بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

شکست، خزش و خستگی

جلسه نهم
(خستگی- ۲)

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.

رابطه مینر در تجمع صدمات ناشی از خستگی

✓ در بعضی موارد تغییرات تنشی متغیر است و تنش های متناوبی که به قطعه اعمال می شود یکنواخت نبوده و تغییر می کنند. عمر خستگی قطعه در این حالت از رابطه مینر بدست می آید:

$$\sum_i \frac{N_i}{N_{f_i}} = 1$$

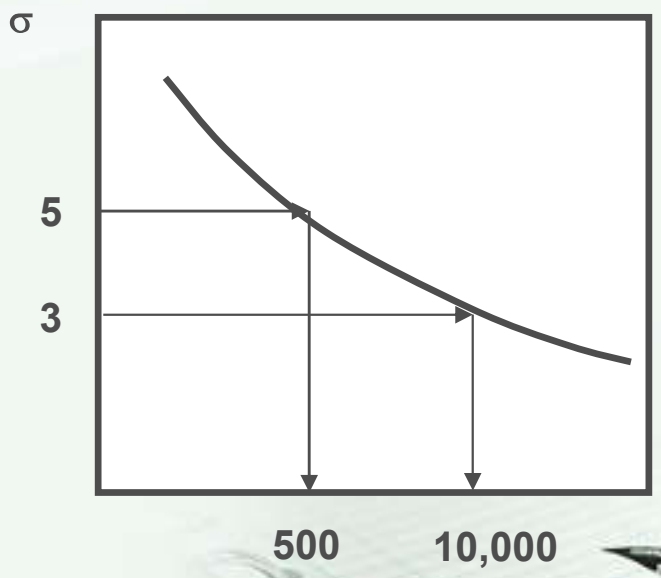
N_i: تعداد سیکل های وارده بر جسم

N_f: تعداد سیکل های لازم برای شکست نمونه

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \ldots + \frac{n_k}{N_k} = 1 \quad or \quad \sum_{j=1}^{j=k} \frac{n_j}{N_j}$$

مثال رابطه مینر

Stress Range, σ_i (ksi)	No. Applied Cycles, N_i	No. Cycles to Failure, N_{fi}
3	900	10,000
5	50	500



$\Sigma N_i/N_{fi}$ = 900/10,000 + 50/500

= 0.09 + 0.10

= 0.19

0.19 < 1.0 OK

۱۹ درصد از عمر خستگی قطعه استفاده شده و ۸۱ درصد از عمر خستگی قطعه باقی مانده است.

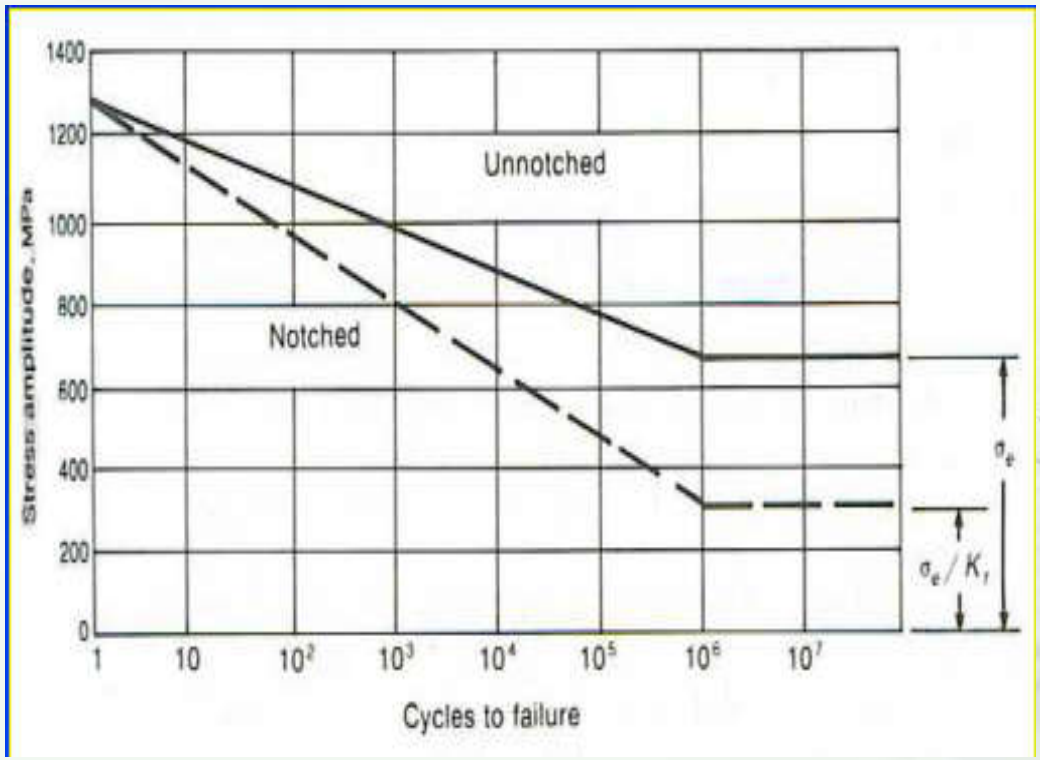
تاثیر شیار بر عمر خستگی

✓ در خستگی وجود ترک وآهنگ رشد آن بسیار مهم است. این موضوع به هندسه قطعه بیشتر وابسته است تا خواص ماده. حساسیت به شیار را با متغیر q بیان می کنند.

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Kt: فاکتور تمرکز تنش تئوری (وابسته به خاصیت الاستیسیته نوک ترک)

Kf: فاکتور شیار خستگی (نسبت استحکام خستگی نمونه شیاردار به نمونه فاقد شیار)



اثر دما بر خستگی

آزمایش های خستگی فلزات در دماهای کمتر از دمای اتاق نشان می دهد که استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می شود. با این که فولادها در حالت خستگی در دمای کم به شیار حساس تر می شوند، هیچ دلیلی برای نشان دادن وقوع هر گونه تغییر ناگهانی در خواص خستگی در دماهای کمتر از دمای تبدیل تردی به نرمی وجود ندارد. همچنین هرچه استحکام خزش ماده ای بیشتر باشد ،استحکام خستگی آن ماده در دمای زیاد بیشتر است.

اثر دما بر خستگی

تنش هایی که باعث ایجاد شکست خستگی در دمای بالا می شوند، لزوماً نباید از منابع مکانیکی ناشی شده باشند. شکست خستگی می تواند در شرایطی که هیچ تنشی به دلایل مکانیکی تولید نمی شود، توسط تنش های گرمایی نوسانی بوجود آید. تنش های گرمایی وقتی ایجاد می شوند که توسط قیدی از تغییر ابعاد یک قطعه به علت تغییر دما جلوگیری شود.

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

اثر دما بر خستگی

اگر شکست در اثر اعمال تنش گرمایی رخ دهد ، این پدیده به شوک گرمایی موسوم است.

اما اگر شکست پس از اعمال مکرر تنش گرمایی رخ دهد، این حالت خستگی حرارتی نامیده می شود. غالباً در وسایلی که در دمای بالا کار می کنند، شرایط ایجاد شکست در اثر خستگی گرمایی وجود دارد. فولاد زنگ نزن آستنیتی از آلیاژهایی است که خصوصاً به دلیل هدایت گرمایی کم و انبساط گرمایی زیاد خود نسبت به این پدیده حساس است.

مکانیزم خستگی

شکست ناشی از پدیده خستگی با شکست ناشی از اعمال تنش های کششی تک محوری متفاوت است. تغییرشکل پلاستیک به شکست بر اثر خستگی کمک می کند، اما جلوی شکست ترد را می گیرد. وقتی که تنش در سطوح زیاد باشد، ترک های خستگی عموماً در سطح شروع می شوند. درحالی که در شکست کششی، رشد ترک های ریز در نزدیکی مرکز ناحیه گلویی روی می دهد.

مکانیزم خستگی

فرآیند شکست خستگی سه مرحله ی مجزا دارد:

- ✓ جواند زنی: تشکیل ترک های ریز در برخی نقاطی با تمرکز تنش زیاد
- ✓ اشاعه (رشد) ترک: پیشروی سریع ترک در هر سیکل تنش
- ✓ شکست: رسیدن ترک به اندازه بحرانی و بروز سریع شکست.

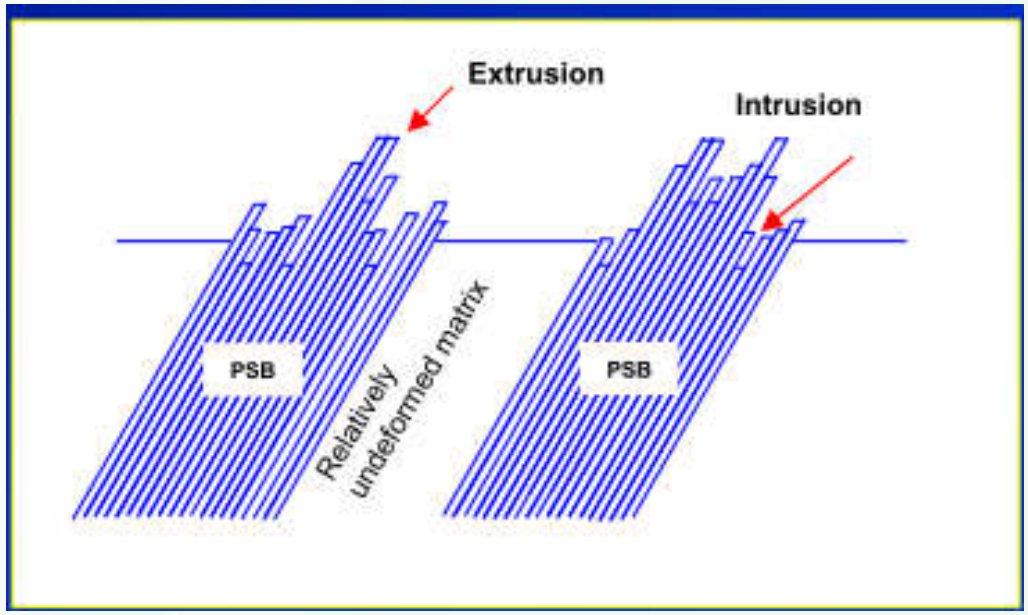
مکانیزم خستگی

- ✓ تقریباً همواره ترک هایی که با شکست خستگی همراه هستند، از برخی نقاط تمرکز تنش در سطح قطعه جوانه زده یا شروع می شوند. این نقاط شامل خراش های سطحی، شیارها، گوشه های تیز و نظایر آن هستند.
- ✓ بارگذاری سیکلی می تواند ناپیوستگی های بسیار ریز سطحی (فرورفتگی ها) را به دلیل لغزش نابجایی ها پدیدار آورد که خود به عنوان مواضع جوانه زنی ترک عمل می کنند.

مکانیزم خستگی

از آنجا که تغییرشکل پلاستیک در سطح یک فلز آسان تر روی می دهد بویژه وقتی که تنش در سطوح زیاد باشد، بنابراین ترک های خستگی عموماً از سطح شروع می شوند.

ابتدا لغزش روی صفحات با جهت کریستالی مناسب انجام می شود و در اثر اعمال تنش های کششی و فشاری این لغزش سبب بوجود آمدن ناهمواری در سطح می شود که شامل برآمدگی و فرورفتگی هایی در سطح است.



مکانیزم های خستگی

در ناحیه ی تمرکز تنش که در این فرورفتگی ها بوجود می آید، یک ترک ظاهر می شود. این ترک ها ابتدا روی صفحاتی که با محور تنش زاویه ٤٥ درجه می سازند (صفحات با تنش برشی زیاد)، گسترش می یابند (مرحله اول رشد ترک- رشد ترک لغزشی یا رشد ترک نوار لغزش). در ادامه، رشد ترک های ریز در جهت عمود بر محور تنش (صفحاتی با تنش کششی زیاد) شروع می شود (مرحله ۲ رشد ترک).

مکانیزم های خستگی

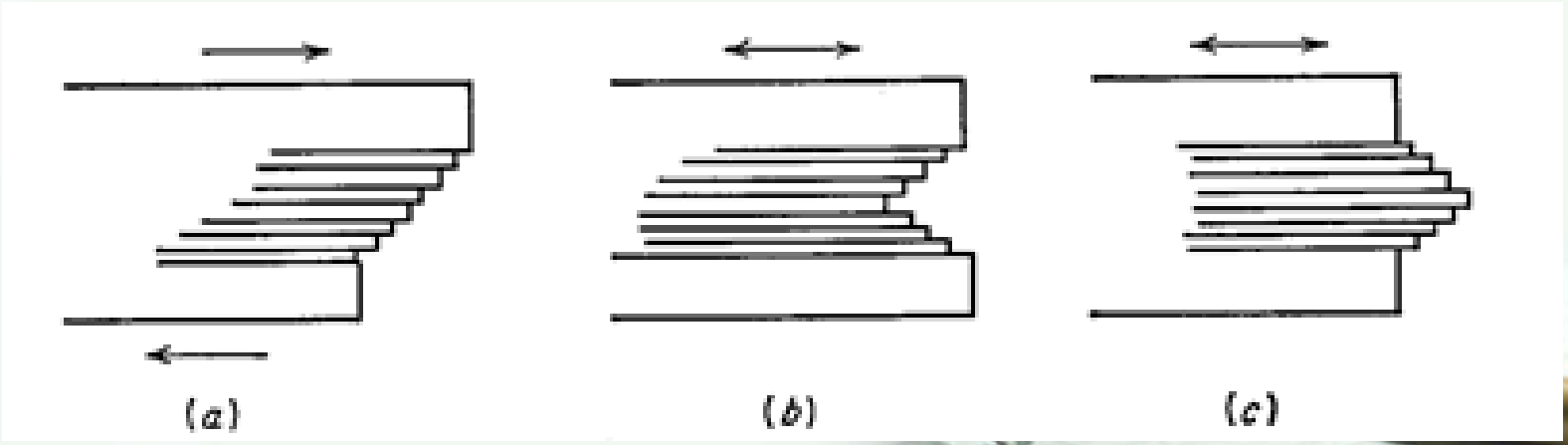
این ترک ها در هر سیکل تنش، مقدار محدودی گسترش یافته و در مرحله معینی از رشد ترک خستگی، مقدار تنش در سطح مقطع ترک نخورده به حدی می رسد که سبب شکست معمولی بر اثر اعمال تنش کششی می شود. شکست نهایی هنگامی رخ می دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند. این شکست با توجه به نوع آلیاژ و شرایط کاری می تواند ترد یا نرم باشد.

مکانیزم های خستگی

مدل Wood برای ایجاد ترک خستگی در اثر تغییرشکل پلاستیک موضعی در زمان افزایش بار در یک سیکل است که لغزش در یک صفحه لغزشی مساعد صورت می پذیرد. در قسمت کاهش بار یک سیکل، لغزش در صفحه ای موازی صفحه لغزش قبلی و درجهت عکس انجام می پذیرد، چون کرنش سختی و اکسیداسیون سطوح آزاد ایجاد شده مانع لغزش در سطح اول می شوند. این لغزش سیکل اول سبب پیدایش برآمدگی یا فرورفتگی شده و در نهایت این پدیده در اثر تغییرشکل های پلاستیک ممتد در سیکل های بعدی رشد نموده و به ترک تبدیل می شود.

مکانیزم تشکیل ترک خستگی

مدل Wood برای تشکیل ترک خستگی: a) تغییرشکل استاتیک، b) تغییرشکل خستگی که منجر به تورفتگی سطحی می شود، c) تغییرشکل خستگی که منجر به برآمدگی و باند لغزش می شود.



مکانیزم رشد ترک خستگی

مدل رشد ترک خستگی (مکانیزم لغزشی معکوس رشد):

۱) ترک تیز درمیدان تنش کششی سبب ایجاد تمرکز تنش بزرگی در نوک آن شده، لذا لغزش به آسانی در نوک ترک انجام می شود. در این حالت امکان داردکه لغزش در امتداد صفحات لغزشی مناسب انجام شده و ترک باز شود.

۲) ترک با افزایش طول همراه است و در ادامه لغزش می تواند در صفحه دیگری بوجود آید.

۳) کارسختی و افزایش تنش سبب می شودکه سایر صفحات لغزشی موازی فعال شده ونوک ترک گرد شود.

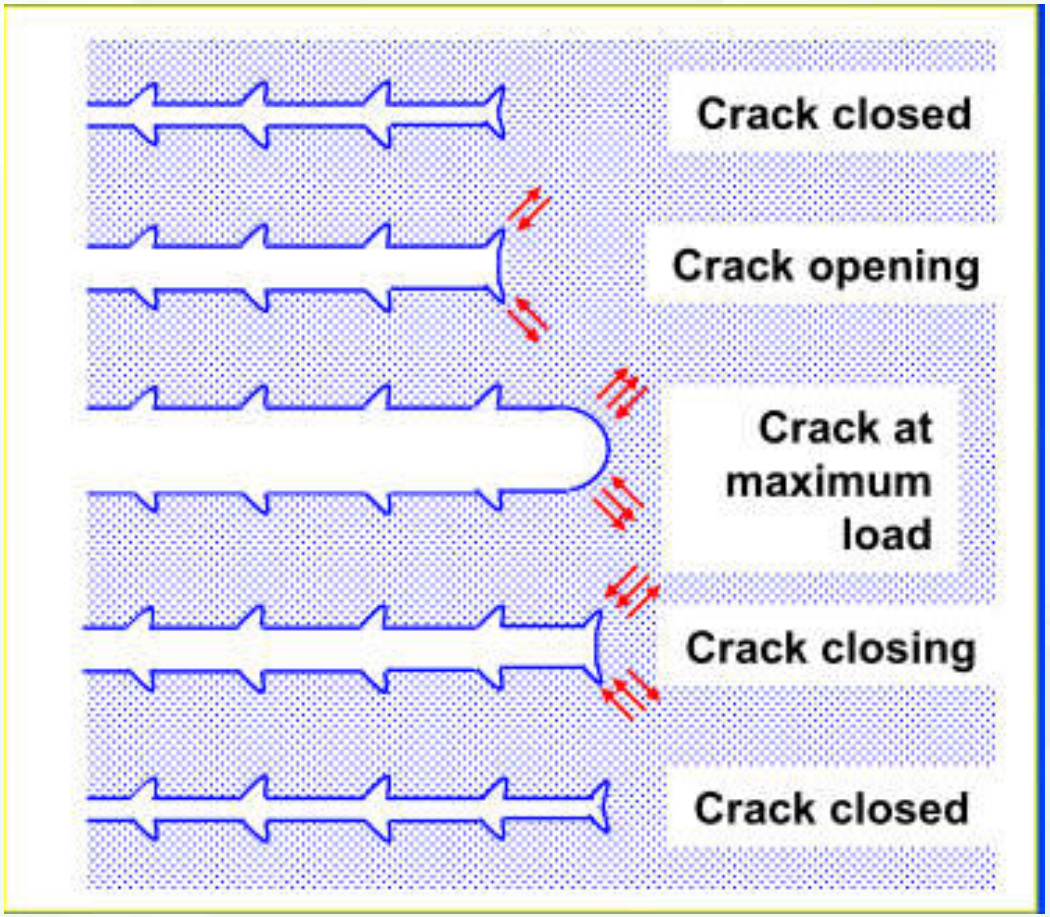
مکانیزم رشد ترک خستگی

مدل رشد ترک خستگی (مکانیزم لغزشی معکوس رشد):

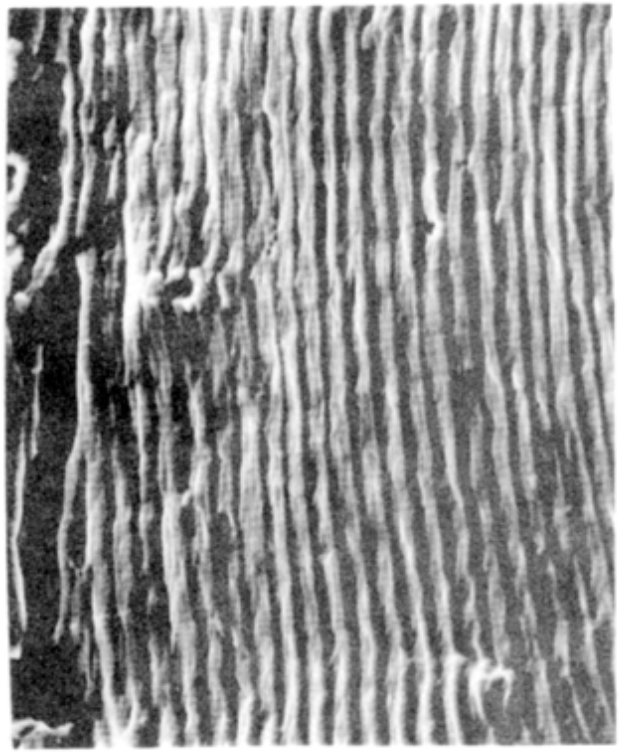
٤) در مجموع درمرحله افزایش بار یک سیکل، ترک به میزان مشخصی رشد می کند. تغییرشکل پلاستیک در ناحیه کوچکی که توسط محیط های الاستیک احاطه شده بوجود می آید. با بار برداری، محیط های الاستیک منقبض شوه و بر منطقه پلاستیک تنش های فشاری اعمال می کنند که از تنش تسلیم حداقل در نوک ترک بیش تر هستند. لذا تغییرشکل پلاستیک معکوس بوجود آمده و یا باعث بسته شدن یا دوباره تیز شدن نوک ترک می شوند.

مکانیزم رشد ترک خستگی

مدل رشد ترک خستگی (مکانیزم لغزشی معکوس رشد)



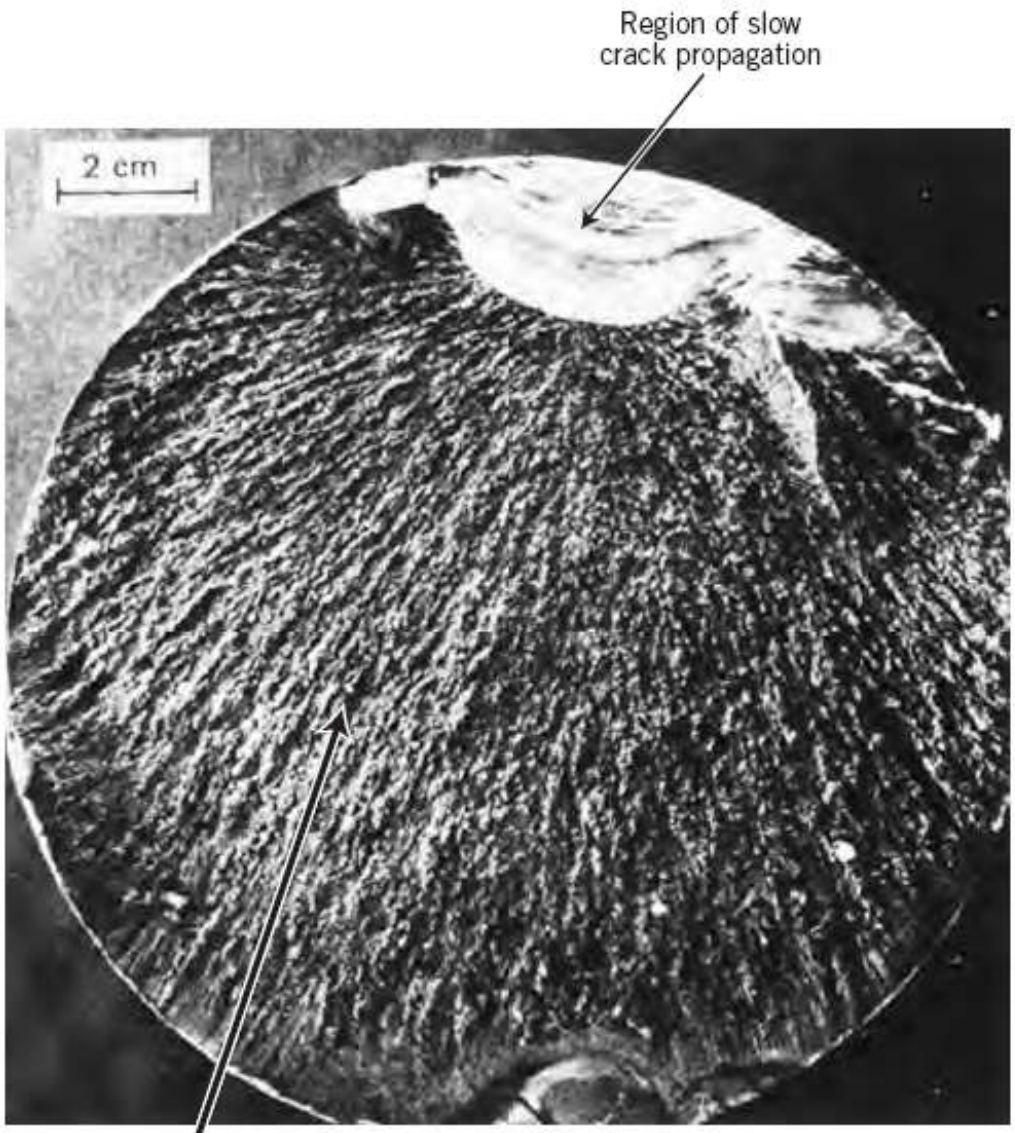
سطح شکست خستگی



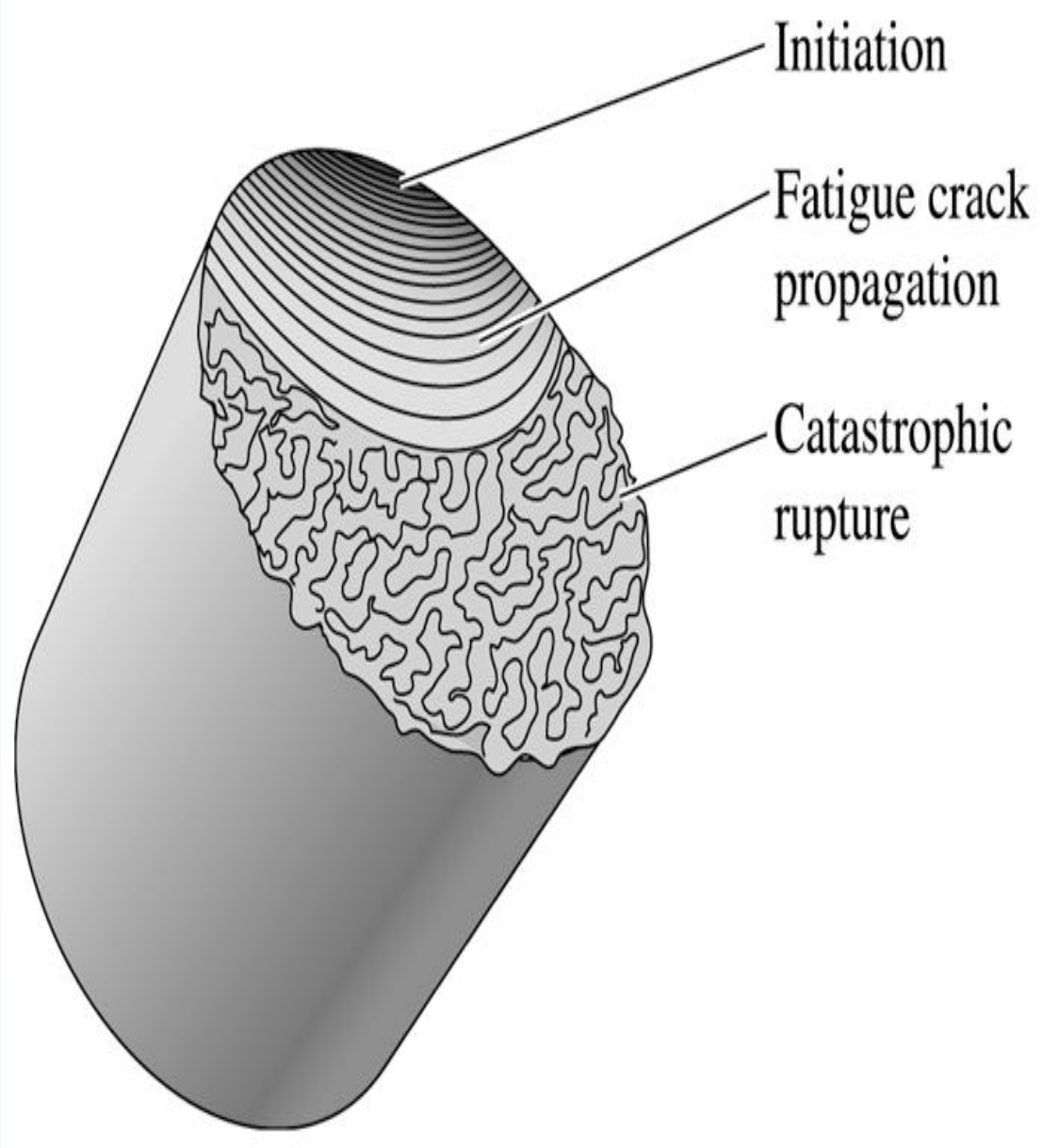
خطوط خستگی حاصل از رشد ترک خستگی

فاصله بین خطوط معرف میزان رشد ترک در هر سیکل است.

سطح شکست خستگی



سطح شکست خستگی



تقسیم بندی خستگی

- ✓ خستگی براساس تنش: بر مبنای تنش های بالا و تغییرشکل پایین– چرخه پایین
- ✓ خستگی براساس کرنش: بر مبنای تنش های پایین و تغییرشکل بالا– چرخه بالا
- ✓ خستگی براساس مکانیک شکست: رشد ترک ها مطرح است و در هر سیکلی میزان رشد ترک مشخص می شود

منابع بارگذاری خستگی

- ✓ بارهای استاتیکی: بطور مستمر روی قطعه قرار دارد.
- ✓ بارهای کاری: در حین کار بر روی قطعه اعمال می شوند.
- ✓ بارهای ارتعاشی: بارهایی که در حین کار اعمال شده و باعث پدیده خستگی می شوند.
- ✓ بارهای اتفاقی: بطور اتفاقی روی می دهند مانند زلزله و ...

اثر سطح بر خستگی

شکست خستگی تقریباً همیشه از سطح شروع می شود. مدارک فراوانی حاکی از این که خواص خستگی به شرایط سطحی بسیار حساس هستند، در دست است. عواملی که در سطح یک نمونه خستگی تاثیر می گذارند، عمدتاً به سه دسته تقسیم می شوند:

- ✓ ناهمواری سطح یا منابع تنش سطحی
- ✓ تغییر استحکام خستگی فلز سطحی
- ✓ تغییرات شرایط تنش باقیمانده در سطح

علاوه بر این ،سطح فلز در معرض اکسایش و خوردگی نیز قرار دارد.

اثر متغیرهای متالورژیکی بر خستگی

خواص خستگی فلزات کاملاً به ساختار حساس است. غالباً خواص خستگی به خواص کششی وابسته اند. بطور کلی حد خستگی فولادهای ریخته شده و کار شده تقریباً ۵۰ درصد استحکام نهایی کششی است. نسبت حد خستگی به استحکام کششی نسبت خستگی نامیده می شود. نسبت خستگی فلزات غیرآهنی مانند نیکل، مس و منیزیم در حدود ۳۵ درصد است. اما با زیاد شدن استحکام تسلیم توسط مکانیزم های استحکام دهی مختلف، معمولاً حد خستگی بطور متناسب با آن زیاد نمی شود. اکثر مواد با استحکام زیاد، در برابر خستگی با محدودیت مواجه اند.

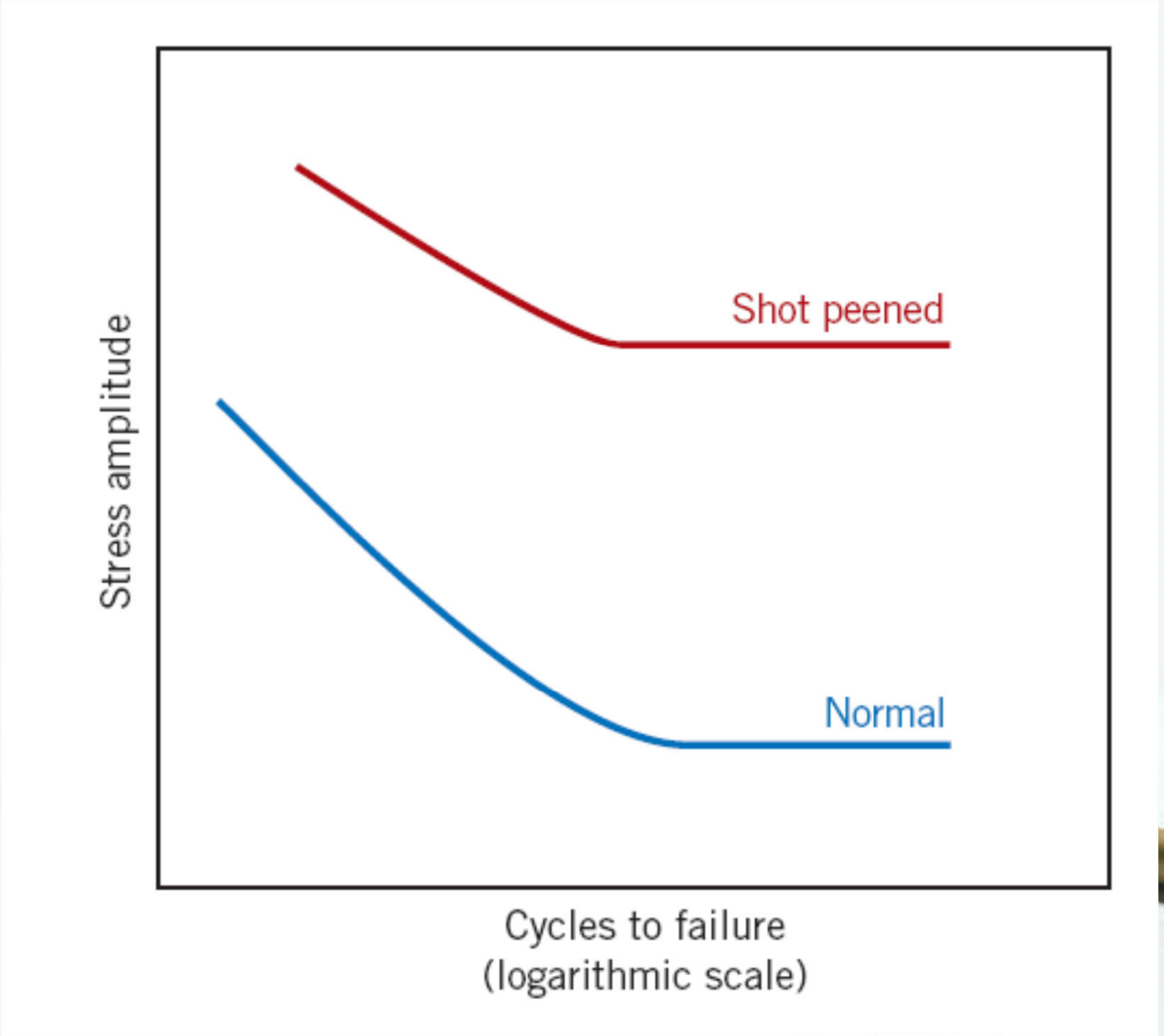
اثر متغیرهای متالورژیکی بر خستگی

رابطه عمر خستگی با اندازه دانه نیز به شیوه تغییرشکل بستگی دارد. بیشترین تاثیر اندازه دانه بر عمر خستگی در شرایط چرخه زیاد و تنش کم است که در آن ایجاد ترک مرحله ۱ مسلط است. در موادی مانند آلومینیوم و مس، ساختارهای سلول نابجایی به سادگی به وجود آمده و اشاعه ترک مرحله ۱ را کنترل می کند. بنابراین ساختار سلول نابجایی، اثر اندازه دانه را می پوشاند. اما در ماده ای مانند برنج آلفا، عدم وجود ساختار سلول نابجایی باعث می شود مرزهای دانه آهنگ ایجاد ترک را کنترل کنند.

عوامل موثر بر بهبود عمر خستگی

- ✓ صیقلی بودن سطح
- ✓ اعمال روش های بهبود استحکام کششی
- ✓ روش های سخت کردن سطحی جهت جلوگیری از جوانه زنی ترک های خستگی
- ✓ اعمال تنش های پسماند فشاری در سطح قطعه (نظیر ساچمه زنی)
- ✓ دانه ریز کردن ساختار
- ✓ تغییرات طراحی در جهت کاهش تمرکز تنش

اثر ساچمه زنی بر عمر خستگی



عوامل موثر بر کاهش عمر خستگی

- ✓ عیوب مختلف نظیر فازهای رسوبی و ناخالصی های غیرفلزی
- ✓ محل های تمرکز تنش همچون سوراخ ها، شیارها، گوشه های تیز و ...
- ✓ افزایش مقدار تنش متوسط
- ✓ عملیات سطحی نظیر ماشین کاری که سبب خراش و شیار در سطح قطعه می شوند.
- ✓ عوامل محیطی نظیر حرارت و خوردگی
- ✓ تنش های تناوبی اولیه با دامنه بزرگتر از حد تحمل
- ✓ روش های ساخت نظیر ریخته گری
- ✓ اندازه قطعه

ضرایب اصلاح حد خستگی

اثر عوامل مختلف را می توان به صورت ضرایبی بر حد خستگی ماده بررسی نمود. مقدار عددی هر یک از ضرایب اصلاح، کمتر از یک بوده و هر کدام بیانگر تنها اثر یک عامل است. این ضرایب به شرح زیر هستند:

- ✓ ضریب پرداخت سطح
- ✓ ضریب اندازه
- ✓ ضریب قابلیت اعتماد (جهت منظور کردن تغییرات اتفاقی)
- ✓ ضریب دمای کار
- ✓ ضریب بارگذاری (نوع بارگذاری و حالت تنش)
- ✓ ضریب تمرکز تنش
- ✓ ضریب محیط کار
- ✓ ضریب فرآیند ساخت

اثر ضرایب اصلاح بر حد خستگی

- ✓ با ضرب کردن ضرایب اصلاح در حد خستگی ماده (مطابق با آزمون خستگی)، حد خستگی کاهش می یابد. البته اگر شرایط برای هر عامل ایده ال باشد و آن عامل تاثیر منفی بر خستگی نگذارد، آن ضریب معادل یک می شود.

- Rotational bending fatigue limit, S_e',
- Surface conditions, k_a,
- Size, k_b,
- Mode of loading, k_c,
- Temperature, k_d
- Reliability factor, k_e
- Miscellaneous effects (notch), k_f

Fatigue limit of a machine part, S_e

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f \cdot S_e'$$