

مکانیک شکست (خستگی و خزش در سازه ها)

ایمان الیاسیان کارشناس ارشد سازه i.elyasian@gmail.com

خستگی نوعی از تخریب است که هنگامی مشاهده میشود که نیروی اعمالی دینامیک است و مقادیر بردار نیروی (مقدار و جهت و راستا) اعمالی با گذشت زمان عوض می شود، تخریب قطعه در تنش هایی کمتر از تنش تسلیم و استحکام کششی می شکند. تخریب بعد از تعداد نوسانات طولانی نیروی اعمالی صورت می گیرد و بنابراین ممکن است مدت زمانی طول بکشد تا قطعه بشکند شکست از طریق پدیده خستگی مانند شکست ترد است و قطعه قبل از شکست تغییر شکل قابل مشاهده زیادی نشان نمی دهد و شکست از طریق خستگی با جوانه زنی و رشد ترک همراه است و سطح مقطع شکست عمود بر تنش اعمالی است تنش اعمالی می تواند به صورت کشش - خمش یا پیچش یا مجموعی از آنهاست. اما مقدار تنش اعمالی (مقدار - جهت و راستا) با گذشت زمان تغییر می کند و تنش ها به صورت سیکل های تکرار شونده (مرتب یا نامنظم) بر جسم اعمال می شود

۱- استحکام خستگی Fatigue Strength

تنشی که در یک تعداد دور مشخص باعث شکست قطعه از طریق خستگی می شود

۲- عمر خستگی : fatigue Life

تعداد دوری که قطعه در یک تنش مشخص می زند تا از طریق خستگی دچار تخریب شود

مکانیزم خستگی شامل سه مرحله است

۱- نرم شدن سیکلی

۲- جوانه زنی ترک

۳- رشد و گسترش ترک

جوانه زنی ترک از مکان های تمرکز تنش نظیر سوراخ ها - گوشه های تیز - ترک های سطحی و مانند آنها شروع می شود. در صورت عدم وجود این عوامل ترک های اولیه حین اعمال بار های سیکلی به وجود می آید. اما طبیعت تکرار شونده بار های اعمالی باعث می شود تغییرات (مثلا تغییر شکل پلاستیک) در مکان هایی خاص (مثلا نزدیک ناخالصی های درونی) متمرکز شود و با تجمع تغییرات در این نواحی ترک اولیه ایجاد می شود. این ترک اولیه در هر سیکل مقداری رشد می کند و در نهایت پس از رسیدن به طول بحرانی ترک رشد می کند.

عوامل موثر بر عمر خستگی

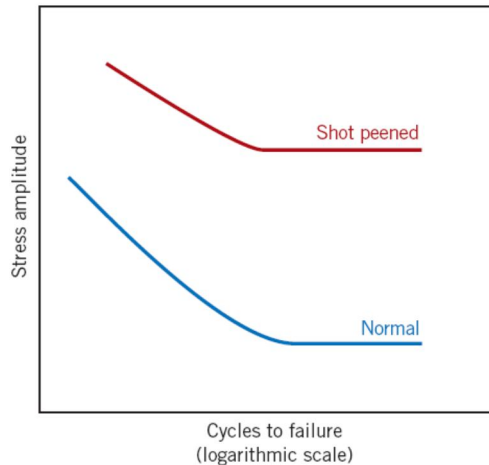
۱- تنش متوسط اعمالی (افزایش تنش متوسط اعمالی باعث کاهش عمر خستگی می شود)

۲- عوامل طراحی (وجود نقاطی که باعث تمرکز تنش شود عمر خستگی را کاهش می دهد).

۳- عملیات سطحی (ترک هایی که روی سطح ایجاد می شود باعث کاهش عمر خستگی می شود).

انجام پالایش روی سطح باعث افزایش عمر خستگی می شود. ایجاد تنش های فشاری بر روی سطح باعث می شود که از پیش روی ترک های روی سطح جلوگیری شده و عمر خستگی را زیاد می کند، یکی از راه

های ایجاد تنش فشاری در سطح قطعه پرتاب گلوله به سطح است. برخورد گلوله به سطح باعث تغییر شکل پلاستیک در نواحی نزدیک سطح می شود. این تنش های فشاری باعث جلوگیری از پیش روی سطح شده و عمر خستگی را زیاد می کند. به این عملیات Shot peen گفته می شود. استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می شود



محل های جوانه زنی ترک خستگی

۱- نوارهای لغزشی خستگی

۲- مرزدانه 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

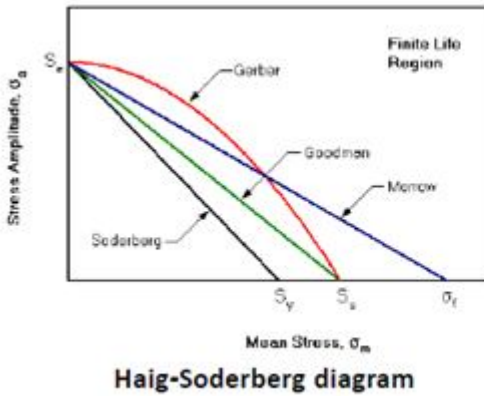
K_b = ضریب تصحیح اندازه

K_c = ضریب تصحیح بار

K_d = ضریب تصحیح دما

K_e = ضریب اعتماد پذیری

K_f = ضریب تصحیح اثرات دیگر مثل تمرکز تنش



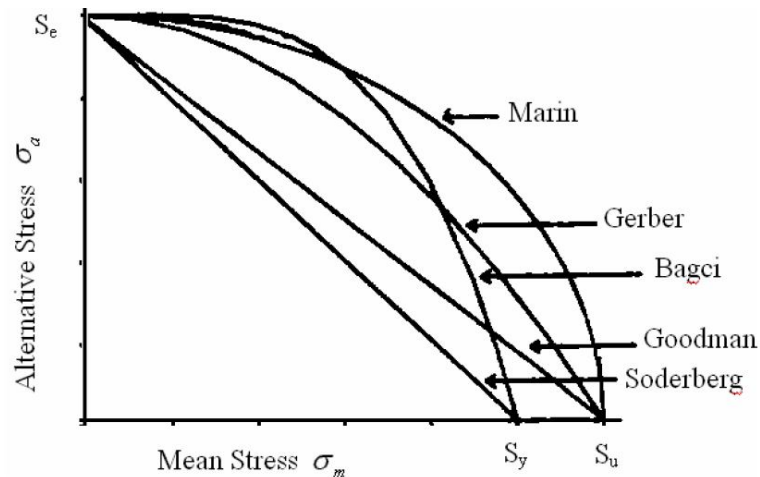
Goodman (England, 1899): $\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} = 1$

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 سودبرگ	$\frac{n\sigma_a}{S_e} + \left(\frac{n\sigma_m}{S_{ut}}\right)^2 = 1$	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		



تئوری های مختلف خستگی

آهنگ رشد ترک

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

Paris equation

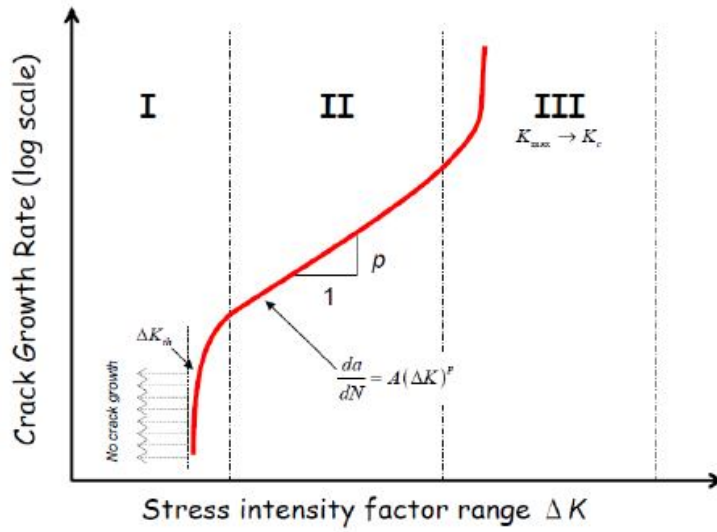
$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{UT}} = 1$ نمودار گودمن

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

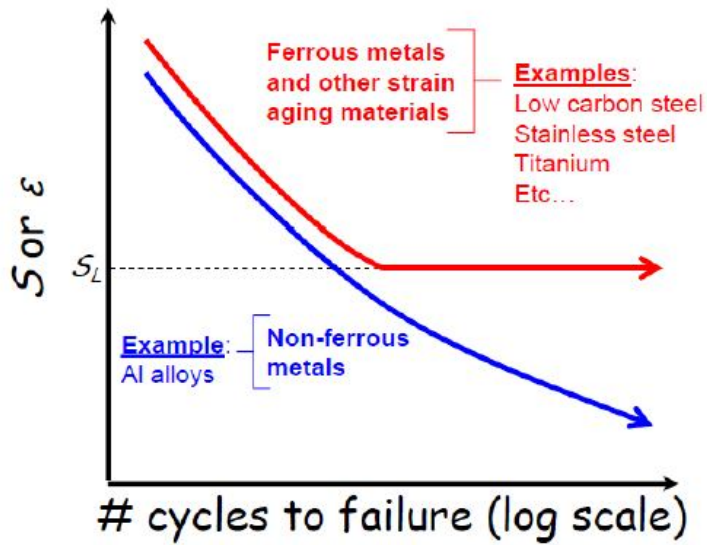
$\frac{S_a}{S_e} + \left(\frac{S_m}{S_{UT}}\right)^2 = 1$ نمودار گربر

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

آهنگ رشد ترک

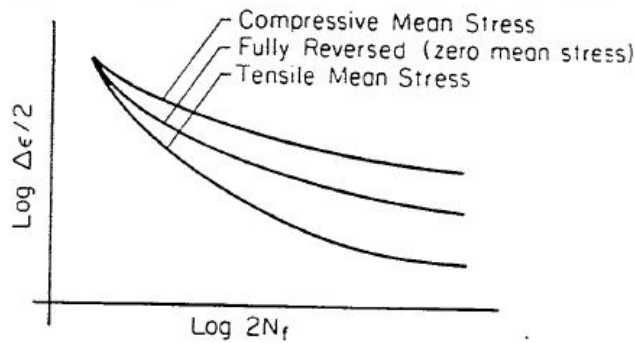


منحنی S-N



S_L = fatigue/endurance limit

خستگی در کرنش سیکلی (منحنی $\epsilon-N$)



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

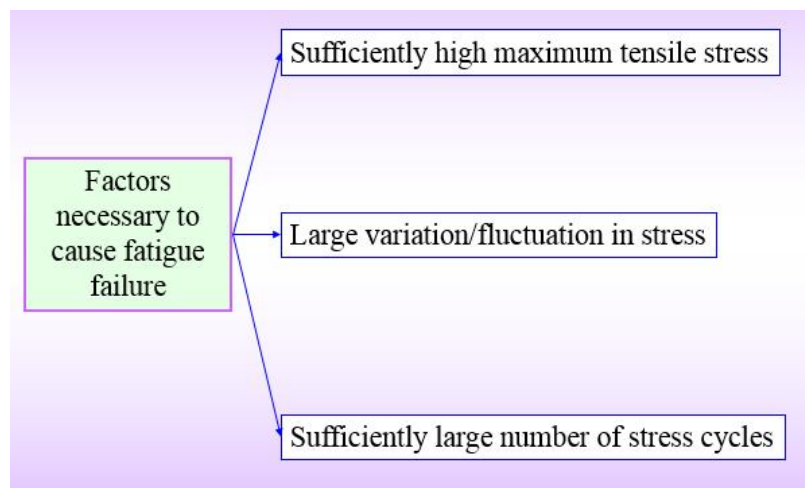
شکستهایی که در شرایط بارگذاری دینامیک رخ می دهند شکستهای خستگی نامیده میشوند شکستها فقط پس از یک دوره کار زیاد رخ می دهند هیچگونه تغییر واضحی در ساختار فلزی که به علت خستگی می شکند وجود ندارد تا بتوان به عنوان مدرکی برای شناخت دلایل شکست خستگی از آن استفاده کرد تحت بارگذاری تکراری و ارتعاشی ستگی بیشتر متداول است و عامل حداقل ۹۰ درصد شکستهای ناشی از دلایل مکانیکی حین کار خستگی باشد بدون آگاهی قبلی و قابل رویت بودن رخ می دهد. خستگی به صورت شکستی با ظاهر ترد، بدون هیچگونه تغییر شکل نا خالص در شکست نتیجه میشود. معمولاً سطح شکست در مقیاس میکروسکوپی 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 می شود. غالباً پیشرفت شکست توسط یک دسته حلقه نشان داده می شود، که از نقطه شروع شکست به طرف داخل پیشرفت می کند.

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

(۱) تنش کششی حداکثری به مقدار بسیار زیاد

(۲) تغییرات به حد کافی زیاد یا نوسانی در تنش وارده

(۳) زیاد بودن چرخه های 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 می کنند

۱. شروع ترک : شامل ایجاد اولیه عیب خستگی که با عملیات تابانیدن مناسب برطرف می شود.
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 می شود
۳. شکست ترک روی صفحاتی با تنش کششی زیاد: عبارت است از رشد یک ترک معین در جهت عمده بر تنش کششی حداکثر . این مرحله معمولاً رشد ترک مرحله ۲ نامیده می شود.
۴. شکست نرم نهایی: هنگامی رخ می دهد 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

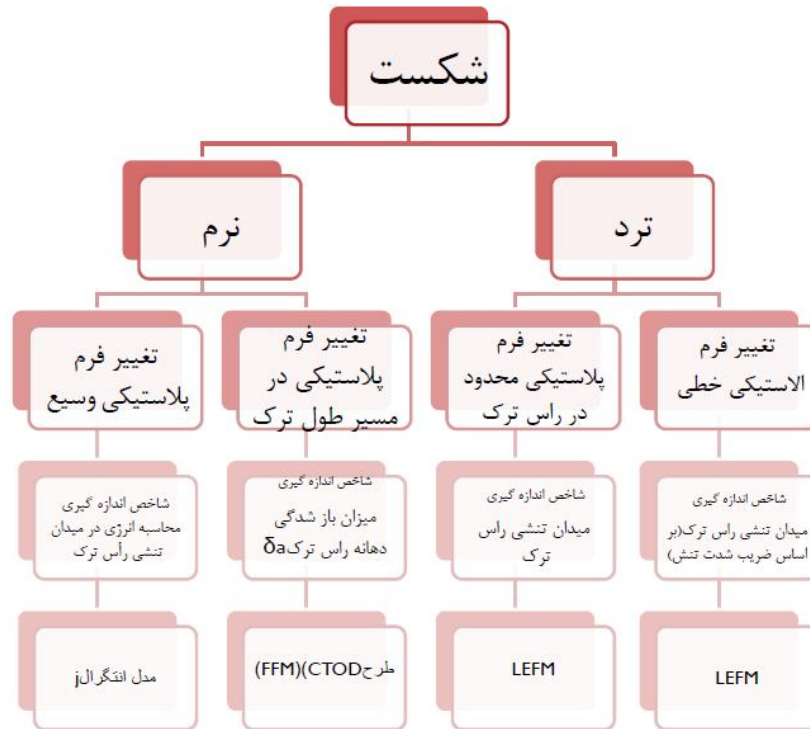
معمولاً ترکهای خستگی در یک سطح آزاد شروع می شوند . در موارد نادری که ترکهای خستگی از قسمت داخلی شروع می شوند، همیشه مرزی ، مانند حد فاصلی که لایه سطحی کربوره شده و فلز اصلی ، باید وجود داشته باشد . عملاً تمام شکستهای خستگی از سطح شروع می شوند. در بسیاری از انواع متداول بارگذاری ، مانند خمش و پیچش، تنش حداکثر در سطح رخ می دهد ، طوری که شروع شکست از آن مکان منطقی جلوه می کند . اما در بارگذاری محوری، شکست خستگی تقریباً همیشه از سطح شروع می شود

خواص خستگی فلزات کاملاً به ساختار حساس است، استحکام خستگی با کاهش دما زیاد می شود. حد خستگی فولادهای ریخته شده و کار شده تقریباً ۵۰ درصد استحکام نهایی کشش است . نسبت حد خستگی به استحکام کششی نسبت خستگی نامیده می شود. نسبت خستگی فلزات غیر آهنی مانند نیکل ، مس و منیزیم در حدود ۳۵ درصد خواهد بود.

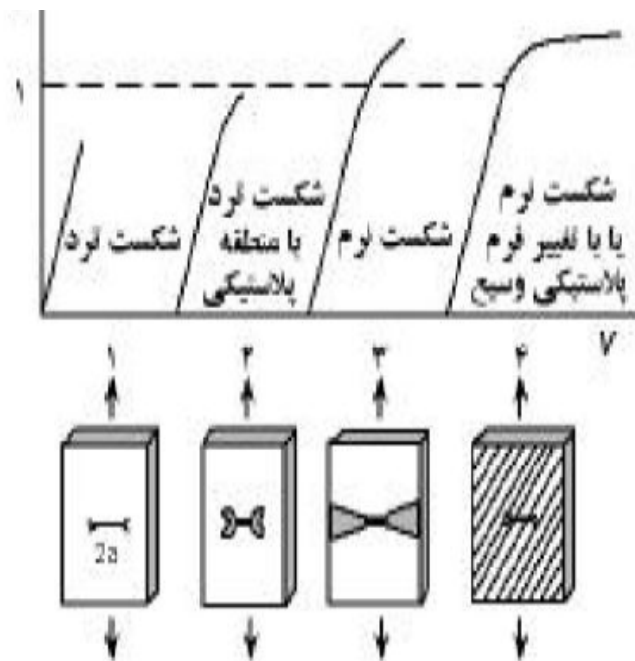
کنش همزمان تنش چرخه ای و حمله شیمیایی به خستگی خوردگی موسوم است. حمله خوردنده بدون حضور تنش غالباً در سطوح فلزی حفره ایجاد می کند . حفره ها مانند شیار عمل کرده و استحکام خستگی را کاهش می دهند. اما وقتی حمله خوردنده همزمان با بار گذاری خستگی رخ دهد ، کاهش آشکاری در خواص خستگی نتیجه می شود که از کاهش خواصی که در اثر خوردگی قبلی سطح به وجود می آید ، بیشتر است . هنگامی که خوردگی و خستگی همزمان واقع شوند ، حمله شیمیایی سرعت اشاعه ترک خستگی را به شدت تسریع می کند. بنابراین فولاد زنگ نزن ، برنز یا آلایژ مس _ برلییم، احتمالاً بهتر از فولاد عملیات حرارتی عمل خواهند کرد. حفاظت از فلز در برابر تماس با محیط خوردنده توسط روکشهای فلزی و غیر فلزی موثر است، به شرط

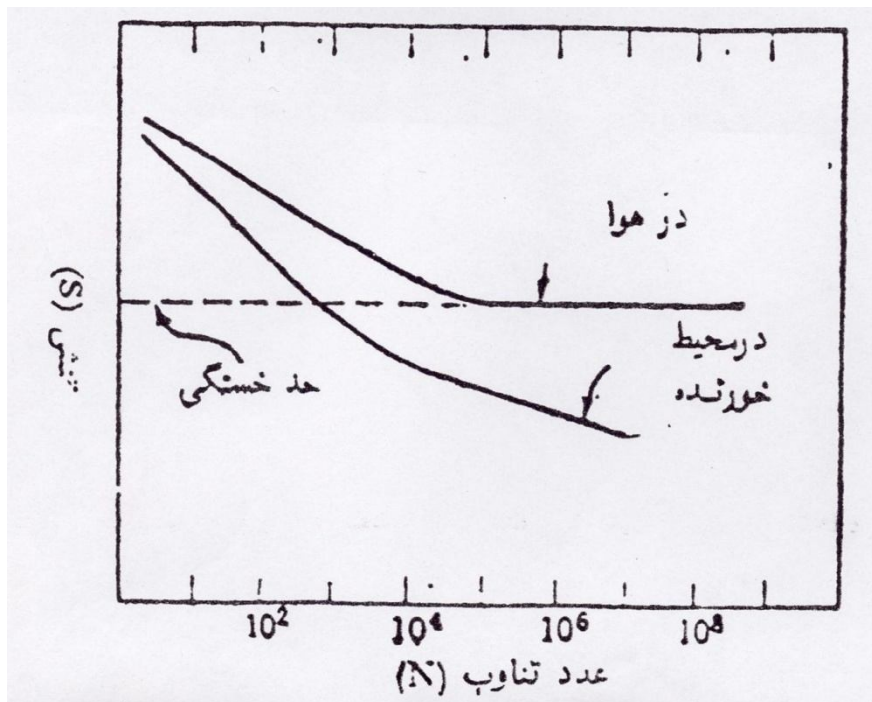
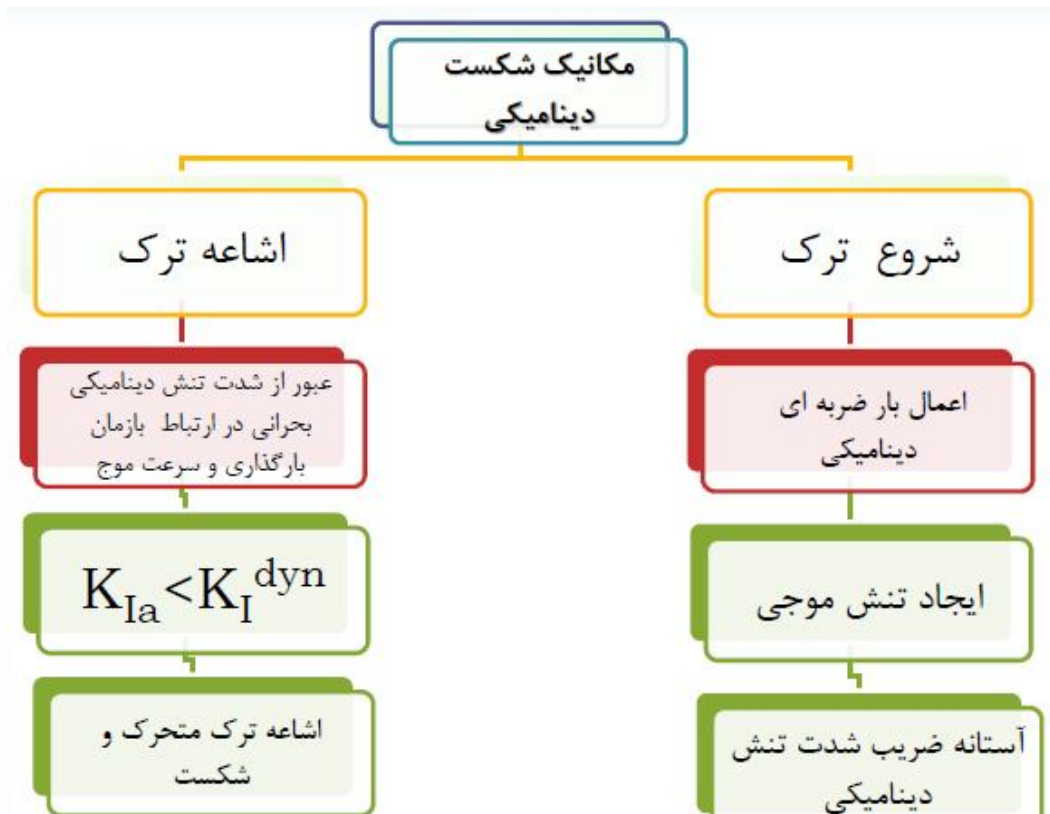
آنکه روکش در اثر کرنش چرخه ای پاره نشود. روکشهای روی و کادمیم بر فولادو روکشهای آلومینیوم آلکلاد در بسیاری کاربردهای خستگی موثر هستند

تشکیل تنشهای باقیمانده فشاری سطح از باز شدن شیارهای سطحی و وارد شدن ماده خورنده جلو گیری می کنند . به ویژه نیتریده کردن در مبارزه با خستگی موثر است و ساچمه زنی در شرایط خاص با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است



دیاگرام طرحهای مکانیک شکست





عوامل موثر در خستگی

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

- 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 ناپیوستگی ها مقاومت در مقابل خستگی را کاهش می دهد

۵- مقدار بالای اکسیژن در آب و یا در دماهای بالا میزان تحمل خستگی کاهش می یابد

۶- عواملی مثل کم شدن سطح مقطع و ارتعاش و..... تاثیر زیادی در کاهش حد خستگی دارند.

روشهای پیشگیری یا کنترل خستگی

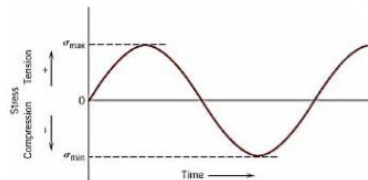
برای حذف یا کاهش ترکهای ناشی از خستگی کارهای زیر را می توان انجام داد:

۱- کنترل تنش های نوسانی: کم کردن و یا حذف بهره برداری نوسانی و طولانی کردن زمانهای راه اندازی و خواباندن

۲- کنترل عوامل محیطی: کاهش اکسیداسیون زیرا همانطور که در بالا اشاره شد افزایش اکسیژن سبب کاهش حد تحمل خستگی می شود. همچنین با کنترل PH نیز می توان میزان خستگی را کاهش داد
طراحی مجدد قطعه: اگر قطعه ها دائما دچار خستگی می گردد و با تعویض آن نیز باز هم دچار خستگی می گردد باید برای آن منطقه متریکال قطعه را عوض کنیم

انواع بار گذاری های تناوبی

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

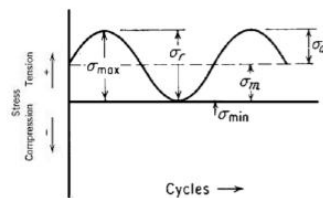


$$\sigma_m = 0$$

$$R = -1$$

$$A = \infty$$

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



$$\sigma_{min} = 0$$

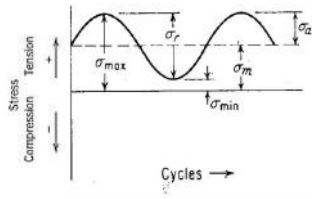
$$\sigma_m = 0.5\sigma_{max} = 0.5\Delta\sigma$$

$$R = 0$$

$$\sigma_{max} = \Delta\sigma$$

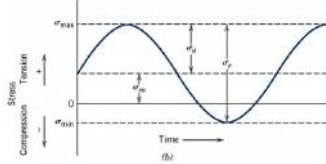
$$\sigma_m = \sigma_a$$

$$A = 1$$

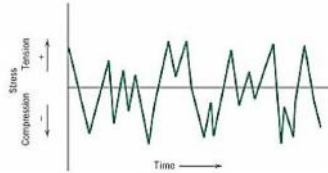


۳- سیکل متغیر موجی از نوع کششی (fluctuating tension)

$$0 < R < 1$$



۴- سیکل متغیر موجی (fluctuating)

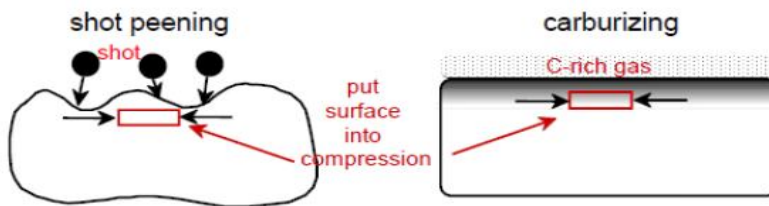


۵- بارگذاری بدون نظم مشخص

❖ 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

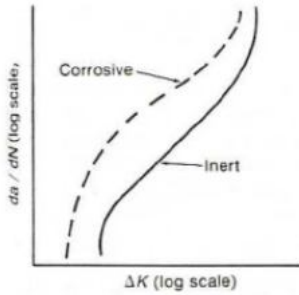
درجه حرارت

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 می آید

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

اثر عوامل موثر بر خستگی

عوامل متالورژیکی

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

عوامل مختلف موثر در خستگی مواد

- ۱- تاثیرات مقاومت و شکل پذیری
- ۲- اندازه ناحیه پلاستیک
- ۳- رفتار مواد سازه ای
- ۴- دامنه بارهای متغیر و تعداد چرخه های بارگذاری و بار برداری
- ۵- تاثیرات 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

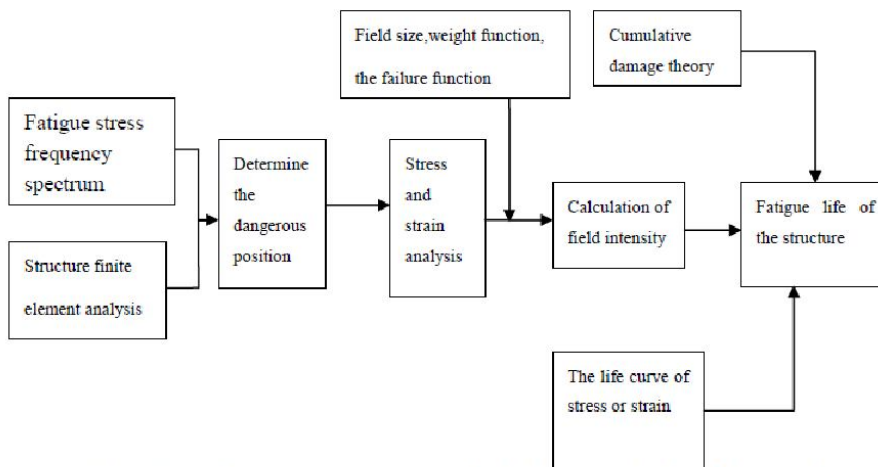
روشهای بررسی خستگی

- ۱- روش طول عمر تنش STRESS-LIFE METHOD

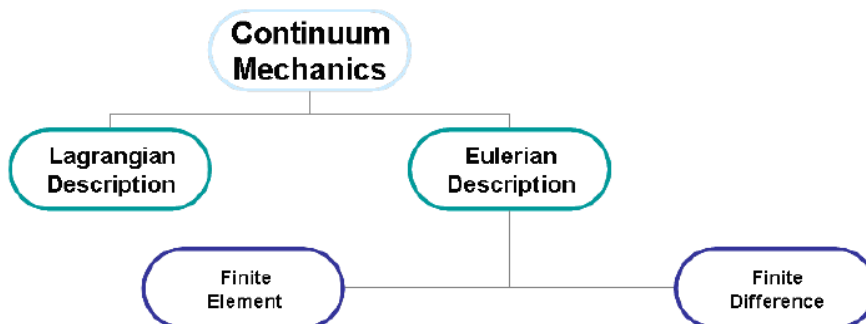
- ۲- روش طول عمر کرنش STRAIN-LIFE METHOD
- ۳- روش مکانیک شکست کشسان خطی LINEAR ELASTIC FRACTURE MECHANICS METHOD
- ۴- روش گسترش ترک CRACK PROPOGATION METHOD
- ۵- روش ارتعاشات VIBRATION FATIGUE

دلایل شکست ناشی از خستگی در سازه های فولادی

۱. عدم استحکام کششی مناسب ماده استفاده شده در سیکل های بارگذاری و باربرداری وارد
۲. تناوب بالا در میزان و نرخ تنش وارده به المان
۳. بالا بودن تعداد چرخه های بارگذاری و باربرداری بر قطعه
۴. تمرکز تنش در نقاط و یا سطوح المان
۵. تغییرات شدید دما که ناشی از گرادیان های حرارتی بالا باشند
۶. ناخالصی در ساختار متالورژیکی مواد
۷. ساختار متالورژیکی مواد و نوع عمل آوری
۸. تنش های 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 $N = \frac{2 \left[(a_c)^{(2-n)/2} - (a_i)^{(2-n)/2} \right]}{(2-n) C f^n \Delta \sigma^n \pi^{n/2}}$

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

تحليل خستگی کم چرخه تک محوری از رابطه کافین- منسون

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

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

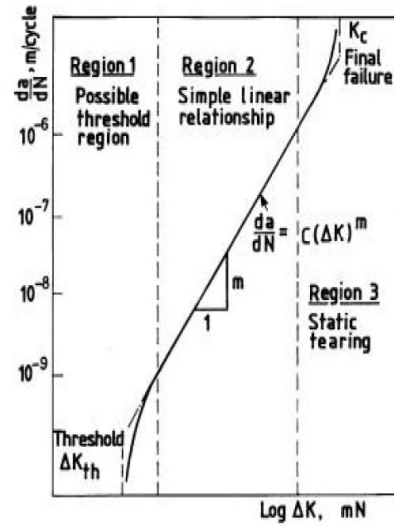
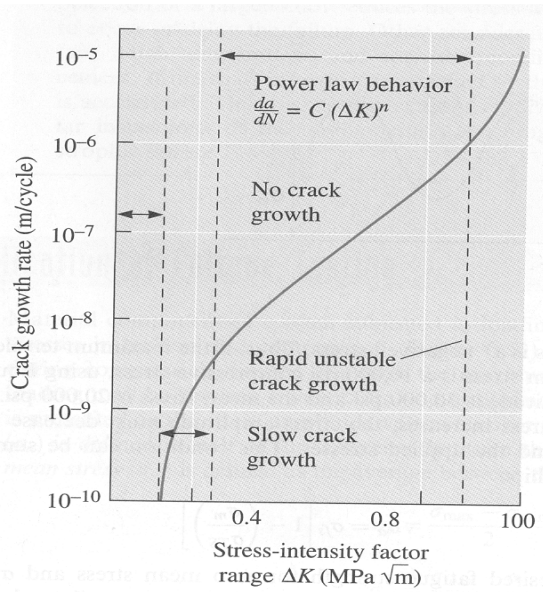
رابطه S.W.T.

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

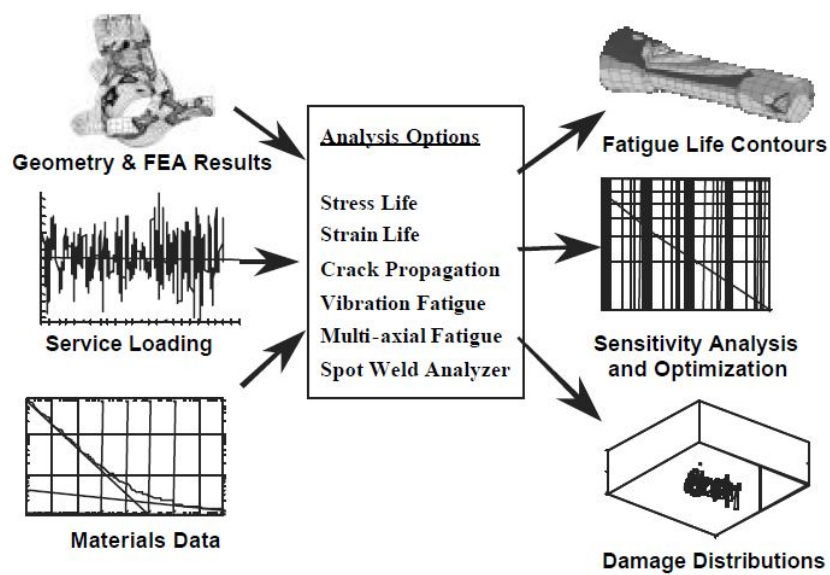
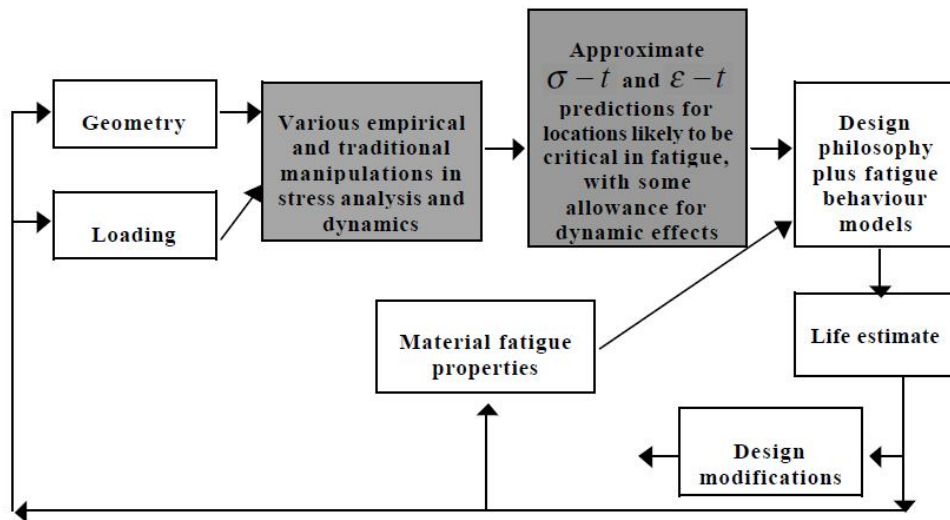
رابطه Dugan

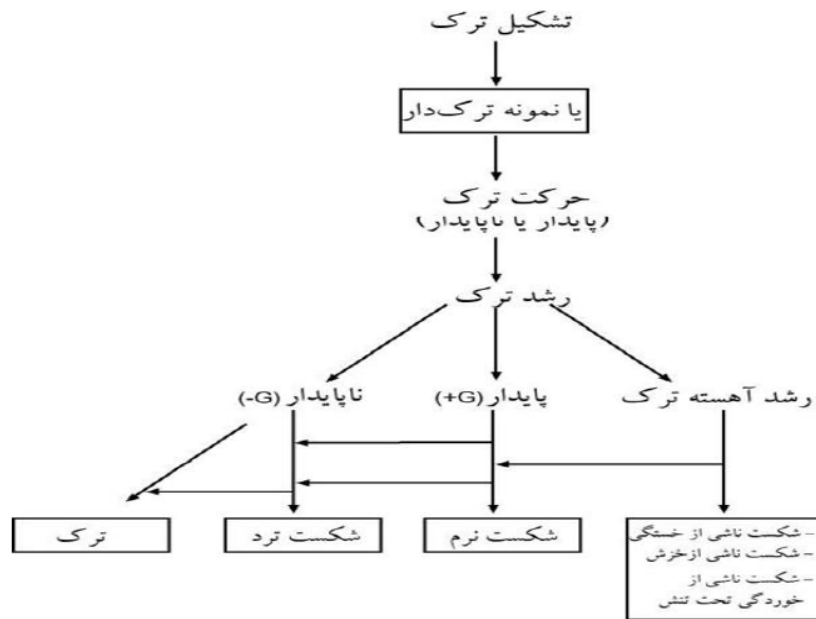
$\varepsilon_a = \frac{\sigma'_f}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right) (2N_i)^b + (\varepsilon'_f - \varepsilon_m) (2N_i)^c$

S.W.T(Smith Watson Topper)

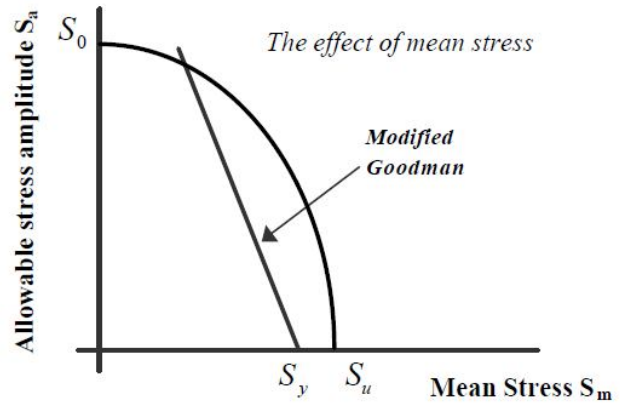


Crack propagation rates at constant ΔK





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



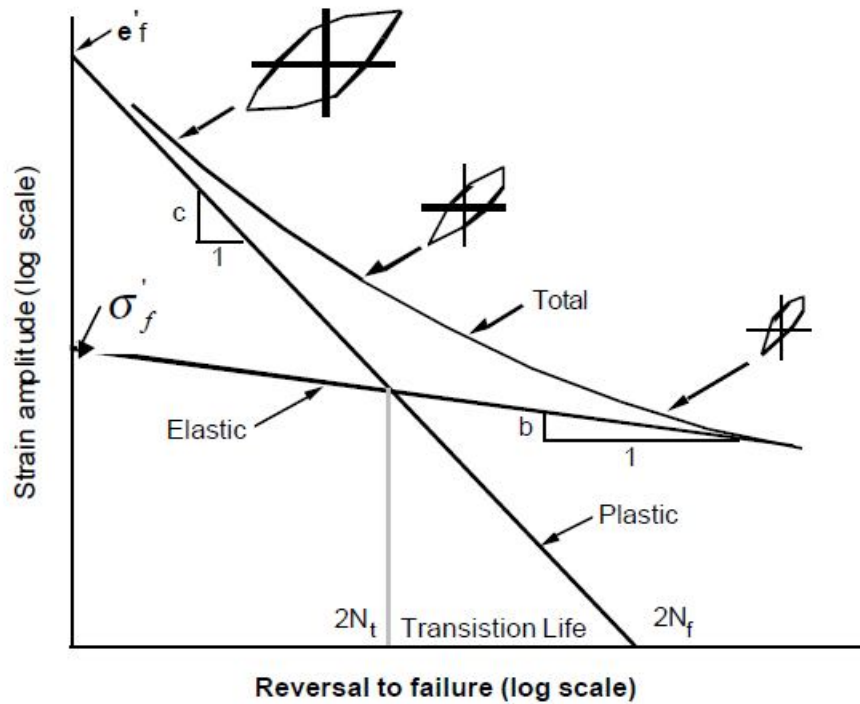
$$N = N_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^{\frac{1}{k}} \quad k = \frac{-(\log S - \log S_0)}{(\log N_0 - \log N)}$$

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

$$\epsilon_e = \frac{\sigma_a}{E} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b \quad \epsilon_p = \epsilon'_f (2N_f)^c$$

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_p$$

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



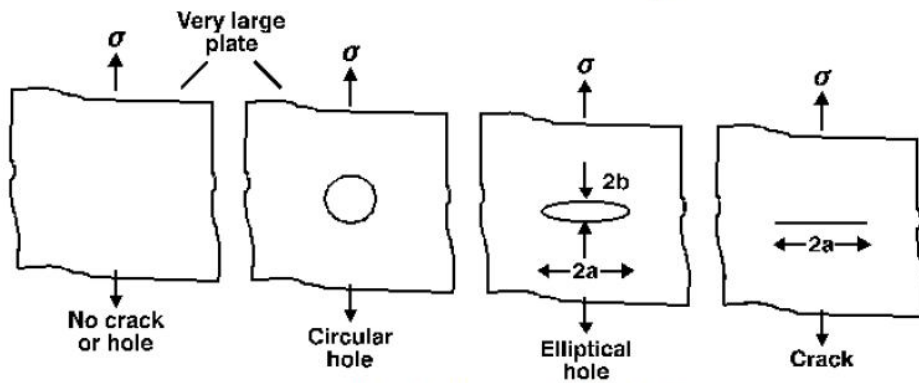
The total Strain-Life curve

The Morrow Mean Stress Correction

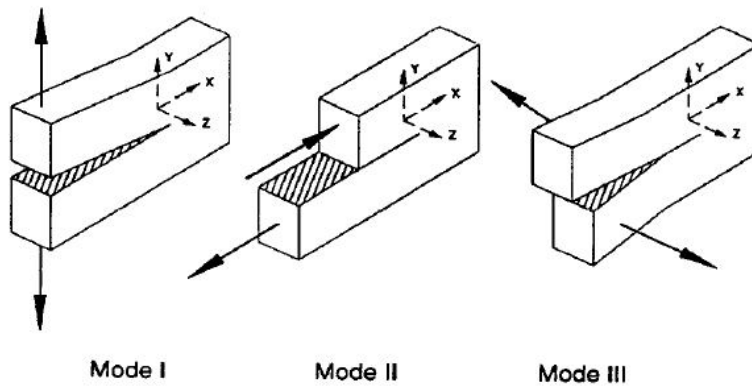
$$\epsilon_e = \frac{(\sigma'_f - \sigma_0)}{E} (2N_f)^b$$

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

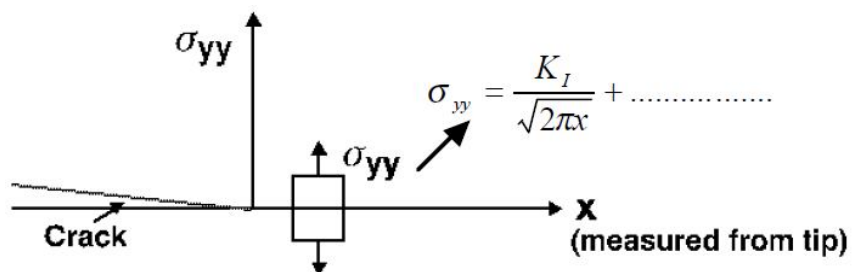
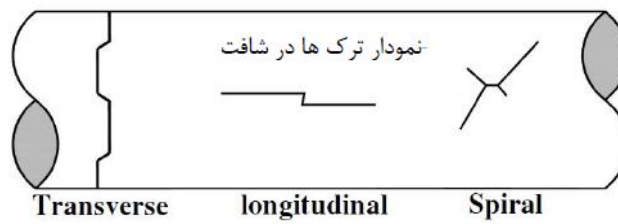
$$\sigma_{\max} = K_T \sigma \qquad K_T = 3 \qquad K_T = \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) \qquad K_T = \infty$$



Elastic stress concentrations

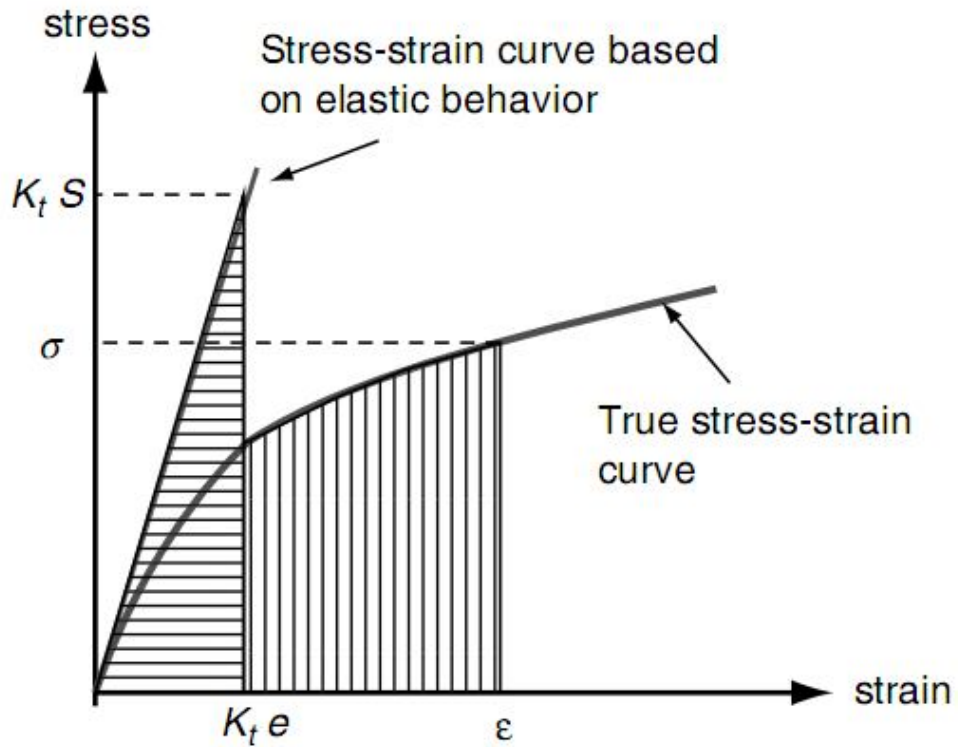


The 3 modes of cracking used in fracture mechanics

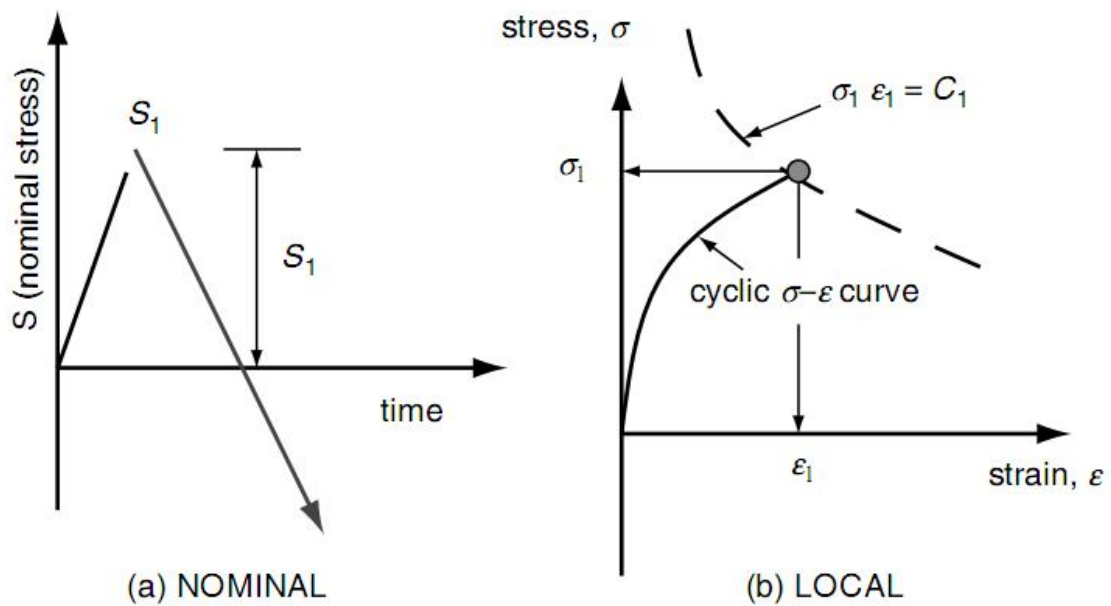


The concept of stress intensity

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



Interpretation of the strain energy density method.



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):

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

- Reemsnyder (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):

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

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

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

For initial loading case,

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

For stabilized hysteresis behavior

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

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

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

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

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

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

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

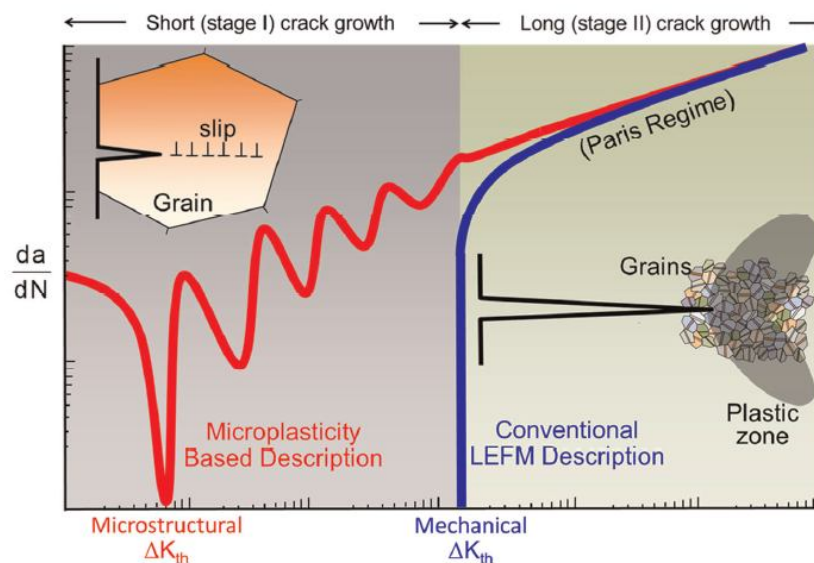
$$S^M = S \left(\frac{K_t}{K_p} \right) \quad , \quad S^M = L \left(\frac{\sigma_y}{L_p} \right)$$

- **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

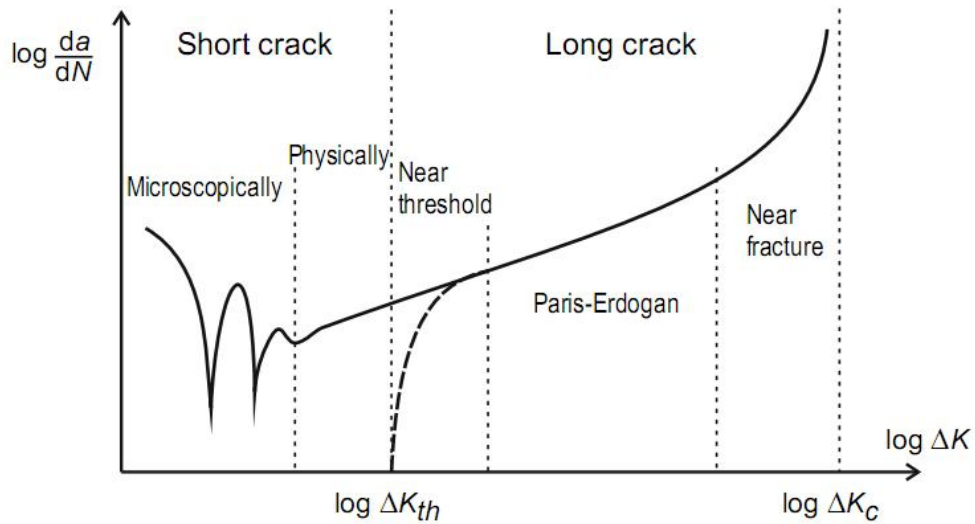
- Interface Elements
- Bonded Contact
- Mesh density – focus refinement in area of delamination.
- Anticipated size of growth of delamination

- 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.

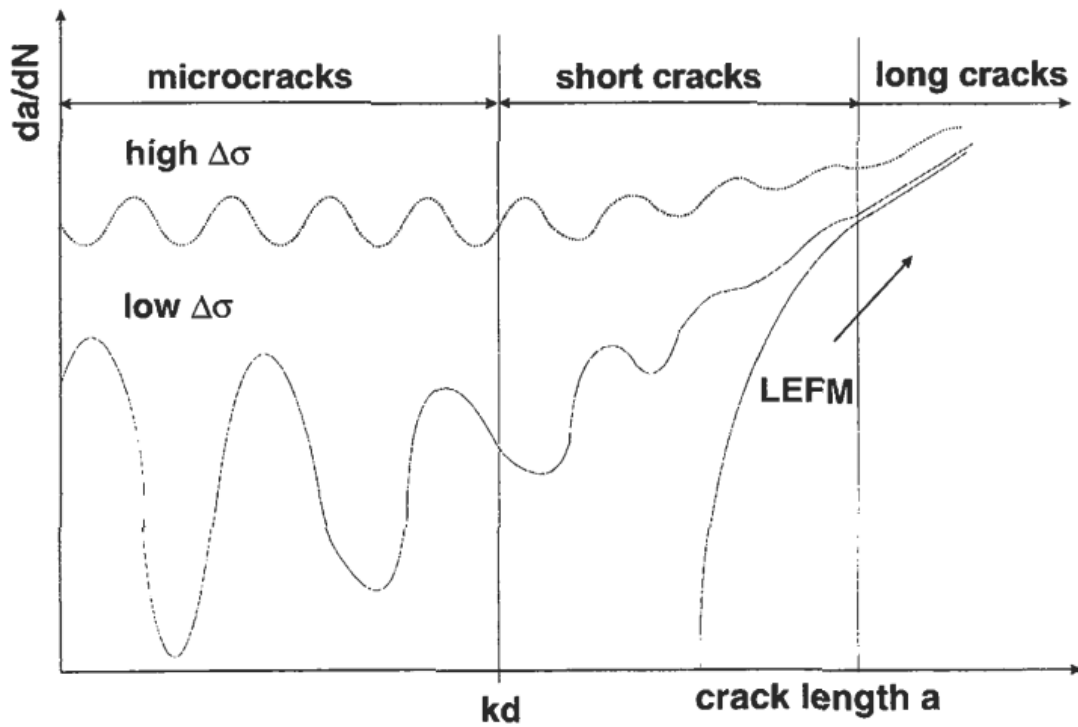
- Onset of delamination.
- Load and direction of critical unstable growth.
- Progressive failure.
- Repeated/cyclic load growth.



Conventional linear elastic fracture mechanics (LEFM) versus microplasticity-based fatigue crack growth characterizations.



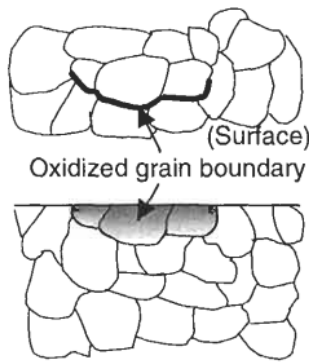
The scheme of the crack growth rate of short and long cracks showing the characteristic ranges of stress intensity factors. The near-threshold behaviour of long cracks is indicated by the *bold dashed line*



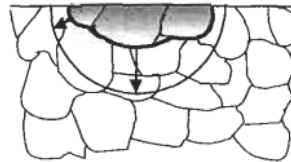
Schematic representation of a typical crack growth behaviour depending on the loading level.

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												

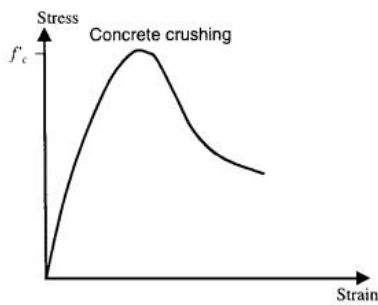


(a) Grain boundary oxidation

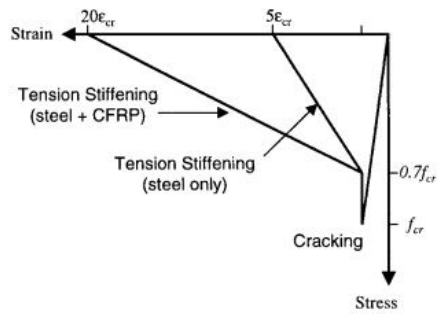


(b) Crack growth in the early stage of life was mainly in the depth direction

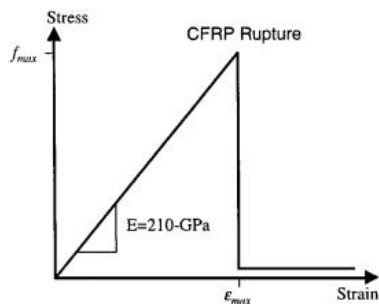
Schematic formation of grain boundary cracks and growth in the early stage of life.



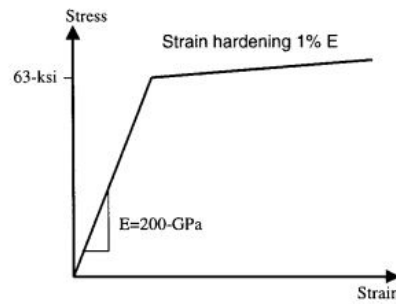
(a) Concrete in compression



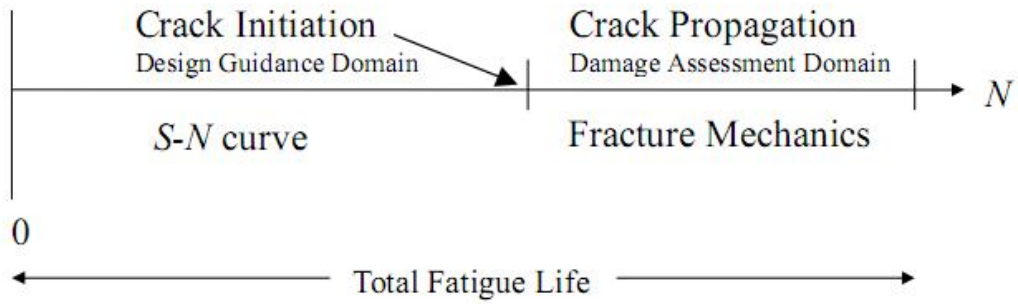
(b) Concrete in tension



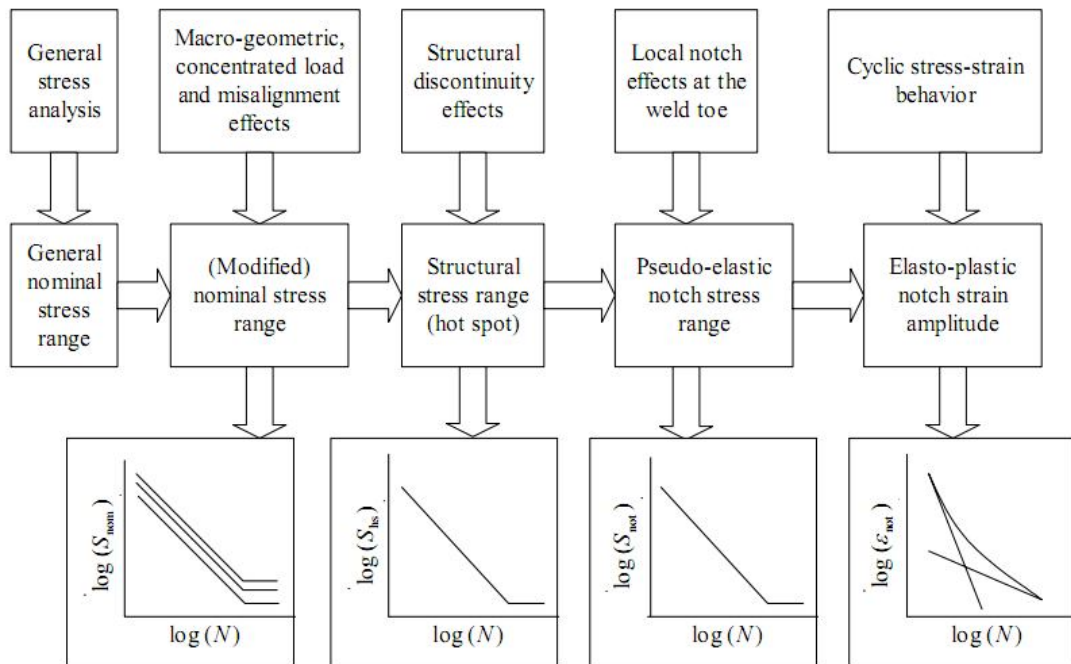
(c) CFRP in tension



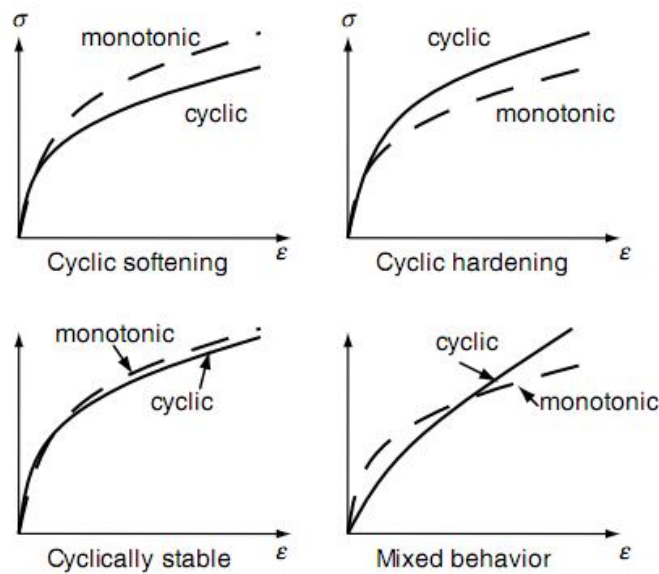
(d) Steel in tension or compression



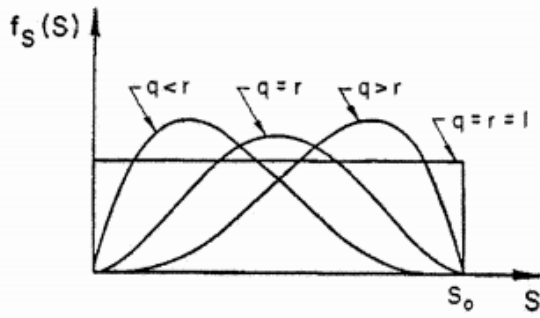
Comparison between the Characteristic $S-N$ curve and Fracture Mechanics Approach



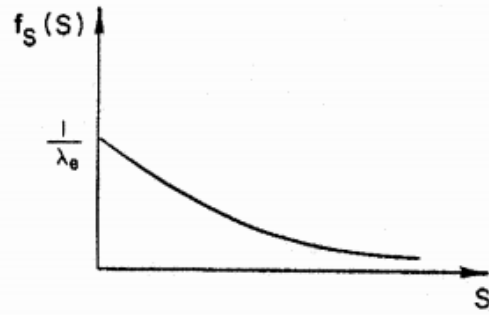
$S-N$ Approaches for Fatigue Strength Assessment (Niemi 1995)



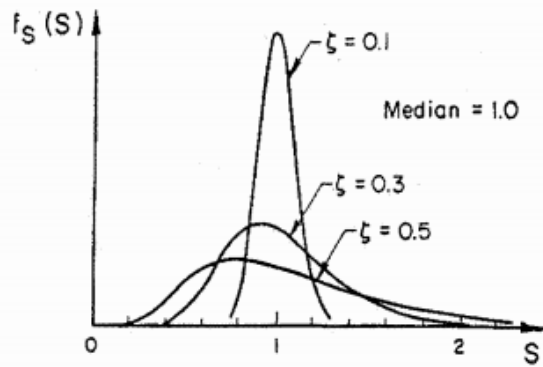
Cyclic and monotonic stress-strain behavior.



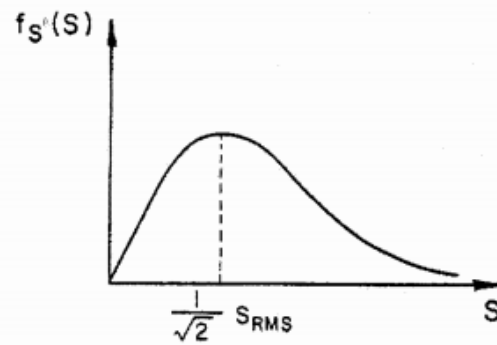
(a) Beta Distributions



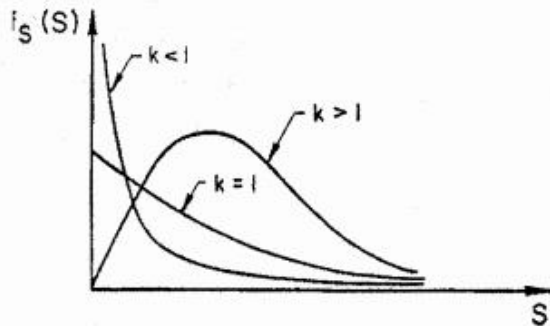
(d) Exponential Distribution



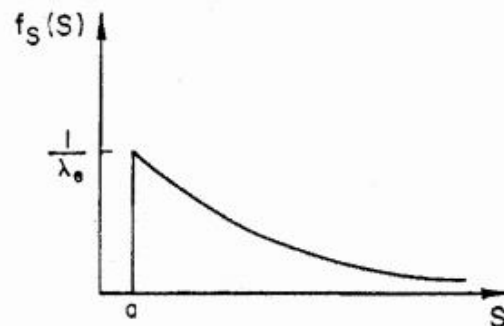
(b) Lognormal Distributions



(e) Rayleigh Distribution

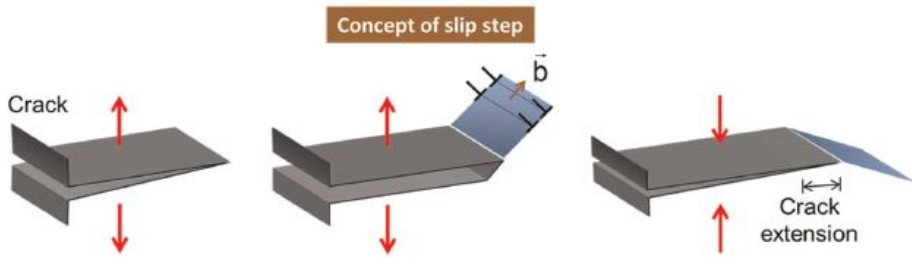
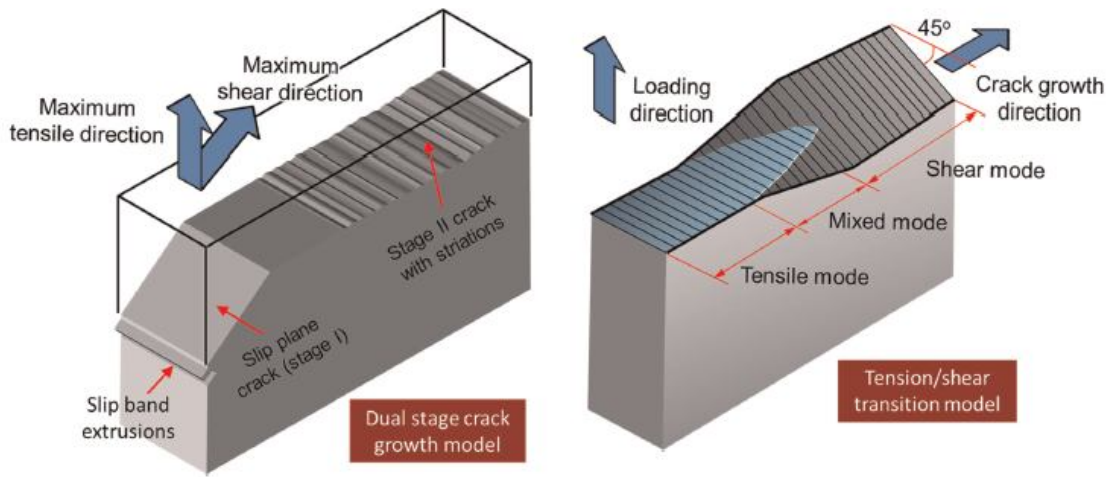
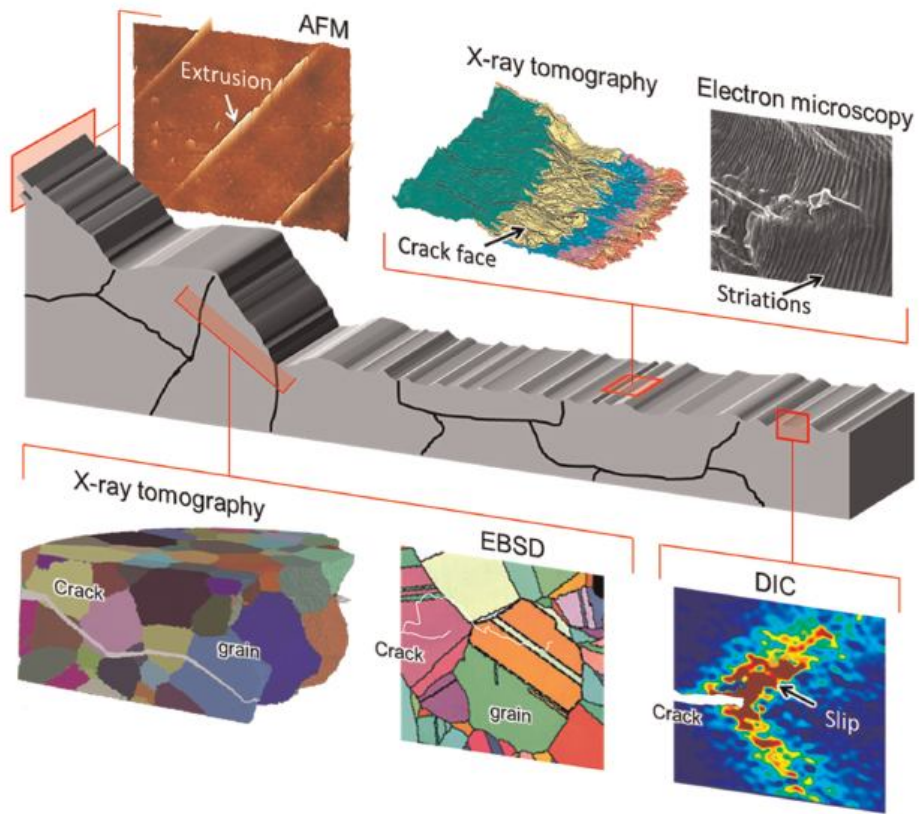


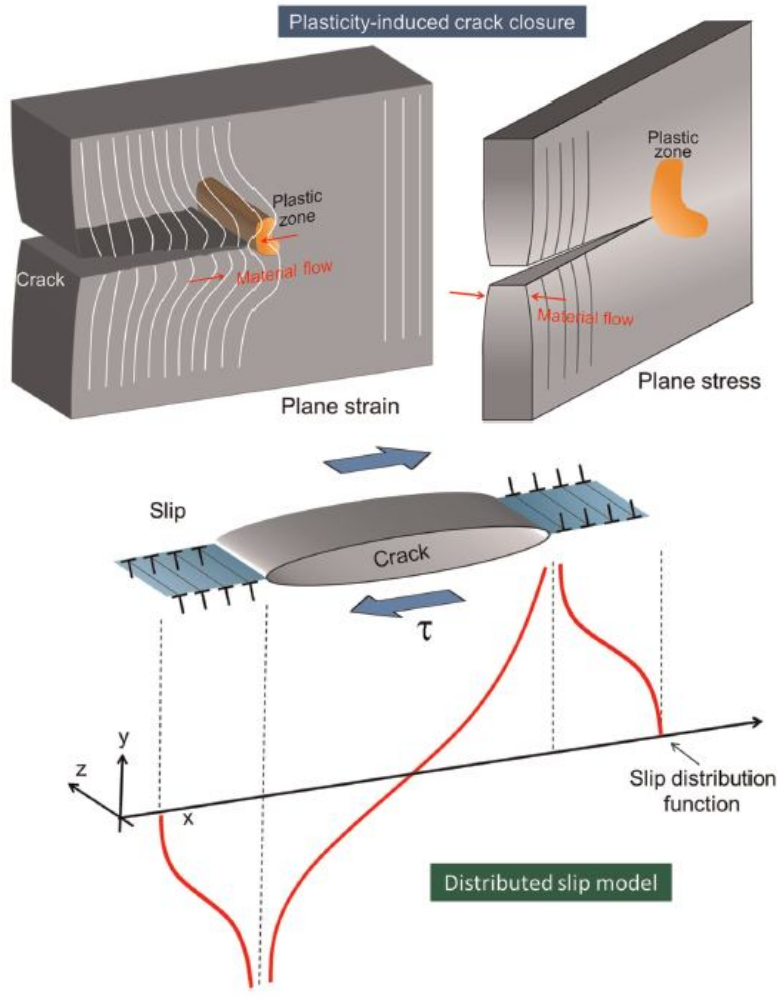
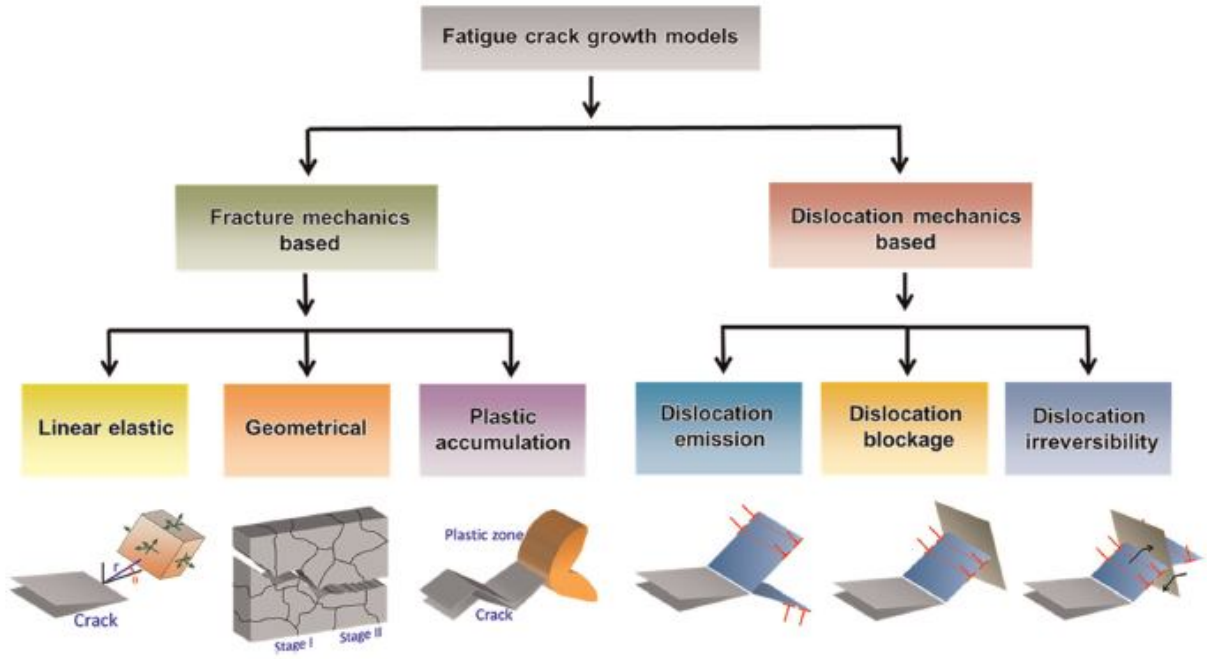
(c) Weibull Distributions

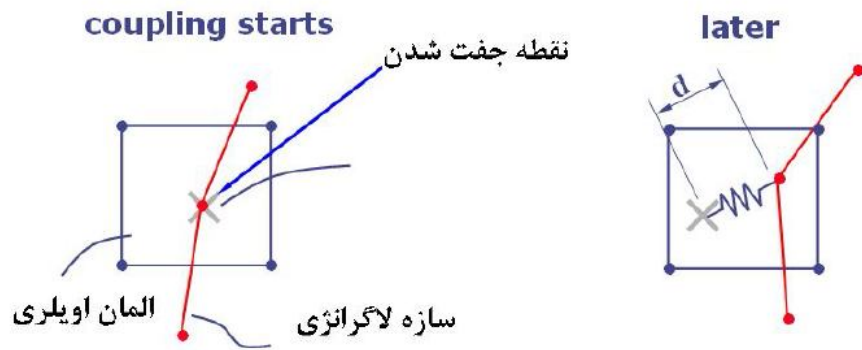


(f) Shifted Exponential Distribution

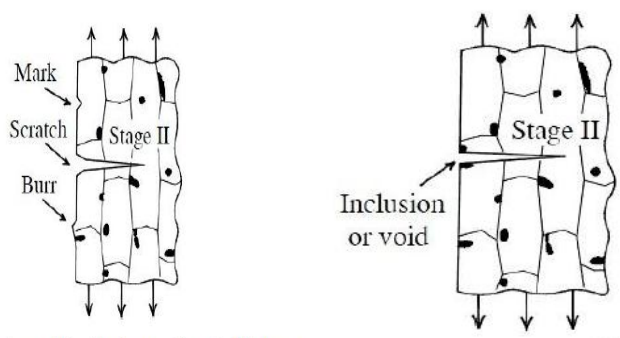
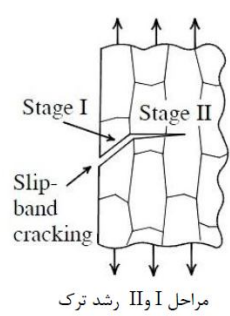
Shapes of Probability Density Functions for Commonly Used Probability Distributions (Munse et al. 1983)



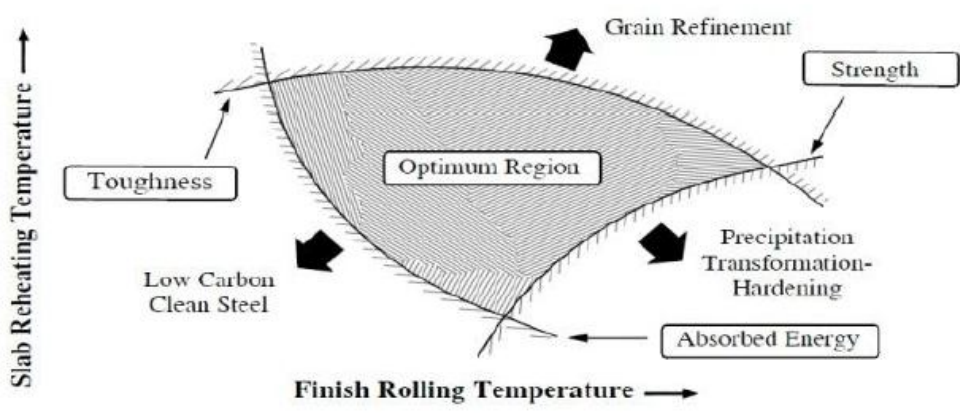




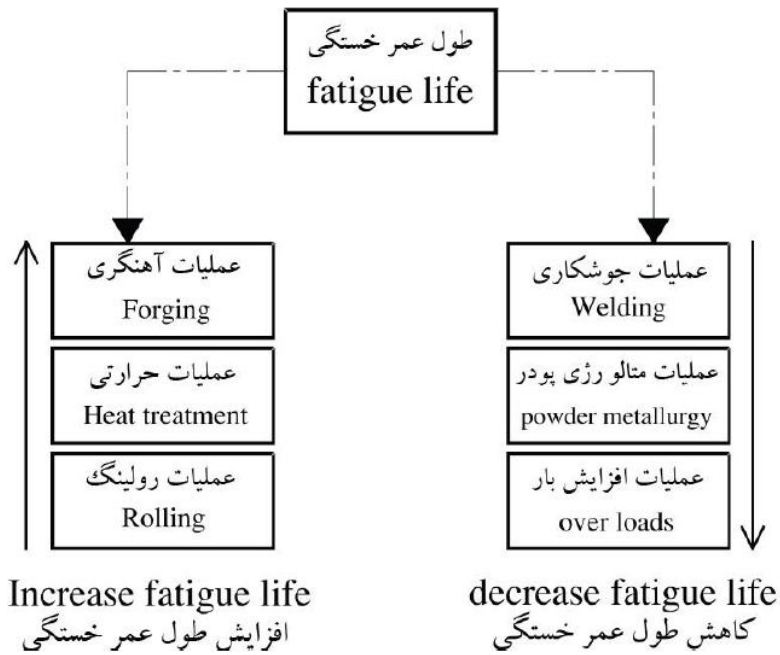
روش Penalty Based Coupling در همپوشانی



مرحله II رشد ترک توسط ناخالصی‌ها - مرحله II رشد ترک توسط ماشین کاری و ضربات ناخواسته



ماده ایده‌آل در خستگی



- 1-Micro Structurally –Small Crack
- 2-Mechanically-Small Crack
- 3-Physically-Small Crack
- 4-Chemically-Small Crack

Closure in fatigue

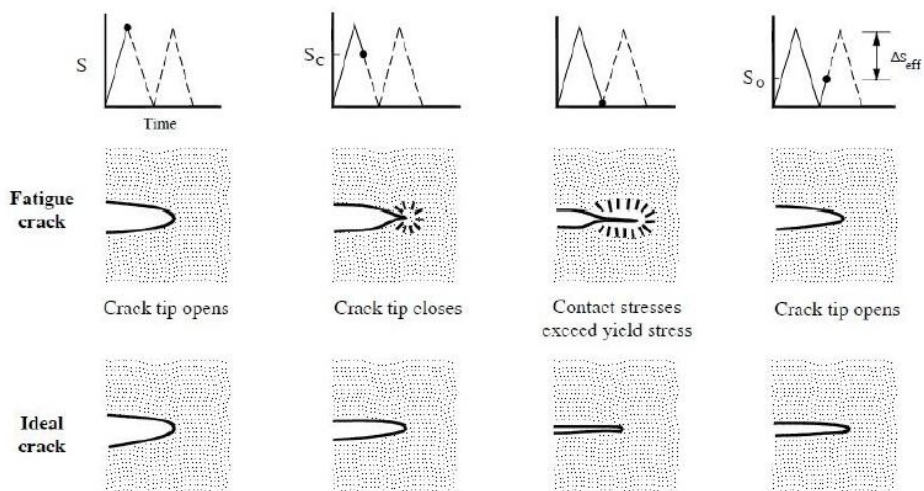
Phase Transformation induced crack closure

Plasticity induced crack closure

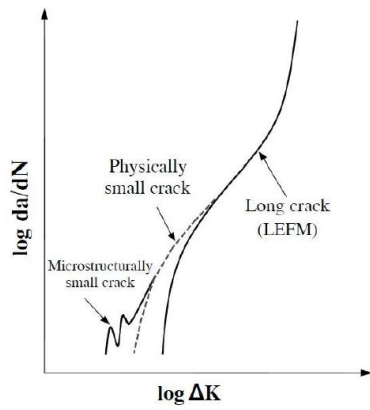
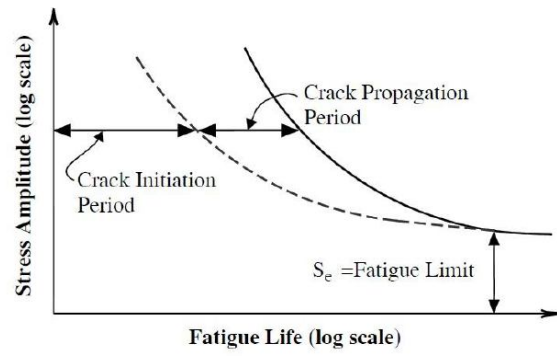
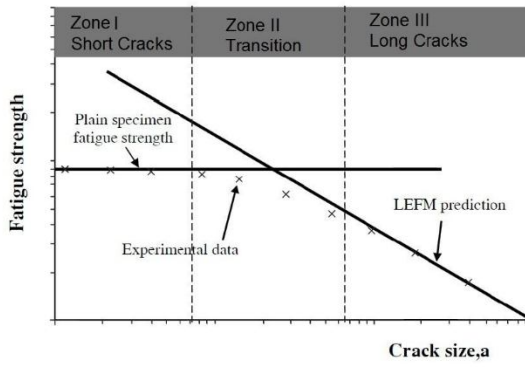
Oxide induced crack closure

Fluid pressure

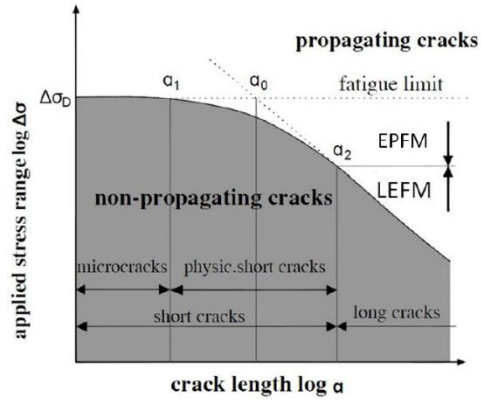
Roughness induced crack closure



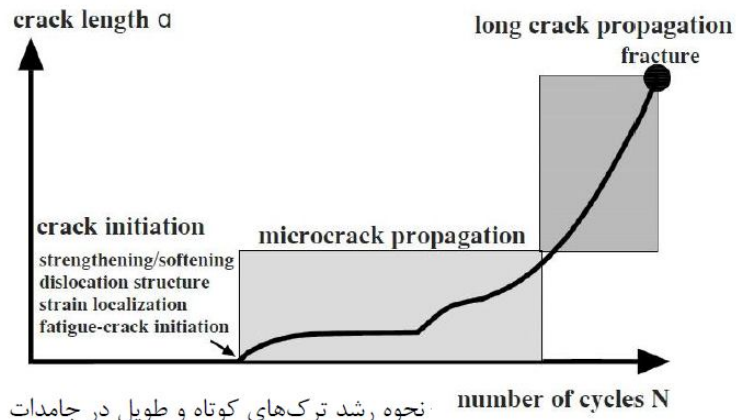
پدیده کلوزر ناشی از تغییر مکان پلاستیک



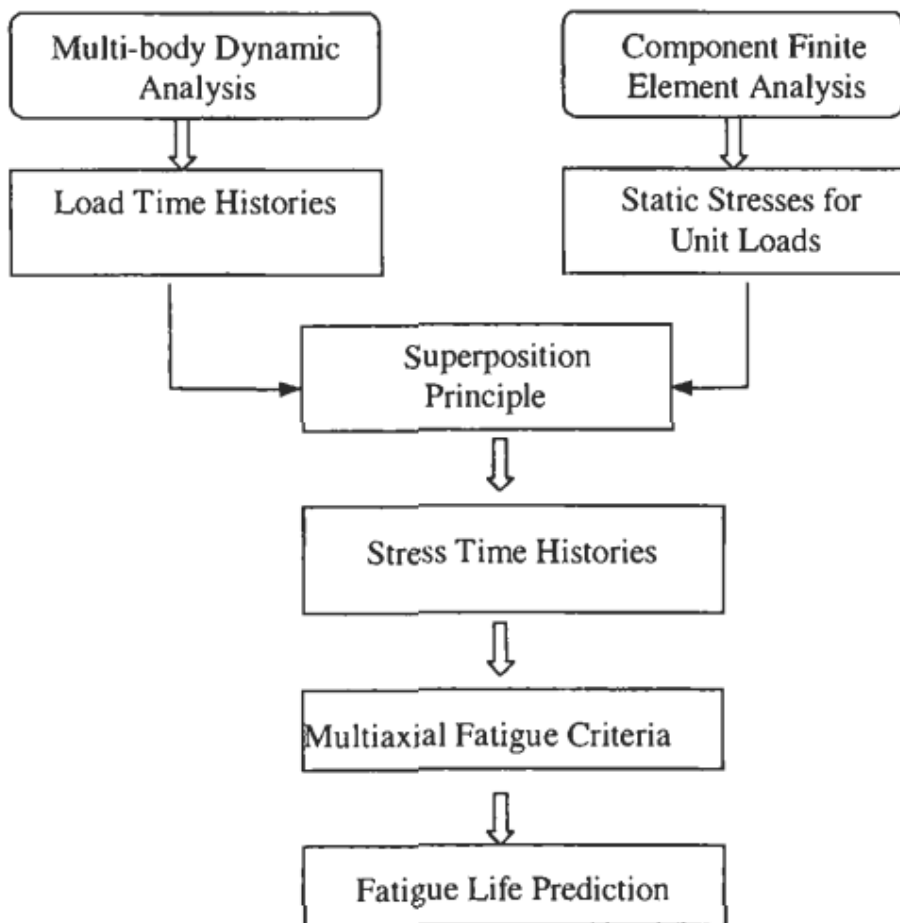
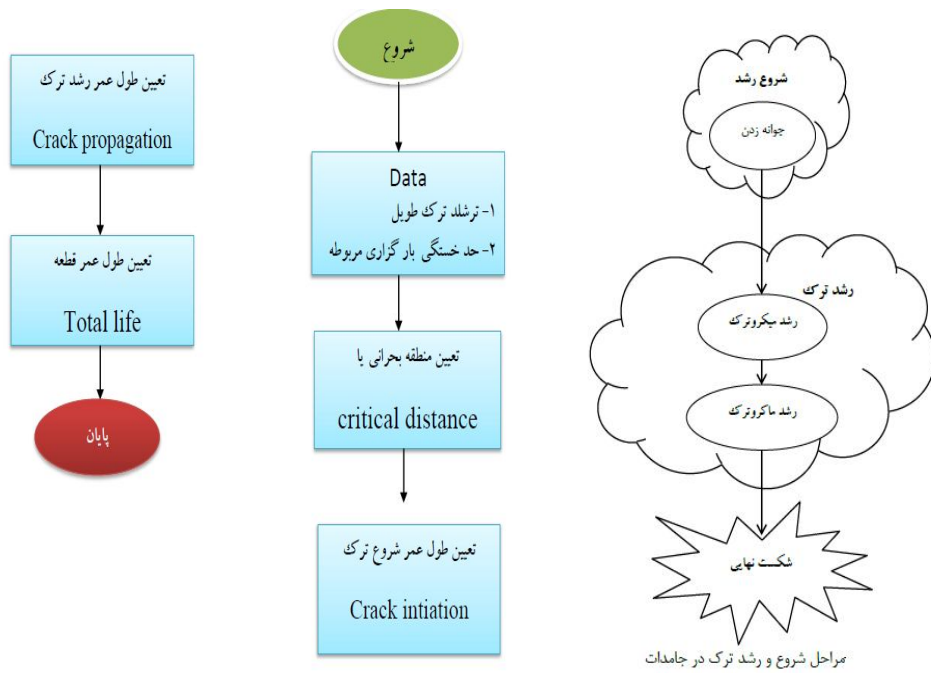
نحوه رشد ترک‌های کوتاه و طویل در جامدات



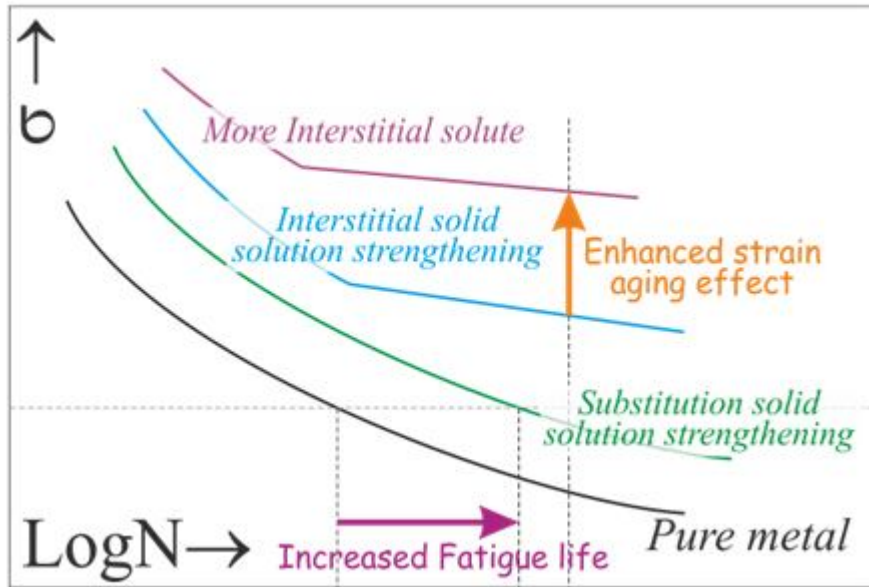
نحوه رشد ترک‌های کوتاه در جامدات



نحوه رشد ترک‌های کوتاه و طویل در جامدات



Schematic flowchart of computational fatigue assessment.



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

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

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

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

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_F}{E} (2N)^b + \varepsilon'_F (2N)^c \quad (6-3)$$

The Endurance Limit

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

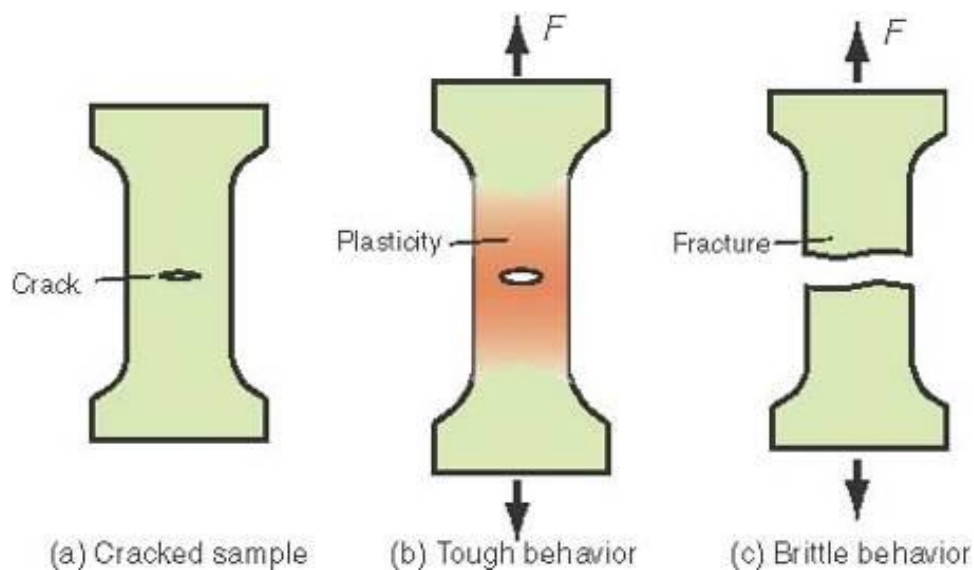
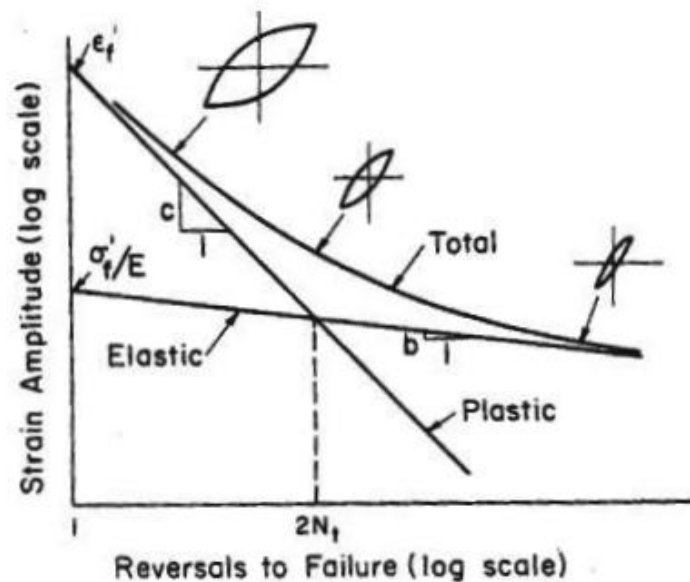
$$\text{Amplitude ratio} \rightarrow A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$$

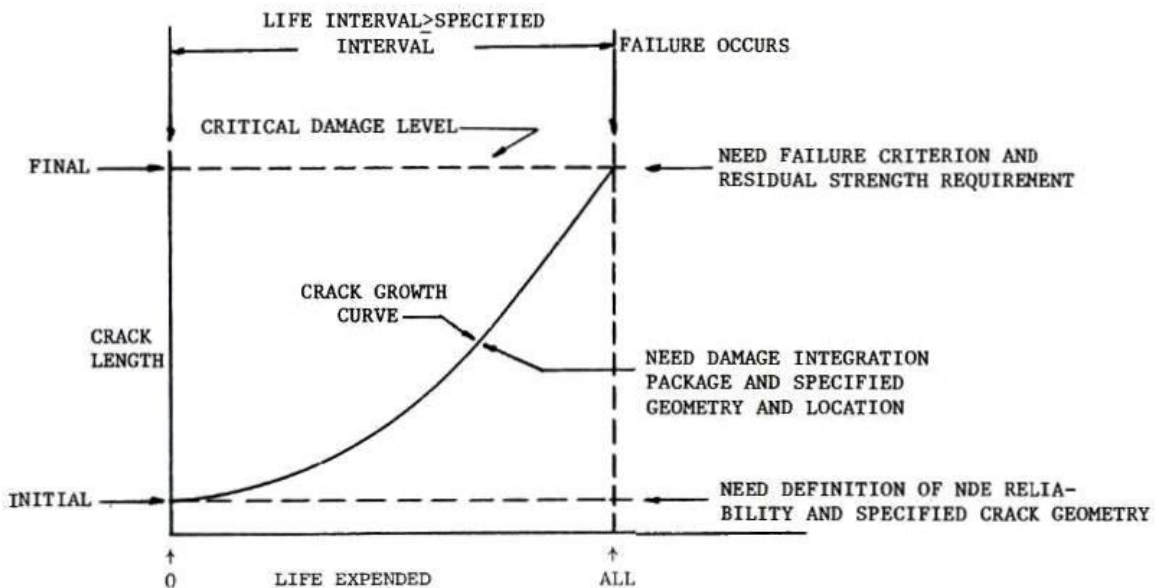
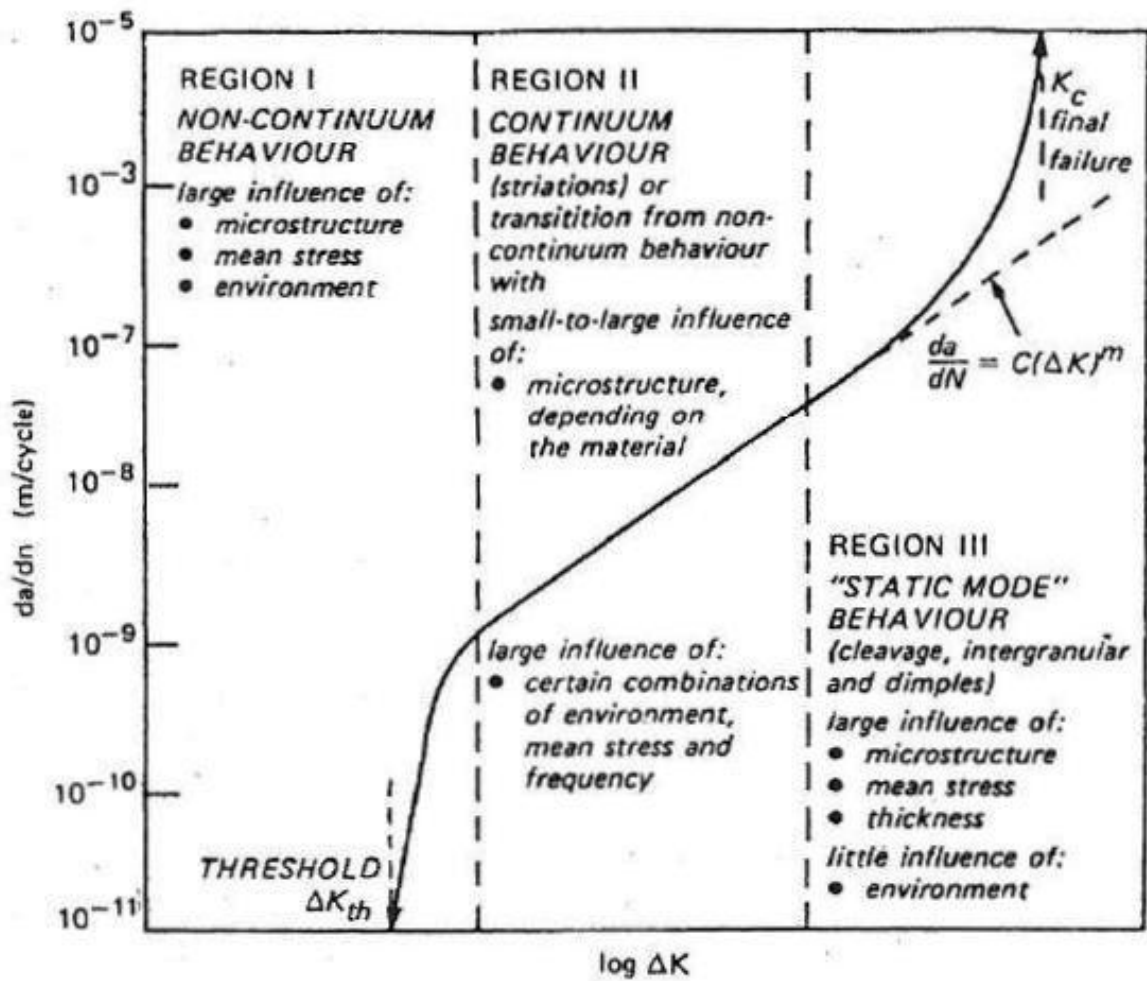
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

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

Strain-Life Relationship

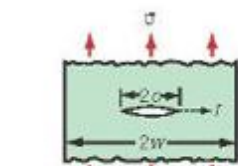
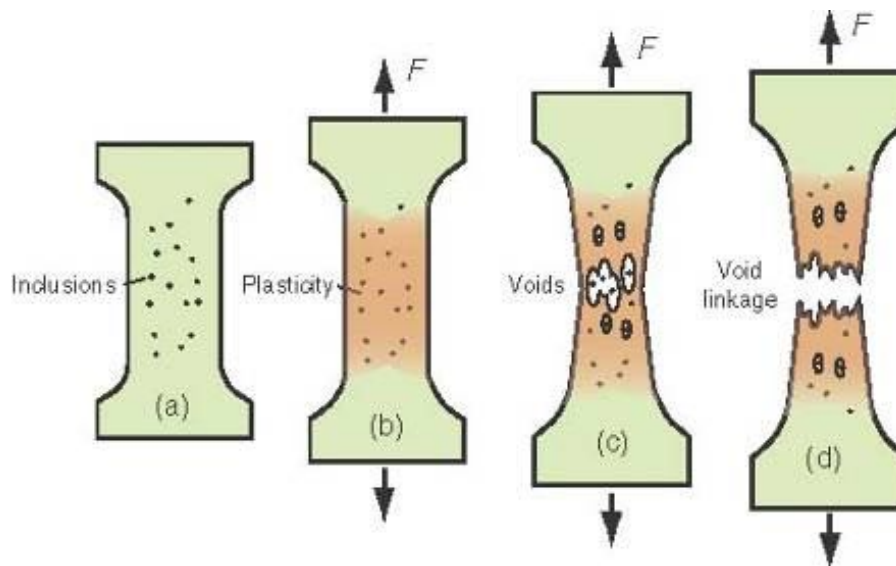
$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \underbrace{\frac{\sigma'_f}{E}(2N_f)^b}_{\text{elastic}} + \underbrace{\epsilon'_f(2N_f)^c}_{\text{plastic}}$$



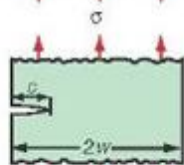


- Cracks already in material (inclusions or voids).
- Cracks caused by shrinkage in castings and welding.

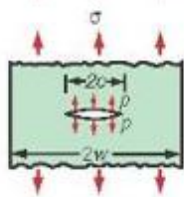
- Cracks caused by machining.
- Cracks caused by cyclic loading (fatigue).
- Cracks caused by corrosion.



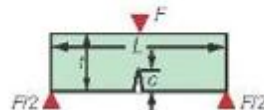
$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi c}$$



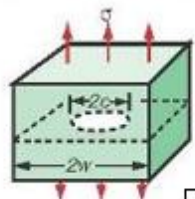
$$K_1 = 1.1 \sigma \sqrt{\pi c}$$



$$K_1 = p \sqrt{\pi c}$$



$$K_1 = 3 \frac{FL}{bw^2} \sqrt{\pi c}$$



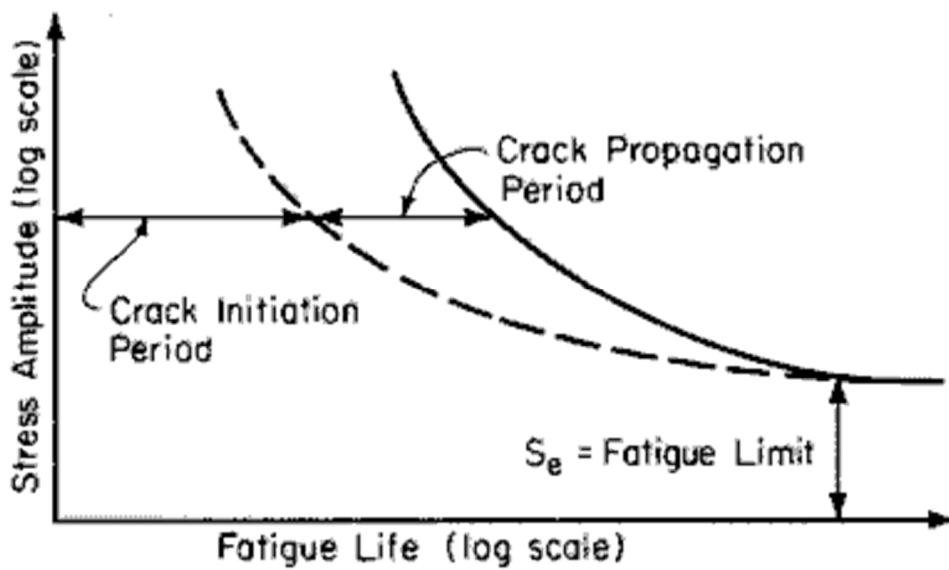
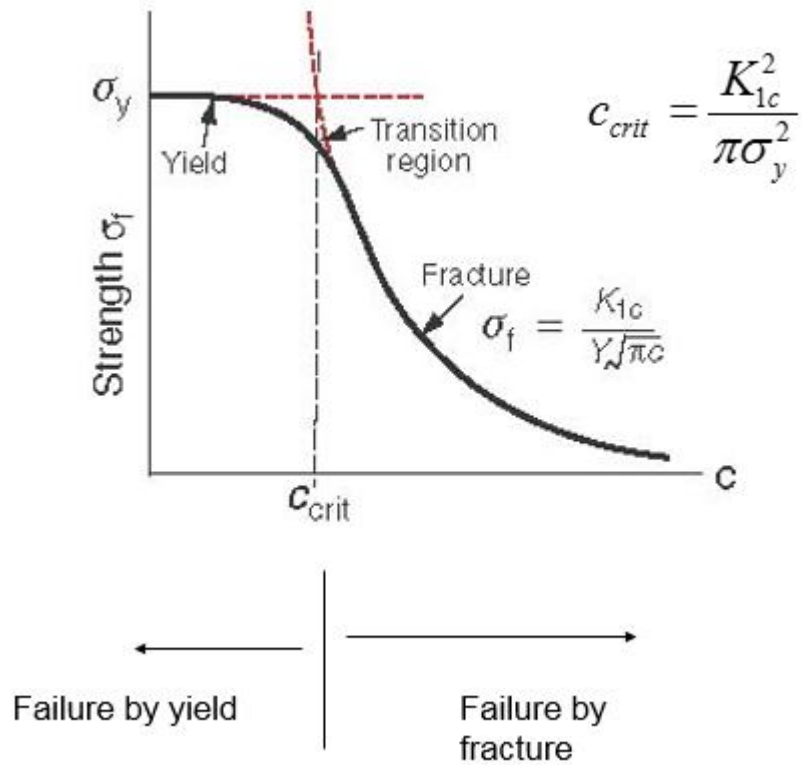
$$K_1 = 0.7 \sigma \sqrt{\pi c}$$

Internal penny shaped crack

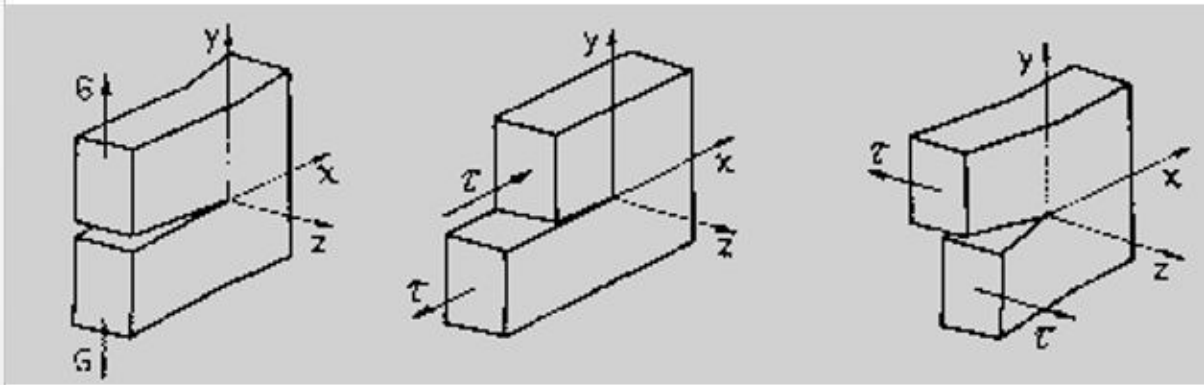
$$\sigma_{local} = Y \frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}$$

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

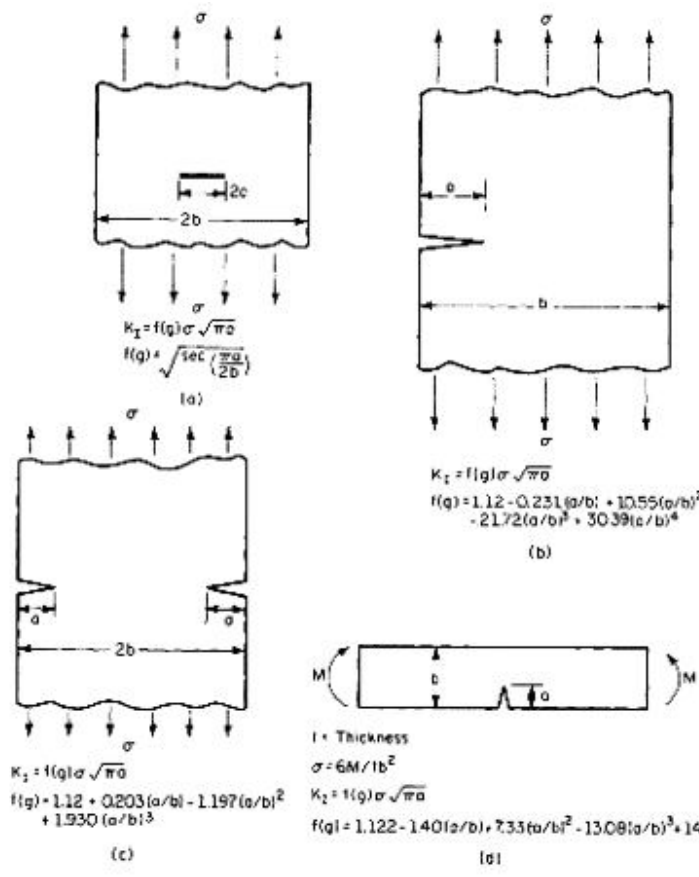
$$\sigma_f = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi c}}$$



- 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

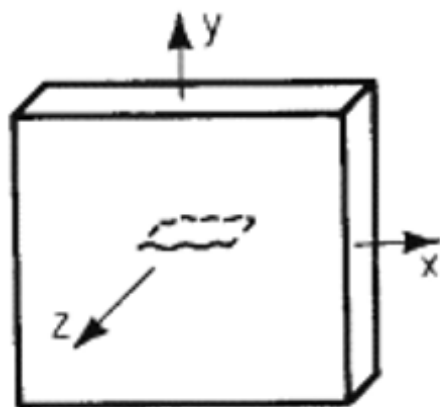
(a) Center-cracked plate loaded in tension,

(b) Edge-cracked plate loaded in tension,

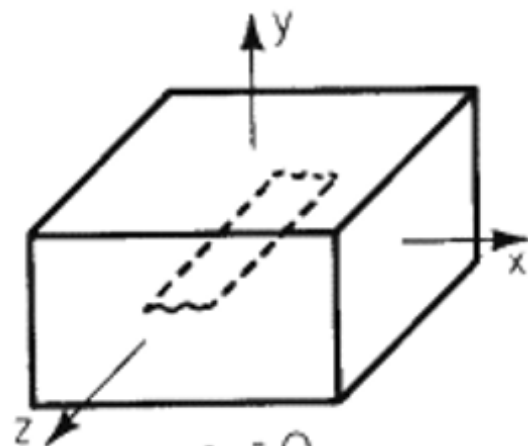
(c) Double-edge-cracked plate loaded in tension

(d) Cracked beam in pure bending

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



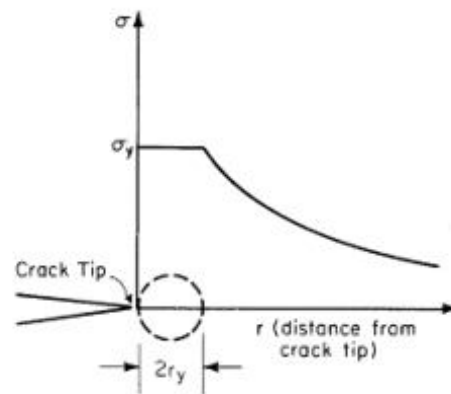
$\sigma_z = 0$
 $\epsilon_z \neq 0$
Plane Stress
(Thin Body)



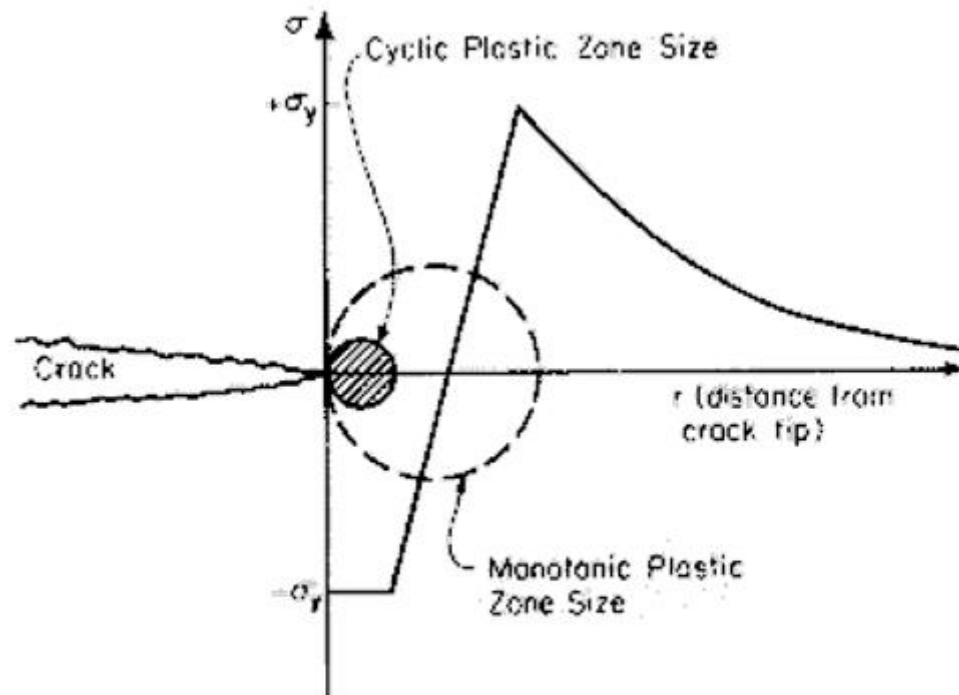
$\epsilon_z = 0$
 $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$
Plane Strain
(Thick Body)

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

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



Monotonic plastic zone size



Reversed plastic zone size

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

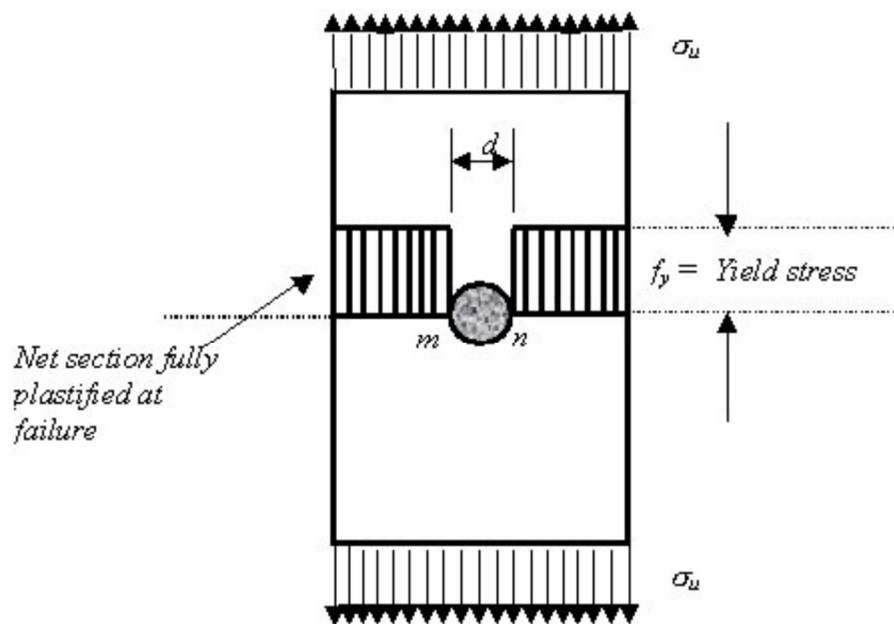
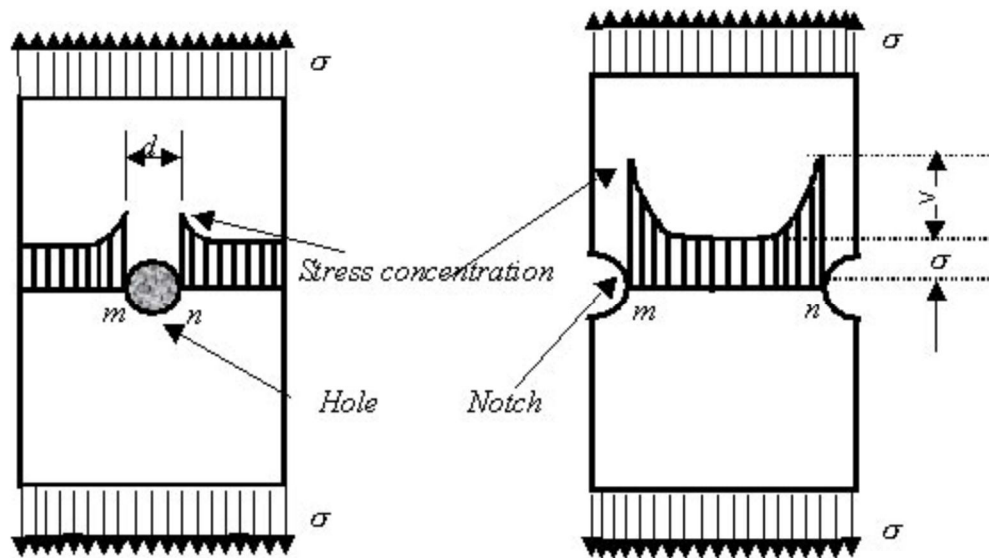
σ_0 is the nominal applied tensile stress

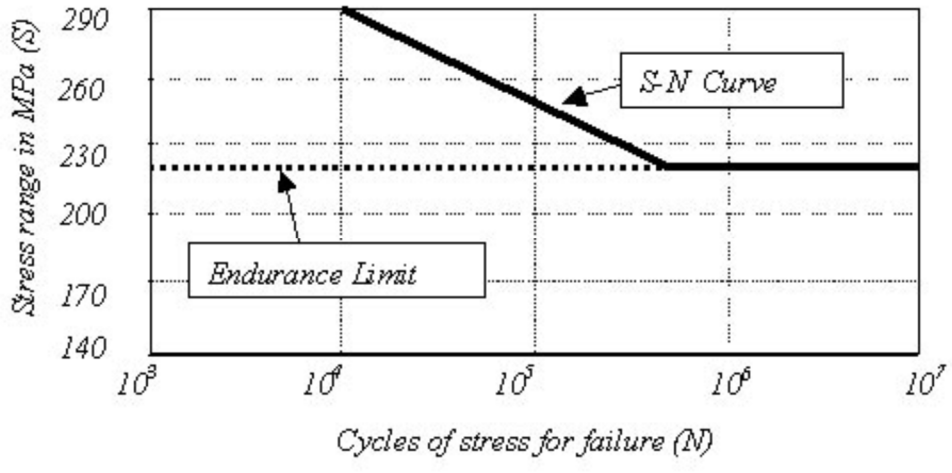
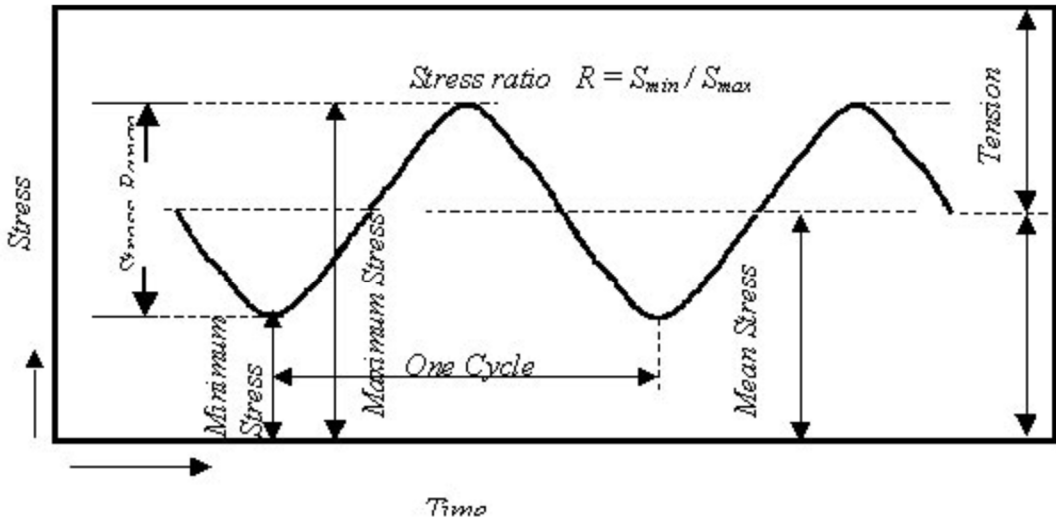
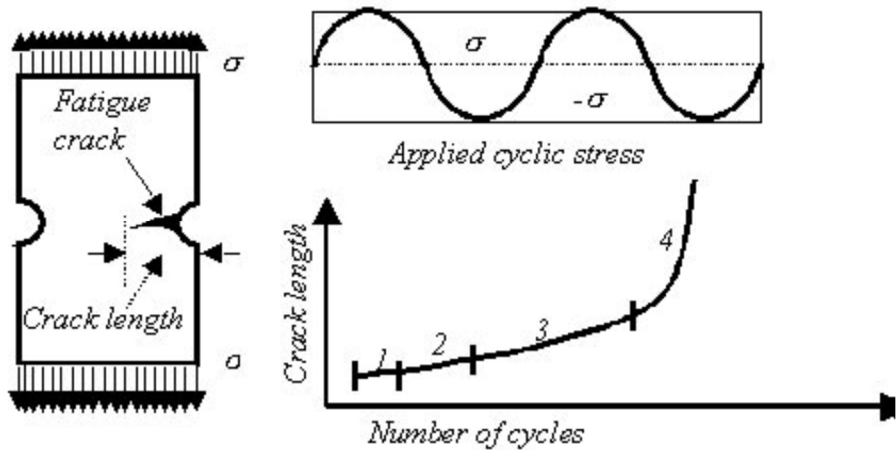
ρ_t is the radius of curvature of the crack tip

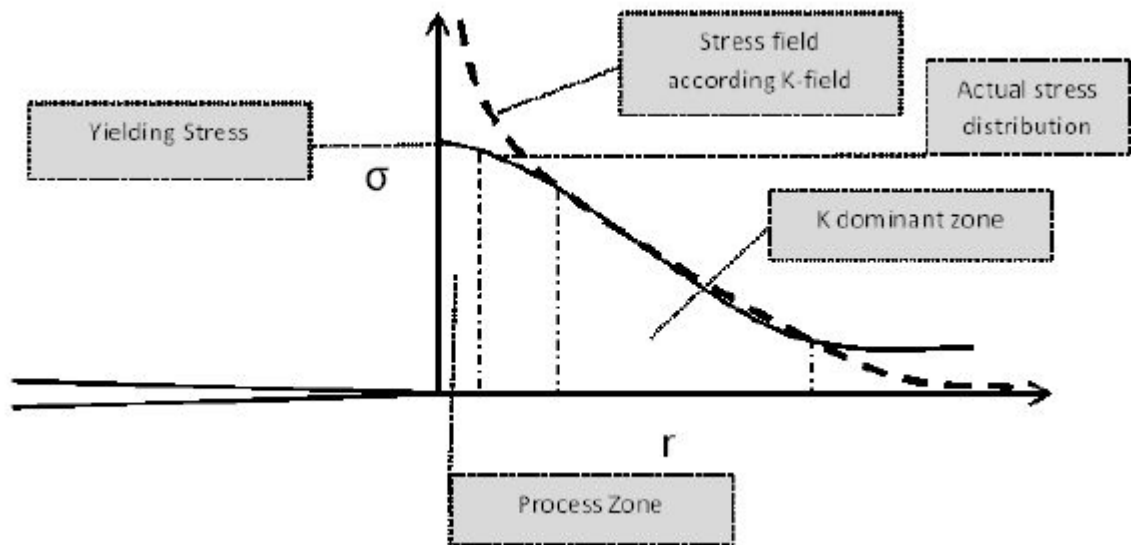
a is the length of a surface crack (becomes $a/2$ for an internal crack)

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

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

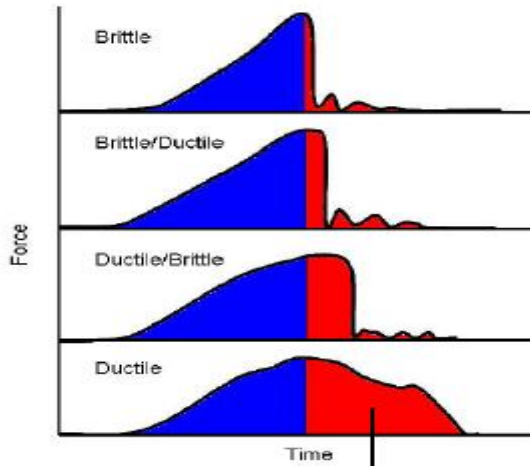






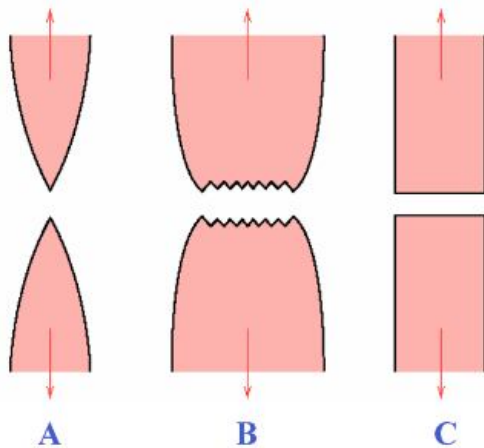
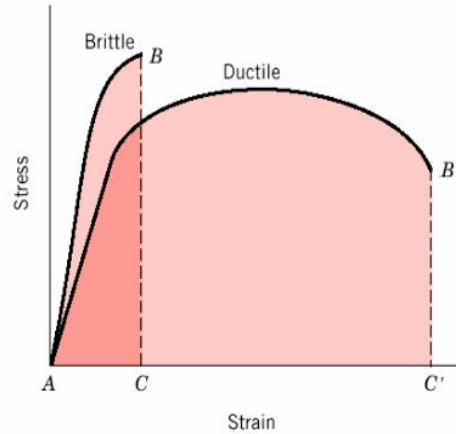
Steps in fracture: ➤ crack formation
➤ crack propagation

- **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



After crack commencement

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



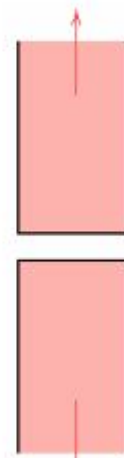
A. Very ductile, soft metals (e.g. Pb, Au) at room temperature, other metals, polymers, glasses at high temperature.

B. Moderately ductile fracture, typical for ductile metals

C. Brittle fracture, cold metals, ceramics.

Brittle Fracture (Limited Dislocation Mobility)

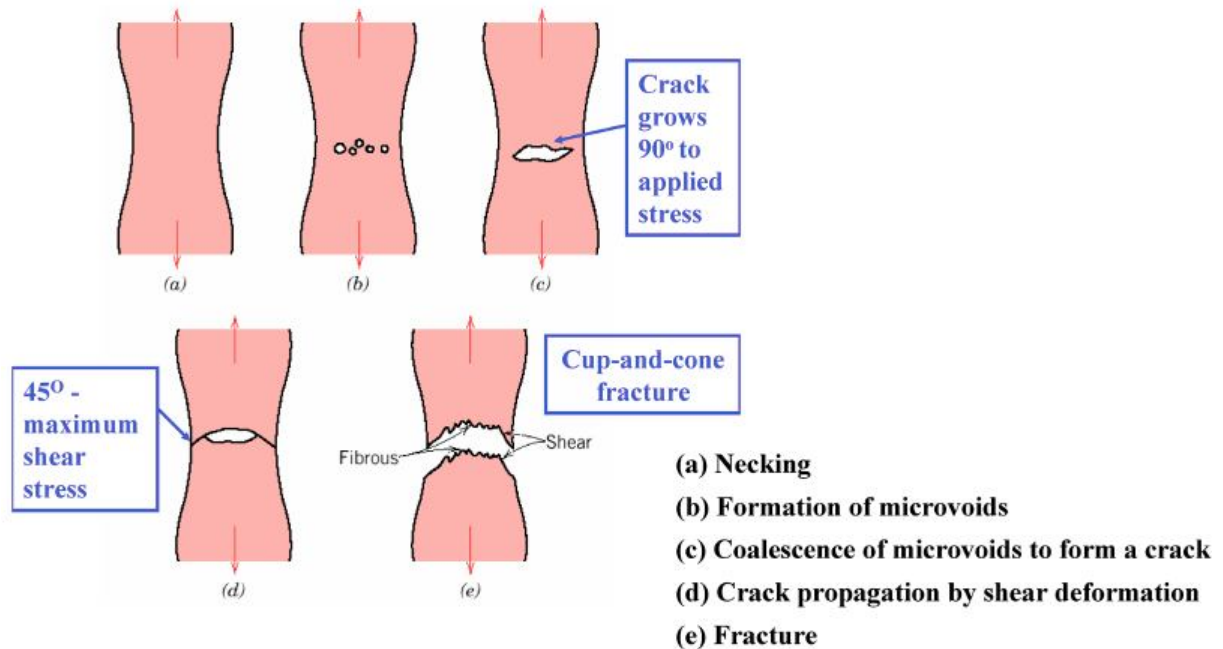
- No appreciable plastic deformation
- Crack propagation is very fast
- Crack propagates nearly perpendicular to the direction of the applied stress
- Crack often propagates by **cleavage** - breaking of atomic bonds along specific crystallographic planes (**cleavage planes**).



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

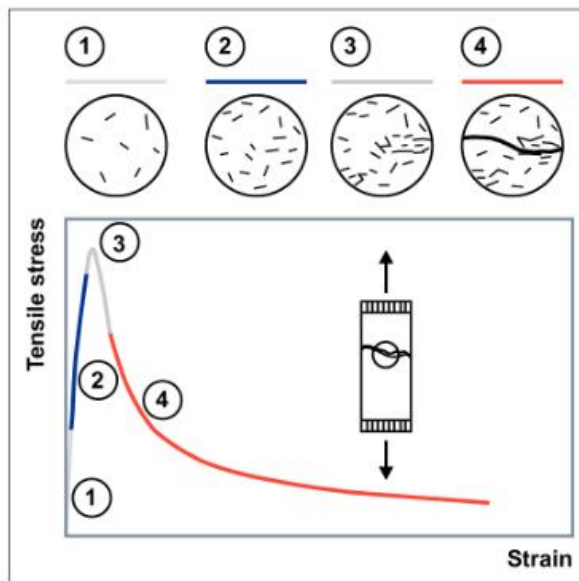
Method	Material Behavior
J-Integral	Linear isotropic elasticity Isotropic plasticity
Energy-Release Rate (VCCT Method)	Linear isotropic elasticity Orthotropic elasticity Anisotropic elasticity
Stress-Intensity Factor	Linear isotropic elasticity
T-Stress	Linear isotropic elasticity Isotropic plasticity
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 T-stress Material force C*-integral
PLANE183	2-D 8-Node or 6-Node Structural Solid	
SOLID185	3-D 8-Node Structural Solid	J-integral (UMM optional) VCCT energy-release rate Stress-intensity factor (UMM optional) T-stress Material force C*-integral
SOLID186	3-D 20-Node Structural Solid	
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:

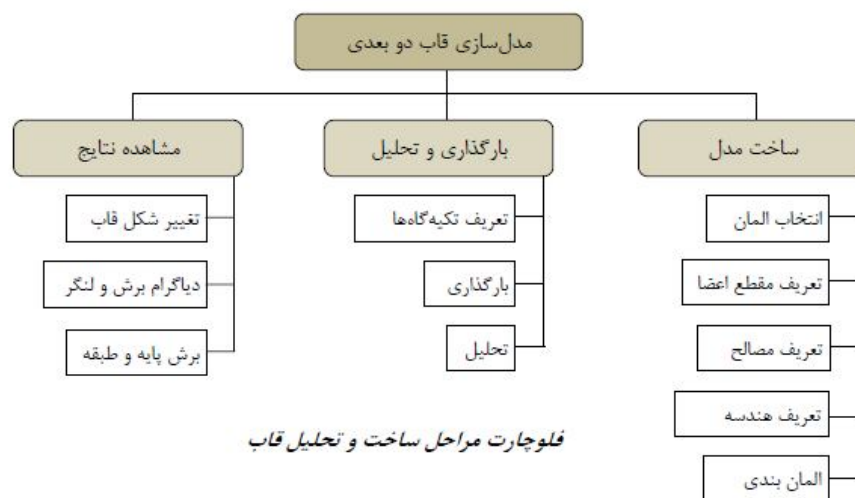
- Elastic material
- Elasto-plastic material
- (linear/non linear)
- Small deformation/displacement

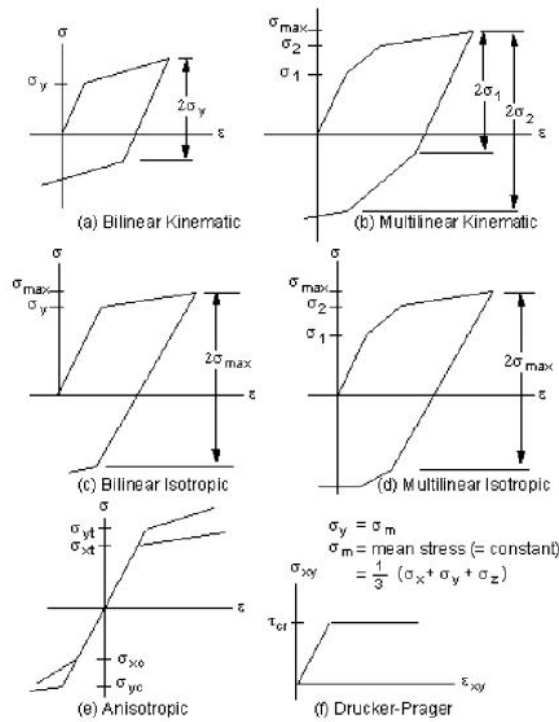
Loads:

- Thermal effects
- Body loads effects
- Contacts

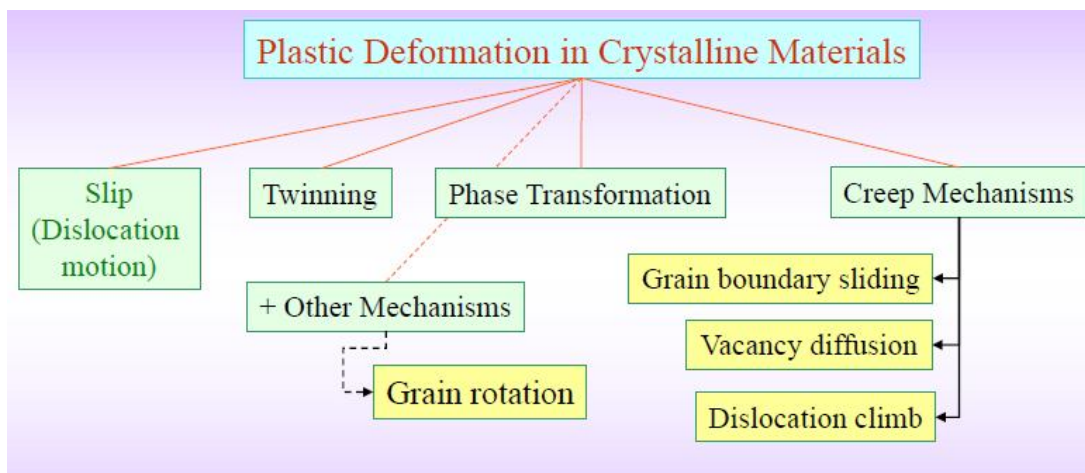
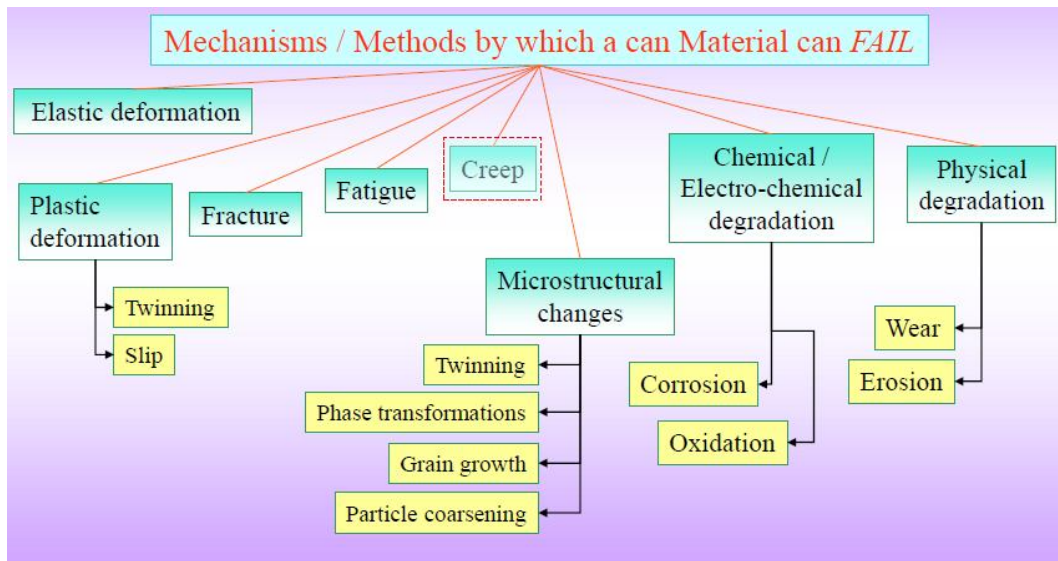
۱. پلاستیسیته مستقل از سرعت (Rate-Independent Plasticity).
۲. پلاستیسیته وابسته به سرعت (Rate-Dependent Plasticity).
۳. ماده Gasket.
۴. غیر خطی الاستیک (Nonlinear Elasticity).
۵. هایپراستیسیته (Hyperelasticity).
۶. مدل آلیاژ حافظه‌دار یا Shape Memory Alloy Material Model.
۷. ویسکوالاستیسیته (Viscoelasticity).
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



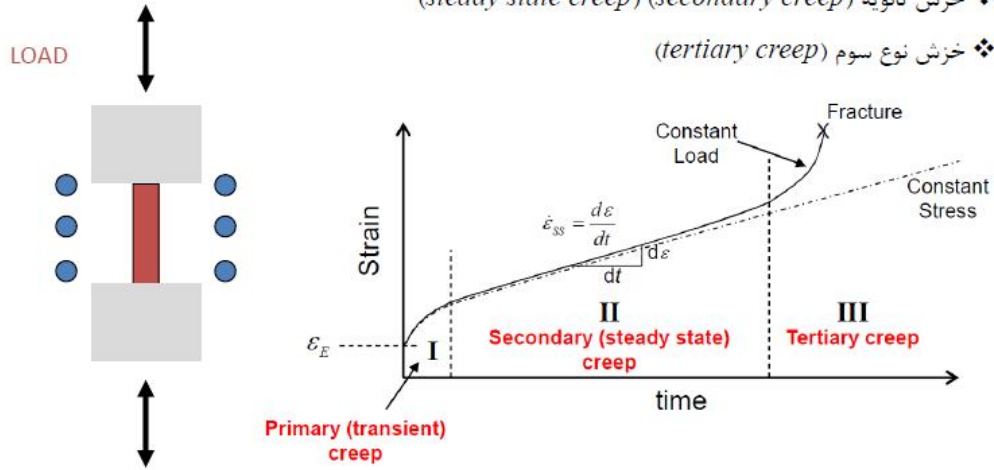
منحنی خزش (کرنش - زمان)

❖ کرنش اولیه (instantaneous creep)

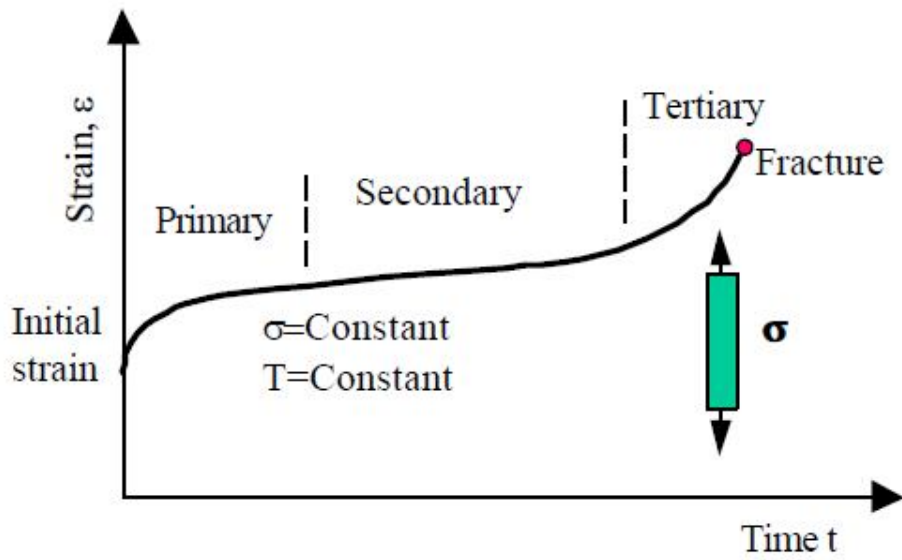
❖ خزش اولیه (primary creep)

❖ خزش ثانویه (secondary creep) (steady state creep)

❖ خزش نوع سوم (tertiary creep)



10



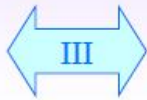
Stages of creep



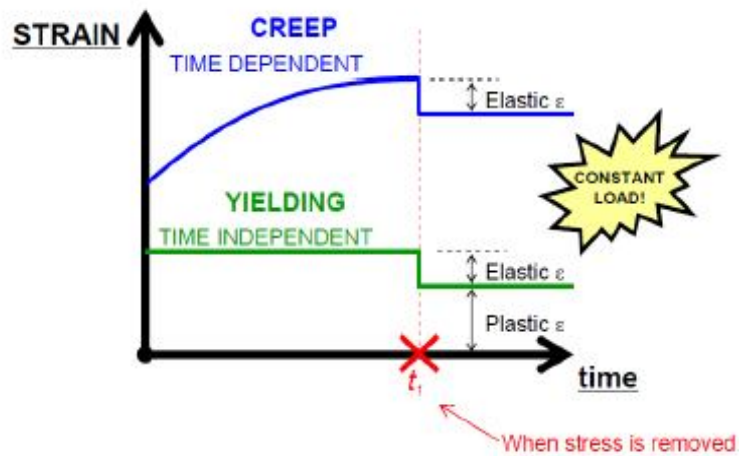
- Creep rate decreases with time
- Effect of work hardening more than recovery



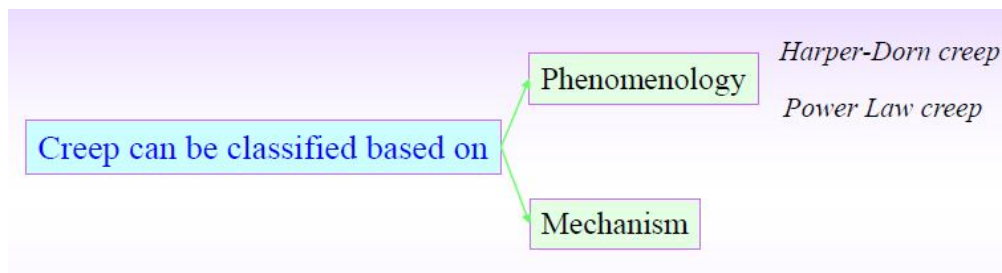
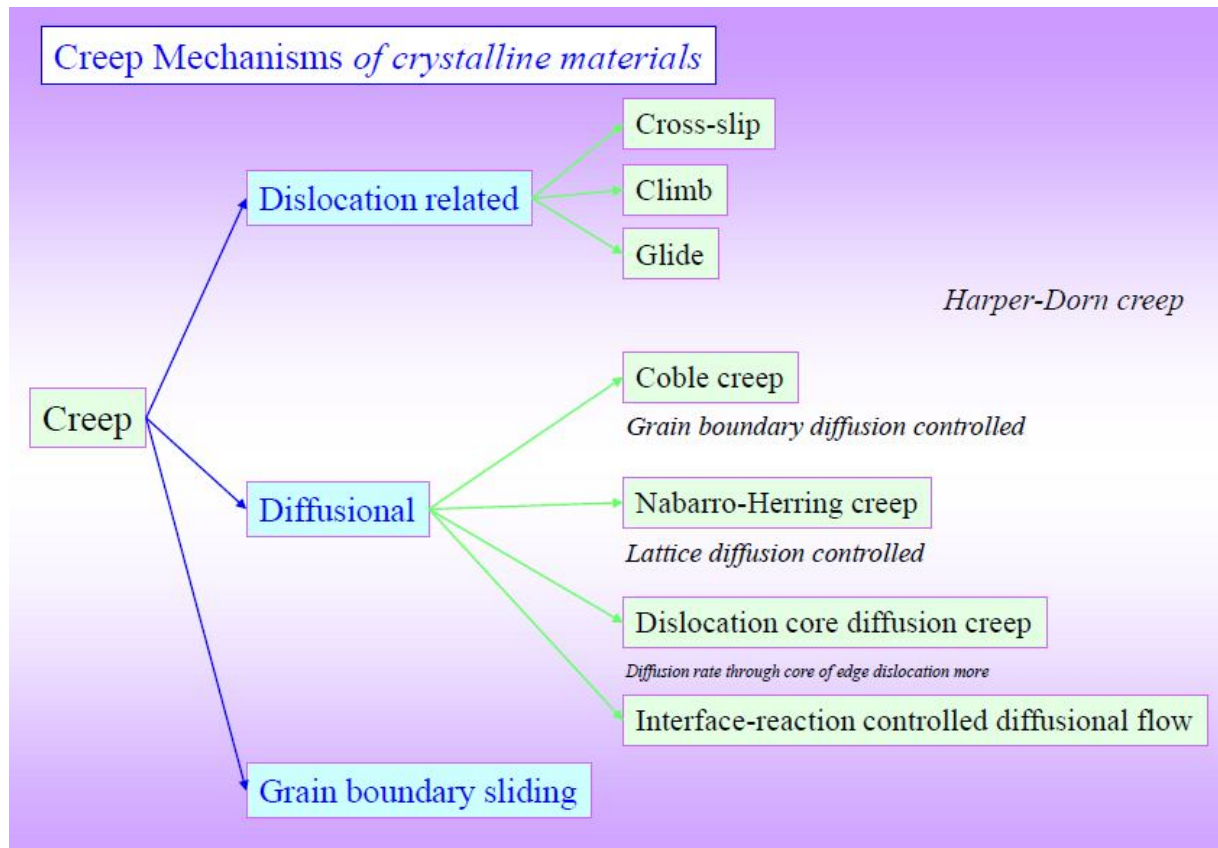
- Stage of minimum creep rate → constant
- Work hardening and recovery balanced



- Absent (/delayed very much) in constant stress tests
- Necking of specimen start
- specimen failure processes set in



$$\varepsilon_{\text{creep}} = f(\tau, \sigma, t)$$



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 عیوب کریستالی
- ❖ افزایش درجه حرارت و اثر آن بر شکست قطعه
- ❖ افزایش درجه حرارت و پدیده تبلور مجدد

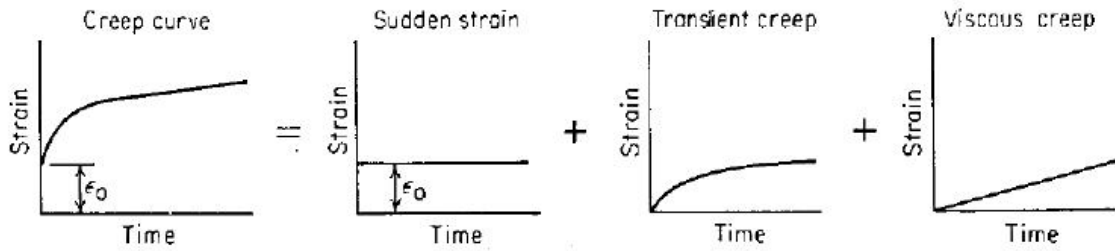
منحنی خزش (کرنش - زمان)

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

معادله آندرید

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_t (1 - e^{-\alpha t}) + \varepsilon_s^o t$$

معادله گاروفالو

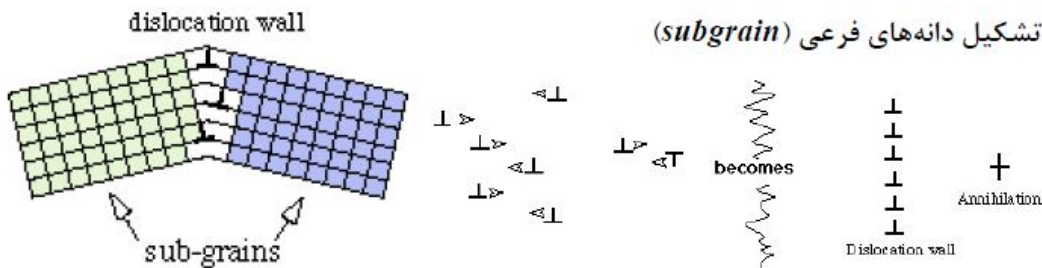


تغییرات ساختاری حین خزش

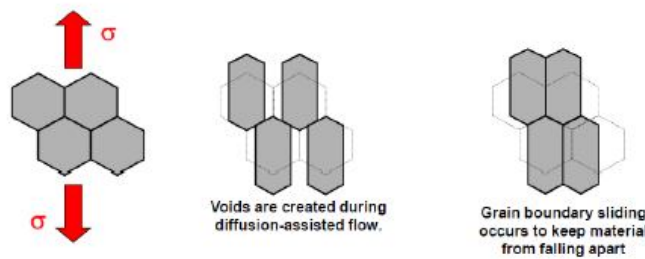
فرآیندهای اصلی تغییر شکل در دمای بالا

❖ لغزش

❖ تشکیل دانه‌های فرعی (subgrain)



❖ لغزش مرزدانه‌ای (grain boundary Sliding)



انرژی محرکه خزش

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

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

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

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

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

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

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

D = diffusion coefficient

d = grain size

b = Burgers vector

k = Boltzmann's constant

T = the absolute temperature (degrees Kelvin)

G = the shear modulus

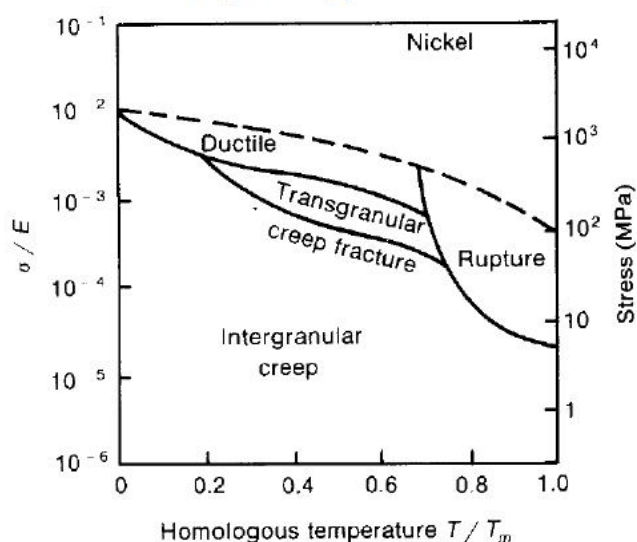
σ = applied stress

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 نابجایی‌ها و ایجاد اتمسفر
- ✓ اثر الاستیکی اتم‌های حل شونده بر نابجایی‌های متحرک و افزایش تنش اصطکاکی
- ✓ جدایش در مناطق نقص در چیده شدن
- ✓ واکنش با جاهای خالی و نابجایی‌های جاگ‌دار
- ✓ جدایش در مرزدانه‌ها 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

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

❖ رابطه $exponential$

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

❖ رابطه کلی

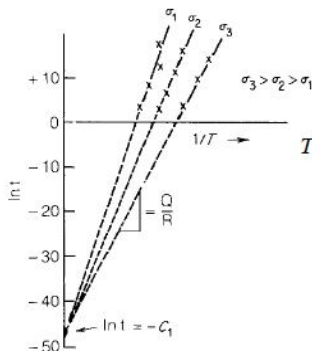
$$\varepsilon_s^o = K\sigma^n e^{-Q/RT}$$

پارامترهای اصلاح (تخمین عمر خزشی)

$$\varepsilon_s^o = K\sigma^n e^{-Q/RT} \xrightarrow{\sigma = cte} \varepsilon_s^o = Ae^{-Q/RT} \xrightarrow{\varepsilon_s^o = \frac{k}{t}} \frac{k}{t} = Ae^{-Q/RT}$$

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

❖ پارامتر لارسون-میلر ($Larson-Miller$)



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

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

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

❖ پارامتر شربی-دورن ($Sherby-Dorn$)

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

مکانیزم‌های خزش (خزش نابجایی)

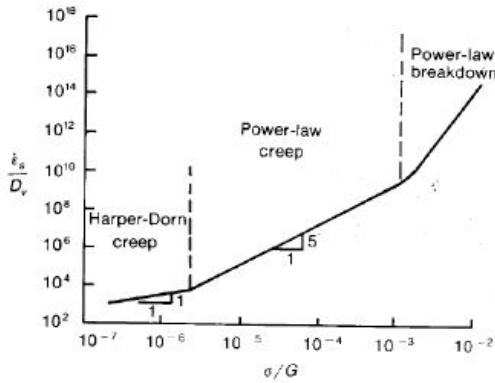
❖ دمای پایین ($0.3-0.6 T_m$)

❖ حرکت برگشت ناپذیر نابجایی‌ها با کمک صعود و لغزش متقاطع

❖ مدل‌های خزش نابجایی

۱- تئوری *Baily-Orowan*

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



۲- تئوری *Weetman*

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

$$D_v = D_o \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right)$$

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

$$\dot{\epsilon}_s^o = \frac{AD}{\alpha^n b^2} \left(\sinh \alpha \frac{\sigma}{E}\right)^n$$

Harper-Dorn creep ✓

$n=1$

Power-Law creep ✓

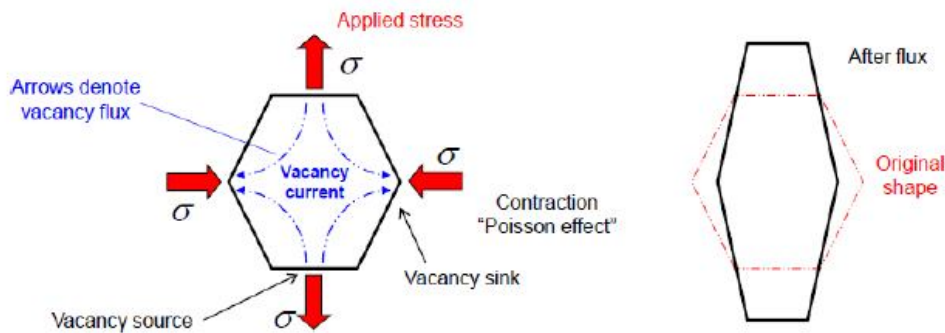
$n=5$

Power-Law breakdown ✓

مکانیزم‌های خزش (خزش نفوذی)

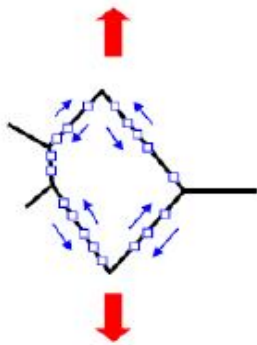
❖ خزش *Herring-Nabarro*

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

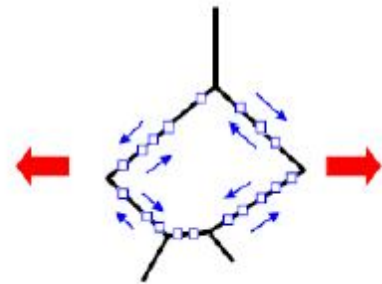
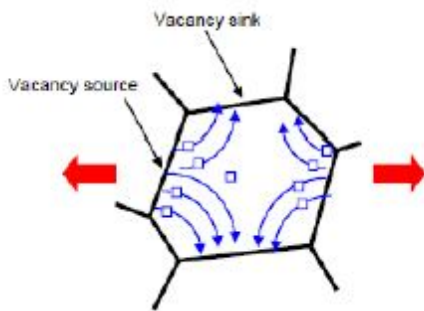
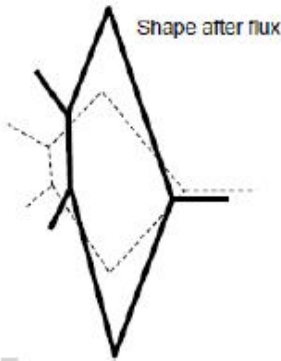


مکانیزم‌های خزش (خزش نفوذی)

❖ خزش Coble



$$\epsilon_s^o \approx \frac{50\sigma b^4 D_{gb}}{kTd^3}$$



Nabarro-Herring

$$\epsilon_{NH} \approx \frac{A_{NH} D_L G b}{kT} \left(\frac{b}{d}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{G}\right)$$

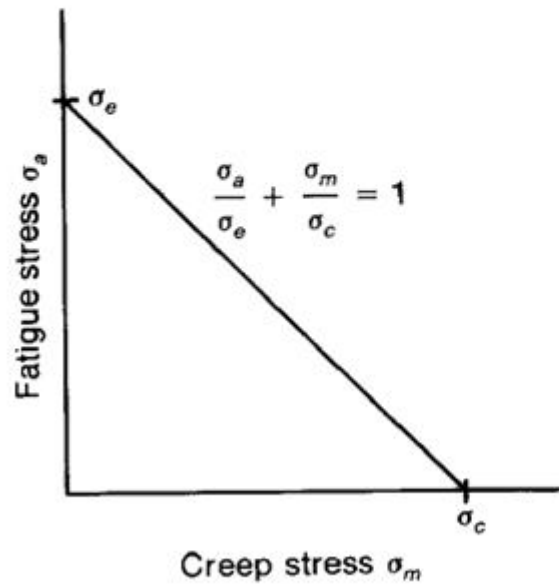
Coble

$$\epsilon_C \approx \frac{A_C D_{GB} G b}{kT} \left(\frac{\delta}{b}\right) \left(\frac{b}{d}\right)^3 \left(\frac{\sigma}{G}\right)$$

اثر متقابل خزش - خستگی

❖ قانون تجميع 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

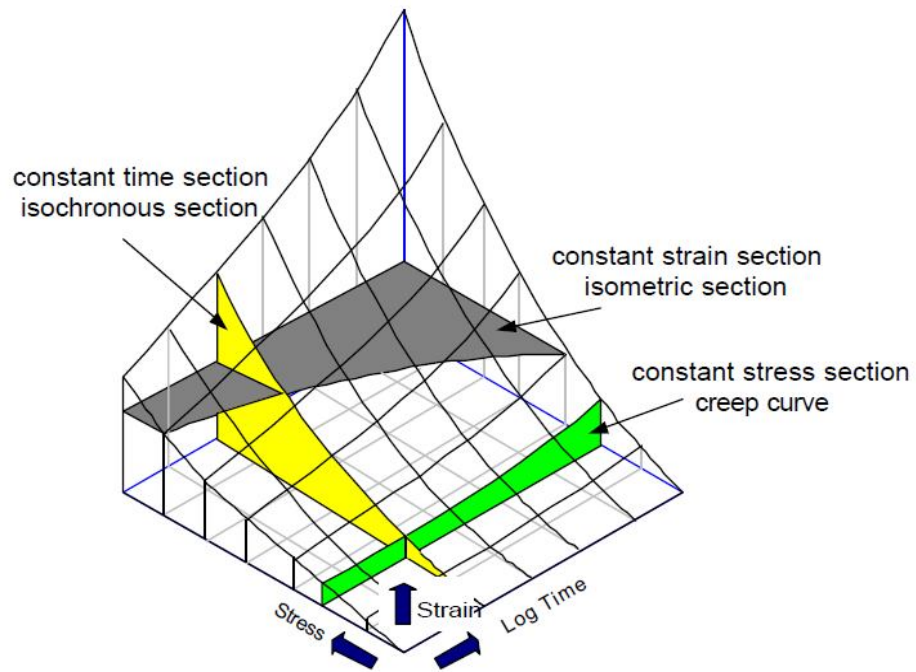
$$v^k t_f = v^k (N/v) = N v^{k-1}$$

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

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

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

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



Constant stress-strain-time coordinates

