

مکانیک شکست (خستگی و خزش در سازه‌ها)

خستگی نوعی از تخریب است و هنگامی مشاهده می‌شود که نیروی اعمالی دینامیک است و مقادیر بردار نیروی (مقدار و جهت و راستا) اعمالی باگذشت زمان عوض می‌شود، قطعه در تنش‌هایی کمتر از تنش تسلیم و استحکام کششی می‌شکند. تخریب بعد از تعداد نوسانات طولانی نیروی اعمالی صورت می‌گیرد و بنابراین ممکن است مدت زمانی طول بکشد تا قطعه بشکند. شکست از طریق پدیده خستگی مانند شکست ترد رخ می‌دهد و قطعه قبل از شکست تغییر شکل قابل‌مشاهده زیادی نشان نمی‌دهد. شکست از طریق خستگی با جوانه‌زنی و رشد ترک همراه است و سطح مقطع شکست، عمود بر تنش اعمالی است. تنش اعمالی می‌تواند به صورت کشش-خمش یا پیچش یا مجموعه‌ای از آن‌ها باشد؛ اما مقدار تنش اعمالی (مقدار-جهت و راستا) باگذشت زمان تغییر می‌کند و تنش‌ها به صورت سیکل‌های تکرارشونده (مرتب یا نامنظم) بر جسم اعمال می‌شود.

۱- استحکام خستگی Fatigue Strength

تنشی که در یک تعداد دور مشخص باعث شکست قطعه از طریق خستگی می‌شود.

۲- عمر خستگی: fatigue life.

تعداد دوری که قطعه در یک تنش مشخص می‌زند تا از طریق خستگی دچار تخریب شود.

مکانیزم خستگی شامل سه مرحله است:

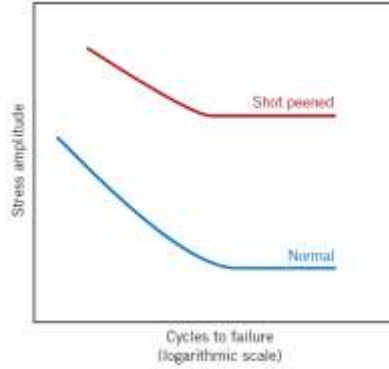
- ۱- نرم شدن سیکلی
- ۲- جوانه‌زنی ترک
- ۳- رشد و گسترش ترک

جوانه‌زنی ترک از مکان‌های تمرکز تنش نظیر سوراخ‌ها - گوشه‌های تیز- ترک‌های سطحی و مانند آن‌ها شروع می‌شود. در صورت عدم وجود این عوامل ترک‌های اولیه حین اعمال بارهای سیکلی به وجود می‌آیند؛ اما طبیعت تکرارشونده بارهای اعمالی باعث می‌شود تغییرات (مثلاً تغییر شکل پلاستیک) در مکان‌هایی خاص (مثلاً نزدیک ناخالصی‌های درونی) متمرکز شود و با تجمع تغییرات در این نواحی ترک اولیه ایجاد می‌شود. این ترک اولیه در هر سیکل مقداری رشد می‌کند و در نهایت پس از رسیدن به طول بحرانی، ترک رشد می‌کند.

عوامل مؤثر بر عمر خستگی

- ۱- تنش متوسط اعمالی (افزایش تنش متوسط اعمالی باعث کاهش عمر خستگی می‌شود)
- ۲- عوامل طراحی (وجود نقاطی که باعث تمرکز تنش شود عمر خستگی را کاهش می‌دهد).
- ۳- عملیات سطحی ترک‌هایی که روی سطح ایجاد می‌شود باعث کاهش عمر خستگی می‌شود.

انجام پالیش روی سطح باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. ایجاد تنش‌های فشاری بر روی سطح باعث می‌شود که از پیشروی ترک‌های روی سطح جلوگیری شده و عمر خستگی را زیاد می‌کند. یکی از راه‌های ایجاد تنش فشاری در سطح قطعه پرتاب گلوله به سطح است. برخورد گلوله به سطح باعث تغییر شکل پلاستیک در نواحی نزدیک به سطح می‌شود. این تنش‌های فشاری باعث جلوگیری از پیشروی سطح شده و عمر خستگی را زیاد می‌کند. به این عملیات Shot peen گفته می‌شود. استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می‌شود.



محل های جوانه زنی ترک خستگی

۱- نواریهای لغزشی خستگی

۲- مرزداشته ها

۳- آخال های سطحی

عوامل موثر جوانه زنی ترک

- ❖ دامنه بارگذاری
- ❖ دما
- ❖ محیط
- ❖ وجود فاق ها (محل های تمرکز تنش)
- ❖ سطح قطعه

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e$$

K_a = ضریب تصحیح پرداخت سطح

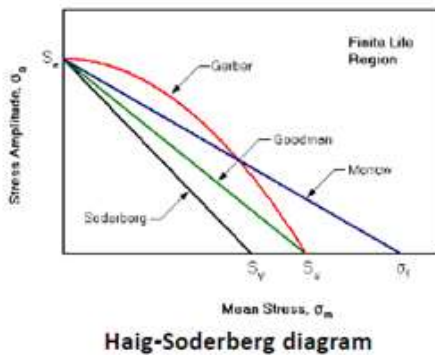
K_b = ضریب تصحیح اندازه

K_c = ضریب تصحیح بار

K_d = ضریب تصحیح دما

K_e = ضریب اعتماد پذیری

K_f = ضریب تصحیح اثرات دیگر مثل تمرکز تنش



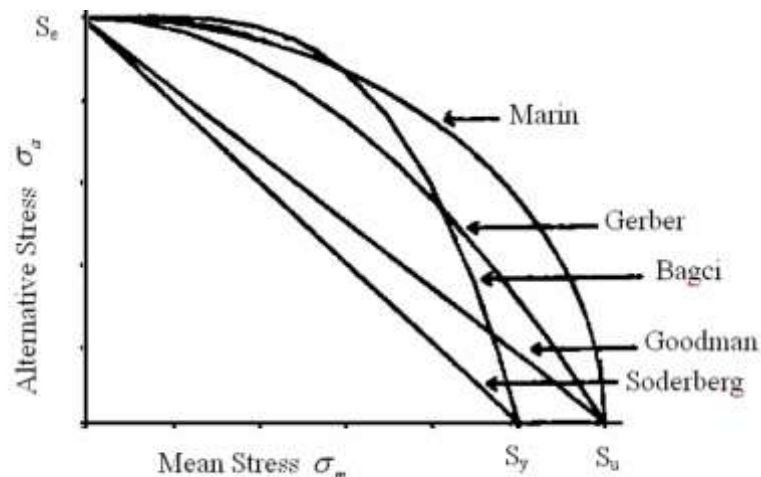
Goodman (England, 1899): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} = 1$

Gerber (Germany, 1874): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right)^2 = 1$

Soderberg (USA, 1930): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ys}} = 1$

Morrow (USA, 1960s): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_f} = 1$

$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{yt}} = \frac{1}{n}$	تئوری سودربرگ	$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$	تئوری گربر
$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$	تئوری گودمن	$\left(\frac{\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = \frac{1}{n^2}$	تئوری مارین
$\frac{\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{\sigma_m}{S_{yt}}\right)^4 = \frac{1}{n}$	تئوری باگسی		



تئوری‌های مختلف خستگی

$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{UT}} = 1$ **نمودار گودمن**

$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{Yt}} = 1$ **نمودار سودربرگ**

$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{UT}}\right)^2 = 1$ **نمودار گربر**

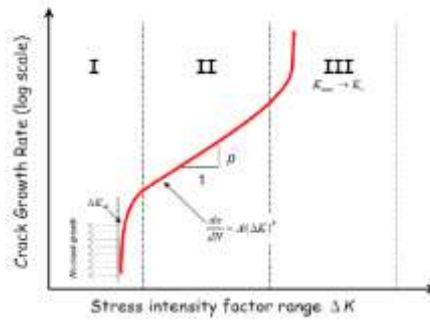
$\left(\frac{S_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{S_m}{S_{UT}}\right)^2 = 1$ **بیضی ASME**

آهنگ رشد ترک

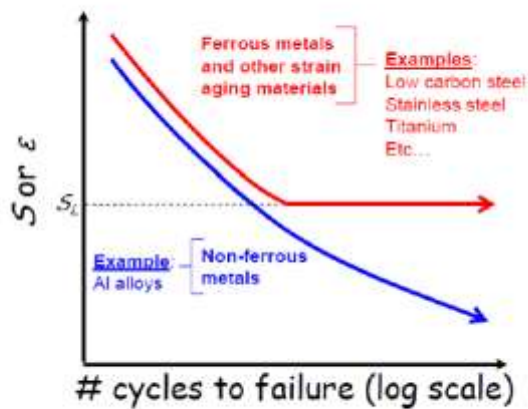
$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^p$$

Paris equation

آهنگ رشد ترک

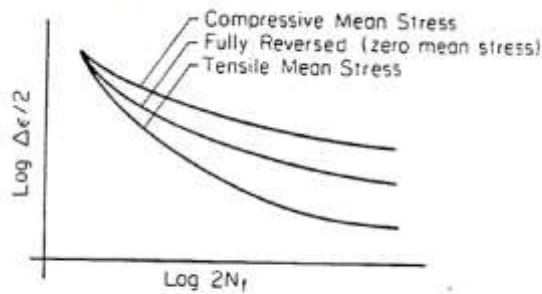


منحنی S-N



$S_L = \text{fatigue/endurance limit}$

خستگی در کرنش سیکلی (منحنی ε-N)



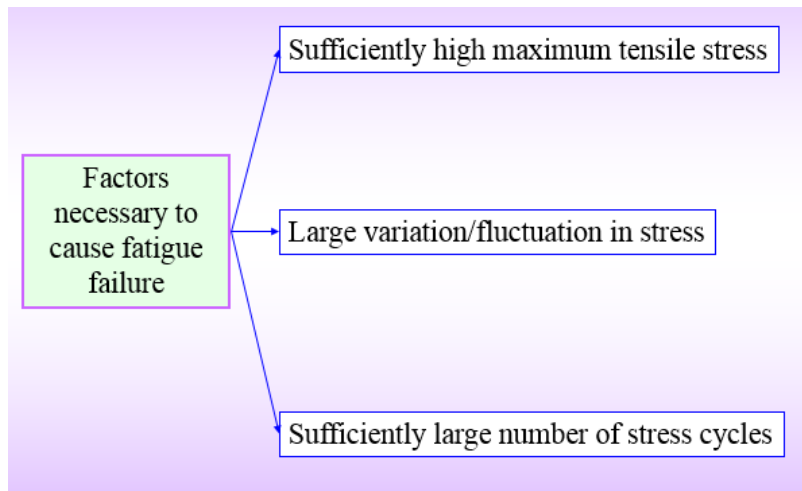
$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c$$

شکست‌هایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می‌دهند شکست‌های خستگی نامیده می‌شوند. شکست‌ها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می‌دهند. هیچ‌گونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می‌شکند وجود ندارد تا بتوان به‌عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد. تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی خستگی بیشتر متداول است و عامل حداقل ۹۰ درصد شکست‌های ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد. این خستگی بدون آگاهی قبلی و قابل‌رؤیت بودن رخ می‌دهد. خستگی به‌صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچ‌گونه تغییر شکل ناخالص در شکست نتیجه

می‌شود. معمولاً سطح شکست در مقیاس ماکروسکوپی بر جهت تنش کششی اصلی عمود است. معمولاً سطح شکست خستگی از ظاهر سطح شکست تشخیص داده می‌شود که از یک ناحیه هموار حاصل از عمل ساییش 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 می‌شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می‌شود که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می‌کند.

سه عامل عمده برای وقوع شکست خستگی ضروری هستند. این عوامل عبارت‌اند از:

- تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد
- تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده
- زیاد بودن چرخه‌های تنش وارده



علاوه بر این متغیرهای دیگری مانند تمرکز تنش، خوردگی، دما، بار اضافی، ساختار متالورژیکی، تنش‌های باقیمانده و تنش‌های مرکب هم وجود دارند که شرایط را برای ایجاد خستگی تقویت می‌کنند.

۱. شروع ترک: شامل بروز اولین عیب خستگی است که با عملیات تابانیدن به طور مناسب برطرف می‌شود.
۲. رشد ترک نوار لغزش: عبارت است از عمیق شدن ترک اولیه روی صفحات با تنش برشی زیاد، این مرحله غالباً رشد ترک مرحله ۱ نامیده می‌شود
۳. شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد: عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمود بر تنش کششی حداکثر. این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله ۲ نامیده می‌شود.
۴. شکست نرم نهایی: هنگامی رخ می‌دهد که طول ترک به اندازه کافی برسد، طوری که سطح مقطع باقیمانده نتواند بار وارده را تحمل کند.

- Stress concentration
- Corrosion
- Temperature
- Microstructure
- Residual stress
- Stress state

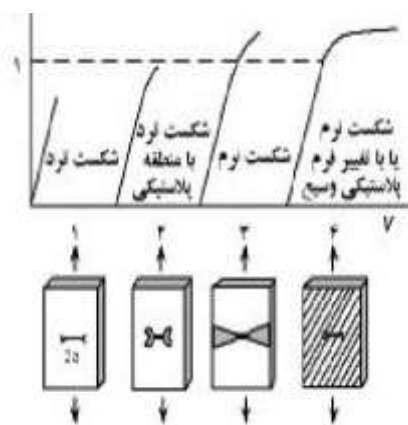
معمولاً ترک‌های خستگی در یک سطح آزاد شروع می‌شوند. در موارد نادری که ترک‌های خستگی از قسمت داخلی شروع می‌شوند، همیشه مرزی، مانند حدفاصلی که لایه سطحی کربوره شده و فلز اصلی، باید وجود داشته باشد. عملاً تمام شکست‌های خستگی از سطح شروع می‌شوند. در بسیاری از انواع متداول بارگذاری، مانند خمش و پیچش، تنش حداکثر در سطح رخ می‌دهد، طوری که شروع شکست از آن مکان منطقی جلوه می‌کند؛ اما در بارگذاری محوری، شکست خستگی تقریباً همیشه از سطح شروع می‌شود. خواص خستگی فلزات کاملاً به ساختار حساس است، استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می‌شود. حد خستگی فولادهای ریخته شده و کار شده تقریباً ۵۰ درصد استحکام نهایی کشش است. نسبت حد خستگی به استحکام کششی نسبت خستگی نامیده می‌شود. نسبت خستگی فلزات غیر آهنی مانند نیکل، مس و منیزیم در حدود ۳۵ درصد خواهد بود.

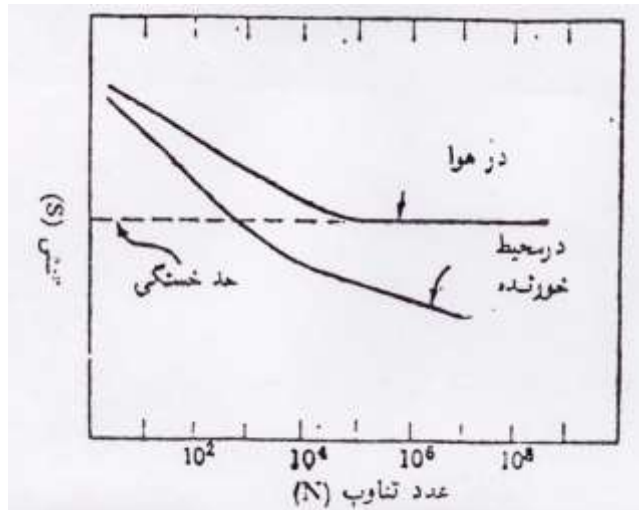
کنش هم‌زمان تنش چرخه‌ای و حمله شیمیایی به خستگی خوردگی موسوم است. حمله خورنده بدون حضور تنش غالباً در سطوح فلزی حفره ایجاد می‌کند. حفره‌ها مانند شیار عمل کرده و استحکام خستگی را کاهش می‌دهند؛ اما وقتی حمله خورنده هم‌زمان با بارگذاری خستگی رخ دهد، کاهش آشکاری در خواص خستگی نتیجه می‌شود که از کاهش خواصی که در اثر خوردگی قبلی سطح به وجود می‌آید، بیشتر است. هنگامی که خوردگی و خستگی هم‌زمان واقع شوند، حمله شیمیایی سرعت اشاعه ترک خستگی را به شدت تسریع می‌کند؛ بنابراین فولاد زنگ نزن، برنز یا آلیاژ مس-بریلیم، احتمالاً بهتر از فولاد عملیات حرارتی عمل خواهند کرد. حفاظت از فلز در برابر تماس با محیط خورنده توسط روکش‌های فلزی و غیرفلزی مؤثر است، به شرط آنکه روکش در اثر کرنش چرخه‌ای پاره نشود. روکش‌های روی و کادمیم بر فولاد و روکش‌های آلومینیوم آلکلاد در بسیاری کاربردهای خستگی مؤثر هستند.

تشکیل تنش‌های باقیمانده فشاری سطح از باز شدن شیارهای سطحی و وارد شدن ماده خورنده جلوگیری می‌کنند. به‌ویژه نیتریده کردن در مبارزه با خستگی مؤثر است و ساچمه زنی در شرایط خاص با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است.



دیاگرام طرح‌های مکانیک شکست





عوامل مؤثر در خستگی

عوامل زیر در تعیین حد تحمل و یا کاهش آن نقش دارند:

۱. دامنه تنش متناوب
۲. تعداد دفعات اعمال تنش (تعداد سیکل تنش N)
۳. سرعت اعمال تغییرات تنش
۴. شیارها و خراش‌ها و تغییرات ضخامت و جوش‌ها و دیگر ناپیوستگی‌ها مقاومت در مقابل خستگی را کاهش می‌دهد.
۵. مقدار بالای اکسیژن در آب و یا در دماهای بالا میزان تحمل خستگی کاهش می‌یابد.
۶. عواملی مثل کم شدن سطح مقطع و ارتعاش و... تأثیر زیادی در کاهش حد خستگی دارند.

روش‌های پیشگیری یا کنترل خستگی

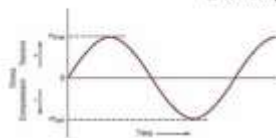
برای حذف یا کاهش ترک‌های ناشی از خستگی کارهای زیر را می‌توان انجام داد:

۱. کنترل تنش‌های نوسانی: کم کردن و یا حذف بهره‌برداری نوسانی و طولانی کردن زمانه‌ای راه‌اندازی و خواباندن.
۲. کنترل عوامل محیطی: کاهش اکسیداسیون زیرا همان‌طور که در بالا اشاره شد افزایش اکسیژن سبب کاهش حد تحمل خستگی می‌شود. همچنین با کنترل PH نیز می‌توان میزان خستگی را کاهش داد.

طراحی مجدد قطعه: اگر قطعه‌ها دائماً دچار خستگی می‌گردد و با تعویض آن نیز باز هم دچار خستگی می‌گردد باید برای آن منطقه متریال قطعه را عوض کنیم.

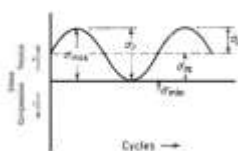
انواع بارگذاری‌های تناوبی

۱- سیکل کاملاً برگشتی (alternating stress (fully reverse))



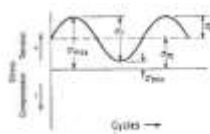
$$\begin{aligned} \sigma_m &= 0 \\ R &= -1 \\ A &= \infty \end{aligned}$$

۲- سیکل متغیر تکراری (repeated stress (pulsating tension))



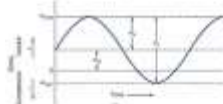
$$\begin{aligned} \sigma_{min} &= 0 \\ \sigma_m &= 0.5\sigma_{max} = 0.5\Delta\sigma \\ R &= 0 \\ \sigma_{max} &= \Delta\sigma \\ \sigma_m &= \sigma_a \\ A &= 1 \end{aligned}$$

۳- سیکل متغیر موجی از نوع کششی (fluctuating tension)



$$0 < R < 1$$

۴- سیکل متغیر موجی (fluctuating)



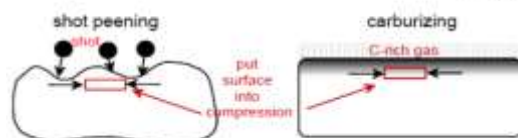
۵- بارگذاری بدون نظم مشخصی



❖ زبری سطح (Roughness)

❖ کربن دهی و دکربوره شدن سطحی (Carburizing and Decarburizing)

❖ ساچمه زنی (Shot peening)



❖ نورد کردن سطحی (Surface Rolling)

❖ سایر روش‌های سخت کردن سطحی

❖ پوشش‌های سطحی

❖ تنش پسماند (Residual stress)

اندازه قطعه

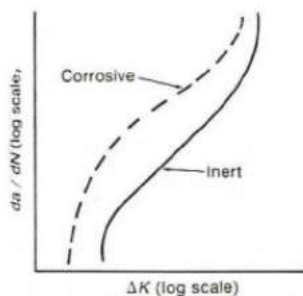
درجه حرارت

فرکانس

Under stressing/coaxing/ rest period

اثر فاق (شیار) یا مکان تمرکز تنش

❖ خستگی خوردگی (Corrosion Fatigue): خستگی تحت تاثیر محیط خورنده که مکانیزم مستقلی نسبت به خستگی و خوردگی دارد را خستگی خوردگی گویند.



❖ خستگی گرمایی (Thermal fatigue): تغییرات تنش در اثر تغییرات دما بوجود می‌آید

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

اثر عوامل مؤثر بر خستگی

عوامل متالورژیکی

- ❖ ترکیب آلیاژ (عناصر محلول جامد و رسوبات)
- ❖ ری‌ساختار
- ❖ اندازه دانه
- ❖ انرژی نقص در چیده شدن
- ❖ همگن بودن ساختار
- ❖ ناخالصی‌ها

عوامل مختلف مؤثر در خستگی مواد:

- ۱- تأثیرات مقاومت و شکل پذیری
- ۲- اندازه ناحیه پلاستیک
- ۳- رفتار مواد سازه‌ای
- ۴- دامنه بارهای متغیر و تعداد چرخه‌های بارگذاری و باربرداری
- ۵- تأثیرات محیطی و شرایط سطح
- ۶- نوسانات بارگذاری و تنش و ترکیبات آن‌ها
- ۷- حداکثر تنش زیر مقاومت تسلیم
- ۸- تنش‌های رفت و برگشتی
- ۹- تمرکز تنش و نرخ تنش
- ۱۰- تنش‌های پسماند
- ۱۱- کار سرد
- ۱۲- خوردگی و خزش
- ۱۳- تغییرات حرارتی
- ۱۴- ناخالصی متالورژیکی مواد
- ۱۵- ساختار متالورژیکی مواد

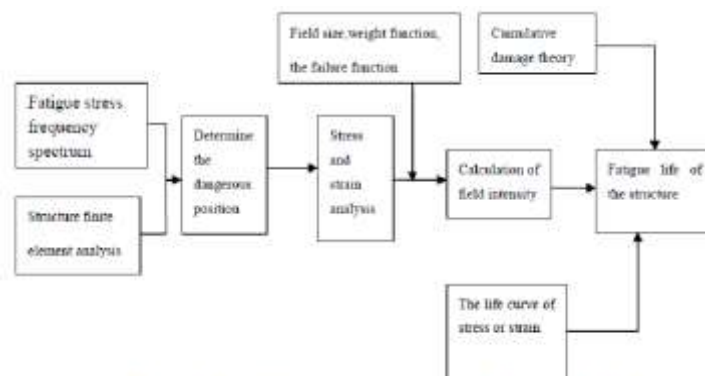
۱۶- عدم استحکام کششی

روش‌های بررسی خستگی

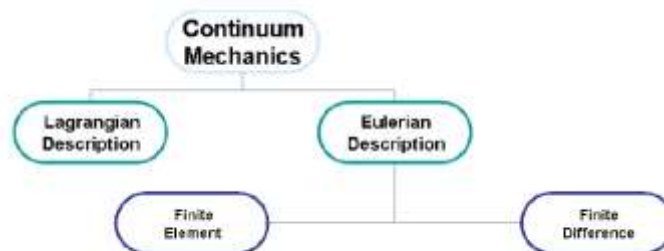
- ۱- روش طول عمر تنش STRESS-LIFE METHOD
- ۲- روش طول عمر کرنش STRAIN-LIFE METHOD
- ۳- روش مکانیک شکست کشسان خطی LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS METHOD
- ۴- روش گسترش ترک CRACK PROPOGATION METHOD
- ۵- روش ارتعاشات VIBRATION FATIGUE

دلایل شکست ناشی از خستگی در سازه‌های فولادی

- ۱. عدم استحکام کششی مناسب ماده استفاده شده در سیکل‌های بارگذاری و باربرداری وارد
- ۲. تناوب بالا در میزان و نرخ تنش وارده به المان
- ۳. بالا بودن تعداد چرخه‌های بارگذاری و باربرداری بر قطعه
- ۴. تمرکز تنش در نقاط و یا سطوح المان
- ۵. تغییرات شدید دما که ناشی از گرادیان‌های حرارتی بالا باشند
- ۶. ناخالصی در ساختار متالورژیکی مواد
- ۷. ساختار متالورژیکی مواد و نوع عمل آوری
- ۸. تنش‌های پسماند موجود در المان ناشی از ساخت و نصب



Fatigue life prediction algorithm processes of welded structure based on field method.



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

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

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

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

Stress Amplitude, $\sigma_a = \sigma_{fs} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right) \right]$

$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$
Paris and co-workers $N = \frac{2 \left[(a_f)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2} \right]}{(2-n)Cf^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}}$

$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N)^c, \frac{\Delta \varepsilon_s}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b, \varepsilon_a = \frac{\Delta \varepsilon_s}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \Rightarrow \varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c$

تحلیل خستگی کم چرخه تک محوری از رابطه کافین-منسون

$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c$ Modified Morrow و Morrow رابطه

$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} (2N)^b + \varepsilon'_f (2N)^c, N = N_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{1}{b}}$

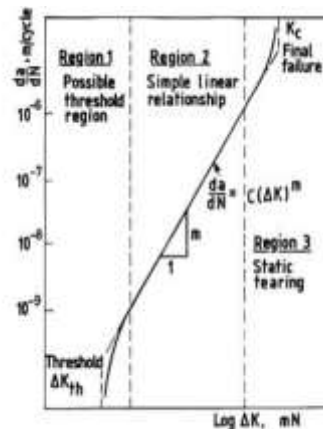
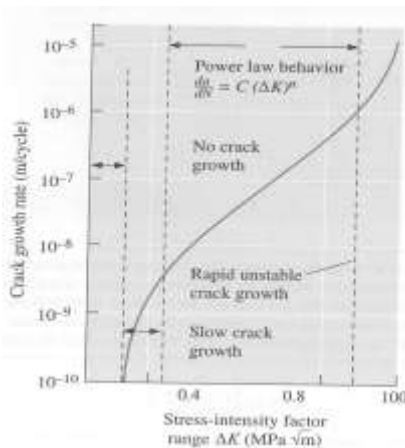
رابطه S.W.T.

$\varepsilon_a \sigma_{\max} E = (\sigma'_f)^2 (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \varepsilon'_f E (2N_f)^{b+c}, \sigma_{\max} = \sigma_n + \sigma_m$

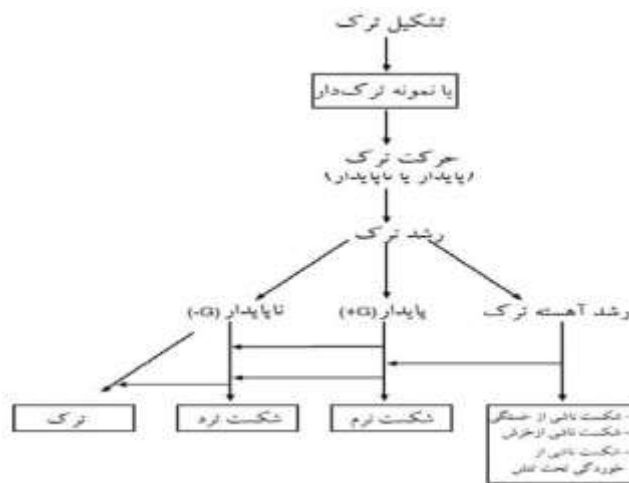
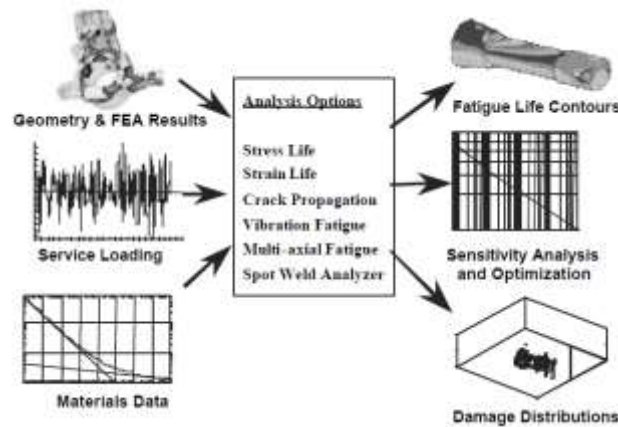
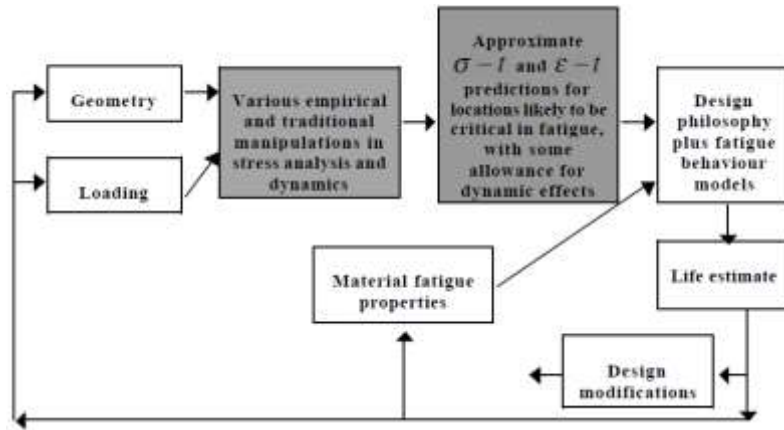
رابطه Dugan

$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma'_f} \right) (2N_f)^b + (\varepsilon'_f - \varepsilon_m) (2N_f)^c$

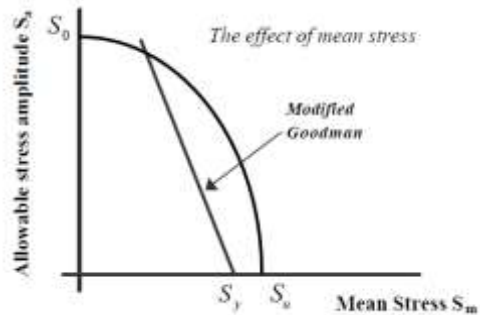
S.W.T(Smith Watson Topper)



Crack propagation rates at constant ΔK



$$S_a = S_0 \left[1 - \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^{m1} \right]$$



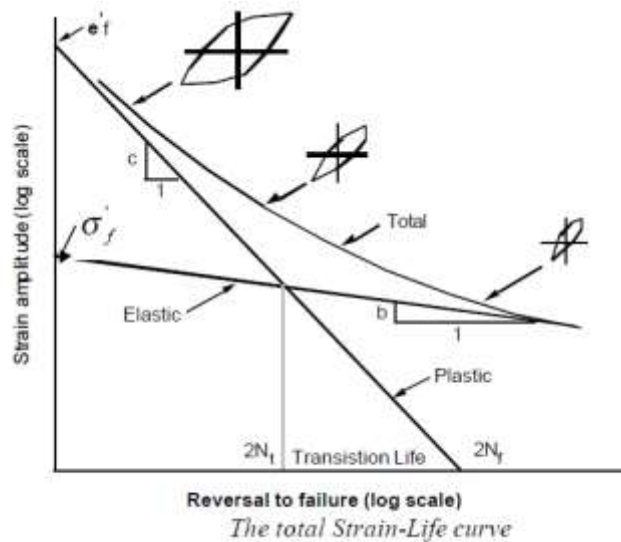
$$N = N_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad k = \frac{-(\log S - \log S_0)}{(\log N_0 - \log N)}$$

$$N = aS^{-b} \quad \sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b$$

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad \varepsilon_p = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

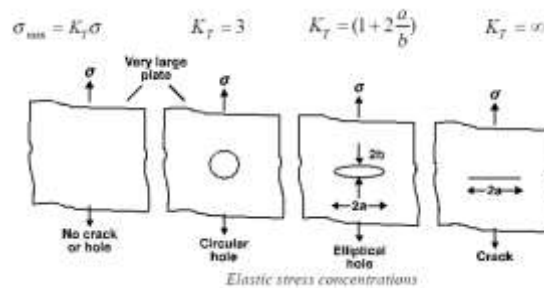
$$\varepsilon_t = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

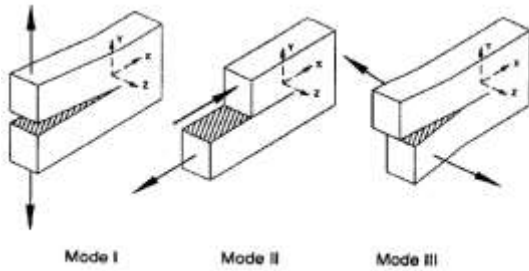


The Morrow Mean Stress Correction

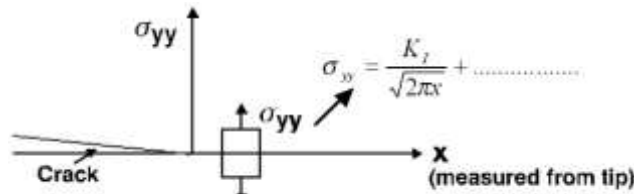
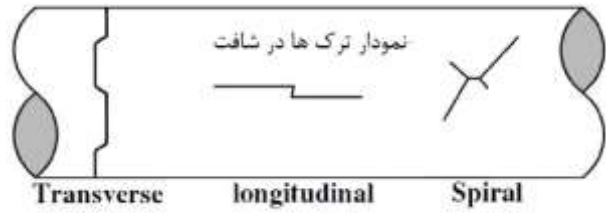
$$\varepsilon_e = \frac{(\sigma'_f - \sigma_0)}{E} (2N_f)^b$$

$$\varepsilon_a = \frac{(\sigma'_f - \sigma_0)}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$



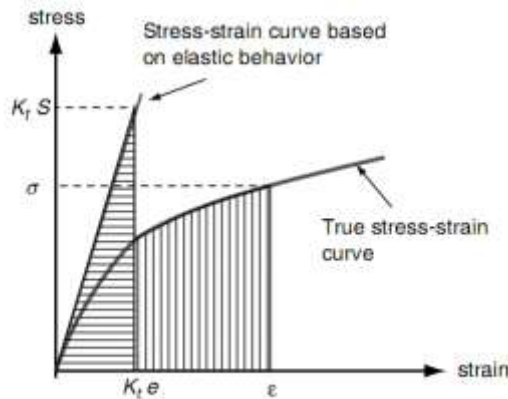


The 3 modes of cracking used in fracture mechanics

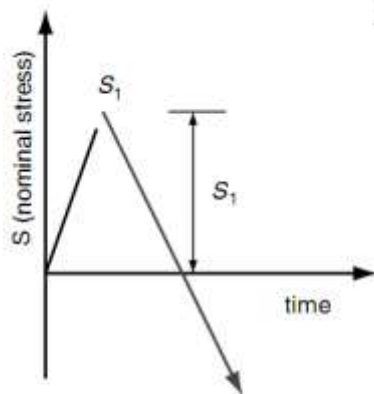


The concept of stress intensity

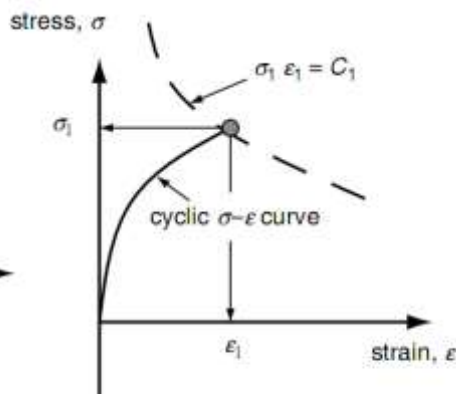
$$K = Y\sigma(\pi a)^{1/2}$$



Interpretation of the strain energy density method.



(a) NOMINAL



(b) LOCAL

Initial nominal stress loading with the modified Neuber rule.

$$\Delta\sigma\Delta\epsilon = K_f^2 \Delta S \Delta e$$

For the initial cyclic stress-strain curve

$$e_1 = \frac{S_1}{E}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \left(\frac{\sigma_1}{K'}\right)^{1/n'}$$

For the hysteresis stress-strain curve,

$$\Delta e = \frac{\Delta S}{E}$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'}\right)^{1/n'}$$

$$\frac{\sigma_1^2}{E} + \sigma_1 \left(\frac{\sigma_1}{K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f S_1)^2}{E}$$

and

$$\frac{(\Delta \sigma)^2}{E} + 2\Delta \sigma \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E}$$

- Lawrence et al. (1982):

$$\frac{\sigma_1^2}{E} + \sigma_1 \left(\frac{\sigma_1}{K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f S_1 + \sigma_r)^2}{E}$$

- Reemsnnyder (1981):

$$\left(1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_1}\right)^2 \left[\frac{\sigma_1^2}{E} + \sigma_1 \left(\frac{\sigma_1}{K'}\right)^{1/n'}\right] = \frac{(K_f S_1)^2}{E}$$

- Baumel and Seeger (1989):

$$\sigma_1(\varepsilon_1 - \varepsilon_r) = \frac{(K_f S_1)^2}{E}$$

$$W_e = \frac{\sigma_a^2}{2E} + \frac{\sigma_a}{1+n'} \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} \quad , \quad W_s = \frac{1}{2} \frac{S_a^2}{E}$$

$$\frac{\sigma_a^2}{E} + \frac{2\sigma_a}{1+n'} \left(\frac{\sigma_a}{K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f S_a)^2}{E}$$

For initial loading case,

$$\frac{\sigma_1^2}{E} + \frac{2\sigma_1}{1+n'} \left(\frac{\sigma_1}{K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f S_1)^2}{E} = \frac{(\sigma_1^e)^2}{E}$$

For stabilized hysteresis behavior

$$\frac{(\Delta \sigma)^2}{E} + \frac{4\Delta \sigma}{1+n'} \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'}\right)^{1/n'} = \frac{(K_f \Delta S)^2}{E} = \frac{(\Delta \sigma^e)^2}{E}$$

$$S^M = S \left(\frac{\sigma_y}{S_p} \right)$$

$$\sigma^e = S^M K_t^M = SK_t$$

$$\sigma \varepsilon = (K_t^M)^2 S^M e^M$$

$$\sigma \varepsilon = S^M K_t^M e^M K_t^M \left(\frac{S^M E}{S^M E} \right)$$

$$e^M = \frac{S^M}{E} + \left(\frac{S^M}{K_t} \right)^{1/n'} \quad \sigma \varepsilon = \frac{(SK_t)^2}{E} \left(\frac{e^M E}{S^M} \right)$$

$$K_p = \frac{\text{Load at onset of general yielding}}{\text{Load at first notch yielding}} = \frac{L_p}{L_y}$$

$$S^M = S \left(\frac{K_t}{K_p} \right) \quad S^M = L \left(\frac{\sigma_y}{L_p} \right)$$

– **Static Design**

- Fiber breakage, max strain criteria
- Fiber crushing, buckling
- Core damage, face sheet wrinkling
- Hole & fastener damage

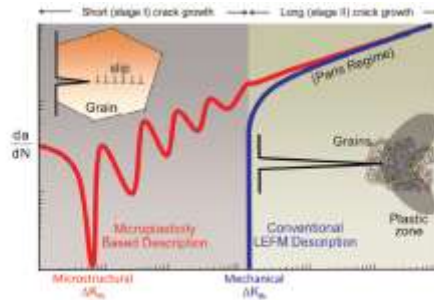
– **Delamination**

- Onset of delamination
- Critical unstable growth
- Repeated/cyclic load growth

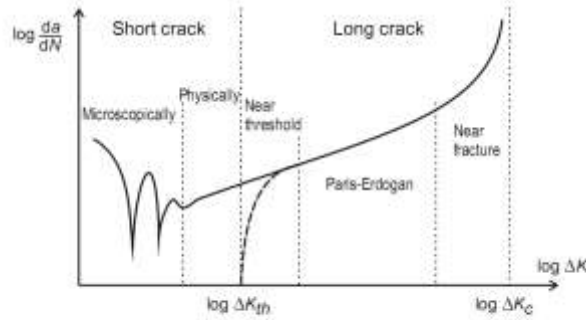
- Interface Elements
- Bonded Contact
- Mesh density – focus refinement in area of delamination.
- Anticipated size of growth of delamination

- Estimate critical load to grow unstable delamination.
- Nonlinear prediction of deformation and opening of delamination.
- Predict growth shape of delamination and demonstrate residual load capability.
- Predict growth shape with correlation to ultrasonic scans.
- Investigate emerging methodology for cyclic damage of composites.

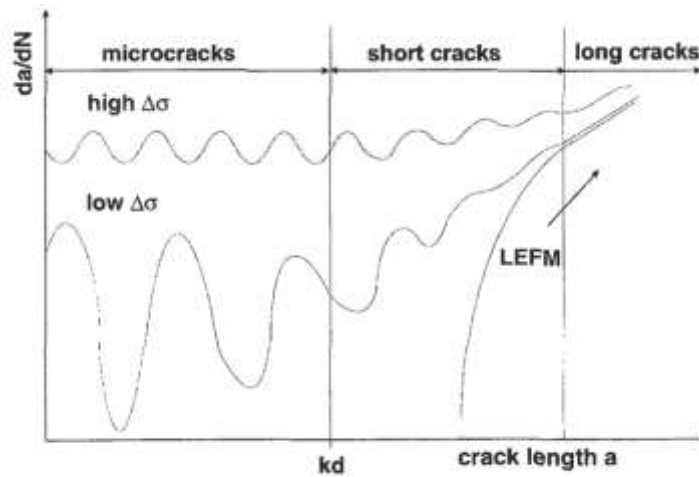
- Onset of delamination.
- Load and direction of critical unstable growth.
- Progressive failure.
- Repeated/cyclic load growth.



Conventional linear elastic fracture mechanics (LEFM) versus microstructurally based fatigue crack growth characteristics



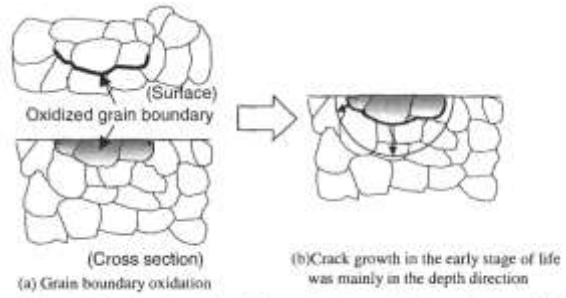
The scheme of the crack growth rate of short and long cracks showing the characteristic ranges of stress intensity factors. The near-threshold behaviour of long cracks is indicated by the bold dashed line.



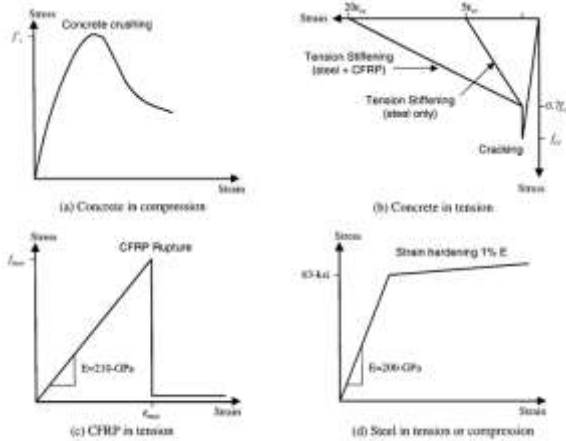
Schematic representation of a typical crack growth behaviour depending on the loading level.

Space scales and simulation methods

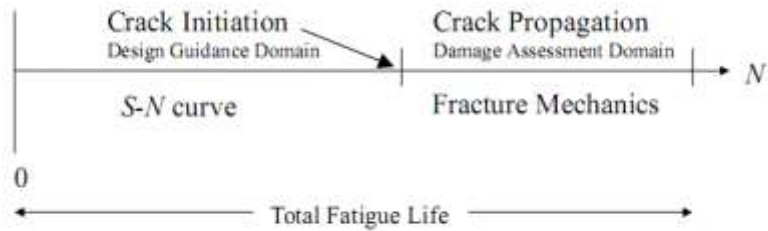
Scale range [m]				
10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}
10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
10^{-2}	10^{-1}	10^0		
Subnano	Nano	Micro	Meso	Macro
<i>ab initio</i> , phonon spectra				
Monte Carlo, cluster variation, molecular dynamics				
dislocation dynamics, discrete dislocations				
tessellation, topology, grain boundary dynamics				
percolation				
finite element, boundary element, finite difference, rheology, cellular automata				



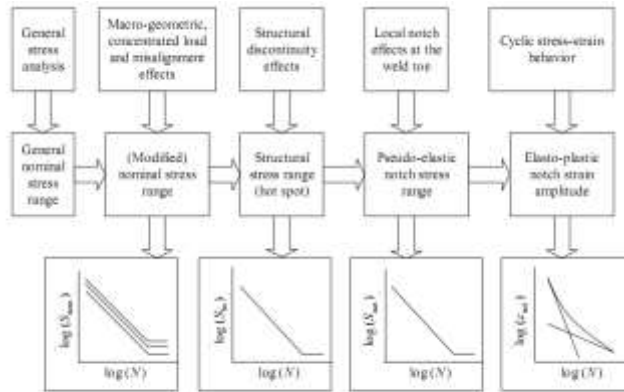
Schematic formation of grain boundary cracks and growth in the early stage of life.



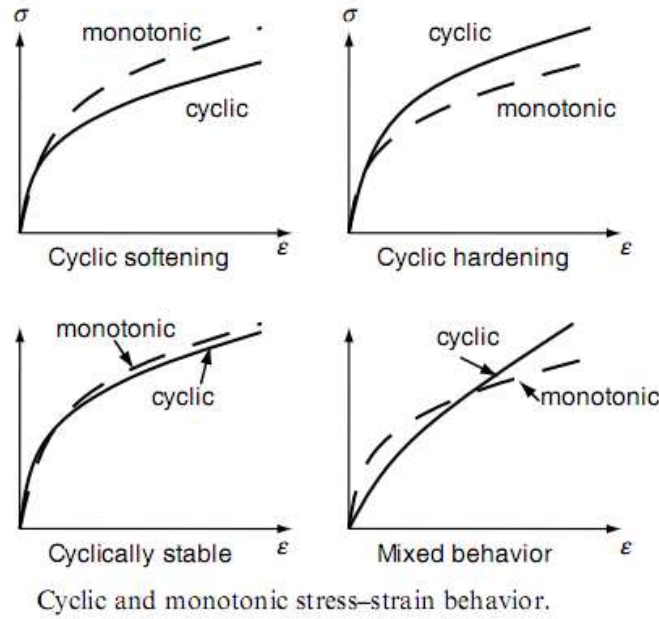
Mathematical Constitutive Models for Composite Materials



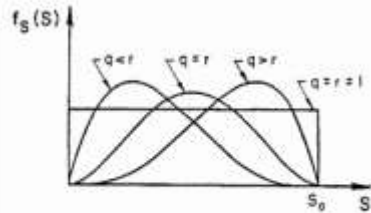
Comparison between the Characteristic S-N curve and Fracture Mechanics Approach



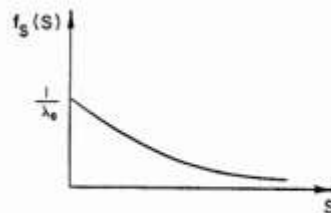
S-N Approaches for Fatigue Strength Assessment (Niemä 1995)



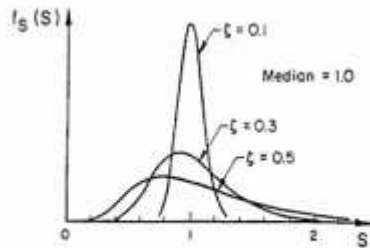
Cyclic and monotonic stress-strain behavior.



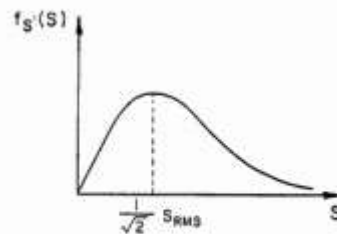
(a) Beta Distributions



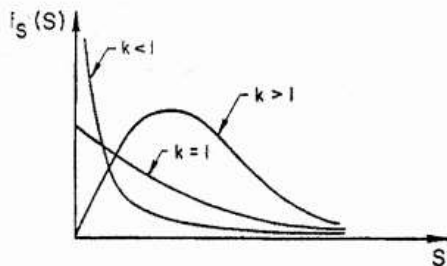
(d) Exponential Distribution



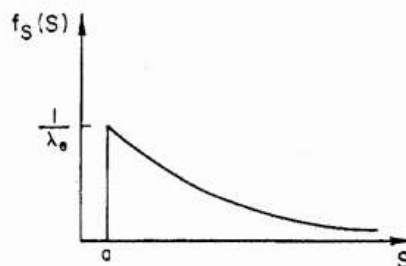
(b) Lognormal Distributions



(e) Rayleigh Distribution

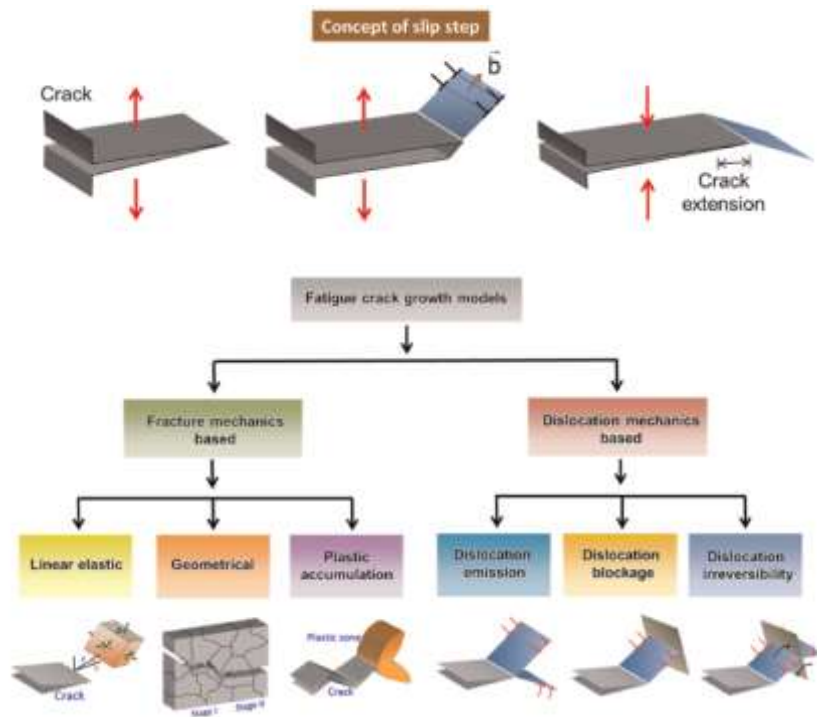
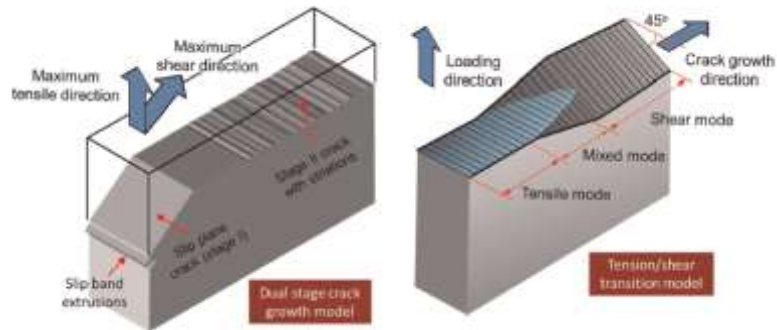
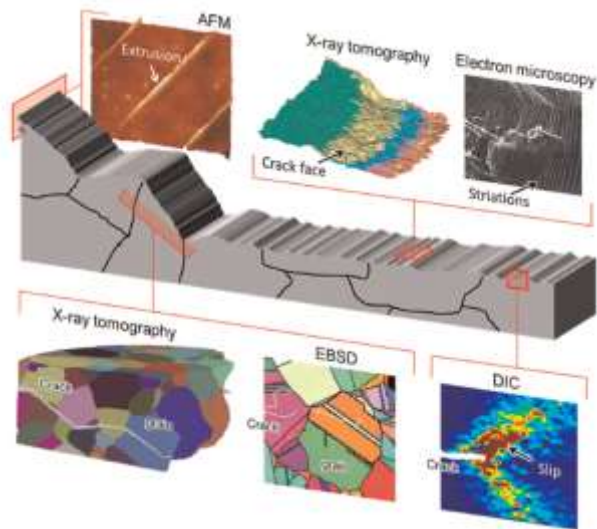


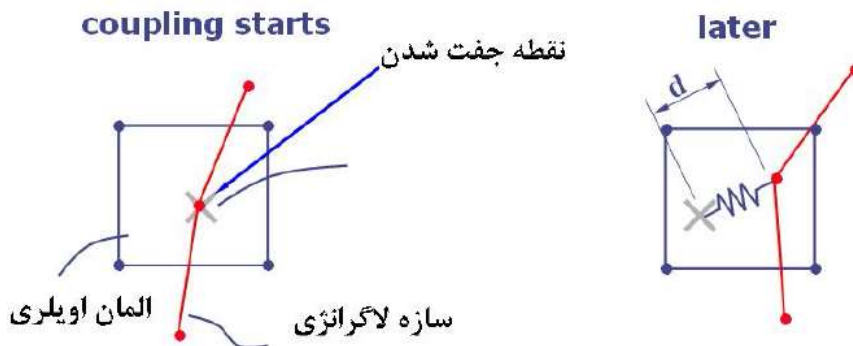
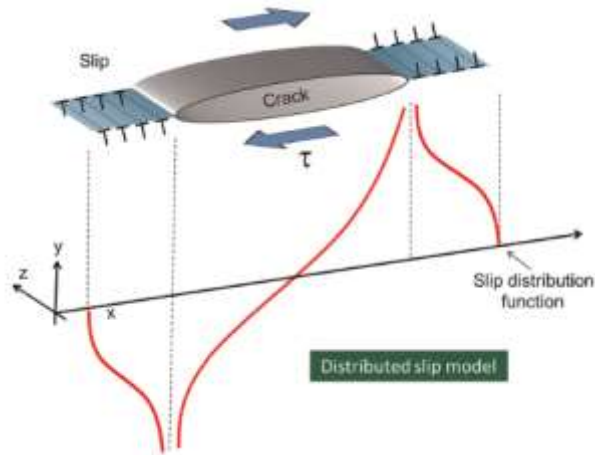
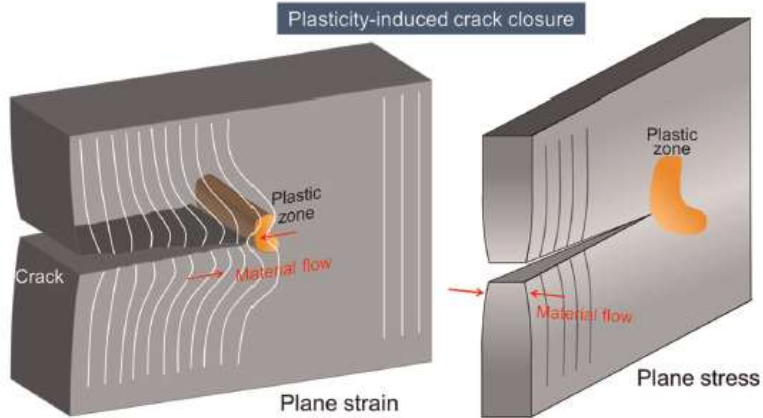
(c) Weibull Distributions



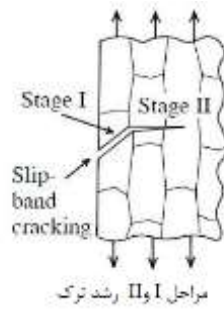
(f) Shifted Exponential Distribution

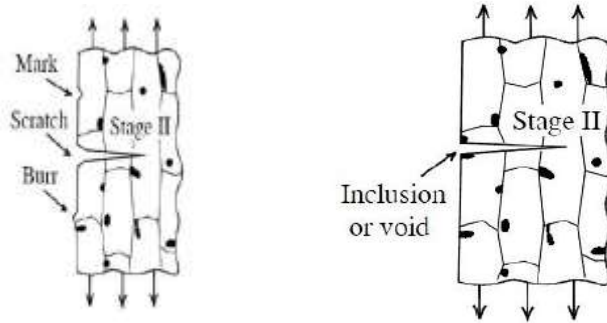
Shapes of Probability Density Functions for Commonly Used Probability Distributions (Munse et al. 1983)



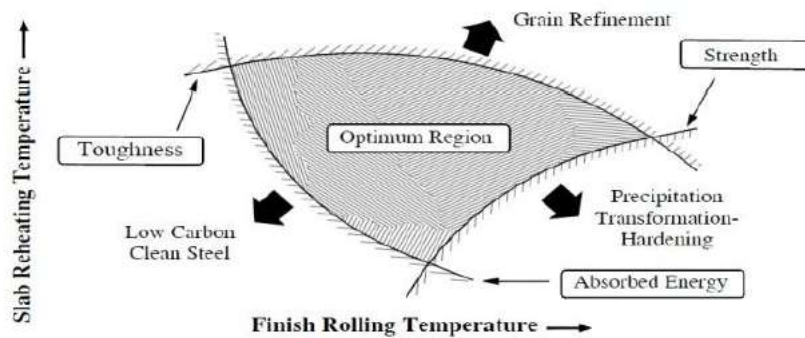


روش Penalty Based Coupling در همپوشانی

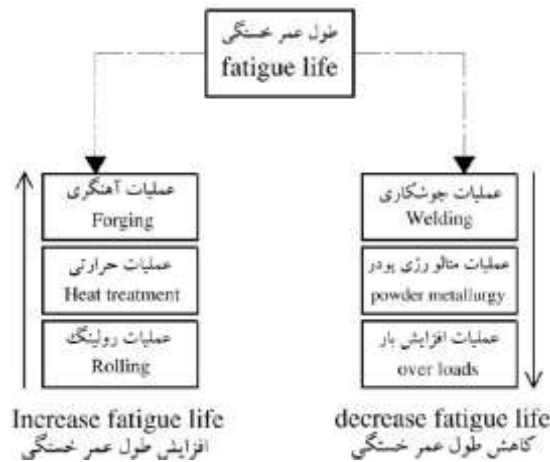




مرحله II رشد ترک توسط ناخالصی‌ها مرحله II رشد ترک توسط ماشین‌کاری و ضربات ناخواسته



ماده ایده‌ال در خستگی



1-Micro Structurally –Small Crack

2-Mechanically-Small Crack

3-Physically-Small Crack

4-Chemically-Small Crack

Closure in fatigue

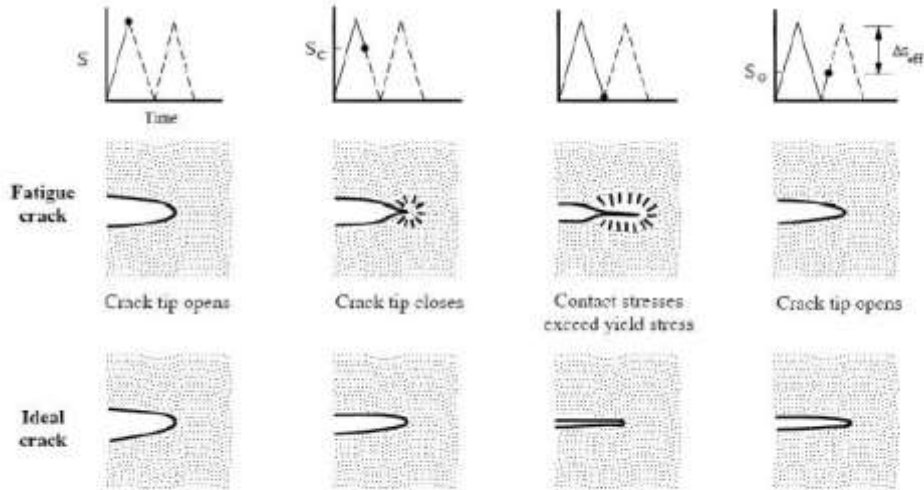
Phase Transformation induced crack closure

Plasticity induced crack closure

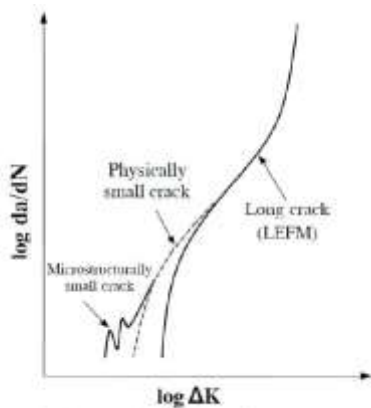
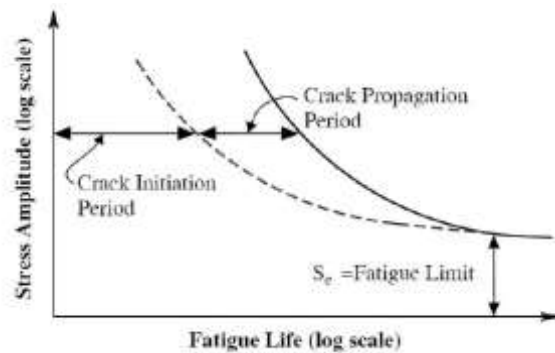
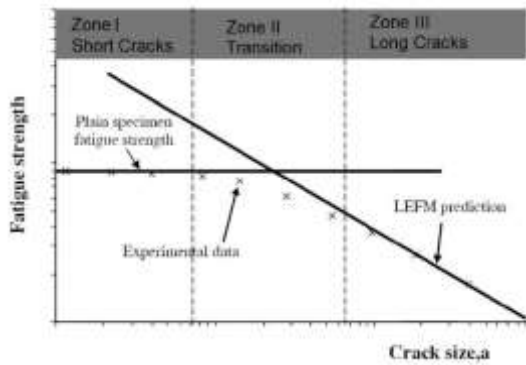
Oxide induced crack closure

Fluid pressure

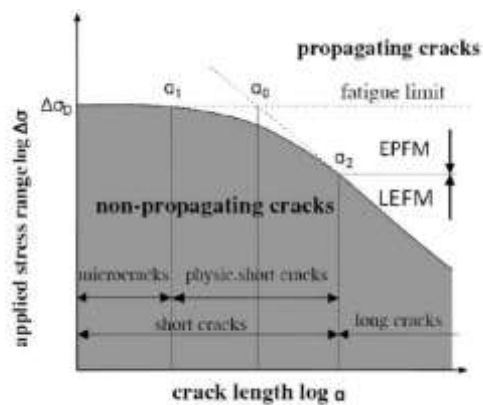
Roughness induced crack closure



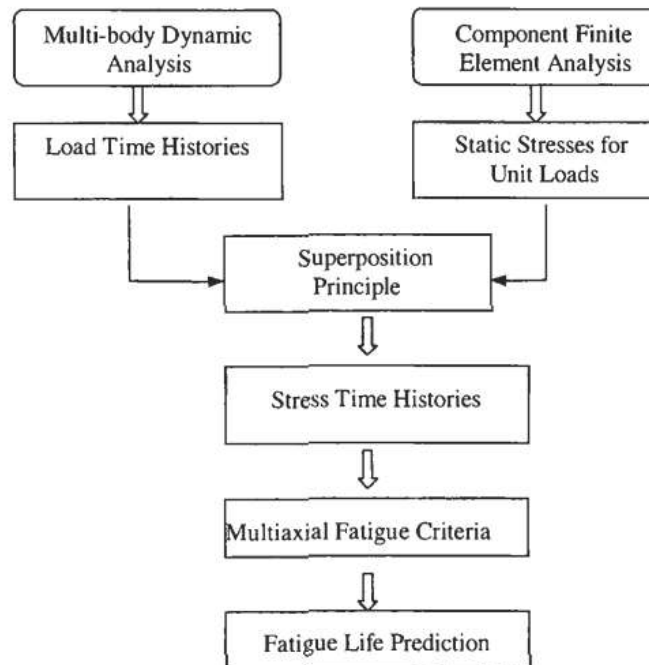
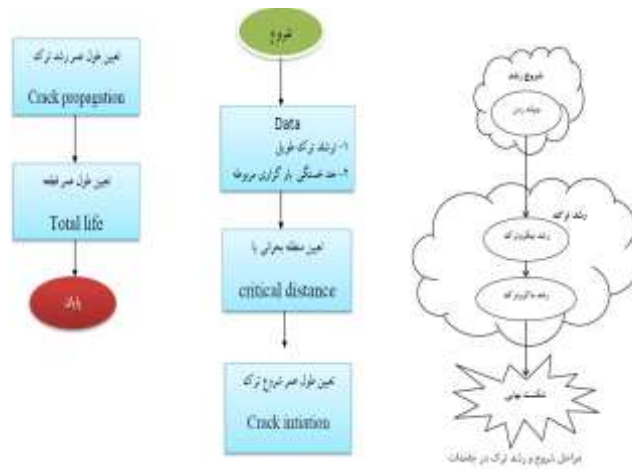
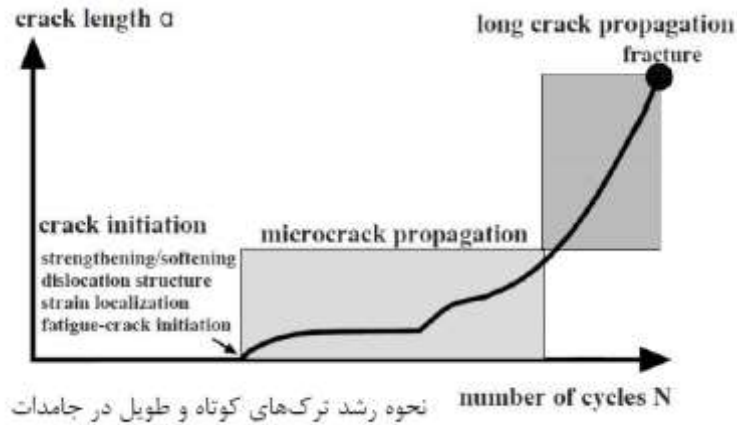
پدیده کلوزر ناشی از تغییر مکان پلاستیک



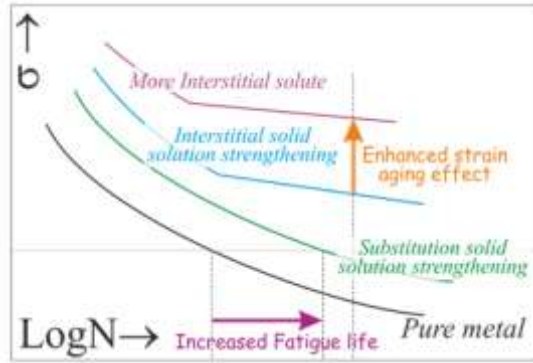
نحوه رشد ترک‌های کوتاه و طولی در جامدات



نحوه رشد ترک‌های کوتاه در جامدات



Schematic flowchart of computational fatigue assessment.



$$\frac{da}{dN} = A \sigma_a^m a^n$$

$$\frac{da}{dN} = B \varepsilon^q$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_F (2N)^c \quad (6-1)$$

$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_F}{E} (2N)^b \quad (6-2)$$

$$\frac{\delta}{\nabla e} = \frac{E}{\alpha^k} (\delta \mathcal{V})_p + \varepsilon^k (\delta \mathcal{V})_c \quad (9-3)$$

The Endurance Limit

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ kpsi} & S_{ut} > 200 \text{ kpsi} \\ 700 \text{ MPa} & S_{ut} > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6-8)$$

$$(S'_f)_N = E \Delta \varepsilon_e / 2$$

$$(S'_f)_N = \sigma'_F (2N)^b \quad (6-9)$$

$$f = \frac{\sigma'_F}{S_{ut}} (2 \cdot 10^3)^b \quad (6-10)$$

$$\sigma'_F = S_{ut} + 345 \text{ MPa}$$

$$b = -\frac{\log(\sigma'_F / S'_e)}{\log(2N_e)} \quad (6-12)$$

$$S_f = a N^b \quad (6-13)$$

$$a = \frac{(f S_{ut})^2}{S_e} \quad (6-14)$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left(\frac{f S_{ut}}{S_e} \right) \quad (6-15)$$

$$N = \left(\frac{\sigma_{rev}}{a} \right)^{1/b} \quad (6-16)$$

Low-cycle Fatigue

$$S_f \geq S_{ut} N^{(\log f)/3} \quad 1 \leq N \leq 10^3 \quad (6-17)$$

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (6-18)$$

k_a = surface condition modification factor

k_b = size modification factor

k_c = load modification factor

k_d = temperature modification factor

k_e = reliability factor¹³

k_f = miscellaneous-effects modification factor

S'_e = rotary-beam test specimen endurance limit

S_e = endurance limit at the critical location of a machine part in the geometry and condition of use

Surface Factor k_a

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (6-19)$$

$$k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6-20)$$

$$A_{0.95\sigma} = \frac{\pi}{4} [d^2 - (0.95d)^2] = 0.0766d^2 \quad (6-22)$$

$$A_{0.95\sigma} = 0.01046d^2 \quad (6-23)$$

$$d_e = 0.370d \quad (6-24)$$

$$d_e = 0.808(hb)^{1/2} \quad (6-25)$$

Temperature Factor k_d

$$k_d = 0.975 + 0.432(10^{-3})T_F - 0.115(10^{-5})T_F^2 + 0.104(10^{-8})T_F^3 - 0.595(10^{-12})T_F^4 \quad (6-27)$$

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (6-28)$$

Stress Concentration and Notch Sensitivity

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad \text{or} \quad q_{\text{shear}} = \frac{K_{fs} - 1}{K_{ts} - 1} \quad (6-31)$$

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \sqrt{a/r}} \quad (6-33)$$

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad (6-34)$$

$$n_f = \frac{S_e}{K_f \sigma} = \frac{(1/K_f)S_e}{\sigma}$$

$$\text{Soderberg} \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (6-45)$$

$$\text{mod-Goodman} \quad \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (6-46)$$

$$\text{Gerber} \quad \frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1 \quad (6-47)$$

$$\text{ASME-elliptic} \quad \left(\frac{n\sigma_a}{S_e}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_m}{S_y}\right)^2 = 1 \quad (6-48)$$

$$\frac{S_a}{S_e} = \frac{1 - S_m/S_{ut}}{1 + S_m/S_{ut}} \quad (6-50)$$

$$\frac{n\sigma_a}{S_e} = \frac{1 - n\sigma_m/S_{ut}}{1 + n\sigma_m/S_{ut}} \quad (6-51)$$

$$S_a = \frac{rS_{ut} + S_e}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{4rS_{ut}S_e}{(rS_{ut} + S_e)^2}} \right] \quad (6-52)$$

$$S_a = S_e + \left(\frac{S_e}{S_{ut}} - 1 \right) S_m \quad -S_{ut} \leq S_m \leq 0 \quad (\text{for cast iron}) \quad (6-53)$$

$$S_{su} = 0.67S_{ut} \quad (6-54)$$

$$\sigma'_a = \left\{ \left[(K_f)_{\text{bending}}(\sigma_a)_{\text{bending}} + (K_f)_{\text{axial}} \frac{(\sigma_a)_{\text{axial}}}{0.85} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsion}}(\tau_a)_{\text{torsion}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (6-55)$$

$$\sigma'_m = \left\{ \left[(K_f)_{\text{bending}}(\sigma_m)_{\text{bending}} + (K_f)_{\text{axial}}(\sigma_m)_{\text{axial}} \right]^2 + 3 \left[(K_{fs})_{\text{torsion}}(\tau_m)_{\text{torsion}} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (6-56)$$

$$\sum \frac{n_i}{N_i} = c \quad (6-57)$$

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (6-58)$$

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi l} \frac{(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{(1/d_1) + (1/d_2)}} \quad (6-59)$$

$$p_{\max} = \frac{2F}{\pi bl} \quad (6-60)$$

$$b^2 = \frac{4F}{\pi w} \frac{(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2}{1/r_1 + 1/r_2} \quad (6-61)$$

$$p_{\max} = \frac{2F}{\pi bw} \quad (6-62)$$

$$S_C = \frac{2F}{\pi bw} \quad (6-63)$$

$$\frac{F}{w} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \pi S_C^2 \left[\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right] = K_1 \quad (6-64)$$

$$K_g = \frac{K_1}{4} \sin \phi \quad (6-65)$$

$$S_C = C_P \sqrt{\frac{F}{w} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)} \quad (6-66)$$

$$K_1 = \alpha_1 N^{\beta_1} \quad K_g = a N^b \quad S_C = \alpha N^\beta$$

$$\beta_1 = \frac{\log(K_1/K_2)}{\log(N_1/N_2)} \quad b = \frac{\log(K_{g1}/K_{g2})}{\log(N_1/N_2)} \quad \beta = \frac{\log(S_{C1}/S_{C2})}{\log(N_1/N_2)} \quad (6-67)$$

$$(S_C)_{10^8} = \begin{cases} 0.4H_B - 10 \text{ kpsi} \\ 2.76H_B - 70 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6-68)$$

$$0.99(S_C)_{10^7} = 0.327H_B + 26 \text{ kpsi} \quad (6-69)$$

$$\text{Endurance ratio} = \frac{\text{endurance limit}}{\text{tensile strength}} \approx 0.5$$

$$\text{Stress Amplitude, } \sigma_a = \sigma_{fs} \left[1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}} \right) \right]$$

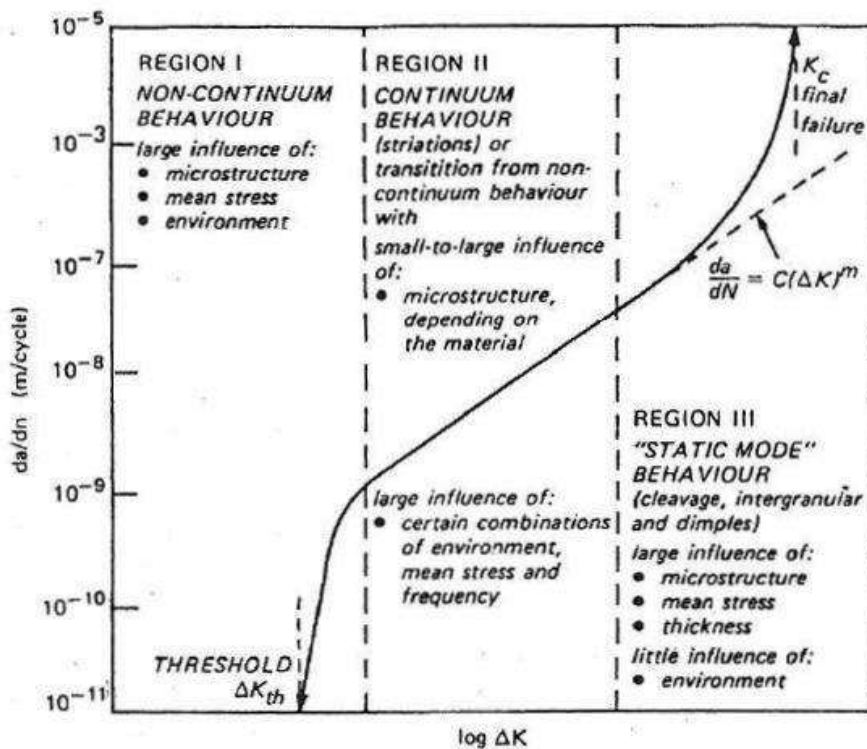
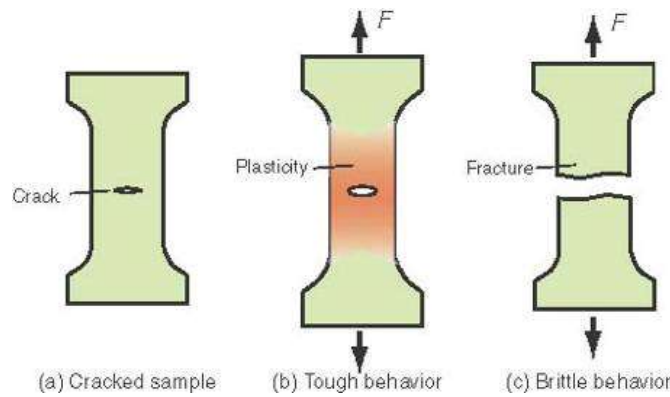
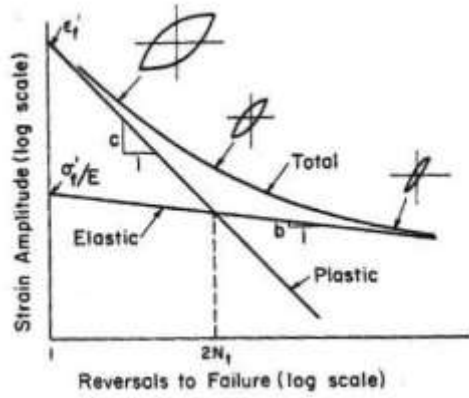
$$\text{Amplitude ratio} \rightarrow A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

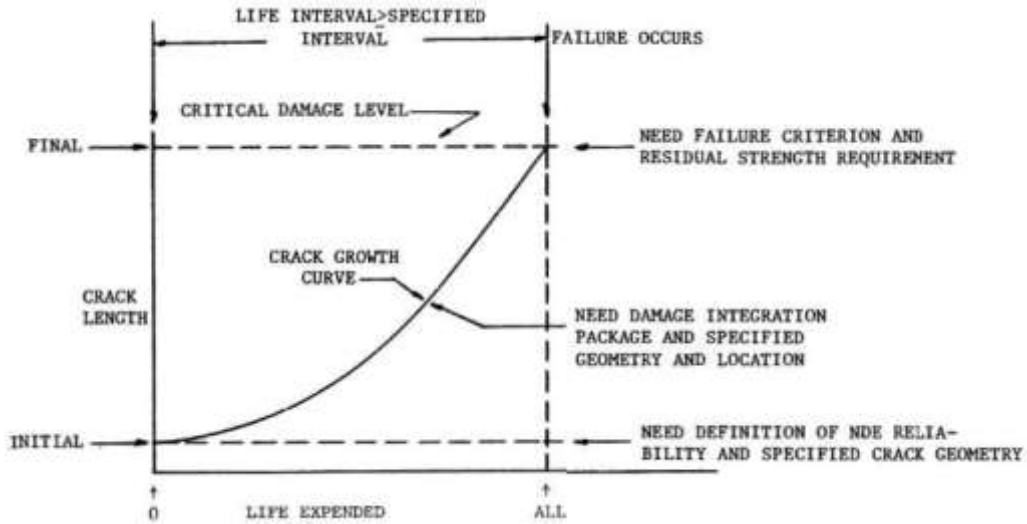
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

$$N = \frac{2[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2}]}{(2-n)Cf^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}}$$

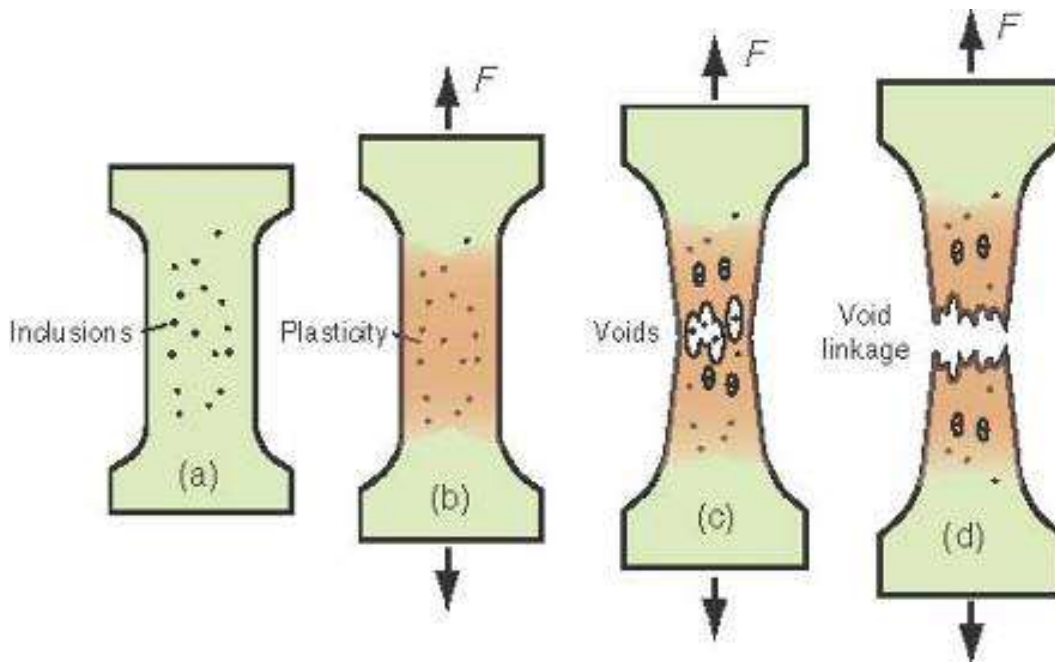
Strain-Life Relationship

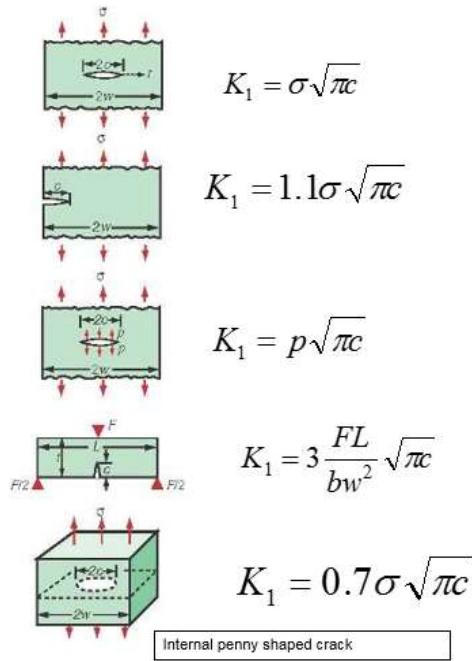
$$\frac{\Delta \epsilon}{2} = \underbrace{\frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b}_{\text{elastic}} + \underbrace{\epsilon'_f (2N_f)^c}_{\text{plastic}}$$





- Cracks already in material (inclusions or voids).
- Cracks caused by shrinkage in castings and welding.
- Cracks caused by machining.
- Cracks caused by cyclic loading (fatigue).
- Cracks caused by corrosion.

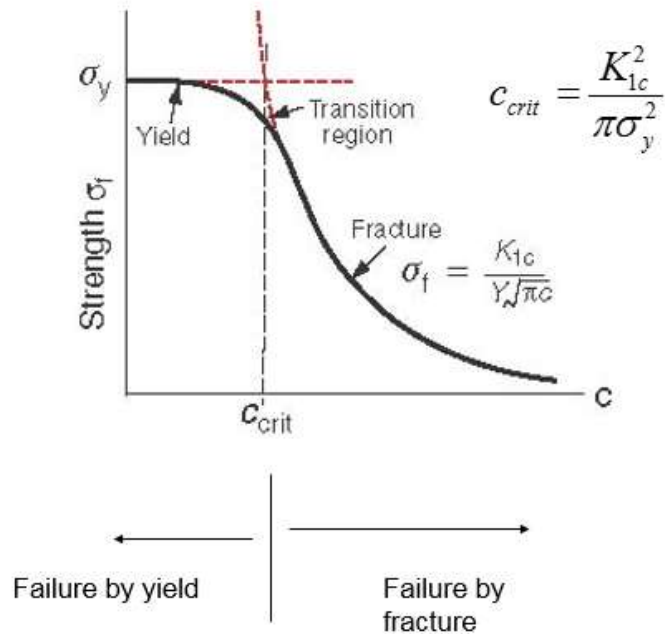


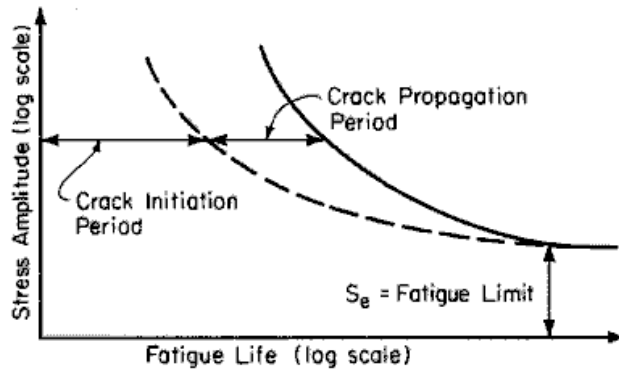


$$\sigma_{local} = Y \frac{\sigma\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}$$

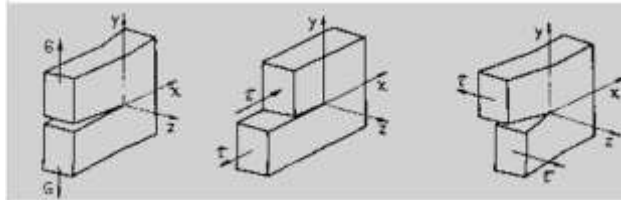
$$K_1 = Y\sigma\sqrt{\pi c}$$

$$\sigma_f = \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi c}}$$

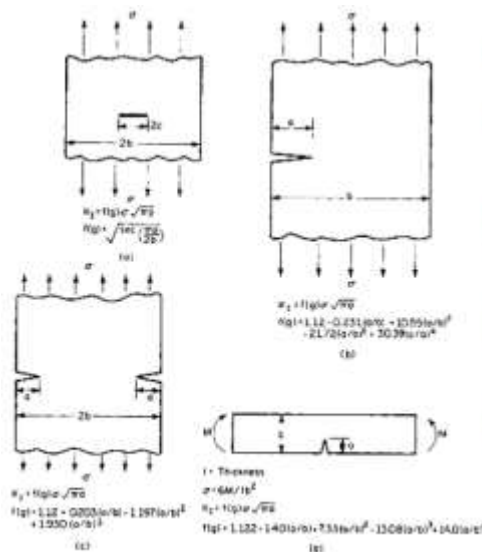




- Mode 1:** Opening or tensile mode (the crack faces are pulled apart)
- Mode 2:** Sliding or in-plane shear (the crack surfaces slide over each other)
- Mode 3:** Tearing or anti-plane shear (the crack surfaces move parallel to the leading edge of the crack and relative to each other)



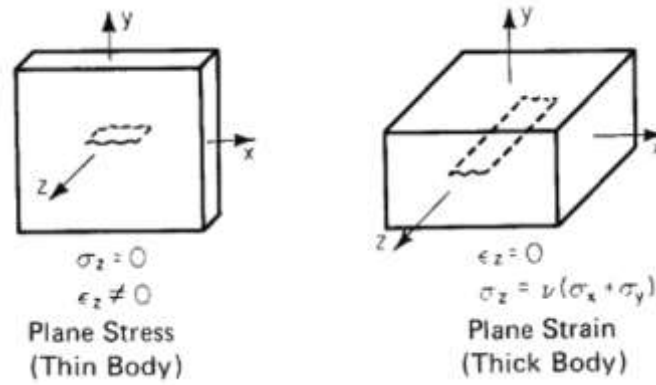
Behaviour described	Terms used	
Crystallographic mode	Shear	Cleavage
Appearance of Fracture	Fibrous	Granular
Strain to Fracture	Ductile	Brittle



Stress intensity factor for

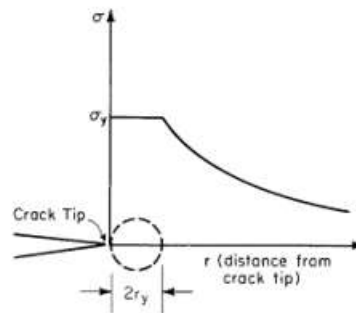
- (a) Center-cracked plate loaded in tension,
- (b) Edge-cracked plate loaded in tension,
- (c) Double-edge-cracked plate loaded in tension
- (d) Cracked beam in pure bending

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right)$$

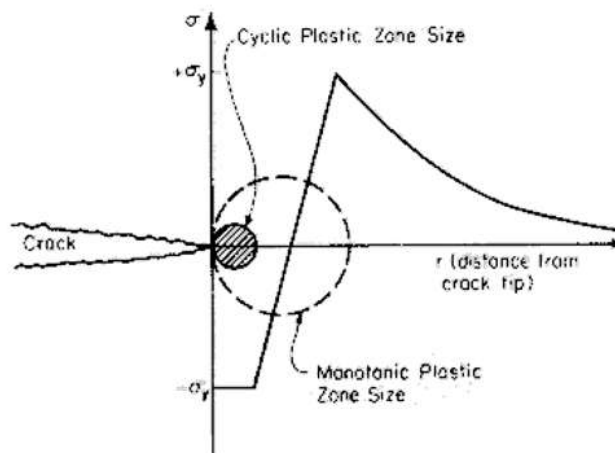


$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad \text{Plane stress}$$

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_y} \right)^2 \quad \text{plane strain}$$



Monotonic plastic zone size



Reversed plastic zone size

$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

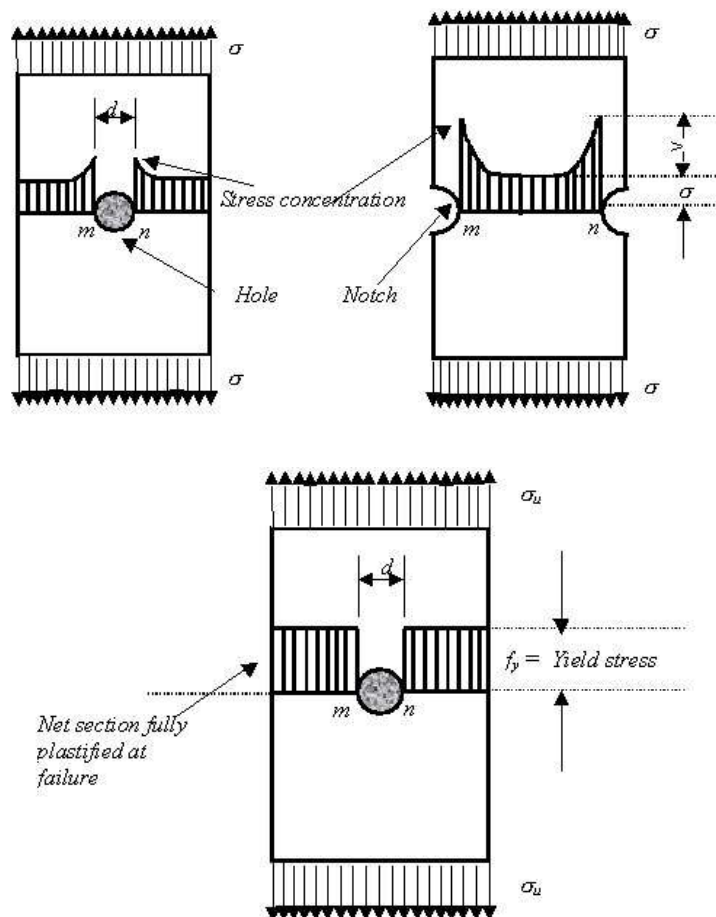
σ_0 is the nominal applied tensile stress

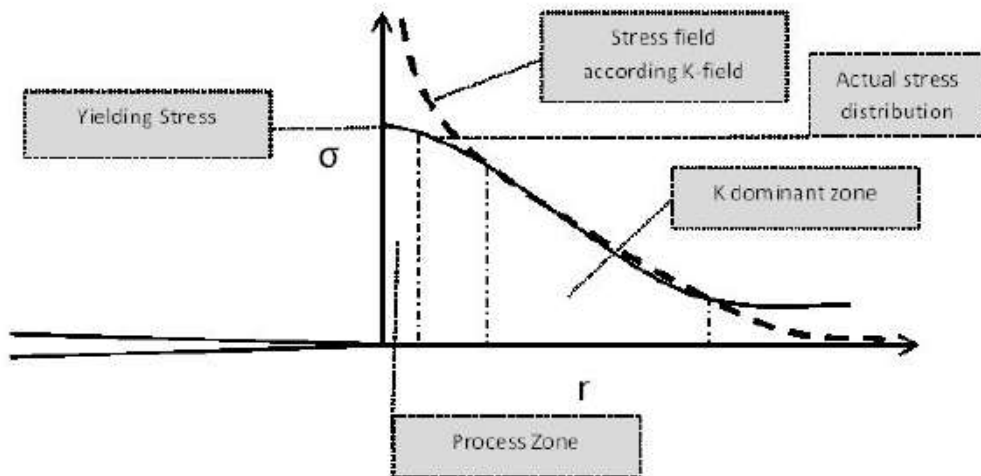
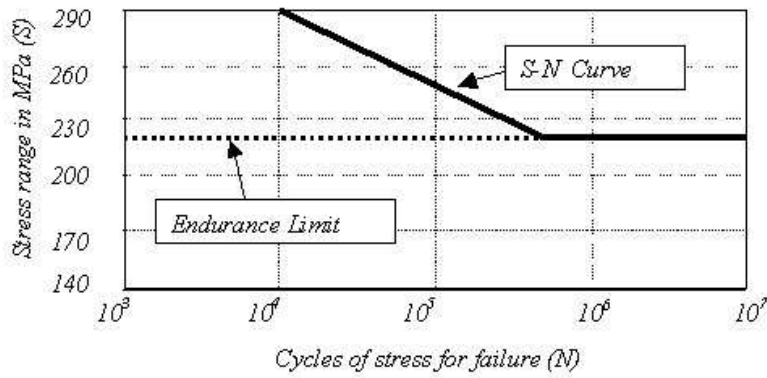
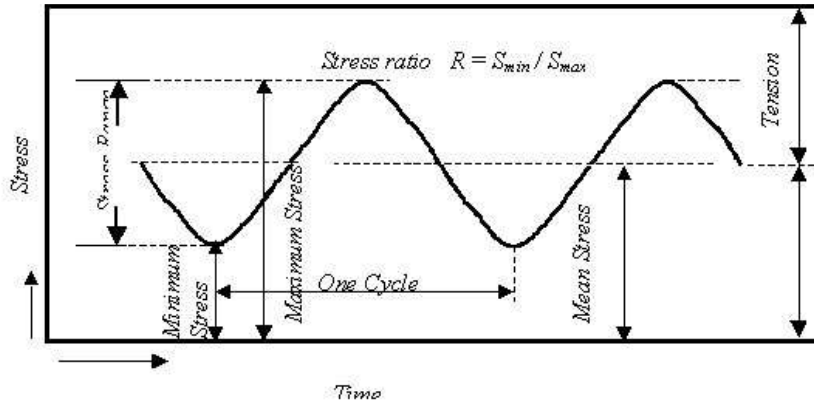
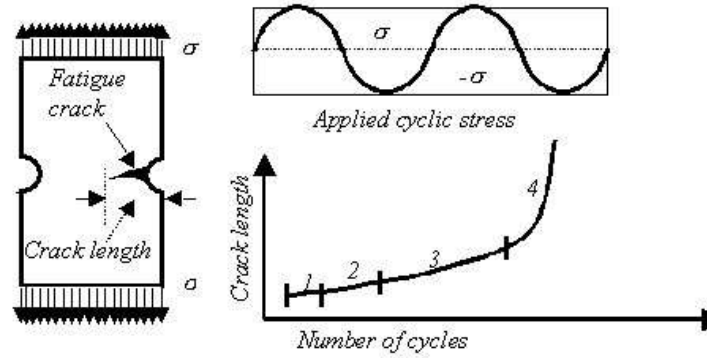
ρ_t is the radius of curvature of the crack tip

a is the length of a surface crack (becomes $a/2$ for an internal crack)

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0} = 2 \left(\frac{a}{\rho_t} \right)^{1/2}$$

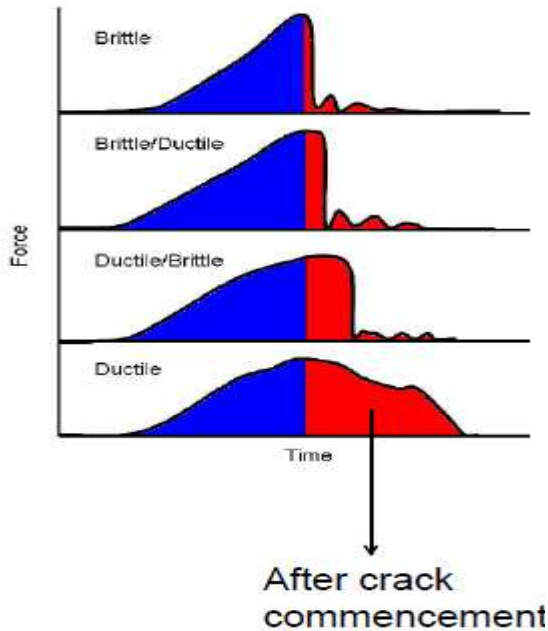
$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$



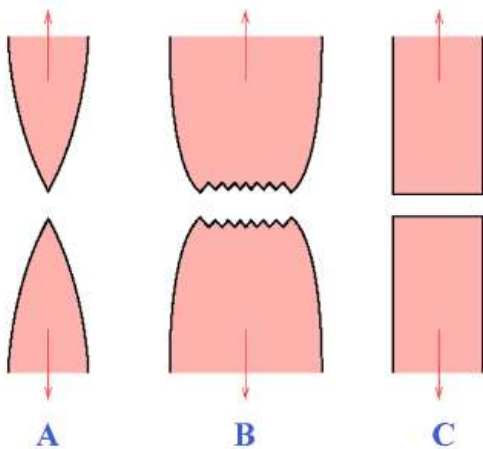
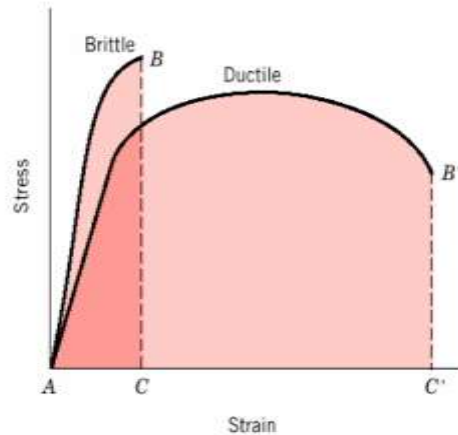


Steps in fracture: ➤ crack formation
➤ crack propagation

- **Ductile fracture** - most metals (not too cold):
 - Extensive plastic deformation ahead of crack
 - Crack is “stable”: resists further extension unless applied stress is increased
- **Brittle fracture** - ceramics, ice, cold metals:
 - Relatively little plastic deformation
 - Crack is “unstable”: propagates rapidly without increase in applied stress



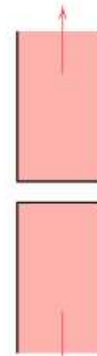
- **Ductile materials** - extensive plastic deformation and energy absorption (“toughness”) before fracture
- **Brittle materials** - little plastic deformation and low energy absorption before fracture



- A. **Very ductile**, soft metals (e.g. Pb, Au) at room temperature, other metals, polymers, glasses at high temperature.
- B. **Moderately ductile fracture**, typical for ductile metals
- C. **Brittle fracture**, cold metals, ceramics.

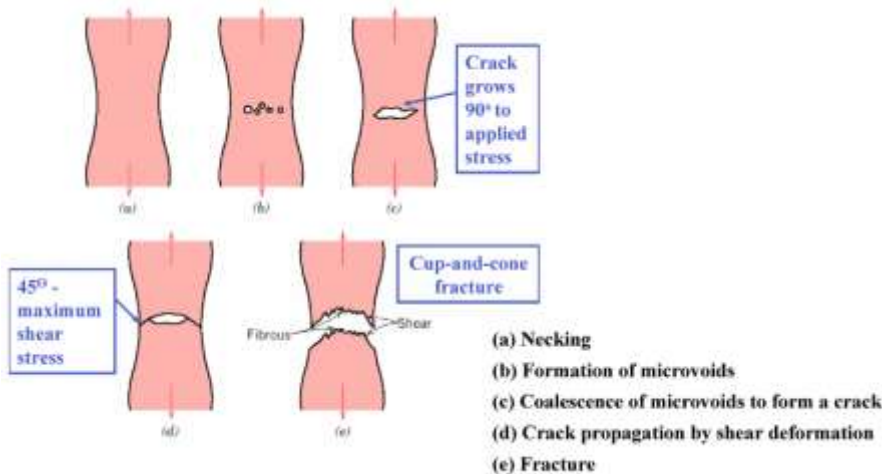
Brittle Fracture (Limited Dislocation Mobility)

- No appreciable plastic deformation
- Crack propagation is very fast
- Crack propagates nearly perpendicular to the direction of the applied stress
- Crack often propagates by **cleavage** - breaking of atomic bonds along specific crystallographic planes (**cleavage planes**).



Brittle Fracture

- A. Transgranular fracture:** Fracture cracks pass through grains. Fracture surface have faceted texture because of different orientation of cleavage planes in grains.
- B. Intergranular fracture:** Fracture crack propagation is along grain boundaries (grain boundaries are weakened or embrittled by impurities segregation etc.)



Design Concepts for Fracture

1. Applied stresses (service)
2. Minimum flaw size (material microstructure)
3. Material fracture toughness
4. Crack growth rate,

Fracture Mechanics Parameters

- J-Integral
- Energy-Release Rate
- Stress-Intensity Factor
- T-Stress
- Material Force
- C*-Integral
 - UMM Method (Unstructured Mesh)

Fracture Mechanics Table

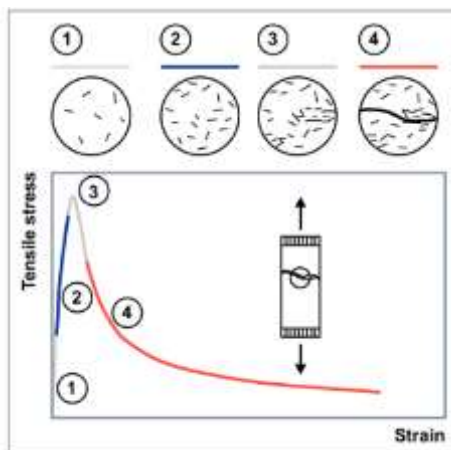
Method	Material Behavior
J-Integral	Linear isotropic elasticity Isotropic plasticity
Energy-Release Rate (VCCT Method)	Linear isotropic elasticity Orthotropic elasticity Anisotropic elasticity
Stress-Intensity Factor	Linear isotropic elasticity
T-Stress	Linear isotropic elasticity Isotropic plasticity
Material Force	Various (including plasticity, viscoelasticity)
C*-Integral	Creep

Crack-Growth Simulation

- VCCT-Based Interface Element Method
- Cohesive Zone Method
- XFEM-Based Method

Fracture Mechanics Meshing & Element Support

Element Type	Description	Parameter Calculations Supported
PLANE182	2-D 4-Node Structural Solid	J-integral VCCT energy-release rate Stress-intensity factor
PLANE183	2-D 8-Node or 6-Node Structural Solid	T-stress Material force C*-integral
SOLID185	3-D 8-Node Structural Solid	J-integral (UMM optional) VCCT energy-release rate Stress-intensity factor (UMM optional)
SOLID186	3-D 20-Node Structural Solid	T-stress Material force C*-integral
SOLID187	3-D 10-Node Tetrahedral Structural Solid	J-integral (UMM optional) Stress-intensity factor (UMM optional) T-stress Material force C*-integral
SOLID285	3-D 4-Node Tetrahedral Structural Solid with Nodal Pressures	J-integral (UMM optional) Stress-intensity factor (UMM optional)

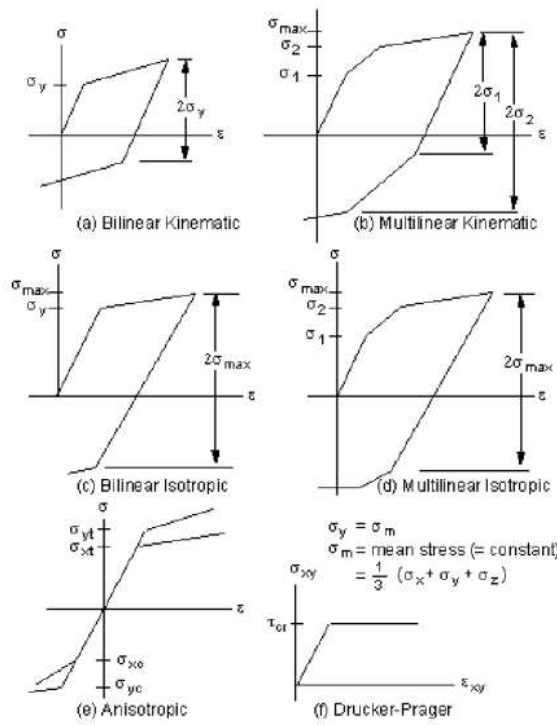
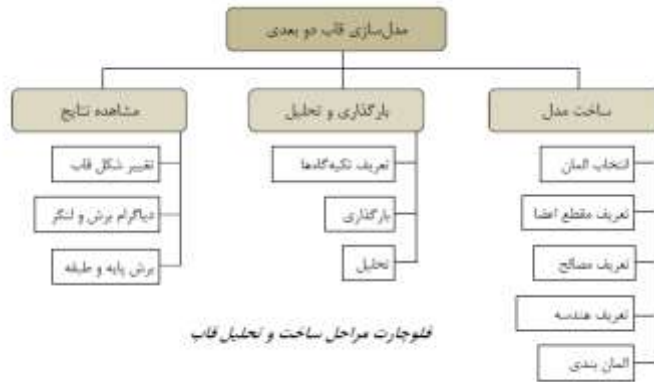


Concrete fracture

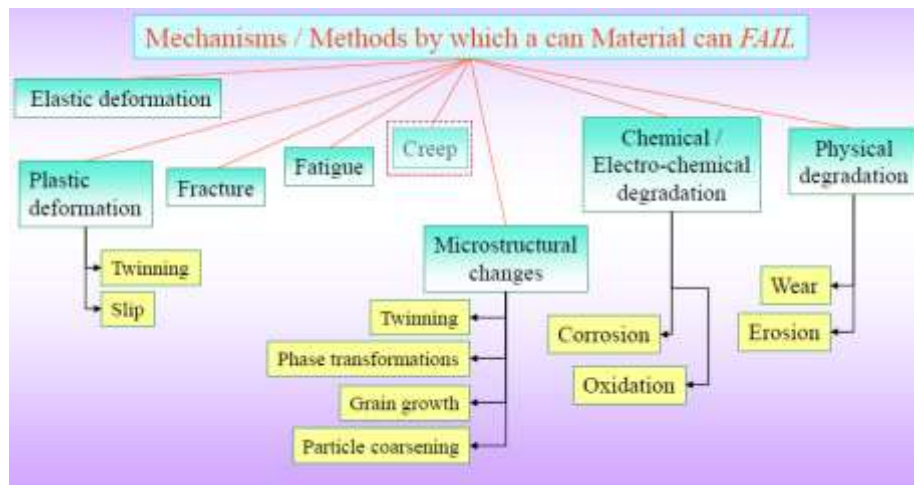
- Structural/material behavior:
- Elastic material
 - Elasto-plastic material
 - (linear/non linear)
 - Small deformation/displacement

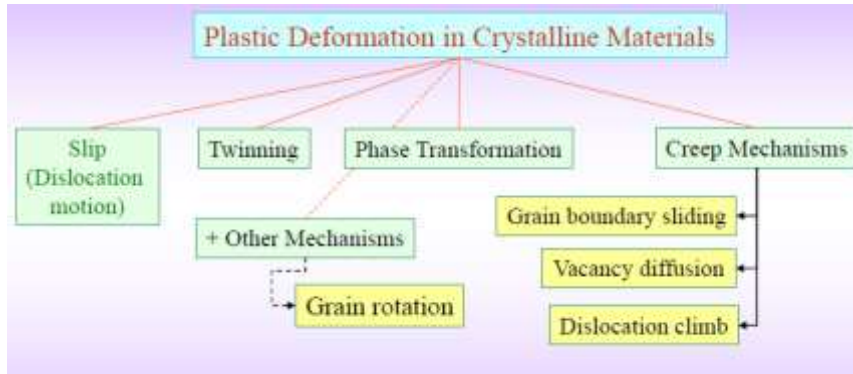
- Loads:
- Thermal effects
 - Body loads effects
 - Contacts

۱. پلاستیسیته مستقل از سرعت (Rate-Independent Plasticity).
 ۲. پلاستیسیته وابسته به سرعت (Rate-Dependent Plasticity).
 ۳. ماده Gasket.
 ۴. غیر خطی الاستیک (Nonlinear Elasticity).
 ۵. هایپراستیسیته (Hyperelasticity).
 ۶. مدل آلیاز حافظه‌دار یا Shape Memory Alloy Material Model.
 ۷. ویسکوالاستیسیته (Viscoelasticity).
 ۸. بتن (Concrete).
۱. سخت شوندگی کینماتیک دو خطی (Bilinear Kinematic Hardening).
 ۲. سخت شوندگی کینماتیک چند خطی (Multilinear Kinematic Hardening).
 ۳. سخت شوندگی کینماتیک غیر خطی (Nonlinear Kinematic Hardening).
 ۴. سخت شوندگی ایزوتروپیک دو خطی (Bilinear Isotropic Hardening).
 ۵. سخت شوندگی ایزوتروپیک چند خطی (Multilinear Isotropic Hardening).
 ۶. سخت شوندگی ایزوتروپیک غیر خطی (Nonlinear Isotropic Hardening).
 ۷. غیر ایزوتروپیک (Anisotropic).
 ۸. دراگر-پراگر (Drucker - Prager).
 ۹. چدن (Cast Iron).

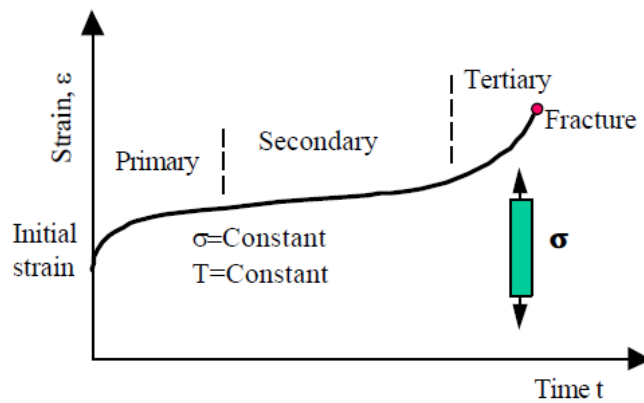
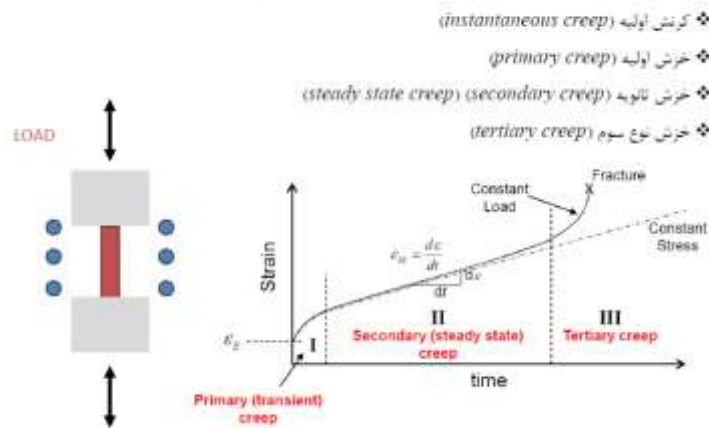


نمودار تنش-کرنش برخی مصالح غیر خطی

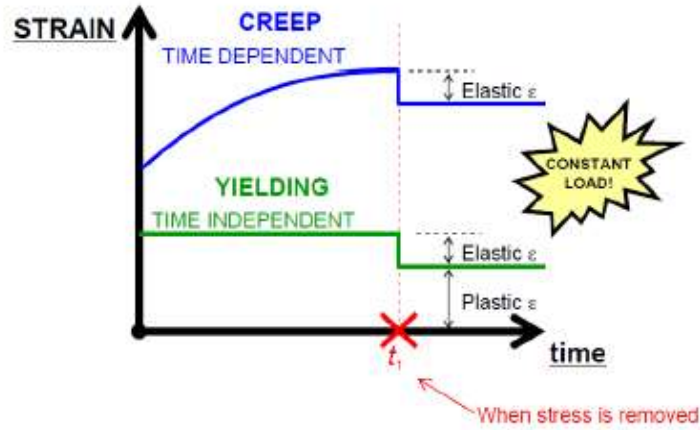




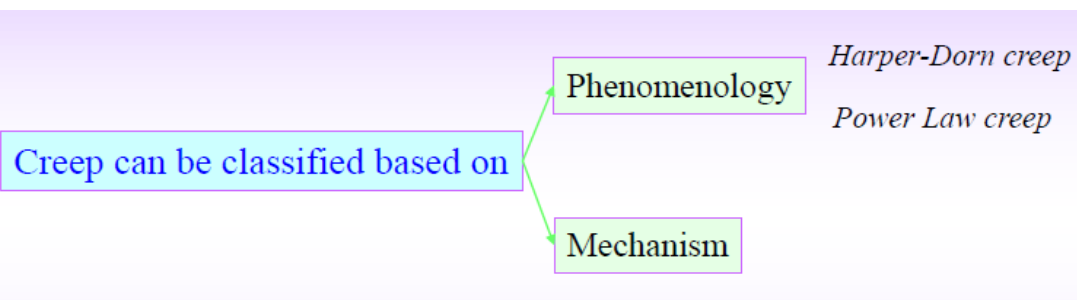
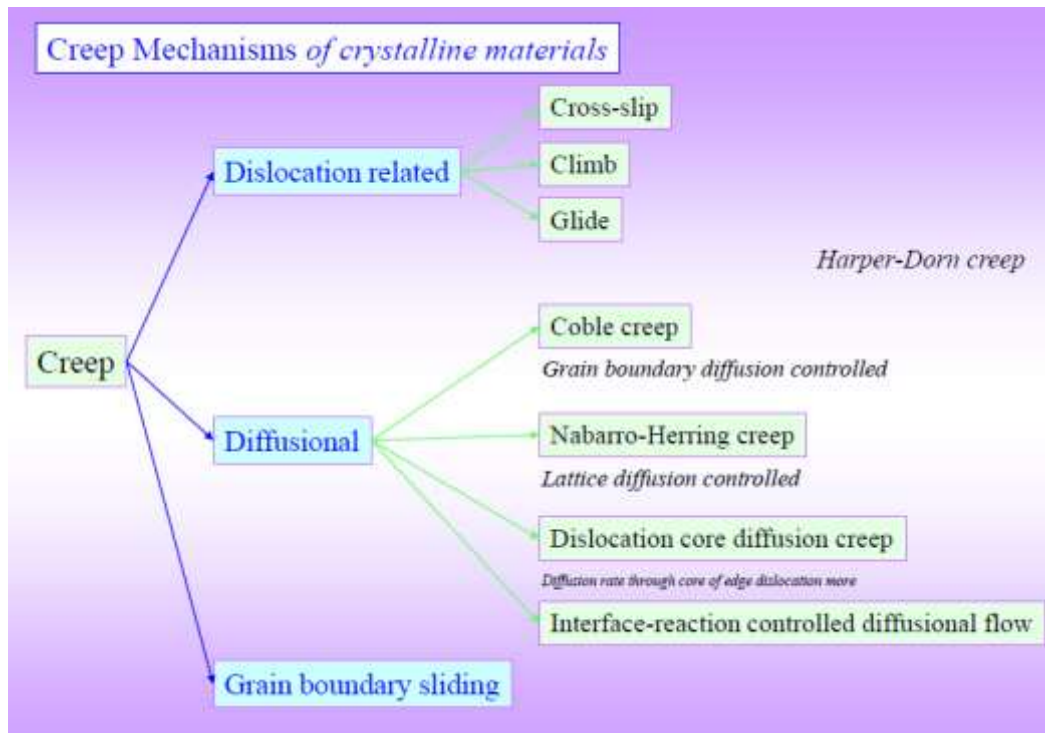
منحنی خزش (کرنش - زمان)



Stages of creep	
I	<ul style="list-style-type: none"> Creep rate decreases with time Effect of work hardening more than recovery
II	<ul style="list-style-type: none"> Stage of minimum creep rate \rightarrow constant Work hardening and recovery balanced
III	<ul style="list-style-type: none"> Absent (/delayed very much) in constant stress tests Necking of specimen start specimen failure processes set in



$$\epsilon_{\text{creep}} = f(T, \sigma, t)$$



اثرات افزایش درجه حرارت بر خواص قطعه

- ❖ افزایش درجه حرارت از دیدگاه ترمودینامیک
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر پایداری فازهای جامد و انحلال آنها
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر نفوذ اتمی
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر سیستم‌های لغزشی و حرکت نابجایی‌ها
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر عيوب کریستالی
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر شکست قطعه
- ❖ افزایش درجه حرارت و پدیده تبلور مجدد

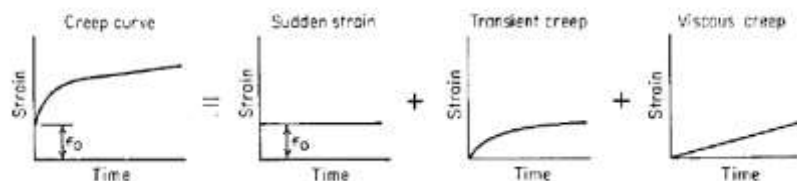
منحنی خزش (گرنش - زمان)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \beta t^{1/3}) e^{(kt)}$$

معادله آندرید

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1 (1 - e^{-\alpha t}) + \varepsilon_2 t$$

معادله گاروفالو

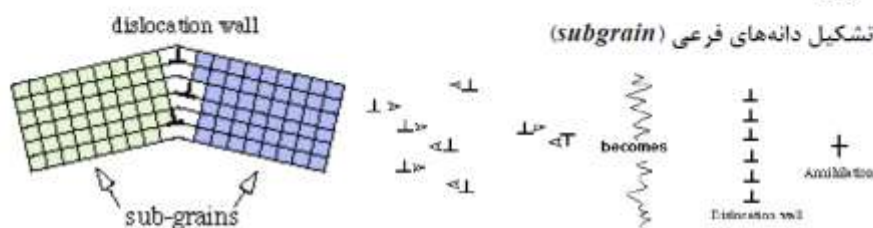


تغییرات ساختاری حین خزش

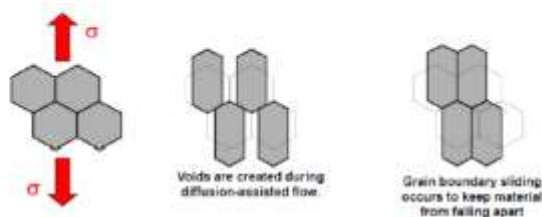
فرآیندهای اصلی تغییر شکل در دمای بالا

❖ لغزش

❖ تشکیل دانه‌های فرعی (subgrain)



❖ لغزش مرزدانه‌ای (grain boundary Sliding)



انرژی محرکه خزش

$$\varepsilon_s^o = A e^{-Q/RT}$$

روش‌های محاسبه انرژی محرکه خزش

❖ روش *Dorn et. al*

$$A = \varepsilon_1^o e^{Q/RT_1} = \varepsilon_2^o e^{Q/RT_2} \quad Q = \frac{R \ln(\varepsilon_1^o / \varepsilon_2^o)}{(1/T_2 - 1/T_1)}$$

❖ روش *Dorn*

$$\varepsilon = \alpha (t e^{-Q/RT})^n$$

$$\theta = t e^{-Q/RT}$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \alpha (t_1 e^{-Q/RT_1})^n \\ \varepsilon &= \alpha (t_2 e^{-Q/RT_2})^n \end{aligned} \right\} \rightarrow Q_{creep} = R \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \right) \ln \left(\frac{t_1}{t_2} \right)$$

❖ معادله *Dorn* کلی شده (این معادله برای همه مکانیزم‌های خزش معتبر است)

$$\dot{\varepsilon} = \frac{ADGb}{kT} \left(\frac{\sigma}{G} \right)^n \left(\frac{b}{d} \right)^p, \text{ where } D = D_0 \exp(-Q/kT)$$

D = diffusion coefficient

d = grain size

b = Burgers vector

k = Boltzmann's constant

T = the absolute temperature (degrees Kelvin)

G = the shear modulus

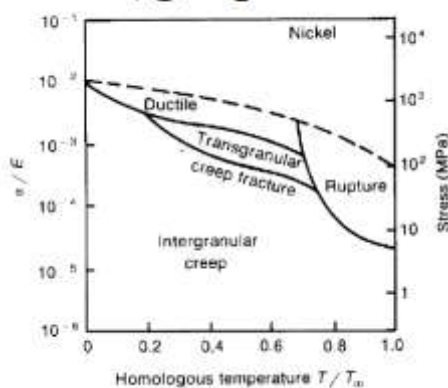
σ = applied stress

n = stress exponent

p = inverse grain size exponent

A = a dimensionless constant.

شکست در دمای بالا



خزش مرحله سوم

عوامل موثر بر نوع ترک:

- تبلور مجدد
- وجود ذرات ناخالصی در نقاط سه گوش
- وجود ذرات ناخالصی در مرزها
- ناهمگن بودن ساختار متالورژیکی
- تنش
- دما

اثر عوامل مختلف بر خزش

- ❖ اندازه دانه
- ❖ تاثیر تبلور مجدد
- ❖ اثر پیش کرنش

❖ اثر عناصر آلیاژی

۱- محلول جامد (*solid solution*)

- ✓ جدایش بر نایجایی‌ها و ایجاد اتمسفر
- ✓ اثر الاستیکی اتم‌های حل شونده بر نایجایی‌های متحرک و افزایش تنش اصطکاکی
- ✓ جدایش در مناطق نقص در چیده شدن
- ✓ واکنش با جاهای خالی و نایجایی‌های جاگ‌دار
- ✓ جدایش در مرزخانه‌ها و اثرات بعدی بر لغزش یا مهاجرت مرزها
- ✓ تشکیل مناطقی با نظم کوتاه‌برد و دوربرد

۲- رسوب‌ها (*precipitates*)

۳- ذرات پراکنده (*dispersion hardening*)

روش‌های بهبود مقاومت به خزش

❖ افزودن عناصر نقطه ذوب بالا

❖ افزایش اندازه دانه

❖ استفاده از عناصر با *SFE* پایین

❖ تشکیل محلول‌های جامد

❖ ایجاد ذرات فاز دوم پراکنده در زمینه

اثر تنش بر آهنگ خزش در دمای ثابت

❖ رابطه توانی

$$\varepsilon_s^o = c\sigma^n$$

❖ رابطه *sinh*

$$\varepsilon_s^o = \varepsilon_o^o \sinh \frac{\sigma}{\sigma_o}$$

❖ رابطه *exponential*

$$\varepsilon_s^o = Ke^{\gamma\sigma}$$

❖ رابطه کلی

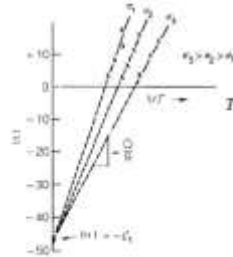
$$\varepsilon_s^o = K\sigma^n e^{-Q/RT}$$

پارامترهای اصلاح (تخمین عمر خزشی)

$$\dot{\epsilon}_s^o = K \sigma^n e^{-Q/RT} \xrightarrow{\sigma = cM} \dot{\epsilon}_s^o = A e^{-Q/RT} \xrightarrow{\dot{\epsilon}_s^o = \frac{k}{t}} \frac{k}{t} = A e^{-Q/RT}$$

$$\log t = -\log A + \frac{Q}{2.3RT}$$

پارامتر لارسون-میلر (Larson-Miller)



$$T(\log t + \log A) = \frac{Q}{2.3R} = f(\sigma)$$

$$P_{L-M} = T(\log t + C) = f(\sigma)$$

$$C \approx 20 \quad (15 - 25)$$

پارامتر شرپی-دورن (Sherby-Dorn)

$$P_{S-D} = -\log A - \log t - \frac{Q}{2.3RT}$$

مکانیزم‌های خزش (خزش نابجایی)

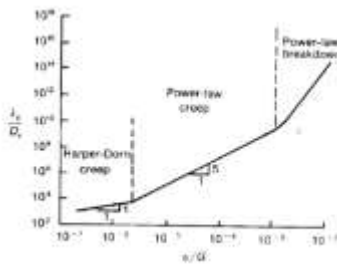
❖ دمای پایین ($0.3-0.6 T_m$)

❖ حرکت برگشت نابذیر نابجایی‌ها یا کمک جمود و لغزش متقاطع

❖ مدل‌های خزش نابجایی

1- تئوری Bally-Orowan

$$\dot{\epsilon}_s^o = \frac{r}{h} = -\frac{\partial \sigma / \partial t}{\partial \sigma / \partial \epsilon}$$



2- تئوری Weetman

$$\dot{\epsilon}_s^o = \frac{AD_0 G b}{kT} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n$$

$$D_0 = D_s \exp(-Q/kT)$$

$$\dot{\epsilon}_s^o = B \sigma^n \exp(-Q/kT)$$

$$\dot{\epsilon}_s^o = \frac{AD}{\alpha^n b^3} \left(\sinh \alpha \frac{\sigma}{E}\right)^n$$

Harper-Dorn creep ✓

n=1

Power-Law creep ✓

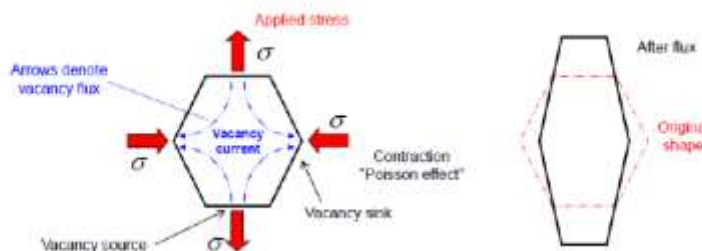
n=5

Power-Law breakdown ✓

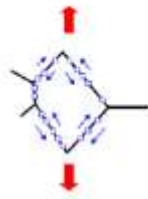
مکانیزم‌های خزش (خزش نفوذی)

❖ خزش Herring-Nabarro

$$\dot{\epsilon}_s^o \approx \frac{14\sigma b^3 D_v}{kT d^2}$$

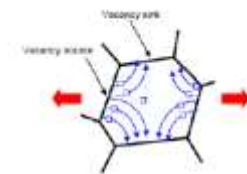
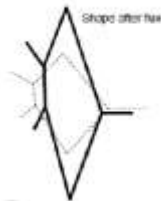


مکانیزم‌های خزش (خزش نفوذی)



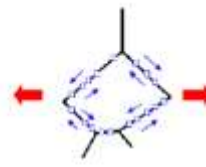
خزش Coble ❖

$$\epsilon_{\tau}^0 \approx \frac{50\sigma b^4 D_{gb}}{kTd^3}$$



Nabarro-Herring

$$\epsilon_{\tau}^0 = \frac{A_{NH} D_v G b}{kT} \left(\frac{b}{d} \right)^3 \left(\frac{\sigma}{G} \right)$$



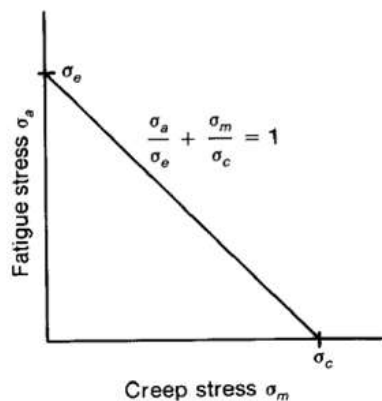
Coble

$$\epsilon_{\tau}^0 = \frac{A_C D_{gb} G b}{kT} \left(\frac{\delta}{b} \right) \left(\frac{b}{d} \right)^3 \left(\frac{\sigma}{G} \right)$$

اثر متقابل خزش - خستگی

❖ قانون تجمیع خسارات

$$\sum_{j=1}^{j=k} \left(\frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{l=1}^{l=m} \left(\frac{t}{t_d} \right)_l \leq D$$



عمل متقابل خستگی - خزش برای دمای ثابت

❖ تعدیل روابط خستگی

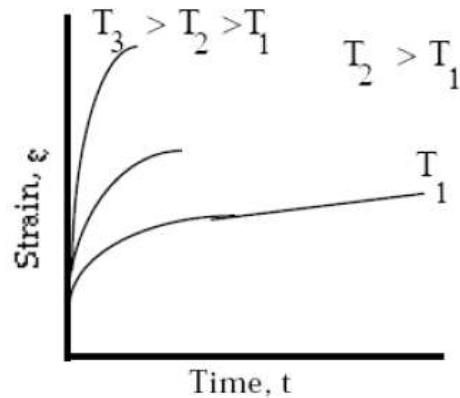
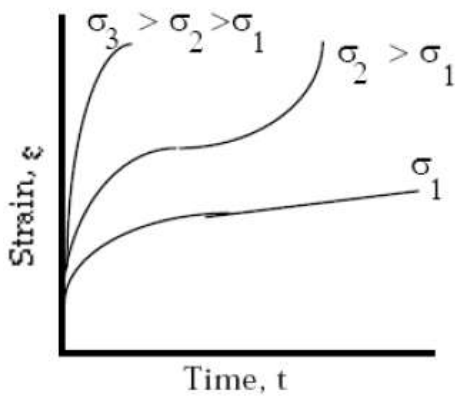
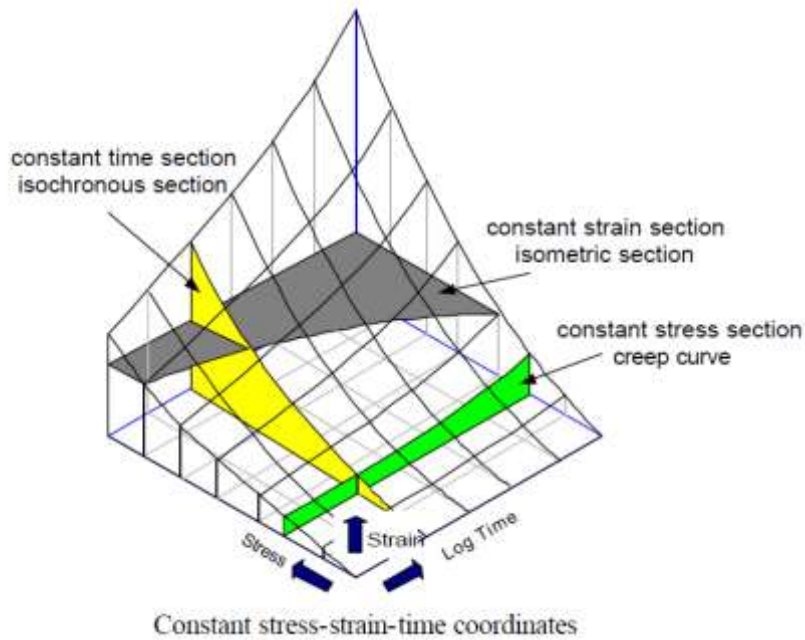
$$v^k t_f = v^k (N/v) = N v^{k-1}$$

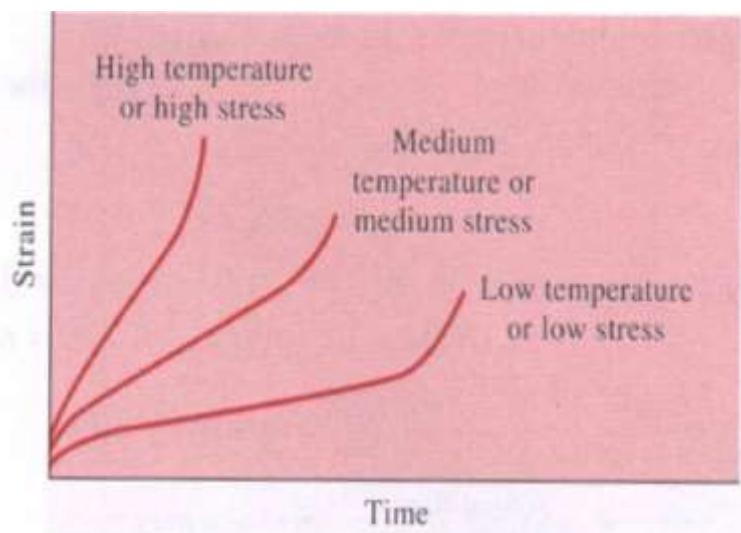
$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N)^c$$

$$\Delta \varepsilon_p (N v^{k-1})^{-c} = C_1$$

$$\Delta \varepsilon_e = \frac{\Delta \sigma}{E} = \frac{A'}{E} N^{-b} v^{k'}$$

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_p + \Delta \varepsilon_e = \left(\frac{A'}{E}\right) C_1^{n'} N^{-(1/c)n'} v^{-(1/c)n'(k-1)+k'} + C_1 (N v^{k-1})^{-c}$$





نویسنده: ایمان یاسیان