بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

شکست، خزش و خستگی

جلسه هشتم
(خستگی - ۱)

دکتر رضا اسلامی فارسانی

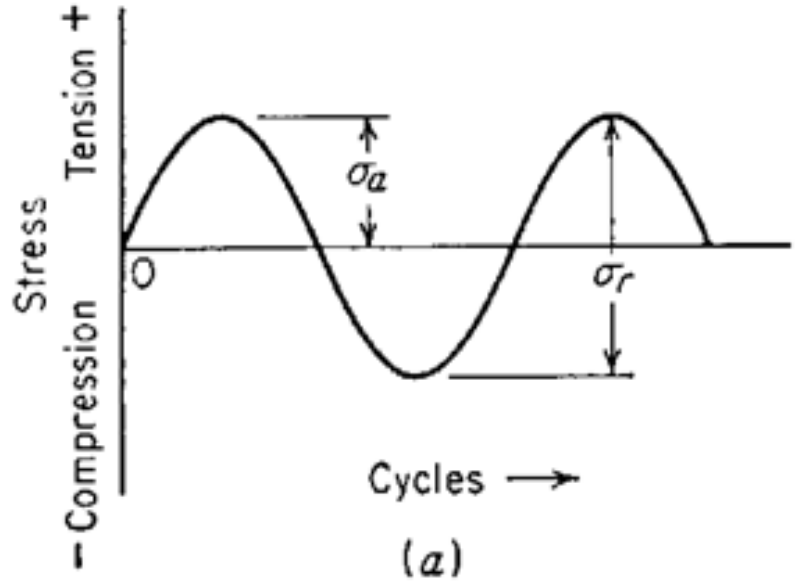
تعریف خستگی

- ✓ خستگی (Fatigue): شکست تدریجی پیش رونده ناشی از تنش های تناوبی
- ✓ خستگی، فرآیندی موضعی و پیش رونده از تغییر دائمی ساختار در نقطه یا نقاطی از جسم است که براساس اعمال تنش یا کرنش تناوبی فعال شده و پس از تعدادی سیکل کافی منجر به ایجاد ترک و رشد تدریجی و پایدار آن و در نهایت رسیدن به ابعاد بحرانی و شکست نهایی قطعه می گردد.
- ✓ شکست خستگی خطرناک است، چون بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می دهد.

تعریف خستگی

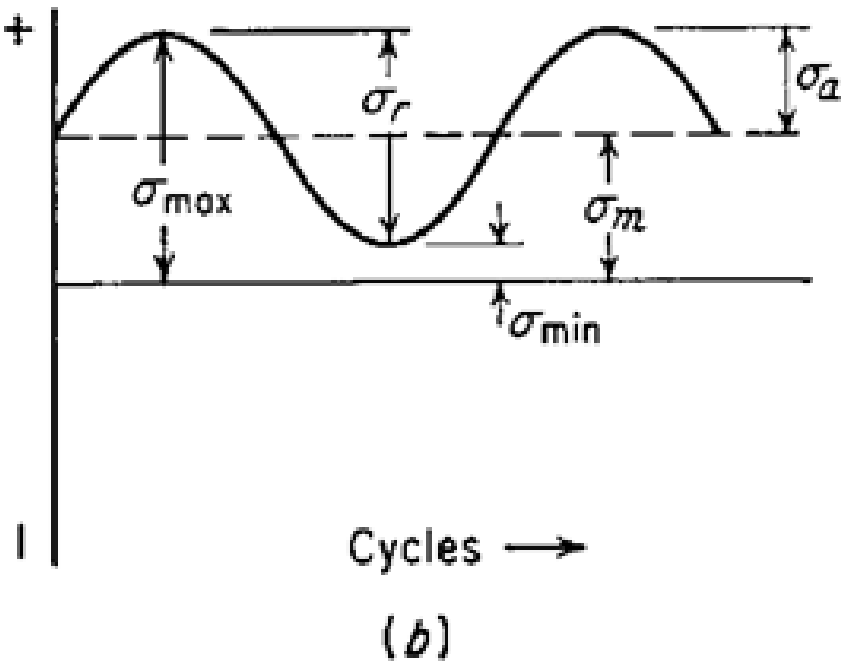
- ✓ خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییرشکل در شکست روی می دهد.
- ✓ معمولاً سطح شکست در مقیاس ماکروسکوپی عمود بر جهت تنش کششی اصلی است.عموماً شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می شود که از یک ناحیه هموار حاصل از عمل سایش با اشاعه ترک در مقطع و یک ناحیه ناهموار که در هنگام عدم تحمل بار توسط مقطع، در قطعه به صورت نرم شکسته شده است، تشکیل می شود.
- ✓ غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می شود که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می کند.

انواع تنش های تناوبی ایجاد کننده خستگی



- ✓ سیکل کاملاً معکوس: تنش های متناوب که از صفر تا حداکثر تغییر کرده و منظم هستند. در آزمایشات خستگی برای تعیین داده های خستگی عموماً از این حالت استفاده می شود. در این حالت، تنش حداقل و حداکثر برابر هستند که تنش کششی، مثبت و تنش فشاری، منفی است

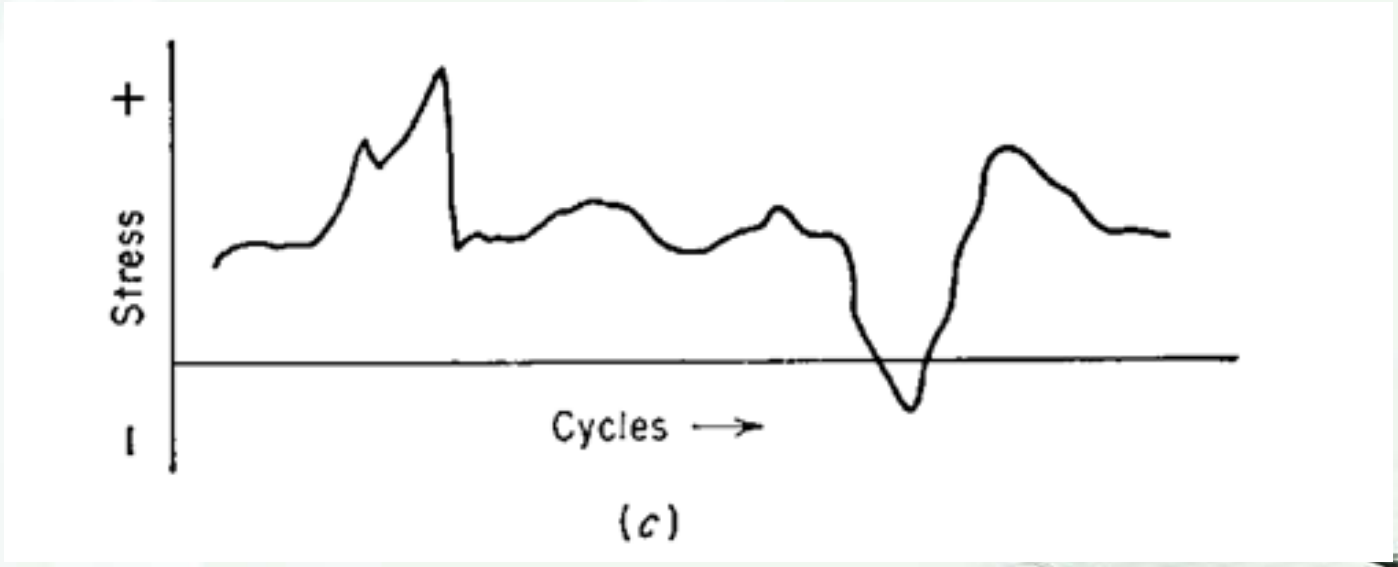
انواع تنش های تناوبی ایجاد کننده خستگی



- تنش های متناوبی که در محدوده تنشی خاصی بصورت منظم و متناوب وارد می شوند. در این حالت یک سیکل تنش تکراری داریم که در آن، تنش حداقل و حداکثر هر دو کششی هستند و با یکدیگر برابر نیستند.

انواع تنش های تناوبی ایجاد کننده خستگی

- ✓ سیکل تنشی پیچیده که بطور نامنظم و اتفاقی بر ماده وارد می شود.



کمیت هایی برای بیان داده های خستگی

Mean Stress, $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

✓ تنش متوسط: متوسط جمع جبری تنش حداکثر و حداقل در یک دوره

Stress Amplitude, $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

✓ دامنه تنش تناوبی: نصف محدوده تنش

Stress Range, $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

✓ محدوده تنش: اختلاف جبری تنش حداکثر و حداقل

Stress Ratio, $R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$

✓ نسبت تنش حداکثر و حداقل

$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$

✓ نسبت دامنه تنش تناوبی و تنش متوسط

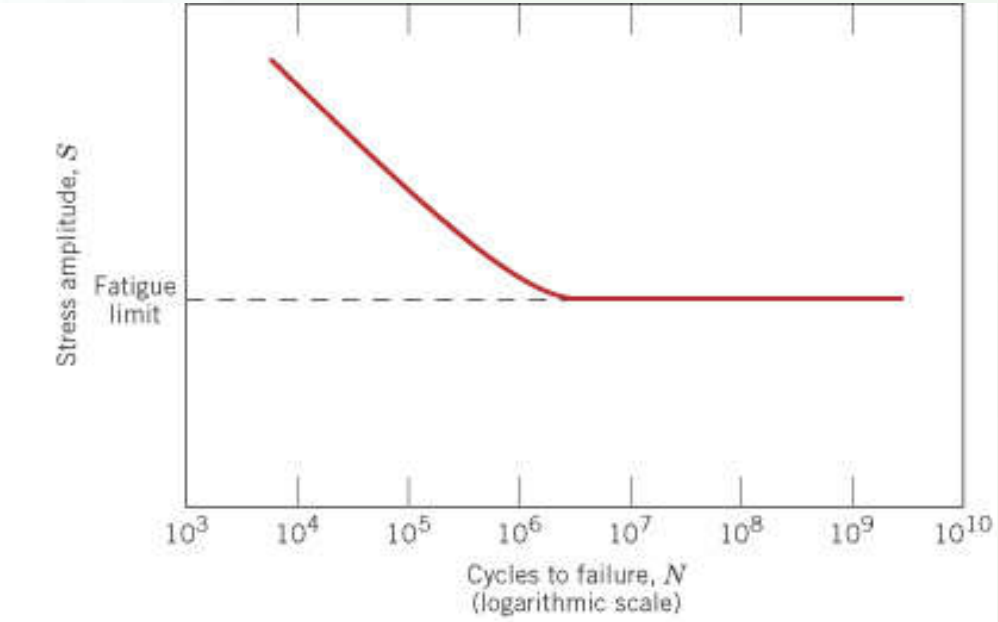
حد خستگی

- برای قطعات تحت بارهای استاتیکی، معیار طراحی اصلی، حد تسلیم است، اما برای قطعات تحت بارهای دینامیکی، امکان تسلیم ماده تحت تنش های کمتر وجود دارد. لذا لازم است برای این کاربردها، معیار دیگری تحت عنوان حد خستگی یا حد تحمل یا حد دوام تعریف شود.

- حد خستگی (Fatigue Limit): حداکثر تنشی که ماده بتواند تعداد فوق العاده زیاد تناوب و تقریباً نامحدود را بدون شکست تحمل کند.

حد خستگی

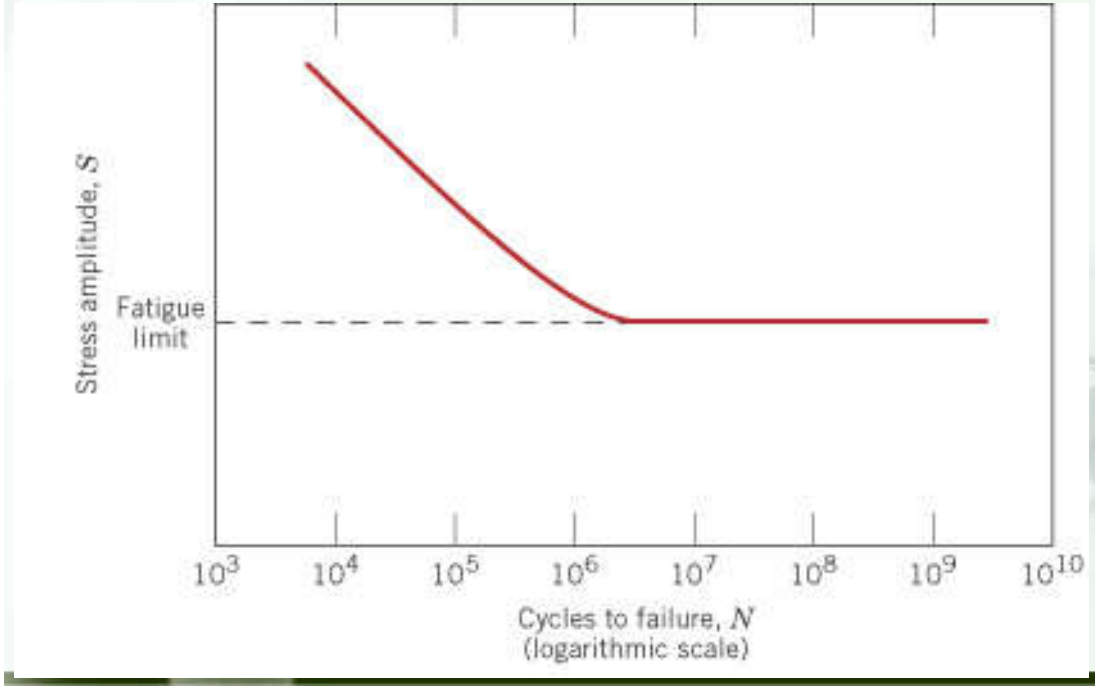
- حد خستگی، تنشی است که به ازای آن منحنی ولر، منحنی تنش (دامنه تنش) برحسب سیکل (S-N) به حالت افقی می رسد. برخی مواد نظیر فولادها دارای این حد هستند. مطابق با شکل، اگر تنش اعمالی بر فولاد کم شود، تعداد سیکل های تنش افزایش می یابد، یعنی فولاد می تواند سیکل های تنش بیشتری را تحمل کند. برای بسیاری از فولادها، حد خستگی تقریباً نصف استحکام کششی اندازه گیری شده در تست استاتیک است.



مفهوم نمودار ولر

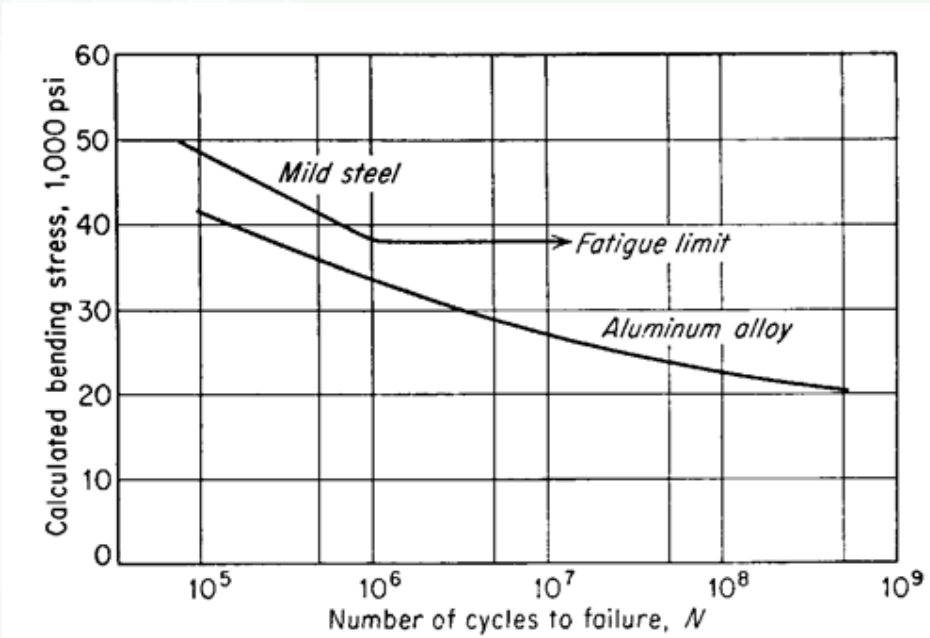
نمودار ولر بیان می کند که:

- ✓ در یک دامنه تنش اعمالی خاص، قطعه طی چند سیکل می‌شکند.
- ✓ در یک تعداد سیکل خاص، حداکثر تنشی که می تواند قطعه بدون شکست تحمل کند، چه مقدار است.
- ✓ با افزایش تنش اعمالی تعداد دور تا شکست کاهش می‌یابد.



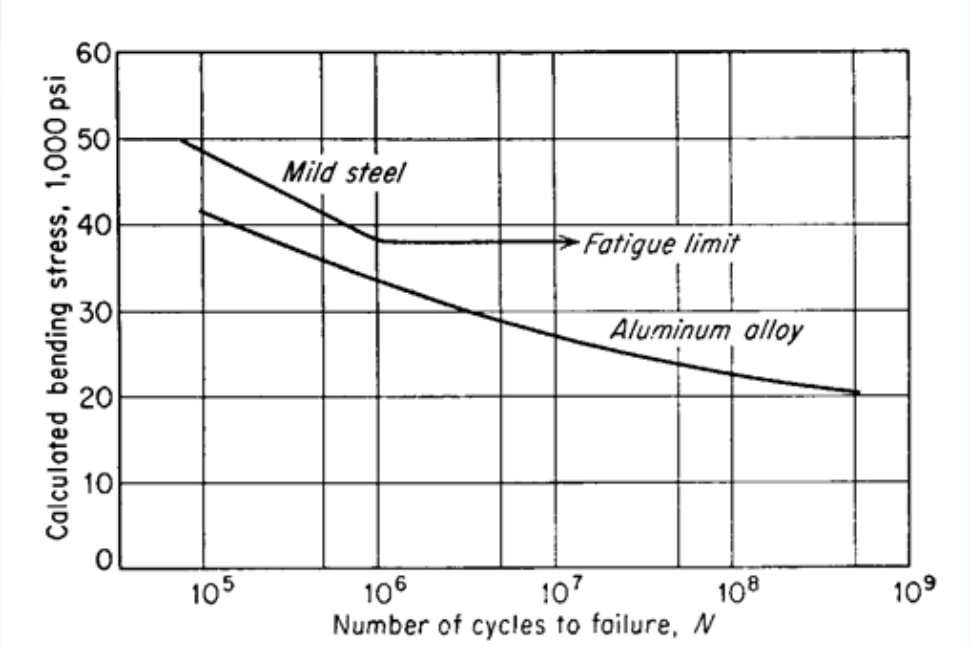
حد خستگی

برای تعیین حد تحمل ماده، تعداد زیادی نمونه با ابعاد یکسان و مشخصات یکسان در شرایط مشابه تولید شده و هر یک تحت یک تنش تناوبی خاص قرار گرفته و تعداد تناوب های منجر به شکست برای هر نمونه ثبت می شود. سپس نقاط حاصل (تنش- تناوب) برای نمونه های مختلف به هم وصل شده تا منحنی تنش تناوبی برحسب تعداد سیکل (منحنی ولر) رسم شود. قسمتی که به ازای آن منحنی مذکور افقی می شود، حد خستگی است.



حد خستگی

برخی فلزات بخصوص آلیاژهای آهنی (اکثر فولادها) و آلیاژهای تیتانیم و برخی آلیاژهای منیزیم دارای حد خستگی هستند. بسیاری از فلزات غیرآهنی نظیر آلیاژهای مس، آلومینیوم و برخی آلیاژهای منیزیم فاقد حد تحمل هستند. برای این مواد، براساس مشخصات و نوع کاربرد، حد تحمل تعریف می شود. حد تحمل آنها، حداکثر تنشی است که ماده بتواند تعداد مشخصی سیکل (معمولاً بین یک تا صد میلیون سیکل) را بدون شکست تحمل کند.



اثر تنش متوسط بر خستگی

منحنی های S-N معمولاً برای مواد در شرایط سیکل های کاملاً معکوس تنش (R=-1 یا $\sigma m=0$) بدست می آیند. اما در عمل اکثر قطعات در حین کار تحت تنش های متوسط غیرصفر واقع می شوند. تجربه نشان داده است که حد خستگی به مقدار تنش متوسط بستگی دارد. تنش متوسط کششی، حد خستگی را در مقایسه با شرایط تنش متوسط صفر کاهش می دهد. اما تنش متوسط فشاری، اثر معکوس دارد. هر چه تنش متوسط کششی بیشتر باشد، تنش تناوبی مجاز کمتر می شود.

روابط تجربی تاثیر تنش متوسط بر خستگی

چندین رابطه تجربی (گودمن، سودربرگ و گربر) برای تاثیر تنش متوسط بر تنش تناوبی مجاز وجود دارد.

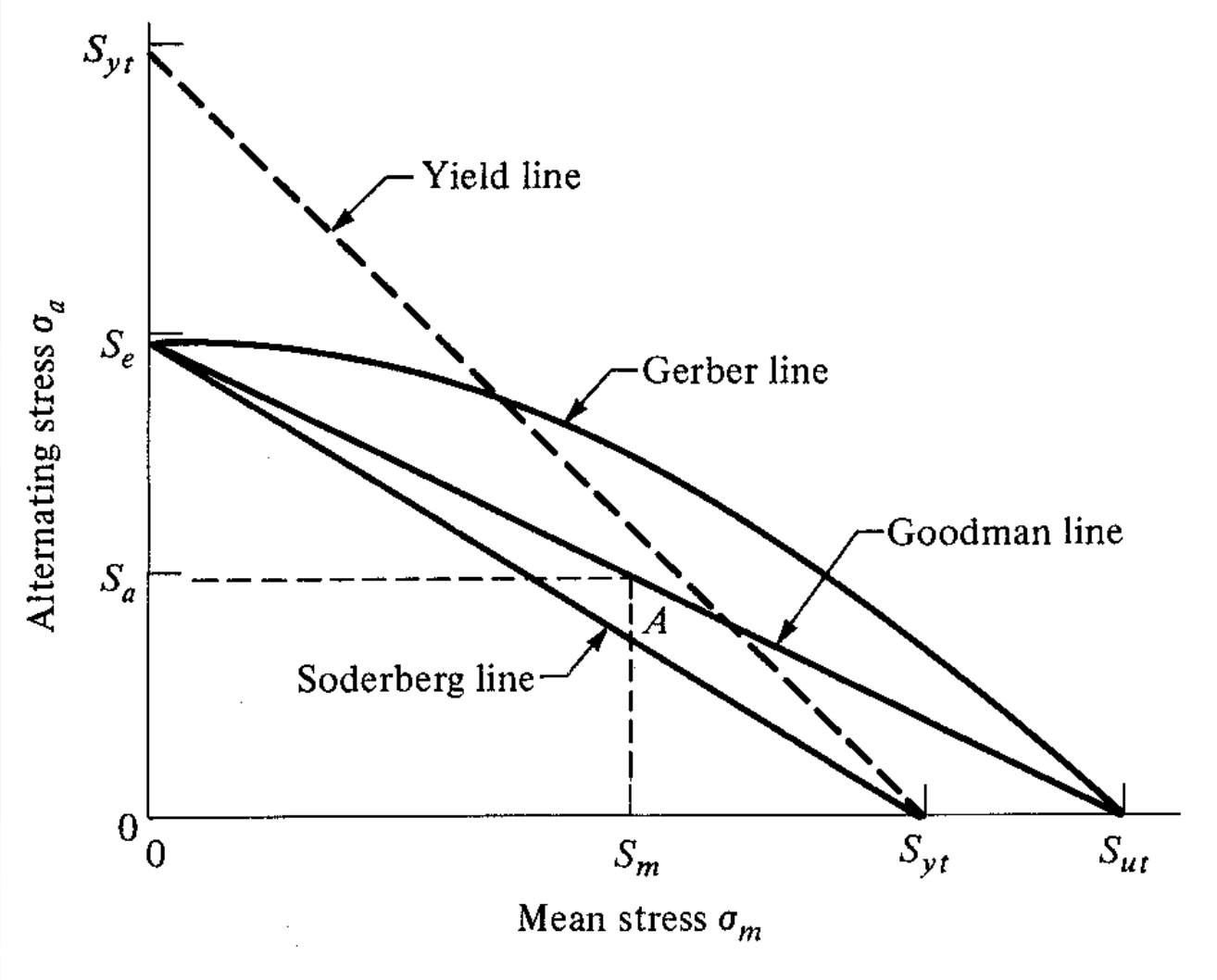
$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0}\left\{1-\frac{\sigma_m}{\sigma_y}\right\} \quad \text{(Soderberg)}$$

$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0}\left\{1-\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}}\right\} \quad \text{(Goodman)}$$

$$\sigma_a = \sigma_a|_{\sigma_m=0}\left\{1-\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}}\right)^2\right\} \quad \text{(Gerber)}$$

روابط تجربی تاثیر تنش متوسط بر خستگی

اغلب نتایج بین روابط گربر و گودمن هستند.



اثر تنش متوسط بر خستگی

عمر خستگی یک قطعه را در شرایطی که تنش متوسط صفر نباشد، می توان پیش گویی کرد. در این حالت برای تخمین اثرات تنش متوسط بر عمر خستگی، تنها داشتن یک منحنی S-N برای یک مقدار معین تنش متوسط لازم است. معمولاً آزمایش خستگی در حالت بارگذاری کاملاً معکوس که در آن تنش متوسط صفر است، استفاده می شود. برای تنش های متوسط غیر صفر، یک دامنه تنش کاملاً معکوس معادل σ_{av} می تواند در منحنی S-N و در شرایط تنش متوسط صفر وارد شود و تعداد سیکل های لازم را برای شکست یا عمر خستگی قطعه را پیش گویی کند.

اثر تنش متوسط بر خستگی

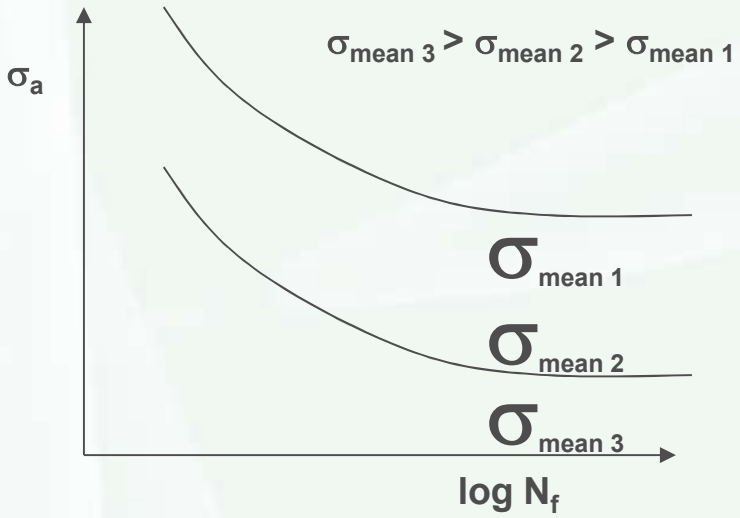
روابط متعددی برای σ_{av} وجود دارد که رابطه گودمن معروفترین آنهاست.

$$\sigma_{av} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}}$$

σ_a، دامنه تنش تناوبی در شرایط $\sigma_m = 0$ است. تنش کششی با علامت مثبت و تنش متوسط فشاری با علامت منفی نشلن داده می شوند. مطابق با معادله بالا، تنش متوسط کششی، مقدار σ_{av} را افزایش می دهد. با وارد کردن σ_{av} در منحنی S-N (برای حالت $\sigma_m = 0$)، سیکل های لازم برای شکست کم می شوند، یعنی عمر خستگی کاهش می یابد. در حالت تنش متوسط فشاری، عکس این حالت است..

اثر تنش متوسط بر خستگی

اگر منحنی های S-N ماده معینی را برحسب مقادیر مختلف σ_m رسم کنیم، خواهیم داشت:



بنابراین به ازای یک سطح تنش نوسانی اعمال شده (σ_a)، با افزایش σ_m، عمر نمونه کم می شود.

سرعت رشد ترک در خستگی

سرعت رشد ترک در خستگی بصورت $\frac{da}{dN}$ بیان می شود:

$$\frac{da}{dN} = c\sigma^m a^n$$

σ: تنش تناوبی

C: عدد ثابت

a: طول ترک

در تحقیقات مختلف، m، از ۲ تا ٤ و n، از ۱ تا ۲ تغییر می کنند.

سرعت رشد ترک در خستگی

رشد ترک با کرنش کل نیز رابطه دارد.

$$\frac{da}{dN} = c\sigma^m a^n = c\varepsilon^m$$

سرعت رشد ترک می تواند برحسب فاکتور شدت تنش نیز بیان شود. در این

حالت سرعت رشد ترک تابعی از پارامتر شدت تنش است.

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$$

سرعت رشد ترک در خستگی

یکی از ساده ترین و پرکاربردترین معادلات برای سرعت رشد ترک در خستگی، معادله پاریس است.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

ΔK، پارامتر شدت تنش تناوبی است. C و n نیز ثوابت ماده هستند که به دما، فرکانس و نسبت بار بستگی دارند.

سرعت رشد ترک در خستگی

رابطه پاریس نشان می دهد که تغییر طول ترک در هر سیکل تابعی از اختلاف بین پارامترهای شدت تنش ماکزیمم و مینیمم است. چون شدت تنش تابعی از تنش و طول ترک است، ΔK مستقیماً طیف تنش را به سرعت رشد ترک مرتبط می سازد. در کمتر از یک مقدار بحرانی برای ΔK که به پارامتر شدت تنش آستانه معروف است، سرعت رشد ترک بسیار کم است. لذا رشد ترک وقتی روی می دهد که ΔK بیش از مقدار بحرانی آن باشد.