>Nach Entlastung wird die bleibende Auslenkung des Kraftangriffspunktes gemessen und festgestellt, ob die Anforderung erfüllt ist.</p> |



Example – bicycle handlebar



4.5.3 Dynamische Festigkeit

Die Anforderungen an die Lenker-Vorbau-Kombination gelten als erfüllt, wenn bei den Prüfungen die geforderten Schwingspielzahlen bei den geforderten Prüfkräften nach Tabelle 4 ohne Bruch oder sichtbaren Anriß ausgehalten werden.

Tabelle 4: Prüfkräfte für die Lenkerprüfung

| Prüfkraft gleich- phasig | Prüfkraft gegen- phasig | Anzahl der Schwingspiele |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| ± 250 N (± 150 N) | ± 200 N (± 120 N) | je 100 000 |

5.5.3 Dynamische Prüfung

Es wird die unter 5.5.2 geprüfte Lenker-Vorbau-Kombination an beiden Seiten mit einer Prüfkraft nach Tabelle 4 und nach Bild 11 bzw. Bild 12 belastet.

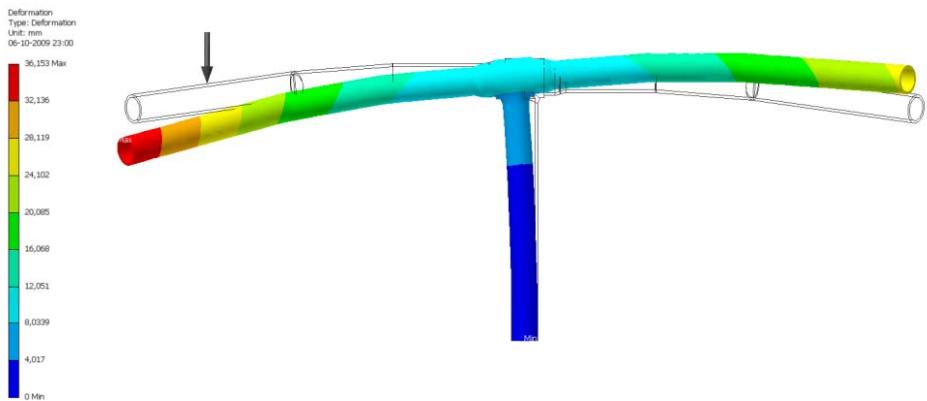
Hat ein Lenker mehrere mögliche Griffpositionen, so ist die Prüfkraft so einzuleiten, dass dadurch die größtmöglichen Momente für Vorbauchaft und Lenkerbügel auftreten.

Bei der gleichphasigen Prüfung ist die Kraft unter 25° geneigt aufzubringen.

Nach der Prüfung wird festgestellt, ob die Anforderungen erfüllt sind.

Example – bicycle handlebar

Static - FEM simulation

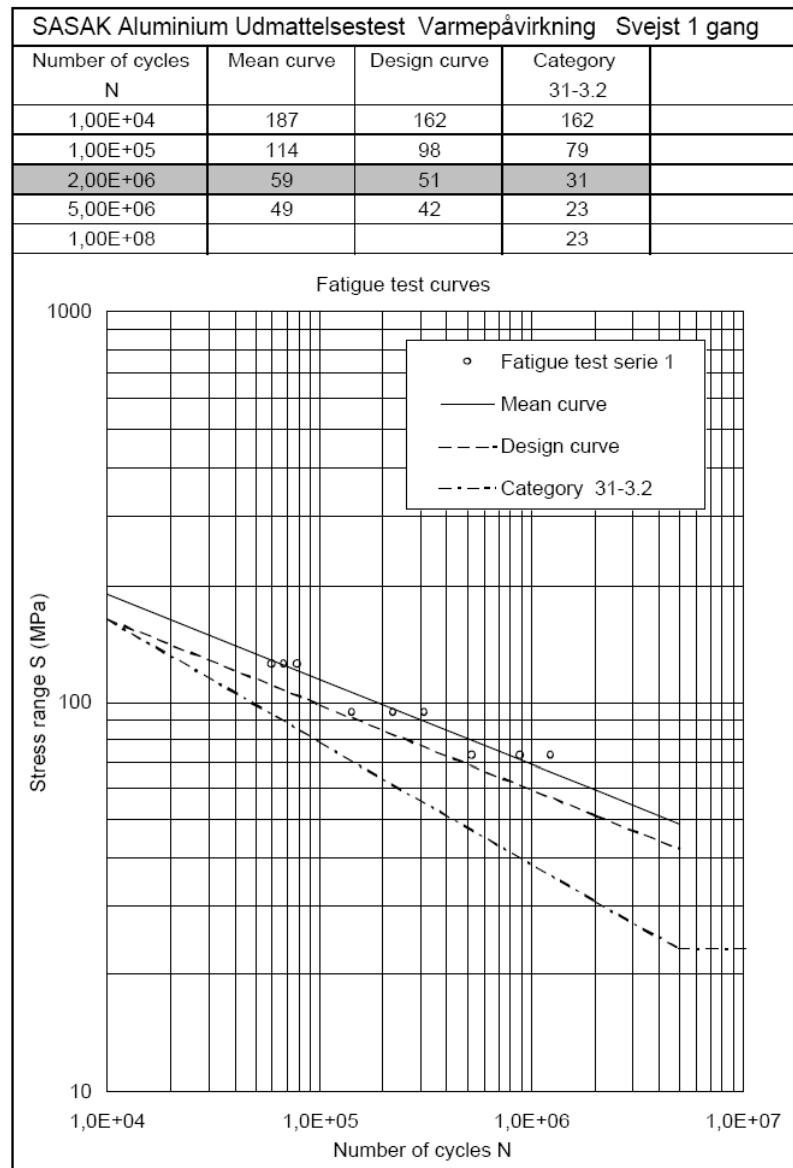


Fatigue - Advanced simulation

- ANSYS Workbench FEM Example

Inventor FEM Example
ANSYS Workbench FEM Example

Example – bicycle handlebar



Figur 9. Udmattelseskurve for emner svejst en gang

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION