خواص مکانیکی مواد (2)

منابع درس :

1. Fracture of Brittle Solids B.R. Lawn T.R. wilshaw

2. Deformation and fracture mechanics of engineering materials Hertzberg

۳ ـ تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی ـ اکرامی

4. Fracture of structural materials Tetelman

5. Elastic and plastic fracture Atkins and mai

6. Fundamental of fracture mechanics Knott

7. Ductile of fracture and ductility B.Dodo and Y.Bai

موارد 5 و 6 مربوط به کارشناسی ارشد است.

شکست ترد و نرم :

تقسیم بندی شکست : شکست ترد شکست نرم

در شکست ترد ، در مورد فلزات معمولاً همراه با اشاعه‌ی سریع ترک است و ظاهراً (ماکروسکوپی) تغییر شکل پلاستیک نداریم اما در مقیاس میکروسکوپی برای جوانه زنی ترک نیاز به تغییر فرم پلاستیک است . (در مقیاس میکروسکوپی)

شکست نرم : در حین اشاعه‌ی ترک تغییر شکل رخ می دهد و سرعت اشاعه‌ی آن نسبت به مورد قبلی کمتر است . قبل از جوانه زنی ترک هم تغییر فرم داریم .

تقسیم بندی بر مبنای کریستالوگرافی :

شکست تورقی cleavage : در اثر تنش های نرمال بر صفحات تورقی بوجود می آید و سطح شکست معمولاً براق و دانه‌ای . صفحات تورقی تغییر شکل پلاستیک ندارند

شکست برشی shear : در اثر تغییر شکل یا لغزش در صفحات متقابل توسط تنش های برشی انجام میشود . سطح شکست در بزرگنمایی کم تیره رنگ و فیبری است .

تقسیم بندی بر مبنای سطح شکست :

۱) براق و دانه‌ای Granular ۲) رشته ای Fibrous

تقسیم بندی بر مبنای میزان تغییر شکل تا شکست : ۱- ترد ۲- نرم

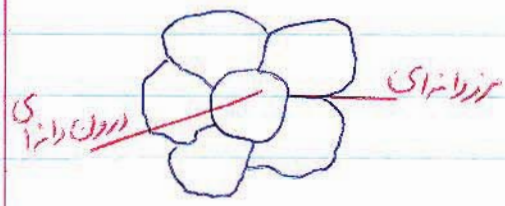
در شکست ترد، تغییر شکل تا شکست کم است. برعکس شکست نرم.

چدن SG در مقابل فولاد کم کربن شکست ترد دارد.

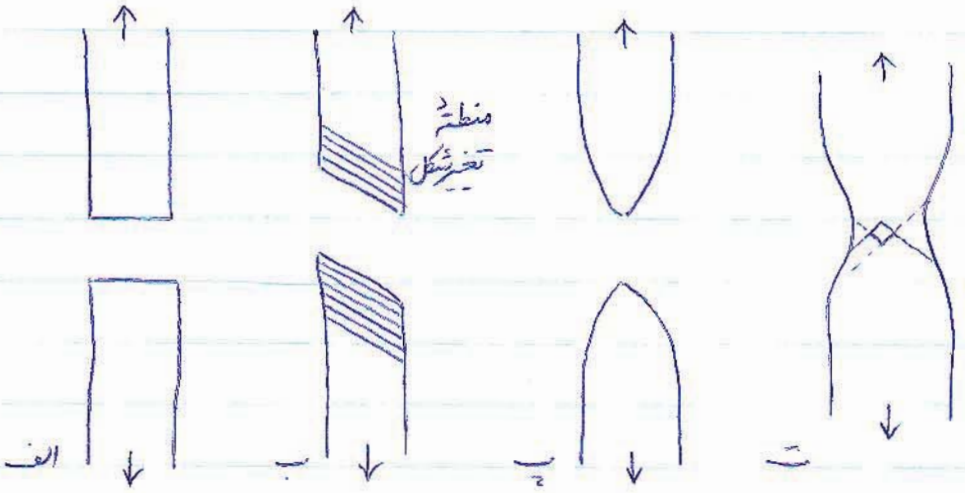
تقسیم بندی در چند بلورها بر اساس مسیر رشد راشاعه ی ترک:

شکست مرز دانه ای inter granular : در دمای بالا معمولاً رخ میدهد (خزش)

شکست درون دانه ای trans granular



انواع شکست در آزمایش کشش مواد:



الف ـ سطح شکست عمود بر تنش مرمال ← ترد (تغییر شکل پلاستیک هم ندارد)

fcc تحت شرایطی می تواند اینطور باشد. ساختارهای: bcc و hcp

← تنش برشی برای شکست بالا باشد: دما پایین و نرخ اعمال تنش بالا

ب ـ سطح شکست، مورب است ← از نوع برشی (نرم) در تک بلورهای hcp

(لغزش فقط در صفحه ی قاعده رخ میدهد)

پ ـ سطح شکست نازک شده ← تغییر شکل زیاد : فلزات خالص و fcc . برخی از fcc ها : طلا و سرب خالص

ت ـ قابلیت تغییر فرم متوسط ← مثلاً fcc های دارای ناخالصی

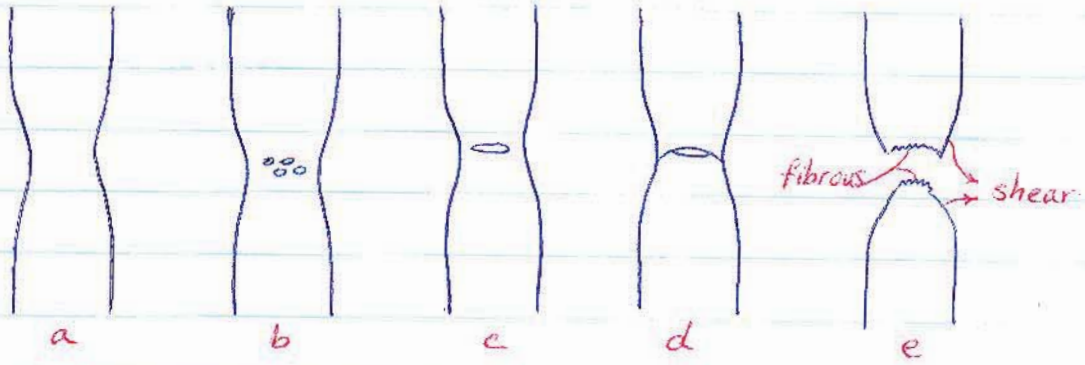
در آزمایش کشش necking داشتیم . در اثر رسیدن نیرو به max ، در یکی نقاط ضعف تمام حفره‌ها به هم می‌پیوندند تا ترک بوجود آید تا اینکه طول آن (ترک) به میزان معینی برسد . ابتدا باید حفره تشکیل شود و بعد رشد کند .

مخروط فنجان
cup - cone

مکانیزم شکست مخروط فنجان :

a) رسیدن به نیروی max .

b) بوجود آمدن حفره‌ها c) ایجاد ترک d) رشد ترک e) شکست



در لبه‌های شکست shear داریم .

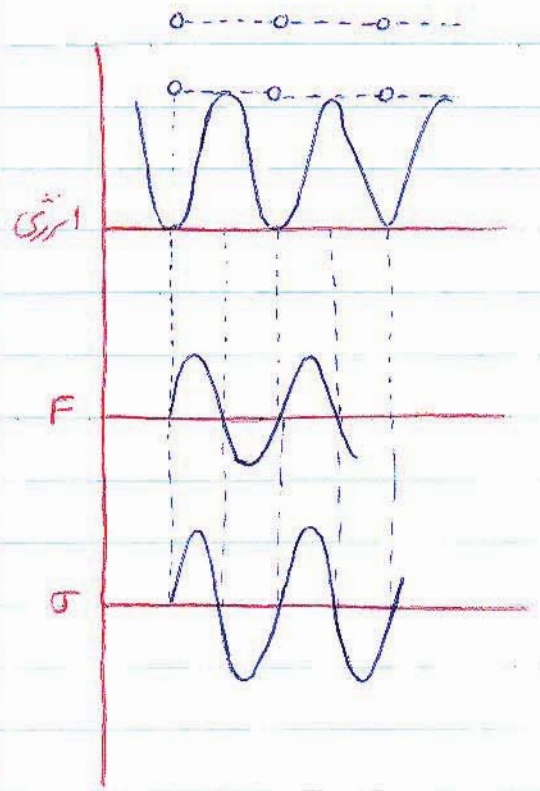
در شکست مرز دانه‌ای سطح بصورت برآمده است و مرزها را برجسته نشان می‌دهد .

در شکست نرم ، حفره هایی دیده میشود که درون این حفره ها ناخالصی و آخال هاد... وجود دارد.

استحکام نظری (تئوری مواد) :

در شبکه ی بدون نقص و کامل ، تنش مورد نیاز برای شکست ، خیلی بالاست ($\frac{E}{10}$) اما

یکسری عوامل این تنش را کاهش می دهند.



$$\sigma = \sigma_{max} \sin\frac{2\pi x}{\lambda} \sim \sigma_{max}.\frac{2\pi x}{\lambda}$$

$$\sigma = E\epsilon = \frac{Ex}{a_0} \qquad x = a - a_0$$

$$\sigma_{max} = \frac{\lambda}{2\pi}\frac{E}{a_0}$$

$$u = \int \sigma\, dx = \int_0^{\lambda/2} \sigma_{max} \sin\frac{2\pi x}{\lambda}\, dx$$

$$= \frac{\lambda \sigma_{max}}{\pi}$$

$$\frac{\lambda \sigma_{max}}{\pi} = 2\gamma_s \;:\; \sigma_{max} = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_0}}$$

چون شکست ترد است از رابطه ی هوک تبعیت می کند . انرژی لازم برای شکست صرف بوجود

آمدن دو سطح جدید شکست میشود .

$$\sigma \sim \frac{E}{5.5}$$

در عمل رابطه ی sin نیست و اتم ها هم ، هم کنش دارند پس :

$$\sigma_{th} \sim \frac{E}{10}$$

در مکانیک 1 ، برش در نظر داشتیم و $\frac{G}{10}$ بدست آمد .

نواقص در جامدات :

تحت این نواقص ، تنش لازم برای شکست کم خواهد شد :

۱ـ نواقص شبکه : نقطه ای ـ خطی ـ صفحه ای (صفر بعدی ، یک بعدی ، دو بعدی)

۲ـ نواقص ساخت : حین فرایند ساخت . ریخته گری : حفره ها ، تخلخل ها و ...

تراشکاری : آثار باقی مانده از تراشکاری ← ایجاد تمرکز تنش

۳ـ نواقص طراحی : مثلاً قطعه باید سوراخ داشته باشد ← نزدیک این سوراخ ، تنش 3 برابر تنش اعمالی است .

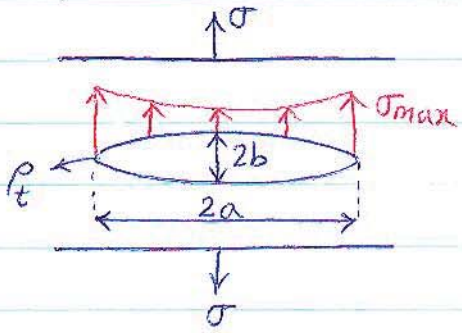
اگر قطعه L شکل باشد . در گوشه تمرکز تنش داریم ← باید یک شعاع به گوشه دهیم ← کاهش تمرکز تنش .

۴ـ نواقص مونتاژ : قطعات به طریقی به هم وصل میشوند : پیچ و مهره ـ جوشکاری که هریک نقص هستند . (پیچ سفت بسته شود ، تنش باقی می ماند)

۵ـ ریز ترک ها : برای بدست آوردن محصول روی آن فرایندهایی انجام میشود که در داخل ریز ترک هایی بوجود می آید .

۶ـ نواقص مربوط به جوشکاری : تنش های باقی مانده در اثر جوشکاری

ریز ترک ها:



یک ترک بیضی شکل در نظر می گیریم.

$$\sigma_{max} = \sigma\left(1+\frac{2a}{b}\right) \quad \text{or} \quad \sigma(1+2\sqrt{a/\rho}) \qquad \rho = \frac{b^2}{a}$$

σ_{max} : تنش در رأس ترک

$$\Rightarrow \sigma_{max} = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\rho}}$$

شکست وقتی بوجود می آید که $\sigma_{max} \simeq \sigma_{th}$ برسد.

$$\sigma_{th} = \sqrt{\frac{E\gamma_s}{a_0}}$$

$$\Rightarrow \sigma = \sigma_F = \sqrt{\frac{E\gamma\rho}{4aa_0}}$$

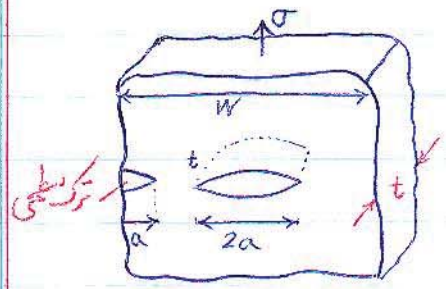
در عمل : $\rho \sim a_0$

$2a \sim 10^4 a_0$

$\mapsto$ در عمل $\quad \sigma_F \cong \frac{E}{1000}$

ملاحظه میشود، این نقص استحکام شکست را، 100 مرتبه کاهش پیدا می دهد.

نظریه گریفیث در مورد شکست ترد: (Griffith) ۸۶/۱۱/۲۳

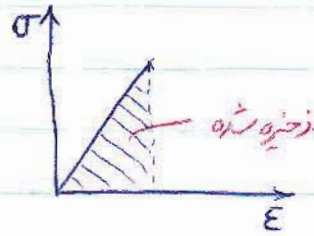


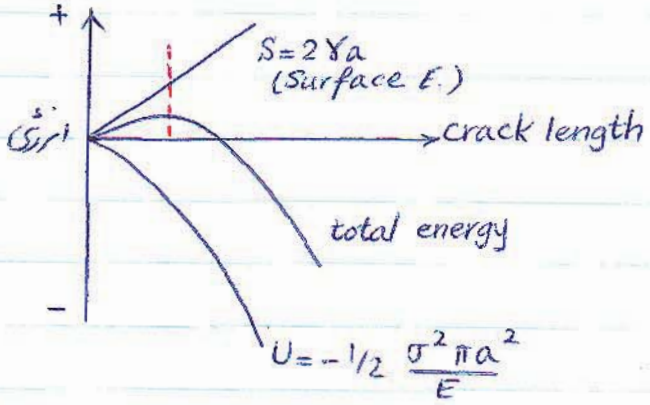
a : نصف طول ترک داخلی ، طول ترک سطحی

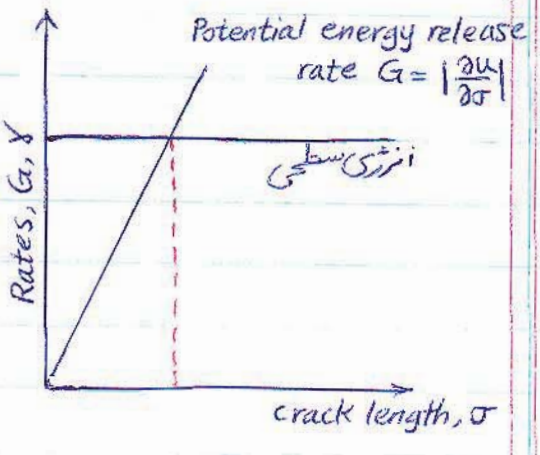
اولین فردی بود که اختلاف استحکام تئوری و عملی را پیدا کرد.

فرض : در یک ماده ترک های میکروسکوپی زیادی وجود دارد که باعث تمرکز تنش می شوند و اگر تنش در یکی از این ترک ها به حد تسلیم برسد، رشد کرده تا شکست رخ دهد. (به حد استحکام تئوری)

انرژی لازم برای سطوح جدید از انرژی الاستیک ذخیره شده تأمین می‌شود. وقتیکه نوک آزاد شدن انرژی الاستیک ذخیره شده حداقل برابر باشد با انرژی لازم برای سطوح جدید، ترک شروع به گسترش می‌کند.







$U/V = 1/2\,(\sigma.\varepsilon) = \sigma^2/2E$ $\qquad U/t = \pi a^2\sigma^2/2E$ (بر واحد ضخامت)

$S = 2a\gamma$ انرژی سطحی $\qquad W = U + S$

$W = 2a\gamma - \pi a^2\sigma^2/2E$ $\qquad \partial W/\partial a = 0$

$\sigma = (2E\gamma/\pi a)^{1/2}$ plane_stress $= \sigma_F$

$\sigma = [2E\gamma/\pi a(1-\nu^2)]^{1/2}$ plane_strain $= \sigma_F$

رابطه‌ی تنلی : $\sigma_F = \sqrt{\frac{E\gamma\rho}{4aa_0}}$. مقایسه‌ی این رابطه با رابطه‌ی گریفیث :

وقتی این دو با هم برابر شدند : $\left(\frac{\pi\rho}{8a_0} = 1\right)$ ؛ $(\rho \simeq 3a_0)$ or

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}\cdot\frac{\pi\rho}{8a_0}}$$

(۸) ۸۹/۱۱/۲۳

$\rho \geq 3a_0 \longmapsto \sigma_F = \sqrt{\frac{E\gamma_s \rho}{4aa_0}}$ در حالت $\rho = 3a_0$ از هردو

$\rho \leq 3a_0 \longmapsto \sigma_F = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$ می‌توان استفاده کرد .

تئوری گریفیث به فرم اولیه در مورد مواد ترد کامل مثل شیشه صادق است . اما در مورد فلزات برای جوانه‌زنی ترک نیاز به تغییر فرم پلاستیک است ← اصلاح شده :

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}}$$

γ_p : نصف کار تغییر شکل پلاستیک $G = 2\gamma_s + 2\gamma_p$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s(1+\gamma_p/\gamma_s)}{\pi a}} = \underbrace{\sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}}}_{\text{رابطه‌ی قبلی}} \cdot \sqrt{\frac{\pi\rho}{8a_0}}$$

$1 + \frac{\gamma_p}{\gamma_s} \sim \frac{\gamma_p}{\gamma_s}$

مقایسه‌ی رابطه‌ی اصلاح شده و رابطه‌ی قبلی

هرچه ρ بیشتر ← γ_p بیشتر حالت مساوی : $\frac{\gamma_p}{\gamma_s} = \frac{\pi\rho}{8a_0}$

ρ : شعاع رأس ترک ؛ پس در حین تغییر شکل پلاستیک ، ρ زیاد می‌شود یعنی از حالت تیزی بیرون می‌آید . γ_p : کار تغییر شکل پلاستیک تا جوانه‌زنی ترک

فریب تمرکز تنش : Stress Concentration factor

$$\sigma_{max} = \sigma\left(1 + 2\sqrt{a/\rho}\right) \text{ or } \sigma\left(1 + \frac{2a}{b}\right) \quad ; \quad K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma}$$

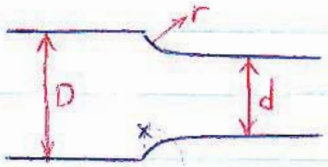
K_t : نسبت تنش در رأس ترک به تنش اعمالی $K_t = \left(1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}\right) \text{ or } \left(1 + \frac{2a}{b}\right)$

K_t به تنش اعمالی وابسته نیست و فقط به هندسه‌ی ترک وابسته است.

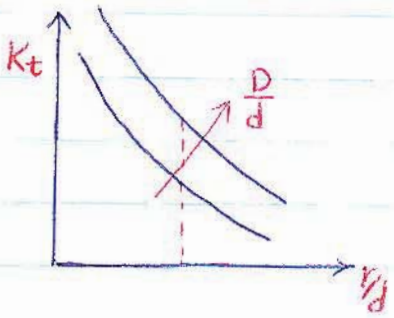
اگر در قطعه، یک سوراخ دایره‌ای وجود داشته باشد، در اطراف سوراخ، تنش 3 برابر تنش اعمالی است یعنی $K_t = 3$.

باید سعی کنیم نگذاریم K_t زیاد شود. پس باید a یا m را کنترل کرد. به هر نحوی اگر طول ترک را کم کنیم مثلاً در ون آن را با ماده‌ی جوش پر کنیم یا m را زیاد کنیم: در نوک ترک یک سوراخ با در ل ایجاد کرد. تا شعاع رأس ترک زیاد شود.

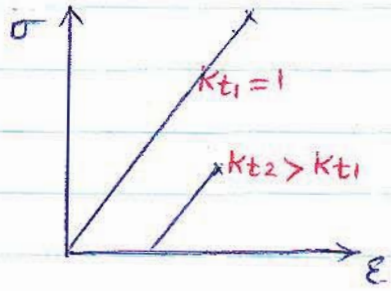
اگر در نمونه، تغییر ابعاد وجود داشته باشد مثل نمونه کشش:



اگر قوس نباشد، شکست در این ناحیه اتفاق می‌افتد

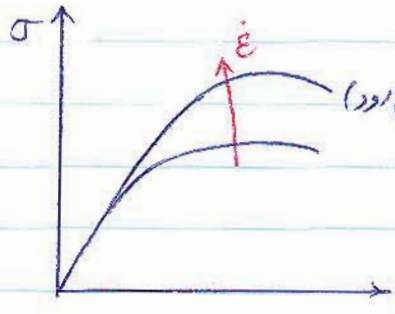


تمرکز تنش، نمودار تنش و کرنش را به مقادیر کوچکتری می‌رساند. تنش و کرنش شکست کم می‌شود.



اثر عوامل خارجی بر نوع شکست:

- آهنگ تغییر شکل: ($\dot{\varepsilon}$)



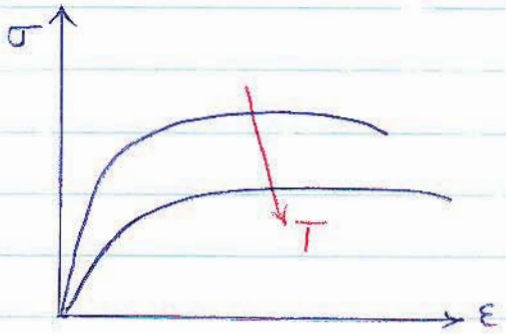
افزایش $\dot{\varepsilon}$، تمایل به شکست ترد را بیشتر می‌کند.

$$\dot{\varepsilon} = b\rho\bar{\tau} \quad ; \quad \bar{\tau} = k\tau^m$$

τ : تنش برشی لازم برای تغزش نابجائی . m : ثابت ماده.

در ε و T ثابت $\sigma = c(\dot{\varepsilon})^m_{\varepsilon,T}$: رابطه‌ی دیگر

• دما :



دما بر مدول الاستیسیته هم تأثیر دارد درحالیکه

$\dot{\varepsilon}$ تأثیر زیادی ندارد .

اثر خاق (notch) :

وجود خاق ، تمایل به شکست ترد را افزایش می‌دهد ؛ به چند دلیل :

الف) ایجاد تمرکز تنش می‌کند . K_t ممکن است σ را به استحکام شکست برساند.

ب) در رأس خاق در اثر افزایش تنش به حد تسلیم می‌رسیم ← مقداری تغییر شکل پلاستیک داریم . تا یک فاصله‌ای از رأس خاق ، تغییر شکل پلاستیک داریم و از آنجا به بعد الاستیک . چون $\sigma < \sigma_y$. در اثر این تغییر فرم ، کارسختی داریم ← افزایش استحکام ← تمایل به شکست ترد بیشتر .

ج) در سطقه‌ی فوق ، $\dot{\varepsilon}$ هم بیشتر است ← تمایل بیشتر به شکست ترد .

د) وجود خاق موجب چندبعدی شدن تنش می‌شود . درحالت یک بعدی شرط تسلیم $\sigma_1 = \sigma_y$

اما در حالت چند بعدی : $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y$ ؛ σ_3 : کششی . شرط تسلیم : $\sigma_1 = \sigma_y + \sigma_3$

پس تنش تسلیم زیاد میشود .

در necking هم تنش سه بعدی ایجاد میشود :

دو تنش دیگر در جهات متفاوت از جهت کشش به این دلیل بوجود می آید که جلوی necking را بگیرد ← کششی هستند .

دلایل ب وج ممکن است اصلاً ایجاد نشوند .

جوانه زنی ترک :

بر مبنای جوانه زنی ترک مواد به سه دسته تقسیم می شوند : مواد ترد - نیمه ترد - نرم

ترد : نابجائی ها در آن نمی توانند حرکت کنند . شکست ناشی از شکست پیوندهای اتمی است : آلومینا ، سیلیکات ها و کلاً مواد سرامیکی ، کاربیدها ، تنگستن

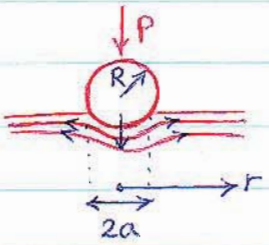
نیمه ترد : نابجائی ها حرکت می کنند . اما حرکت مربوط به چند سیستم لغزش محدود است . شکست هم ناشی از شکست پیوند اتمی است و هم حرکت نابجائی ها ؛ مثل فلزات hcp و برخی از bcc ها ، بلورهای دارای ساختار نمک طعام و ...

نرم : نابجائی ها بدون محدودیتی در آن حرکت می کنند . شکست ناشی از حرکت نابجائی ها است ؛ مثل fcc ها و برخی bcc ها ، پلیمرهای غیر شیشه ای

(۱۴) ۸۶/۱۱/۳۰

در مورد ماده‌ی ترد: خسارات سطحی موجب جوانه‌زنی ترک می‌شود. مثلاً ذره با سرعت به سطح برخورد کند

و یا ذره‌ای روی سطح بنشیند.



ذره با سرعت برخورد می‌کند و در سطح فرو می‌رود.

$$a = \left[\frac{3}{4} PR \left(\frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu'^2}{E'}\right)\right]^{1/3} = \alpha P^{1/3}$$

در زیر ذره تنش فشاری و در پهلو تنش کششی ایجاد می‌شود.

$$\sigma = \frac{1}{2}(1-2\nu)P_0 \qquad P_0 = \frac{P}{\pi a^2} \qquad \sigma_r = \sigma\left(\frac{a}{r}\right)^2$$

طبق این تئوری اگر تنش‌های کششی برسند به حد استحکام تئوری ماده، لایه‌ها باز می‌شوند و ترک جوانه می‌زند. (تئوری آسیب سطحی)

ذرات معلق کوارتز به قطر 1 mm روی سطح شیشه. با اعمال نیروی 1 N ترک جوانه‌زنی می‌کند منتها اعمال این نیرو به ذره‌ای با این قطر دور از ذهن است مگر اینکه با سرعت برخورد کند.

تئوری‌های دیگر:

بوجود آمدن محل‌های تمرکز تنش در هنگام ساخت مواد. روابط مربوط به K قبلاً بدست آمد.

تغییر در ترکیب شیمیائی بعضی مناطق. مثلاً در برخی مناطق اکسید ایجاد شود. اکسید اسیون ایجاد تنش پسماند می‌کند و اگر به استحکام تئوری برسد، ترک جوانه‌زنی می‌کند.

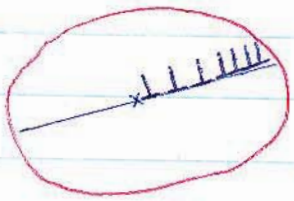
مورد بعدی: اثرات حرارت دادن: با دادن حرارت vacancy ها جمع میشوند ← حفره ← ترک

در مواردی مثل شیشه تعویض یون ها می تواند موجب جوانه زنی ترک شود . در مورد فلزات این اتفاق نمی افتد . یون های مختلف به شیشه اضافه میشود مثلاً برای تغییر رنگ . در محل نشست تنش ایجاد میشود و باید تنش گیری نمود .

جوانه زنی ترک در مواد نیمه ترد :

در این ماده برای جوانه زنی ترک نیاز به تغییر شکل پلاستیک داریم ← تنش تسلیم کنترل کننده است

مهم ترین مکانیزم ، تجمع نابجائی هاپشت موانع است :



اولین نابجائی پشت مانع متوقف میشود و در مراحل بعد تجمع داریم

← تمرکز تنش . اگر این تمرکز در رأس به حد معینی برسد

یکی از این موارد رخ می دهد :

۱) جوانه زنی ترک در نیمه تردها ۲) تغییر شکل پلاستیک در زمینه ی اطراف در مواد نرم

در نیمه تردها ، حد معین تنش شکست است . اما در مواد نرم این حد ، تنش تسلیم است .

این تمرکز در زاویه ی حدود 70.5° نسبت به سطح لغزش ، max مقدار است . (max تنش)

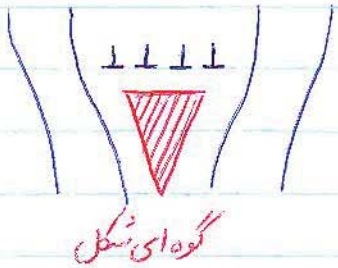
اگر مانع ناخالصی باشد :

تنش اگر برسد به حد استحکام ناخالصی برسد : زره می شکند که در مواد نیمه ترد موجب جوانه زنی ترک میشود . ممکن است تنش به اندازه ی نصف مشترک ناخالصی و زمینه برسد که موجب جدا شدن

ناخالصی از زمینه میشود.

اگر مانع مرزدانه باشد:

ایجاد ترک گوه‌ای شکل در اثر ادغام چند نابجائی در یکدیگر ← جوانه زنی ترک



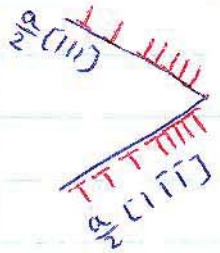
ممکن است در این حالت مانع، نابجائی غیر متحرک باشد.

احتمال جوانه زنی ترک در دانه‌ی مجاور است اگر به حد استحکام شکست برسد.

ممکن است موجب جدایش لایه‌های اتمی شود. چون تنش در همه‌ی جهات است. در مورد قبلی لایه‌های عمودی بود.

در فلزات bcc : تجزیه و یا ترکیب نابجائی‌ها $\frac{a}{2}[111]+\frac{a}{2}[1\bar{1}\bar{1}]=a[100]$

نابجائی حاصل غیر متحرک است در bcc ها چون متعلق به صفحه‌های {100} است. پس

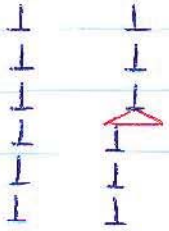


بعنوان مانع عمل می‌کند ← ترک گوه‌ای شکل

در fcc هم داشتیم. چون نقرنش

آسان زیاد است جوانه زنی ترک نداریم. در fcc لومر-کوتل نام داشت.

مرز فرعی در hcp موجب جوانه زنی ترک میشود.



اگر یک قسمت به مانع بخورد، همان قسمت می‌ایستد ← جوانه زنی ترک

ترک های الاستیک : (آخرین مدل)

اگر آرایش نابجائی مرزفرعی باشد متهادرسطح (به سطح ختم شود) جوانه‌ی ترک میشود .

جوانه زنی ترک در مواد نرم :

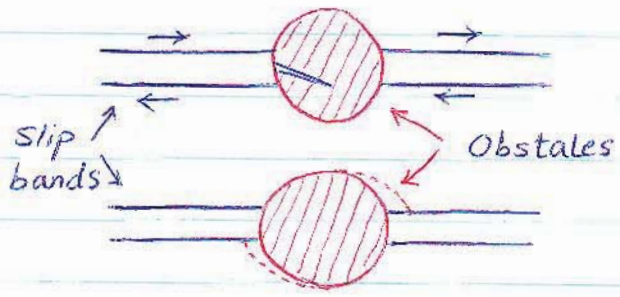
ایجاد ترک سه مرحله دارد :

۱) جوانه زنی حفره‌ها ۲) رشد حفره‌ها ۳) بهم پیوستن حفره‌ها ← ایجاد ترک

محل های امکان ایجاد حفره ها :

ذرات فازدوم ، ناخالصی ها ، آخال ها - محل های تمرکز تنش : مرزدانه‌ها و نابجائی‌های ساکن

پشت ذرات تجمع نابجائی و تمرکز تنش



داریم پس :

یا موجب شکست خود ذره میشود و یا جدا

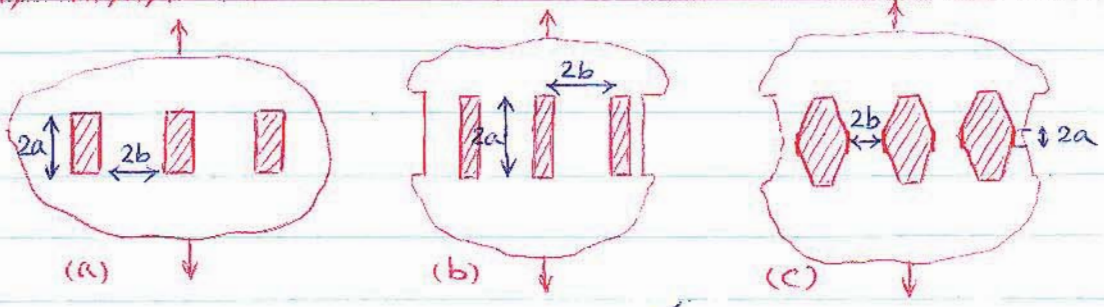
شدن فصل مشترک ذره و زمینه . بستگی دارد تنش به حد شکست و یا حد جداشدن فصل مشترک

برسد . مثل جوانه زنی ترک در نیمه ترد است . در مواد نیمه ترد فقط تا جوانه زنی ترک تغییر شکل

پلاستیک داریم .

رشد حفره ها :

(۱۶) ۸۶/۱۱/۳۰



درجهت اعمال تنش حفرات رشد می‌کند تا به حالت بحرانی برسند ← necking داخلی

شکل می‌گیرد . مواد بین حفرات necking می‌کند . در نتیجه مرحله‌ی نهایی ، حفرات به هم راه

می‌یابند و ترک شکل می‌گیرد . در آزمایش کشش :

تا وقتیکه تنش لازم برای تغییر شکل همگن کمتر از تنش لازم برای ناهمگن باشد ، همگن روی می‌دهد تا

اینکه به max نیرو برسد ؛ و بعد از آن کاهش می‌یابد . (تنش مهندسی منظور است)

در اینجا هم همینطور است :

تا جائیکه تنش رشد حفره‌ها کمتر باشد از تنش لازم برای پیوستن حفره‌ها ، رشد حفره‌ها ادامه

می‌یابد تا وقتیکه تنش لازم برای هم پیوستن کمتر شود .

میزان تغییر شکل برای جوانه‌زنی به چند پارامتر بستگی دارد :

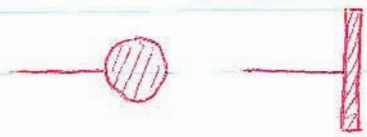
(ابعاد ذرات)

۱) در مورد بالائی زودتر جوانه زنی رخ می‌دهد چون ابعاد بزرگتر است و فصل

مشترک نیز بیشتر است . در مورد ذرات ریز ، نابجائی‌ها می‌توانند دور شان بزنند .

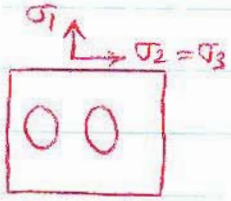
۲) شکل ذرات . اگر plate باشد (صفحه) زودتر می‌شکند ← در فولاد ذرات سمنتیت را

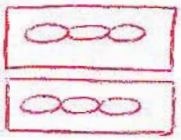
کروی می‌کنند .



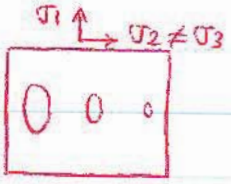
۳) درصد حجمی ذرات : هرچه بیشتر باشد، کرنش لازم جهت جوانه زنی کمتر خواهد بود. ذرات هم نزدیکتر میشوند.

در مقطع شکست یکسری حفره دیده میشود :





تنش برشی اگر اعمال شود :

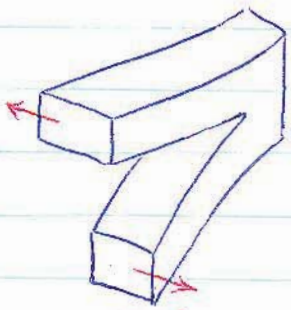


تنش ناهمگن :

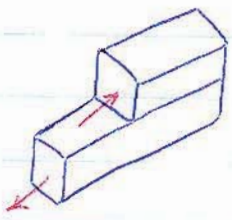
پس با دیدن سطح شکست می توان نوع تنش اعمالی را تشخیص داد و حتی منبع و منشأ ترک را هم پیدا کرد.

در شکست مخروط ـ فنجان ، قسمت shear در جهت تنش برشی max است.

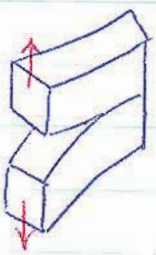
آنالیز تنش در رأس ترک :



نوع ۳
پارگی
Tearing



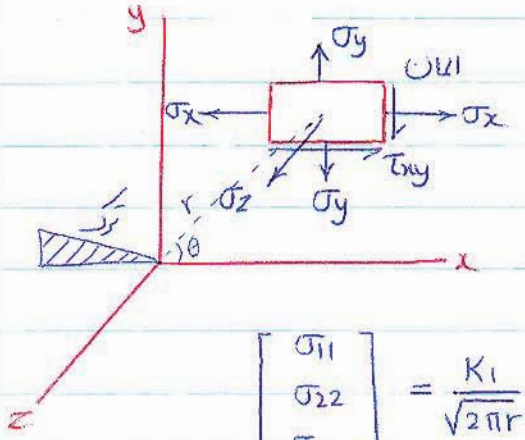
نوع ۲
برشی
Shearing



نوع ۱
کششی
opening

(۱۸) ۸۷/۱۲/۷

نوع ۱ خطرناکترین نوع اشاعه‌ی ترک است . وتنش عمود بر سطوح شکست یا ترک است . در عمل ترکیبی از این‌ها را ممکن است داشته باشیم .



در مجموع شش مؤلفه‌ی تنش داریم .

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}\cos\frac{\theta}{2}\begin{bmatrix}1-\sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3\theta}{2}\\ 1+\sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3\theta}{2}\\ \sin\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{3\theta}{2}\end{bmatrix}$$

$\sigma_{13}=\sigma_{23}=0$ $\qquad$ $\sigma_{33}=0$ $\qquad$ (plane stress)

$\sigma_{33}=\nu(\sigma_{11}+\sigma_{22})$ $\qquad$ (plane strain)

نوع ۲

$$\begin{bmatrix}\sigma_{11}\\ \sigma_{22}\\ \sigma_{12}\end{bmatrix} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}}\begin{bmatrix}-\sin\frac{\theta}{2}\cdot(2\cos\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{3\theta}{2}\\ \sin\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{\theta}{2}\cdot\cos\frac{3\theta}{2}\\ \cos\frac{\theta}{2}\cdot(1-\sin\frac{\theta}{2}\cdot\sin\frac{3\theta}{2}\end{bmatrix}$$

$\sigma_{13}=\sigma_{23}=0$ $\qquad$ $\sigma_{33}=0$ $\qquad$ (plane stress)

$\sigma_{33}=\nu(\sigma_{11}+\sigma_{22})$ $\qquad$ (plane strain)

نوع ۳

$$\begin{bmatrix}\sigma_{13}\\ \sigma_{23}\end{bmatrix} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}}\begin{bmatrix}-\sin\frac{\theta}{2}\\ \cos\frac{\theta}{2}\end{bmatrix}$$

$\sigma_{11}=\sigma_{22}=\sigma_{33}=\sigma_{12}=0$

در رأس ترک تنش از حالت یک بعدی خارج می‌شود ← تمایل به تسری بیشتری می‌شود.

plane stress $\sigma_{33} \sim 0$

plane strain $\varepsilon_{33} \sim 0$

اگر ضخامت کم باشد $\sigma_{33} \sim 0$. در مورد $\varepsilon_{33} \sim 0$ ضخامت زیاد بوده و تنش زیاد است و $\varepsilon_{33} \sim 0$.

در سطح آزاد تنش صفر است . در دو طرف بنابراین صفر است . در حالت ضخامت زیاد بین در سطح آزاد تنش داریم :

ضریب شدت تنش : Stress intensity factor

$K = f(\sigma, a)$ a : طول ترک

$K = m\sigma_\infty \sqrt{\pi a}$ m : ضریب کالیبراسیون (ضریب تعدیل ، اصلاح)

در حالت کلی : $m = f(a/w)$

$m = 1$: ابعاد جسم نامحدود باشد و ترک داخلی باشد . ترک در برابر جسم ناچیز باشد.

w : عرض نمونه

$m = 1.12$: ترک از سطح جوانه بزند و ترک در برابر ابعاد جسم ناچیز باشد.

$m = \frac{2}{\pi}$: اگر ترک سکه‌ای باشد .

$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}}$ فاکتور تمرکز تنش الاستیکی

K_t فقط به هندسه بستگی دارد . اگر ترک سطحی باشد : $a \rightarrow \frac{a}{2}$

K به تنش وابسته است و تنش هم به ساختار ← عوامل متالورژیکی در K تأثیر دارد.

مثلاً تنش اعمالی برای شکست آهن و مس متفاوت است .

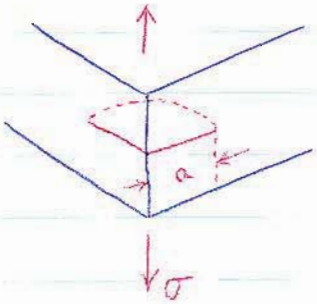
* در لحظه‌ی شکست : $K = K_c$

$K_c = m\sigma_c\sqrt{\pi a_c}$ σ_c : تنش بحرانی a_c : طول ترک بحرانی

(plane stress)

$K_c = K_{Ic}$ (plane strain)

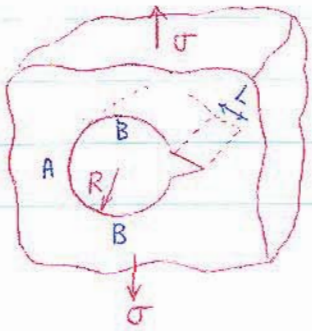
K_{Ic} منظور mode I شناسه‌ی ترک است .



$K = (1.12)^2 \frac{2}{\pi}\sigma\sqrt{\pi a}$

اگر نیم سکه‌ای باشد :

$K = (1.12)\frac{2}{\pi}\sigma\sqrt{\pi a}$ $\frac{2}{\pi}$ بخاطر سکه بودن آن است .



جوانه زنی ترک از سوراخ :

بدلیل تمرکز تنش در اطراف سوراخ L : طول ترک

دو حالت داریم :

مثل ترک سطحی میشود $\longmapsto$ $L \ll R$ $\quad K \approx 1.12\,(3\sigma)\sqrt{\pi L}$

در مورد دایره $K_t = 3$ و در اثر اعمال تنش به قطعه (σ) به ترک 3σ وارد میشود.

در هنگام خوانه زنی از این فرمول استفاده میشود. وقتی بزرگ تر شد از رابطه ی زیر :

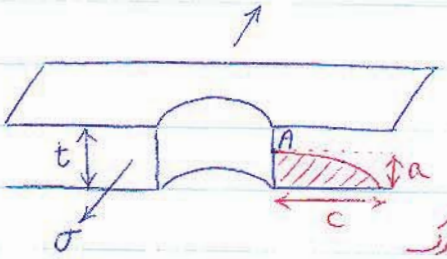
مثل ترک داخلی میشود $\longmapsto$ $L > R$ $\quad K = \sigma\sqrt{\pi\left(\frac{L+2R}{2}\right)}$

حالت $L \ll R$ بالاترین مقدار K و $L > R$ کوچکترین مقدار است.

در حالت $L > R$ سوراخ و ترک را یک ترک فرض کردیم (ترک داخلی)

با افزایش $\frac{L}{R}$ ، K کم میشود. پس در مرحله ی خوانه زنی $\max \cdot F\left(\frac{L}{R}\right)$ است.

خوانه زنی ترک بیضی شکل از سوراخ :



t : ضخامت قطعه

برای شروع ترک

$$K_A \sim 1.12\,(3\sigma)\sqrt{\pi a/Q}\cdot\sqrt{\sec(\pi a/2t)}$$

K_A : شرایط max شدت تنش در سطح بیضی در A

a : عمق زیر شیار بیضی شکل $\quad$ c : نصف عرض زیر شیار بیضی شکل

1.12 : ضریب اصلاح سطحی در A $\quad$ 3σ : اثر تمرکز تنش در A

Q : ضریب اصلاح مربوط به بیضی $= f(a/2c)$

$\sqrt{\sec(\pi a/2t}$: ضریب اصلاح مربوط به صفحه که برای نسبت نسبتاً بزرگ $\frac{a}{t}$ می‌باشد.

K_{1c} : از ثوابت ماده است. (چقرمگی) : toughness

در طراحی از رابطه‌ی $K_{1c} = m\sigma_c\sqrt{\pi a_c}$ ما طول ترک مجاز را محاسبه می‌کنیم در لحظه شکست.

در بازرسی‌ها قبل از اینکه ترک به این طول برسد باید قطعه را عوض کرد.

اگر بخواهیم σ_c را بدست آوریم از دستگاه ترک یاب با توجه به رفت آن استفاده می‌کنیم.

$$\sigma_{11} = \frac{k_1}{\sqrt{2\pi r}}\left(\cos\theta/2 - \cos\theta/2 \sin\theta/2 \sin 3\theta/2\right)$$

بجای اینکه در زاویه‌ی θ کار کنیم، در رأس ترک کار می‌کنیم $(\theta=0)$:

$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

از این به بعد در جهت رشد ترک کار می‌کنیم. یعنی محور x در شکل‌های قبلی نه سایر جهات. (ص ۱۸)

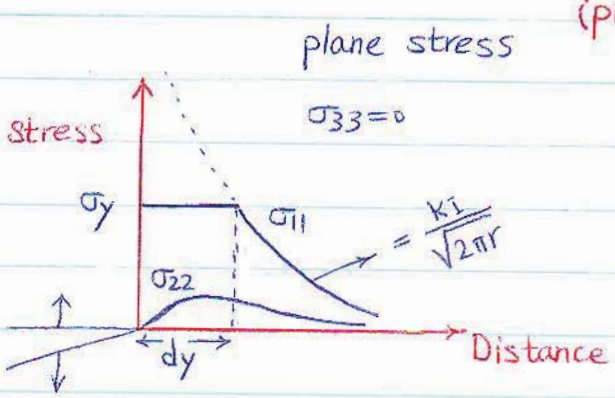
مسئله ـ (آخرین فصل ۸)

$$\sigma = 350\ MPa \qquad 2a = \frac{5}{\pi}\ Cm \qquad \sigma_y = 500\ MPa$$

$K = m\sigma\sqrt{\pi a}$ $\qquad$ ترک داخلی : $m=1$ $\rightarrow$ نصف طول ترک

$$K = 1 \times 350\sqrt{\pi \times \frac{2.5}{100\pi}} = \ldots\ MPa\sqrt{m}$$

توزیع تنش در رأس ترک (plane stress):



$$\sigma_{11} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}$$

به صفر نمی رسد : به تنش اعمالی

می رسد .

در رأس تنش به ∞ نمی رسد چون به تنش تسلیم یا شکست که برسد کار تمام است . (تغییر فرم پلاستیک رخ می دهد) σ_y : تنش تسلیم .

تا فاصله dy ، $\sigma \geq \sigma_y$: تغییر فرم پلاستیک داریم . شکست تر داست ← تغییر فرم ناچیز است (میزان کارسختی ناچیز است) : تا قبل از dy ، $\sigma = \sigma_y$

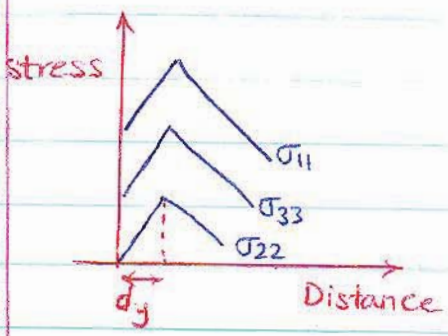
معیار ترسکا : $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_y \quad \rightarrowtail \sigma_1 = \sigma_y$

$\max(\sigma_{22})$: در $r = \frac{\sqrt{2}}{2} a$

۸۶/۱۲/۱۲

σ_{22} : از دو طرف به سطح می رسد و صفر میشود .

توزیع تنش در رأس ترک : (plane strain)

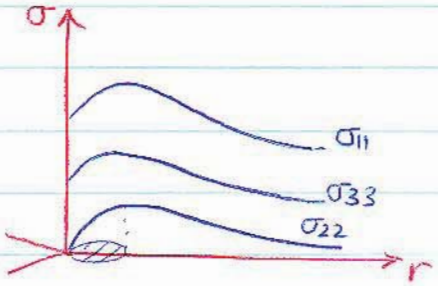


$$\sigma_{33} = 1/2\ (\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

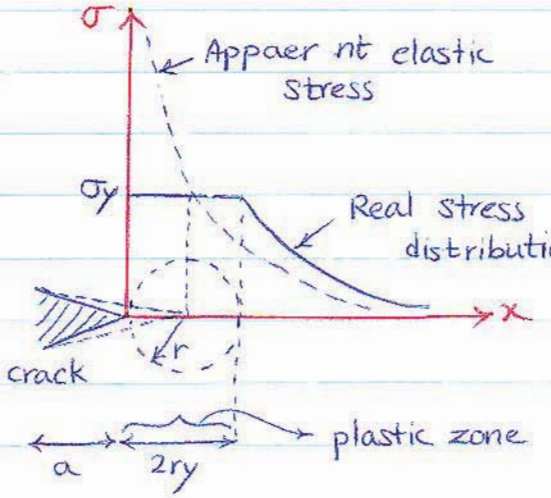
$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \sigma_y \rightarrow \sigma_{11} = \sigma_{22} + \sigma_y$$

۱ : جهت بارگذاری

منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک داریم اما کمتر از حالت قبلی.



محاسبه‌ی اندازه‌ی منطقه پلاستیک:



-- : تغییر تنش در رأس ترک

$$\sigma_{11} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}}$$

$$\sigma_{11} = \sigma_y$$

$$\sigma_{11} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r_y}}$$

استفاده از کار بالا ایراد دارد چون از روابط الاستیک جائی استفاده می‌کنیم که تغییر شکل پلاستیک داریم. برای رفع این مشکل:

حفره‌ی ترک گسترش با اندازه‌ی r داریم.

در حالت plane stress : از مساوی در σ_{11} :

$$r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{k}{\sigma_y}\right)^2$$

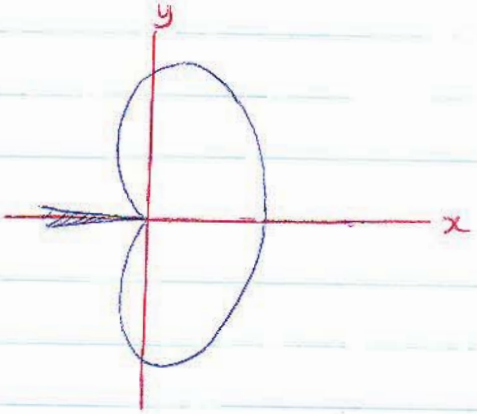
در نمودار بالا وقتی تنش به σ_y می‌رسد تغییر شکل پلاستیک شروع می‌شود و دیگر تنش‌ها بی‌نهایت زیاد نمی‌شود. در اینجا از کار سختی صرفنظر می‌کنیم چون میزان تغییر فرم کم است.

در حالت plane strain منطقه‌ی تغییر شکل را 1/3 حالت قبلی در نظر می‌گیرند.

$$r_y = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2$$ در این مورد محاسبات سخت‌تر است.

باید مقدار K را اصلاح کرد اگر تغییر فرم در

برابر طول ترک قابل صرفنظر نباشد.



$$K = m\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$K_{eff} = m\sigma\sqrt{\pi(a+r_y)}$$

K_{eff} ← فاکتور شدت تنش مؤثر

$m = f\left(\frac{a+r_y}{W}\right)$

اما در عمل تغییر شکل پلاستیک بصورت بالاست:

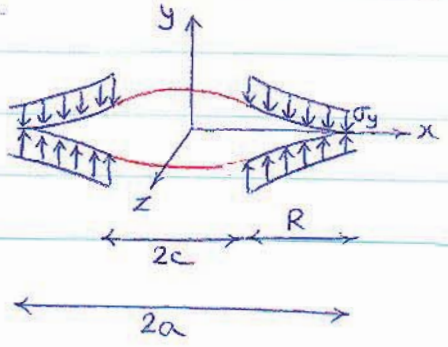
$$r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \cos^2\frac{\theta}{2}\left(1+3\sin^2\frac{\theta}{2}\right)$$

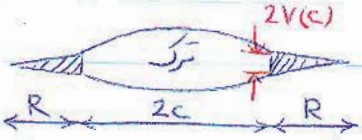
$$K_{eff} \cong Y\left(\frac{a+r_y}{W}\right)\sigma\sqrt{\pi(a+r_y)}$$

برای ترک داخلی $$K_{eff} = \sigma\sqrt{\pi\left[a+(1/2\pi)\left(K_{eff}^2/\sigma_{ys}^2\right)\right]}$$

$$K_{eff} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\left[1-(1/2)(\sigma/\sigma_y)^2\right]^{1/2}}$$

مدل پلاستیکی (نوار) داگدال (Dugdale):





2c : طول ترک داخلی

در حین رشد ترک، در منطقه‌ی تغییر شکل پلاستیک، ترک از خود مقاومت σ_y را نشان میدهد یعنی با ترک با طول $2a$ بطور الاستیک رشد می‌کند.

$$\frac{c}{a} = \cos\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma}{\sigma_{ys}}\right) \qquad a = c + R$$

$$\frac{R}{c} = \sec\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma}{\sigma_y}\right) - 1$$

$$\sigma \ll \sigma_y \mapsto \quad \frac{R}{c} \approx \frac{\pi^2}{8}(\sigma/\sigma_y)^2$$

$$R = \sigma^2\pi^2 c/(8\sigma_y)^2 = \pi K^2/8\sigma_y^2$$

$$\frac{\pi}{8} \sim \frac{1}{\pi} \quad \mapsto \quad R = 1/\pi\,(K/\sigma_y)^2$$

R : کل منطقه پلاستیک. $r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2$ پس : $R = 2r_y$

پس نتایج یکی است ولی روش ها متفاوت است.

ارتباط بین K و سرعت انرژی :

برای مواد ترد : $\sigma = (2E\gamma_s/\pi a)^{1/2}$ plane-stress

$$\sigma = [E(2\gamma + \gamma_p)/(\pi a)]^{1/2} \qquad G = 2\gamma + \gamma_p$$

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{EG} \qquad K = \sqrt{EG} \qquad (m=1)$$

$$\sigma = [EG/\pi a(1-\nu^2)]^{1/2} \quad \text{plain strain}$$

$$K = \sqrt{\frac{EG}{\pi a(1-\nu^2)}}$$

K : چقرمگی

مسئله. چون ورق است : plane stress

$$r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \qquad K = 1 \times 350\sqrt{R \times \frac{2.5}{100\pi}}$$

$$= \frac{1}{2\pi}\left(\frac{55.34}{500}\right)^2 \qquad = 55.34 \ MPa$$

$$= 1.95 \times 10^{-3} \ m = 1.95^{mm}$$

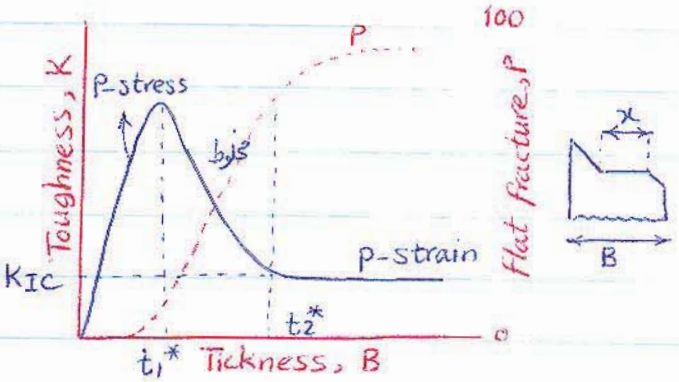
$$K_{eff} = \frac{K(\sigma\sqrt{\pi a})}{\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2\right]^{1/2}} = \frac{55.34}{\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{350}{500}\right)^2\right]^{1/2}}$$

$$= 68.64 \ MPa\sqrt{m}$$

ترک مرکزی است.

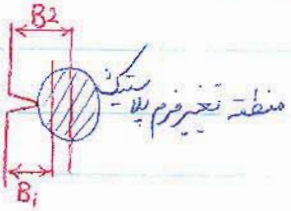
پس نمی توان چشم پوشی کرد.

تغییرات چقرمگی با ضخامت :



$$P = \frac{100x}{B}$$

P : درصد شکست تر



با افزایش ضخامت ، منطقه‌ی تغییر فرم هم زیاد میشود ← کار انجام شده زیاد میشود ←

چقرمگی زیاد میشود . (plane stress) پیک سختی برای وقتی است که کل منطقه را بپوشاند .

از این به بعد ، منطقه‌ی پلاستیک کوچکتر از الاستیک بزرگتر میشود . در ضخامت های زیاد کار تغییر شکل پلاستیک ناچیز میشود و K_{IC} ثابت خواهد شد . علت : r_y باید به $\frac{1}{6\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2$ برسد.

$$\begin{cases} \frac{r_y}{t} \leq 0.1 & p\text{-strain} \rightarrow r_y = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \\ \frac{r_y}{t} \geq 1 & p\text{-stress} \rightarrow r_y = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \end{cases}$$

در هر دو حالت $r_y \propto \left(\frac{1}{\sigma_y}\right)^2$. پس یکی از عوامل موثر تنش تسلیم است . σ_y زیاد باشد ممکن است در ضخامت های کم ، p-strain بریم . (برخلاف نمودار قبلی)

برعکس برای σ_y کم ، در ضخامت های زیاد ممکن است به p-stress بریم .

در حالت مخلوط در کناره ها شکست نرم (p-stress) و در وسط که معمولاً شکست تردد است (p-strain) داریم .

۸۶/۱۲/۱۴

تعیین چقرمگی شکست در شرایط کرنش صفحه ای :

نکات مهم :

۱ـ ضخامت نمونه باید به اندازه ای باشد که از اثر لبه ها بر روی چقرمگی صرفنظر شود .

۲ـ اندازه ی منطقه ی پلاستیک در شکست باید نسبت به سطح نمونه کم باشد تا نمونه را بتوانیم در حالت الاستیک بررسی کنیم .

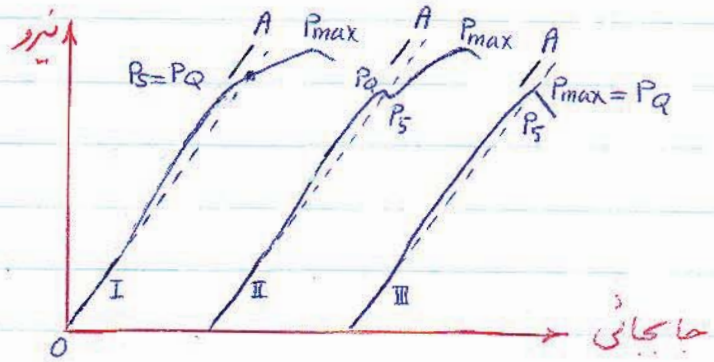
۳ـ ابعاد منطقه ی پلاستیک نسبت به طول ترک نباید زیاد باشد تا بر مقدار چقرمگی تأثیر داشته باشد .

نمونه های استاندارد چقرمگی شکست :

ابعاد را نداریم بلکه نسبت بین طول ها را داریم .

*فرمول ها از ضمیمه ی کتاب می باشد.

تعیین چقرمگی شکست :



خطی با ٪5 اختلاف سنت ـ خط الاستیک رسم می کنیم. محل برخورد با نمودار = P_5.

(کمتر از الاستیک : یعنی ترک ٪2 رشد پیدا کرده است.

اگر قبل از P_5 نقطه ای بزرگتر از لحاظ نیرو وجود نداشت : $P_5 = P_Q$

شرط لازم : $\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1.1$ برای p_strain بودن. قدم بعدی محاسبه ی K_Q.

$K_Q = \frac{P}{B w^{1/2}} f(\frac{a}{w})$ با داشتن $f(\frac{a}{w})$ ، K_Q بدست می آید.

قدم بعدی : K_Q ، K_{IC} هست یا نه؟ برای این کار :

$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$ (p_strain)

اگر اینطور بود $K_Q = K_{IC}$ و آزمایش تمام است.

اگر یکی از آنها برقرار نبود یعنی p_strain نبوده و باید آزمایش را تغییر داد : باید طول ترک

یا ضخامت افزایش یابد.

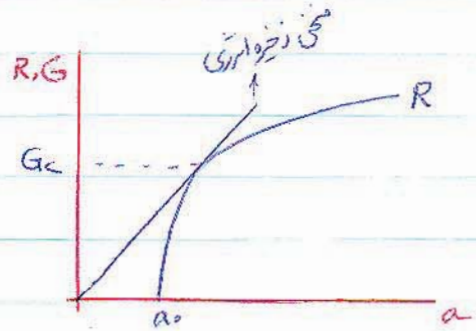
بجای رابطه ی B, a در بالا می توان از رابطه ی زیر هم استفاده کرد :

$$r_y = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K}{\sigma_y}\right)^2 \qquad B, a \geq 2.5 \times 6\pi r_y = 15\pi r_y \simeq 50 r_y$$

در نوع II ، قبل از P_S نقطه‌ای داریم که از P_S از لحاظ نیرو بیشتر باشد و آنرا P_Q قرار می‌دهیم. در نوع III هرسه روی هم منطبق اند و $\frac{P_{max}}{P_Q} = 1$ است.

علت اینکه ابعاد در نمونه نداریم : اگر p_strain بود با تغییر یک پارامتر، بقیه هم تغییر میکنند.

تعیین چقرمگی شکست در تنش صفحه‌ای :

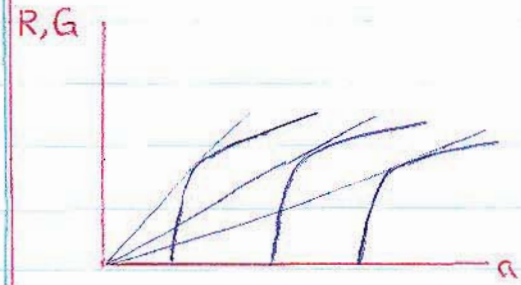


از جسم ترک دار وقتیکه $\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a}$ ناپایداری رخ می‌دهد.

دراین حالت ممکن است ترک قبل از شکست به آرامی رشد کند بنابراین تعیین max تنش مشکل خواهد بود. چون طول بیشترین ترک برای ما مشخص نیست. بنابراین باید لحظه‌ای را به عنوان ناپایداری تعریف کنیم. رابطه‌ی بالا (ایروین) مطابق رابطه‌ی گریفیث است.

Gc : چقرمگی شکست در لحظه‌ی ناپایداری . در p_stress چقرمگی شکست زیاد است و بنابراین تغییر شکل پلاستیک زیاد است.

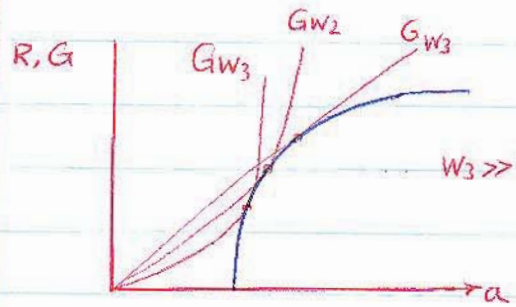
اثر طول ترک :



با تغییر ابعاد چقرمگی شکست تغییر میکند.

محل برخورد تغییر کرده. (مماس ها)

اثر عرض نمونه :

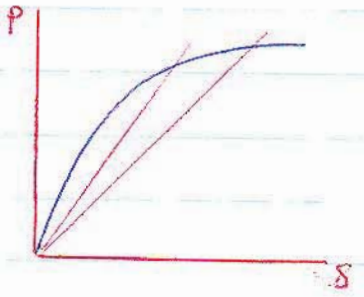


ضخامت ↑ ← چقرمگی شکست ↑

در واقع نتیجه میشود در p_stress ابعاد تأثیر دارد. اما در p_strain ، K_{Ic} ثابت است.

دستگاه R_a را می‌دهد.

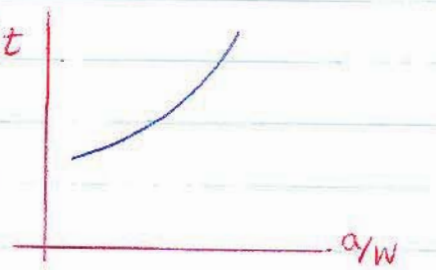
محل تلاقی را می‌خوانیم ← نیرو را داریم و مجدداً نمودار $E\frac{\delta}{P}t - \frac{a}{W}$ بدست می‌آید. برای چندین نقطه همین طریق عمل می‌کنیم.

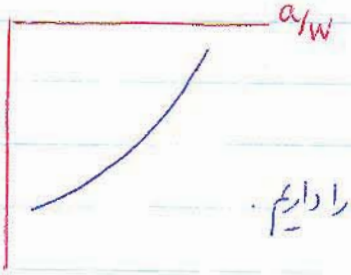


$P = n\delta \quad ; \quad c = \frac{1}{n}$

سازگاری : $c = \frac{\delta}{P}$ (Compliance)

با داشتن P و c ، δ بدست می‌آید ← $\frac{a}{W}$ بدست می‌آید. و منحنی $E\frac{\delta}{P}t - \frac{a}{W}$ بدست می‌آید.



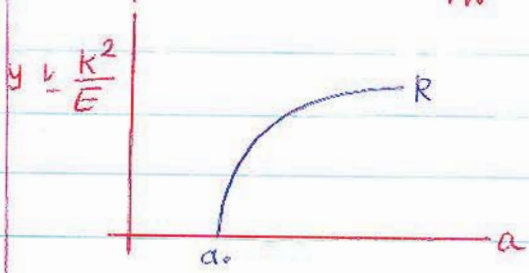


برای یک نمونه m را داریم.

قدم بعدی بدست آوردن G است. $(m = f(\frac{a}{W}))$

$(K = m\sigma\sqrt{\pi a})$

$K = \sqrt{EG} \quad ; \quad \frac{K^2}{E} = G$ ← منحنی R بدست آمد



خط G از رابطه‌ی گریفیث رسم میشود.

تعیین چقرمگی شکست با استفاده از COD : Crack Opening Displacement

COD : میزان بازشدن دهانه‌ی ترک

$$2V(c) = \frac{8\sigma_y c}{\pi E} \ln\left(\sec\frac{\pi\sigma}{2\sigma_y}\right)$$

if $\sigma \ll \sigma_y$ (شکست ترد) $\quad \ln x \sim x-1$

$$\frac{R}{c} \sim \frac{\pi^2}{8}\left(\frac{\sigma}{\sigma_y}\right)^2 \quad , \quad \frac{R}{c} = \sec\left(\frac{\pi}{2}\frac{\sigma}{\sigma_y} - 1\right)$$

$$2V(c) = \frac{K^2}{E\sigma_y} = \frac{g}{\sigma_y} \qquad g_c \cong 2\sigma_y V(c) \quad \text{or} \quad g_c \cong n\sigma_y . 2V^*(c)$$
$$(1 < n \lesssim 1.5-2)$$

وقتی ناپایداری اتفاق می‌افتد که General yielding اتفاق افتد. (تسلیم عمومی)

این محاسبات برای حالت p-stress است : $g_c = 2\sigma_y V(c)$

p-strain : $1 < n \lesssim 1.5-2$ $\qquad$ p-stress : $n = 1$

ممکن است طول ترک در عرض نمونه یکسان نباشد در نتیجه در عرض ترک در تمام نقاط تسلیم اتفاق نیفتد. تسلیم کلی وقتی اتفاق می‌افتد که تمام عرض ترک به تسلیم رسیده باشد. اینکه تسلیم کلی اتفاق افتاده یا خیر باید با مقطع زدن و متالوگرافی آنرا تشخیص دهیم.

تعیین چقرمگی شکست با استفاده از انتگرال J : ۸۶/۱۲/۱۹

محاسبه‌ی JIC :

$$J = \frac{2}{b}\int_0^{\delta_c} P\, d\delta_c$$

(۳۴) ۸۶/۱۲/۱۹

نمونه‌های کششی (II) $J = \frac{2A}{Bb}\left[\frac{1+\alpha}{1+\alpha^2}\right]$: نمونه‌های خمشی (I) $J = \frac{2A}{Bb}$

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{2a_0}{b}\right)^2 + 2\left(\frac{2a_0}{b}\right) + 2} - \left(\frac{2a_0}{b} + 1\right)$$

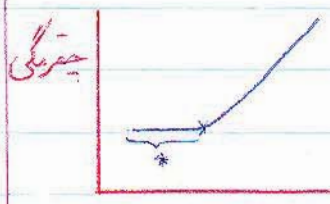
در حالت کلی این روش برای p_stress است . برای p_strain هم قابل استفاده است.

این روش بر مبنای انرژی در راس ترک است . B : ضخامت

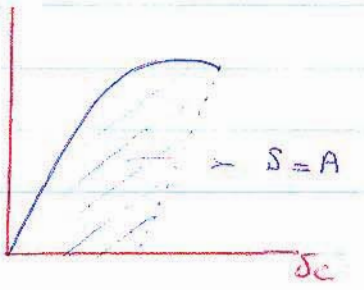
P : نیرو بر واحد ضخامت . b : لیگامنت یا انرژی باقیمانده

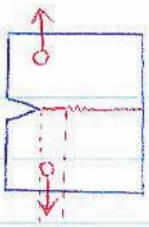
a_0 : طول اولیه‌ی ترک یا فاق . δ_c : تغییر مکان نمونه‌ی فاقدار .

برای محاسبه : ابتدا نمونه‌ی فاقدار را تحت بارگذاری خستگی قرار می‌دهیم تا در راس فاق، ترک بوجود آید ← ابتدا باعث میشود ρ (شعاع راس ترک) کم شود تا بر چقرمگی تأثیر نداشته باشد و هم : می‌توان میزان رشد ترک را بدست آورد .



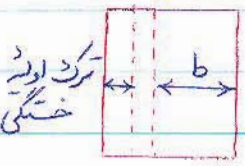
سپس منحنی P برحسب δ_c را رسم می‌کنیم .



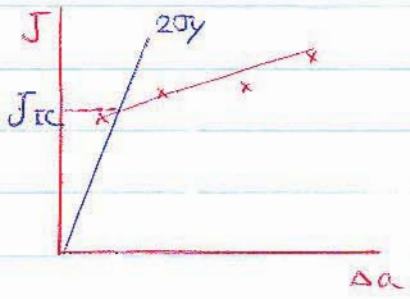


بعد مجدداً نمونه را تحت بارگذاری خستگی قرار می‌دهیم . بعد در نمونه شکست ایجاد می‌کنیم

برای محاسبه‌ی δa ، مرز بین دو ترک خستگی را اندازه گرفته و میانگین



آن را بدست می آوریم. برای نمونه‌ی اول: $J_1, \Delta a_1$. سپس برای نمونه‌ی بعدی تا 4، 5 نتیجه‌ی $J_n, \Delta a_n$ بدست آید. لیگامنت زیر میکروسکوپ قابل اندازه‌گیری است.



در مرحله‌ی بعد نمودار $J-\Delta a$ را رسم می‌کنیم.

شکست‌ترد ← p_strain مدنظر است.

شرط p_strain بودن:

$B, b \geq (25-50)\frac{J}{\sigma_y}$ نقاطی از J و Δa را انتخاب می‌کنیم که در رابطه فوق صدق کنند. سپس از مبدأ مختصات خطی با شیب $(2\sigma_y)$ رسم می‌کنیم: blunting line

محل برخورد J_{IC} است.

$K = \sqrt{\frac{EG}{1-\nu^2}}$ در حالت p_strain ← K بدست می‌آید

علت رسم خط $2\sigma_y$:

$g = CoD \cdot \sigma_y = 2J \cdot \sigma_y = 2\sigma_y \Delta a$ ، $g = 2V(c)\sigma_y$

r_y : طول منطقه پلاستیک $g = 2\sigma_y \cdot \Delta a$

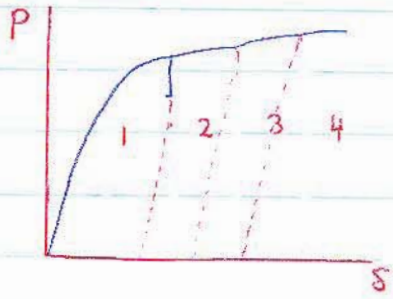
در تغییر فرم پلاستیک اگر از روابط الاستیک بخواهیم استفاده کنیم: ترک بطور الاستیک باندازه‌ی r_y رشد میکند. در اینجا کارسختی مرتفع شده چون تغییر فرم کم است. اگر بخواهیم کارسختی را در نظر بگیریم، خطی با شیب دو برابر تنش سیلان رسم می‌کنیم. $\sigma_{Flow} = \frac{\sigma_y + \sigma_{UTS}}{2}$

درست گفته شده، خستگی دوم برای موادی که در اثر ... تغییر رنگ می‌دهند، لازم نیست. بنابراین

(۴۵) ۸۶/۱۲/۱۹

مرز بین خستگی اول و کل تغییر رنگ را برای این مواد در نظر می‌گیریم.

اگر ابزار اندازه‌گیری طول ترک را داشته باشیم میتوان از یک نمونه استفاده کرد:



در بارگذاری، 10 درصد بارگذاری را کاهش می‌دهیم

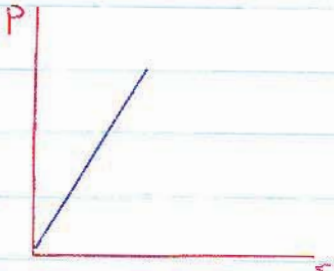
بعد باید طول ترک را به روش غیرمخرب اندازه گرفت.

دوباره همین کار را ادامه می‌دهیم.

$a = a' = \Delta a$

↓

فاق اولیه خستگی



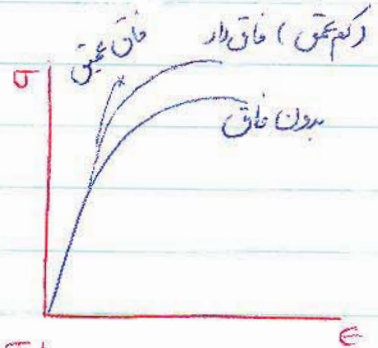
سازگاری $P = n\delta \quad ; \quad c = \frac{1}{n}$

$\delta = P.c$

در هر مرحله، شیب همان مرحله را در نظر می‌گیریم. چون نمونه‌ها

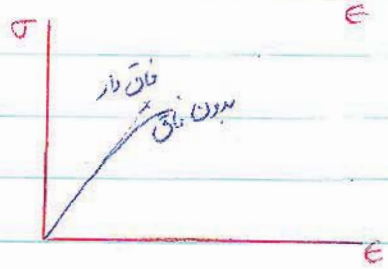
دارای ترک هستند، این شیب‌ها با هم مساوی نیستند.

آخرین روش: آزمایش ضربه:



وجود فاق ← تمایل به شکست ترد زیاد میشود.

notch - strengthening



این نمونه تمایل انعطاف دارد.

نمونه با تمایل انعطاف کم:

notch - weakening

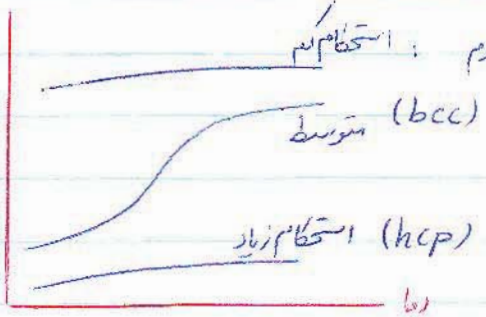
یعنی استحکامش هم کم میشود. پس notch رو تأثیر دارد: بالا بردن استحکام و عکس.

رو روش برای استحکام ضربه: Sharpy - ISO

در Sharpy، نمونه $10 \times 10 \times 55^{mm}$ با فاق V شکل. عمق فاق 0.02^{mm} و شعاع فاق: 0.2^{mm}.

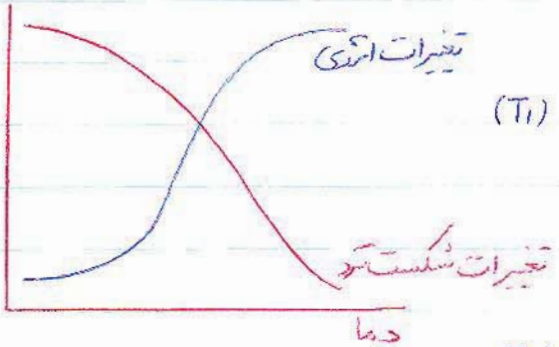
در ISO: $10 \times 10 \times 75^{mm}$ فاق در فاصله 27^{mm} از بالا قرار داشت.

K را در حالت p_strain می‌خواهیم. پس آزمایش را در دمایی انجام می‌دهیم که شکست صد در صد ترد است.



برای متوسط:

باید معلوم شود چقرمگی در چه دمایی محاسبه شده است.



(T1) FTP = Fracture Transition Plastic
(شکست صد در صد نرم)

(T2) FATT = Fracture appearance Transition Temp.
(50 درصد نرم و 50 درصد ترد)

$T_3 = NDT = Nil\ ductility\ Temp.$ (شکست صد در صد ترد)

$T_4 = \frac{T_1 + T_3}{2}$

$T_5 = 15\ (ft.lb)$ دما بر مبنای میزان انرژی

T_3 و T_5 هم هستند چون در منطقه‌ی ترد هستیم. بیشتر روی T_3 کار می‌کنیم. با تعیین NDT انرژی شکست را می‌خوانیم. از انرژی ضربه، K بدست می‌آید. ص ۳۹۸.

دمای تبدیل ثابت نیست و با عواملی تغییر میکند:

۱ـ اندازه‌ی دانه: دانه‌های ریز، دما را به چپ می‌برد. (افزایش چقرمگی) {کاهش دمای تبدیل و قابلیت کاربرد زیاد میشود} در رنج وسیعی از دما کاربرد خواهد داشت.

۲ـ عناصر آلیاژی: منوزار به سمت راست می‌رود. (کاهش چقرمگی). نیکل در فولاد برعکس عمل میکند.

۳ـ ابعاد نمونه: بزرگتر: بسمت p_strain می‌رویم ← شکست ترد: به سمت راست می‌رود و دمای تبدیل زیاد میشود.

۴ـ جهت آماده سازی نمونه: نمونه‌ی لورز ← جهت دانه‌ها در راستای لورز (کشیده شدن دانه‌ها) notch عمود بر راستای دانه‌های کشیده شده: چقرمه‌تر است چون در این حالت موانع (مرز دانه‌ها) زیاد هستند سر راه رشد ترک.

۸۶/۱۲/۲۱

* سایر آزمایشات:

به علت کوچک بودن نمونه‌های ضربه نتایج همیشه با مقادیر واقعی یکسان نیست. از این رو از آزمایشات دیگر استفاده میشود: روش انفجاری ـ وزنه‌ی سقوطی ـ بارگی دینامیکی

روش انفجاری : روی صفحه‌ای به ابعاد $14 \times 14 \times 1$ in یک درز جوش ترد ایجاد و پس از قرار گرفتن روی قالب تحت بار انفجاری (دینامیکی) قرار می‌گیرد.

NDT : بالاترین دمایی است که شکست ترد تالبی صفحه پیش می‌رود.

FTE : دمایی است که شکست ترد تالبی‌ها گسترش نمی‌یابد. (بالاترین دمای گسترش شکست تحت تنش کشسان)

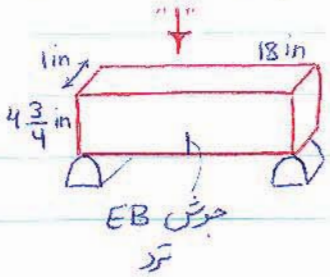
FTP : بالاترین دمایی که بیشتر از آن پارگی نرم رخ می‌دهد.

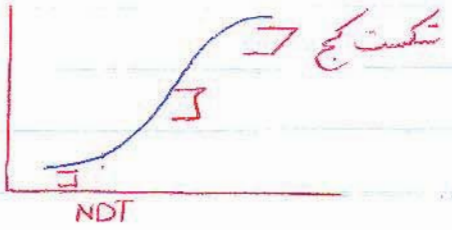
روش وزنه‌ی سقوطی:

درز جوش ترد و کوتاهی بر صفحه‌ای به ابعاد $3.5 \times 14 \times (\frac{5}{8}-1)^{in^3}$ ایجاد و ترک کوچکی در آن ایجاد می‌شود. سپس تحت بار دینامیکی ناشی از سقوط وزنه قرار داده می‌شود. اگر ترک در وجه کششی در امتداد عرض صفحه تالبی‌ها گسترش یابد، دما کمتر از NDT است. با تکرار آزمایش دقیقاً می‌توان NDT را بدست آورد. درز جوش تمرکز تنش ایجاد می‌کند و مثل notch باعث شکست ترد می‌شود چون تنش‌های سه بعدی ایجاد می‌کند.

روش پارگی دینامیکی برای تعیین NDT :

مثل آزمایش شارپی است (آدنگ) اما نمونه ضخیم‌تر است. جوش بدون ترک و ترد شده است.





آزمایش توقف ترک (راپرتسون) :

نمونه‌ای با عرض 6in تحت بارگذاری یکنواخت قرار می‌گیرد. گسترش ترک ترد با اعمال بار ضربه‌ای از طرف سرد شروع و با پیشروی به سمت گرم در نقطه‌ای متوقف میشود. دمای آن نقطه، بعنوان دمای توقف ترک یا CAT نامیده میشود. آزمایش بر روی فولادهای نرم نشان می‌دهد که در زیر دمای NDT دمای توقف ترک مستقل از دماست اما سطح تنش برای توقف ترک کم است و اگر تنش از 5-8 Ksi بیشتر باشد، شکست ترد رخ میدهد.

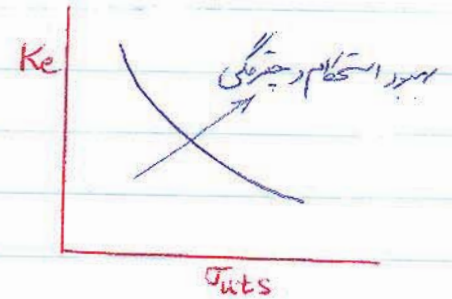
بهبود چقرمگی شکست :

ویژگی اصلی	فلزی	یونی	کووالانسی
پیوند الکترونی			
ساختار بلوری	بلورهای شسته	بلورهای با تقارن کمتر	
میزان نظم	محلول جامد تصادفی	نظم کوتاه برد	نظم دوربرد

افزایش تمایل به شکست ترد ←

(ستونها مستقل از هم هستند)

روی فاز چه کار کنیم تا چقرمگی شکست بیشتر شود؟



مکانیسم‌های چقرمگی خارجی :

۱ـ منحرف کردن و طولانی کردن مسیر ترک ← افزایش انرژی (توسط ذرات در زمینه)

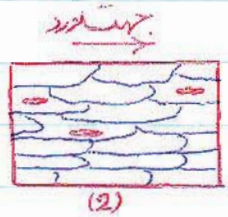
2ـ چقرمگی ناشی از استحاله‌های فازی

3 ـ چقرگی ناشی از ریز ترک ها 4 ـ ایجاد حفره در منطقه‌ی ترک

5 ـ بسته شدن ترک در اثر تغییر شکل پلاستیک.

6 ـ پل زنی (چقرگی رشته‌ای) 7 ـ سرش فصل مشترک سطح ترک در حال لغزش.

۱ـ چقرگی و ناهمسانی ساختاری:



در جهت نورد، رشته‌ها کشیده می‌شوند + آخال‌ها.

اگر notch در منطقه‌ی (2) باشد، چقرمه‌تر است چون

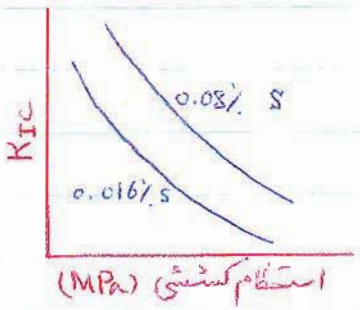
موانع بیشتری می‌بیند. جهت عمود بر هر تغییر شکل چقرمه‌تر است. در مورد آخال هم همینطور

است. در حالت ↓ چقرگی بیشتر از حالت → است.

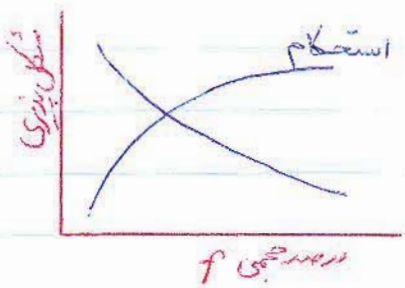
2 ـ بهبود ترکیب شیمیایی یا تمیزی آلیاژ و کنترل عملیات ذوب:

وجود عناصری مثل گوگرد، فسفر، چقرگی را کاهش می‌دهد. در سوپرآلیاژها باید در خلأ ذوب

کنیم.



3 ـ اثر کرجمی نازدوم:



اگر استحکام 500MPa کفسیت نماید به 700MPa

برسیم چون چقرگی (K_{IC}) کاهش می‌یابد.

4. بدست آوردن بهترین ساختار جهت حداکثر چقرمگی:

دو رسته : آلیاژهای آهنی - غیرآهنی

* آلیاژهای آهنی :

کربن : عامل فعال سختی پذیری - مقاوم کننده از طریق محلول جامد ، کاربیدها هم چنین ← استحکام را هی کمک می‌کند اما در جوانه زنی ترکها نیز نقش دارند ← کاهش چقرمگی

نیکل : افزایش چقرمگی Cr و Mo : کاربیدزا ← کاهش چقرمگی

Mn : افزایش چقرمگی Si : اکسیژن زدا ← دمای تبدیل را کاهش ← کاهش چقرمگی

فولادهای Maraging : ساختار مارتنزیتی + عملیات پیرسازی برای افزایش استحکام

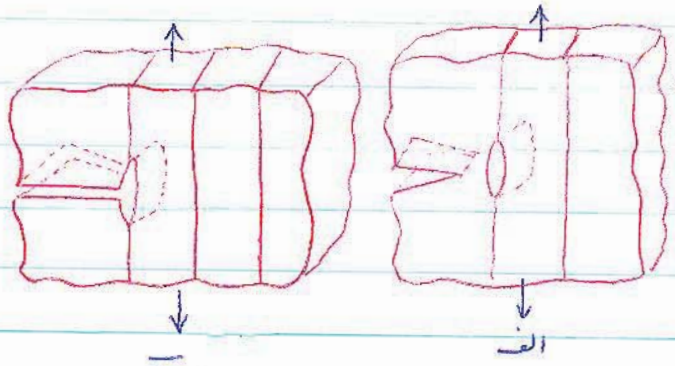
Al : افزایش چقرمگی Ti : کاهش چقرمگی

* آلیاژهای غیرآهنی : (مثل Ti-6V-4Al) : در کتاب

در این آلیاژ فاز β نیمه پایدار مناسب ترین فاز است . آلیاژهای $\alpha+\beta$ بدترین حالت را دارند : استحکام بالا اما چقرمگی پائین .

5. کاهش تنش در راس ترک :

(استفاده از فصل مشترکهای ضعیف)

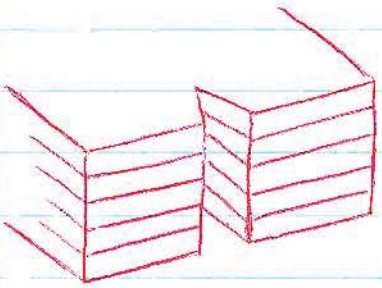


(۴۲) ۸۶/۱۲/۲۱

در رأس ترک تنش‌ها بسیار بزرگ می‌شود. تنش در جهتی موجب باز شدن فصل مشترک شده

و به حالت p-stress (ب) می‌رسیم ← افزایش چقرمگی

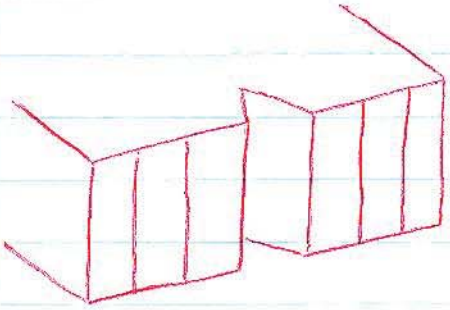
حالت دیگر تقسیم کردن فصل مشترک بصورت زیر است.



تعداد لایه‌ها بیشتر ← افزایش چقرمگی

چون ضخامت حاکم است ← از p-strain به

p-stress می‌رسیم.



حالت بعدی هم "کوتاه عرضی" است.

دوباره به p-stress می‌رسیم.

در لوله‌های تفنگ، لوله از چند قسمت تشکیل می‌شود

تا ترک سریع رشد نکند. (ترک منحرف می‌شود)

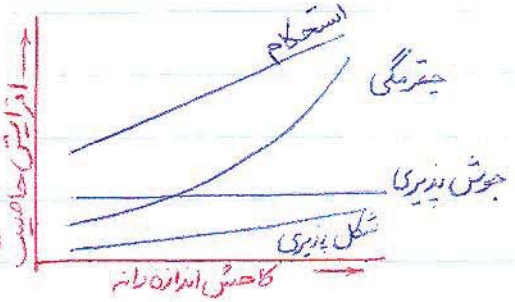
پس در عمل از فصل مشترک ضعیف استفاده می‌کنند.

۸۶/۱۲/۲۶

6. ریز کردن دانه‌ها:

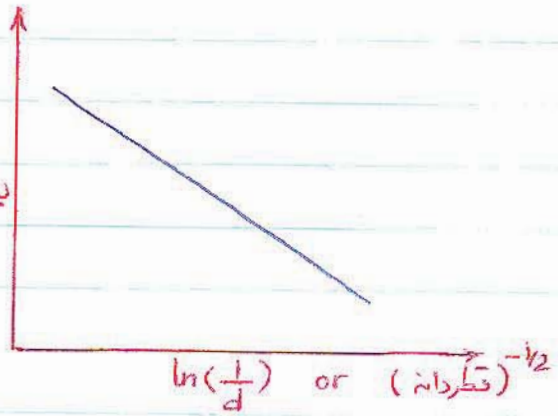
بحث شکست تردی است (p-strain)

به دو دلیل چقرمگی زیاد می‌شود با ریز کردن دانه‌ها:

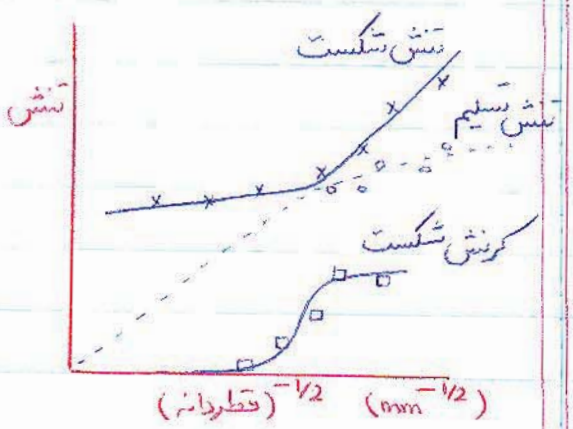


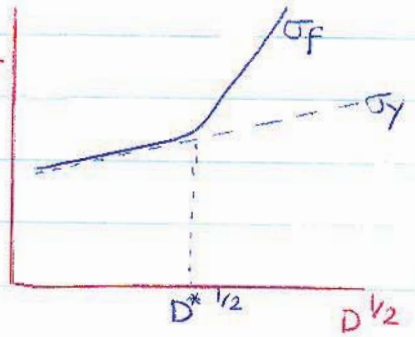
۱) تعداد مرزها (موانع جلوی رشد ترک) زیاد می‌شود.

2) ترک های اولیه داخل دانه ها هستند و طول ترک محدود به اندازه‌ی دانه میشود و K دیگر به K_{IC} نمی رسد. (در اینجا خزش مطرح نیست)



* دمای تبدیل با ریز کردن دانه ها، کم میشود.





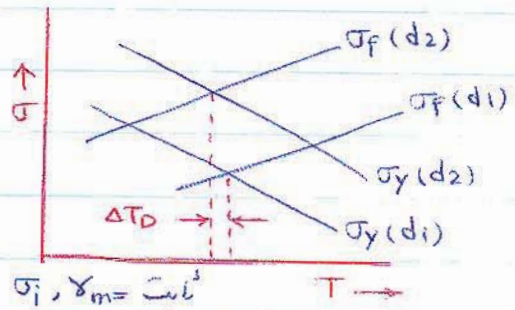
در ریزتر از D^* ابتدا σ_y می ریزیم و بعد به σ_f یعنی تغییر شکل پلاستیک داریم. هرچه اختلاف σ_y و σ_f بعد از D^* (ریزتر) بیشتر باشد بهتر است.

$$\sigma_{ys} = \sigma_i + K_y d^{-1/2}$$

کار تغییر شکل پلاستیک

$$\sigma_f \sim \frac{4G\gamma_m}{K_y} d^{-1/2}$$

چه کار کنیم هم چقرمگی و هم استحکام زیاد شود؟



$d_2 < d_1$

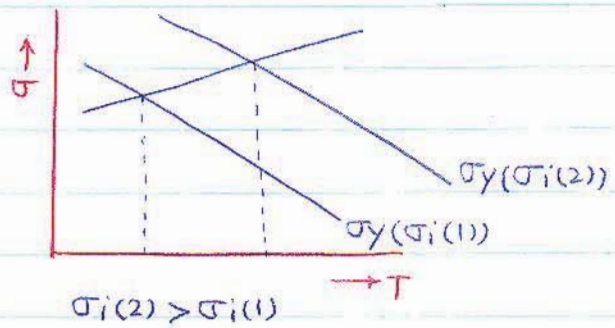
محل برخورد σ_y و σ_f، دمای تبدیل را نشان میدهد.

با ریز کردن دانه ها می توان این کار را کرد. هم σ_y زیاد شده است و هم دمای تبدیل کاهش یافته ← چقرمگی زیاد شده است.

σ_i : تنش اصطکاکی : تنش لازم برای

شروع حرکت نابجائی ها در عیاب مرزدانه .

غیراز مرزدانه ، هرعاملی استحکام را زیاد کند ،



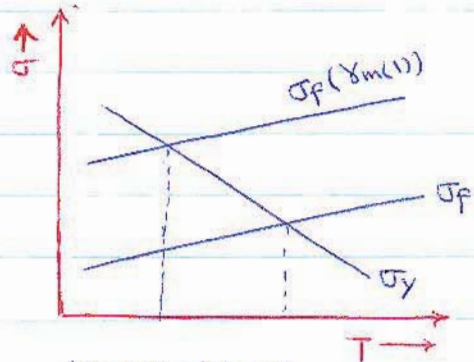
$\sigma_i(2) > \sigma_i(1)$

σ_i زیادمیشود : ذرات نازدرم

d, γ_m = ثابت

استحکام زیادشده است اما چقرگی کاهش یافته است .

دمای تبدیل کم شده و چقرگی زیاد



شده اما استحکام ثابت مانده است.

$\gamma_m(1) > \gamma_m(2)$

پس تنها عامل برای پاسخ به سئوال قبلی ، ریزکردن

d, σ_i = ثابت

دانه هاست . γ_m : تغییرشکل پلاستیک درروش ترک است . میتوان با

افزایش سرعت نابجائی ها و تغییر دما ، میتوان γ_m را تغییرداد.

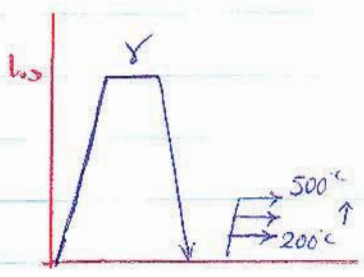
دما زیاد شود ← γ_m زیادمیشود .

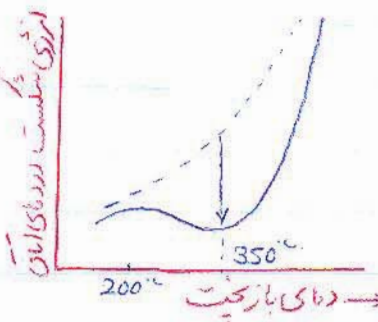
تردی های متالورژیکی :

باایجاد ماارتنزیت انرژی

شکست کاهش می یابد

و باید بازپخت شود .





هرچه دمای بازپخت زیاد شود، انرژی هم زیاد میشود فقط در یک دمائی این مورد کاهش می یابد.

علت اصلی این پدیده : (این پدیده در فولادهای آلیاژی دیده میشود)

- جدایش عناصر ناخالصی در مرزدانه‌ها مثل Sb ، N ، S ، P ، Sn . ← کاربیدها تردتر میشوند.

- شرایط تردی با شروع رسوب‌های سمنتیت همراه است.

- این تردی ناشی از رسوب کاربیدها در مرزدانه‌های γ اولیه است که با P و S و ... تردشده‌اند.

- جهت جلوگیری باید از بازپخت کردن مارتنزیت در این محدوده دمائی جلوگیری کرد.

- افزودن Si ، Mn دمای تردی به دماهای بالاتر انتقال می‌دهد. ← از مارتنزیت بازپخت در دمای 350°C میتوان استفاده کرد. (۱.۵-۲٪ سیلیسیم، این دما را تا 400°C افزایش می‌دهد.)

تردی تمپر (TE) :

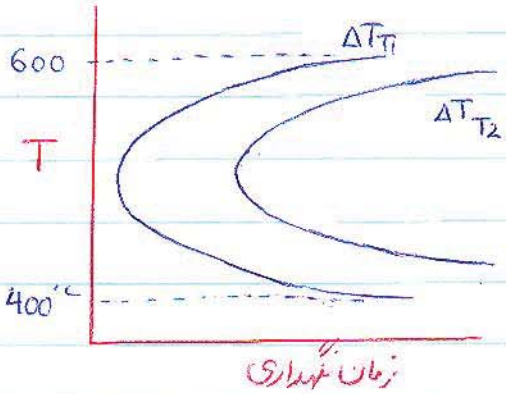
این تردی در فولادهای آلیاژی که به آهستگی در گستره‌ی دمایی 400-600°C سرد و یا بطور تک دما گرم شوند رخ میدهد.

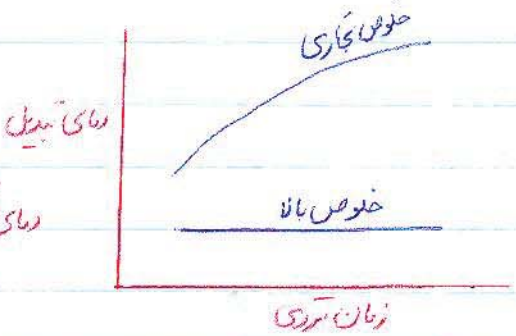
این تردی همراه با افزایش دمای تبدیل تردی به نرمی و شکست مرزدانه‌ای است. (مرزهای γ اولیه)

ناخالصی دارد

این تردی در فولادهای آلیاژی تجاری رخ می‌دهد. تردی در اثر جدایش عناصری مثل Sb ، P ، Sn و As (به ترتیب شدت) در مرزدانه‌های γ اولیه به هنگام نگهداری در گستره‌ی دمایی فوق می‌باشد.

تأثیر زمان نگهداری بر میزان انتقال دمای تبدیل:





آستنیوان بیشترین تأثیر را دارد. (کمترین چقرگی را می‌دهد در یک حد معین نسبت به دیگر نمونه‌ها)

ترک‌های ناشی از محیط:

مشخص شده که وقتی ضریب شدت تنش اولیه به مقدار زیادی کمتر از K_{IC} باشد، شکست رخ می‌دهد. این نوع شکست معمولاً در اثر رشد ترک‌ها با ابعاد بحرانی است و در نتیجه ضریب شدت تنش اولیه به مقدار K_{IC} می‌رسد. رشد ترک می‌تواند با فرایندهای مختلفی رخ دهد. مکانیسم رشد ترک‌های زیر بحرانی ناشی از واکنش متقابل بین تنش استاتیکی و محیط است. از جمله SCC، تردی هیدروژنی (HE) و تردی فلز مایع (LME).

تردی هیدروژنی:

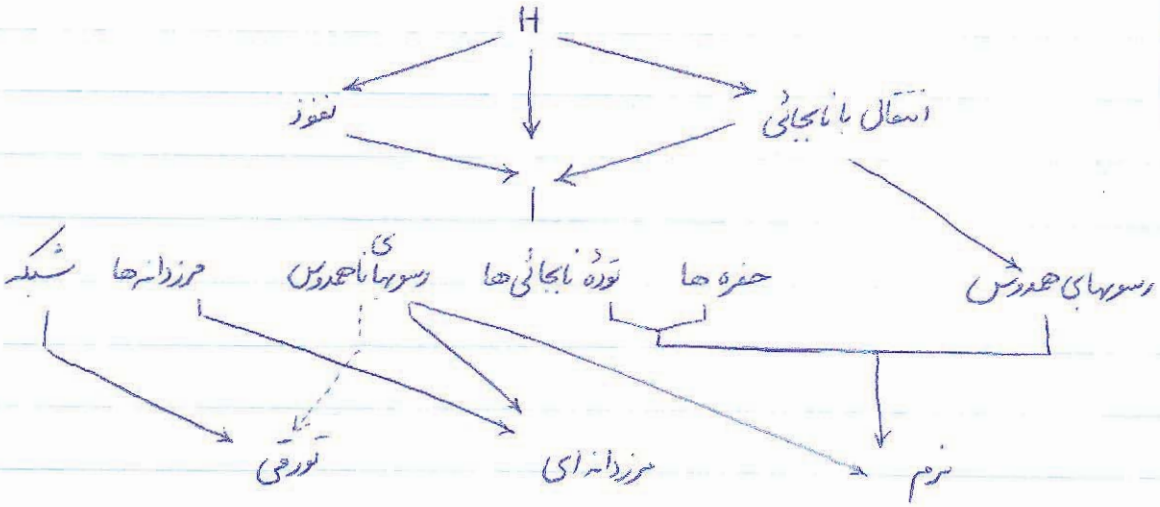
هیدروژن با مکانیسم‌های مختلفی باعث تردشدن مواد می‌شود:

مکانیسم های فشار سطحی ، فشار زیاد ناشی از تخلیل های گازی هیدروژنی باعث رشد ترک میشود .

در محیط های هیدروژنی کم فشار ، هیدروژن تحت تنش نوک به مناطق با تنش کششی سه بعدی نفوذ کرده و برای کاهش استحکام چسبندگی با فلز واکنش می دهد .

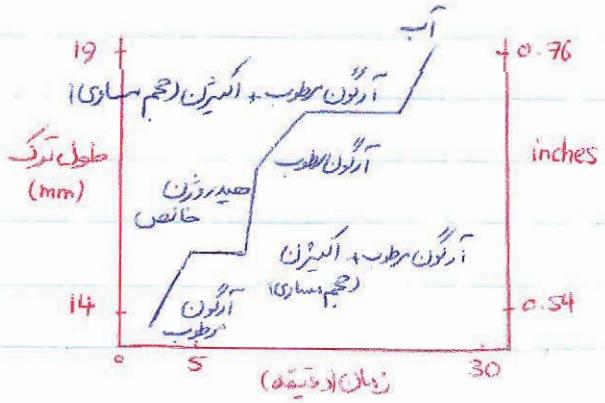
هیدروژن نیز طرکاهش انرژی سطحی با سطوح داخل فلز (سطوح آزاد) واکنش می دهد .

محل های جایگاهی هیدروژن :



۸۷/۱/۱۸

رشد ترک نسبت به زمان در محیط های مختلف :

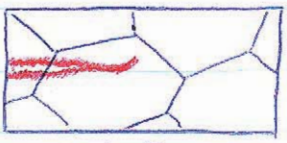


در محیط های H_2 خالص ، آب و Ar مرطوب

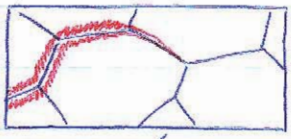
افزایش طول ترک داریم اما در محیط حاوی O_2

بدلیل اکسیدشدن سطح فولاد ، افزایش طول ترک نداریم . در محیط حاوی H_2 شیب منحنی بیشتر است .

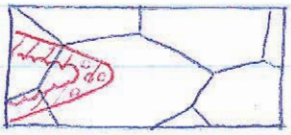
نوع شکست در محیط هیدروژنی :



K متوسط (شکست درون دانه ای)



K کم
(شکست مرز دانه ای)



K بالا
(شکست نرم) ← هم پیوستن حفره ها

K کم ← فرصت مناسب وجود دارد برای نفوذ هیدروژن از مرز دانه ها

تردی هیدروژنی ← چند عامل بستگی دارد :

۱ ـ موقعیت اولیه و فرم هیدروژن (بصورت گازی یا مولی یا ...)

۲ ـ واکنش های جایگاهی هیدروژن از محل تولید ← محل هایی که با فلز واکنش انجام می دهد.

۳ ـ خود مکانیزم تردی هیدروژنی .

ترک خوردگی ـ تنشی (SCC) :

یکی از مهم ترین الگوها : گسیختگی لایه های نازک می باشد. یعنی حل شدن آندی در رأس ترک .

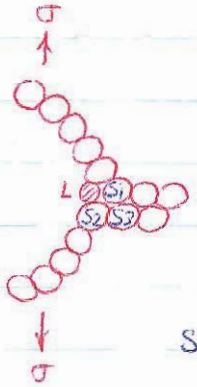
در رأس ترک تمرکز تنش داریم ↑

لایه محافظ در قادرت رأس ترک در اثر تغییر شکل پلاستیک شکسته شده (لایه محافظ دورتر از رأس ترک دست نخورده باقی می ماند) بنابراین یک سل الکتریکی ایجاد میشود که فلز آندی لایه محافظ دست نخورده کاتد می باشد ← فلز اصلی تحت حل شدن آندی قرار می گیرد و ترک رشد می کند .

σ ثابت است و از $\sigma_{y.s}$ کمتر است.

ترَدی فلز مایع: Liquid Metal Embrittlement

وقتی فلزات نرم باریک لایه نازک در حد میکرون از یک فلز مایع پوشش داده شوند و سپس در کشش بارگذاری شوند، تنش و کرنش شکست فلز به میزان زیادی کاهش می‌یابد.



مکانیسم: اتم فلز مایع بصورت شیمیائی جذب شده و باعث کاهش استحکام پیوندهای اتمی در محل‌های تمرکز تنش می‌شود. مایع L استحکام پیوند اتمی بین اتم‌های S1، S2 و S3 را کاهش می‌دهد.

ارتباط بین K_{IC} و خواص مکانیکی:

1. $K_{IC} \cong n\sqrt{2E\sigma_y \frac{\epsilon_f}{3}}$

2. $K_{IC} \equiv [2\sigma_y E (\frac{\pi}{6})^{1/3} D]^{1/2} f^{-1/6}$ — D: قطر ذرات ترک خورده

3. $K_{IC} \equiv En\sqrt{2\pi d_T}$

۱ ← ارتباط بین K_{IC} و خواص کششی. مبنای فرمول: کرنش حقیقی را به COD مرتبط کردند.

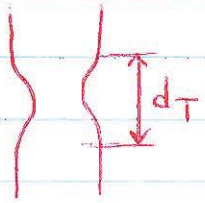
ϵ_f کرنش حقیقی در آزمایش کشش . n: توان کارسختی

$\frac{1}{3}$: بدلیل حالت p_strain بودن

(۵۰) ۸۷ از ۱۸

2 ← برمبنای ترک خوردن ذرات بزرگ و به قطر D . مکانیزم شکست بهم پیوستن ورقه‌ها اولیه است . D: قطر ذرات ترک خورده f: کسر حجمی ذرات ...

3 ← d_T : منطقه‌ی necking . شروع $\epsilon = n$



neck است . مبنای فرمول: شکست در منطقه‌ای کوچک و در حلوی ترک رخ می‌دهد و تنگ کرنش در این منطقه مبادی باکرنش ناپایداری در آزمایش کشش باشد. $(\sigma = K\epsilon^n)$

حل مسائل:

$$K_{IC} = m\sigma\sqrt{\pi a} = 1.12 \cdot \frac{2}{\pi}\sqrt{\pi a_f} \qquad (18.1$$

$$L\text{-}T: \quad 29.7 = 1.12 \times \frac{2}{\pi}\sqrt{\pi a_f}$$

۳ تا a_f بدست می‌آید ، max را انتخاب می‌کنیم.

$D_{\text{مخزن}} = 6.1\ m$ $\quad t = 25.4\ mm$ $\quad P = 17.5\ MPa$ $\quad (34.1$

$E = 210\ MPa$ $\quad \sigma_y = 2450\ MPa$ $\quad G_c = 131\ kg/m^2$

$$\sigma = \frac{Pr}{t} = \frac{17.5 \times 3050}{25.4} = 2411\ MPa \qquad \sigma = \sqrt{\frac{EG}{\pi a}}$$

$$2411 = \sqrt{\frac{210 \times 131 \times 10^{-5}}{\pi \times a_f}} \qquad 131\ \frac{kg}{m^2} = 131 \times 10^{-5}\ \frac{N}{mm^2}$$

ترک را داخلی فرض کرده ایم .

$$K = \frac{PS}{Bw^{1/2}} f\left(\frac{a}{w}\right) \qquad (15.1$$

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{w}\right)^{1/2}}{2\left(1+\frac{a}{w}\right)\left(1-\frac{a}{w}\right)^{3/2}} \cdot \left[1.99 - \frac{a}{w}\right] \cdot \left(1-\frac{a}{w}\right)\left(2.15 - 3.93\frac{a}{w} + 2.7\frac{a^2}{w^2}\right)$$

$\sigma_y = 800\ MPa$ $\quad S = 200\ mm$ $\quad P_f = 59\ KN$ $\quad W = 50\ mm$

$a = 25\ mm$

$f\left(\frac{a}{w}\right) = A$ $\quad B = 10\ mm$ (فرض) $\quad \xrightarrow{\text{حایگذاری}}\ K_Q = D$

شرط اعتبار: $t, a \geq 2.5\left(\frac{K_Q}{\sigma_y}\right)^2$ $\quad$ (t ↑ B) هم در مورد B و هم در مورد a باید برقرار باشد.

خستگی: Fatigue

مراجع.

خستگی فلزات، علی اکبر اکرامی، مرکز نشر دانشگاهی

تغییر شکل و مکانیک شکست مواد و آلیاژهای مهندسی، علی اکبر اکرامی، انتشارات شریف

شکستی که در اثر تنش های تناوبی ایجاد میشود، خستگی نام دارد و این تنش کمتر از تنش شکست در حالت کشش یا فشار است.

مطابق با معیار ASTM :

تغییرات ساختاری را طی که بطور موضعی و تدریجی در یک ماده صورت می گیرد و طی ماده در یک یا چند نقطه تحت تنش ها و یا کرنش های تناوبی قرار گیرد. اگر تعداد چرخه ها به اندازه کافی باشد ممکن است این تغییرات ساختاری منجر به ایجاد ترک و یا شکست کامل شود.

این تغییرات آنی نیست. و بطور ماکروسکوپی تغییر شکل پلاستیک نداریم.

موضعی: لازم نیست کل قطعه تحت تنش های تناوبی قرار گیرد.

این نوع شکست (خستگی) خطرناک است. چون بدون اخطار قبلی رخ می دهد.

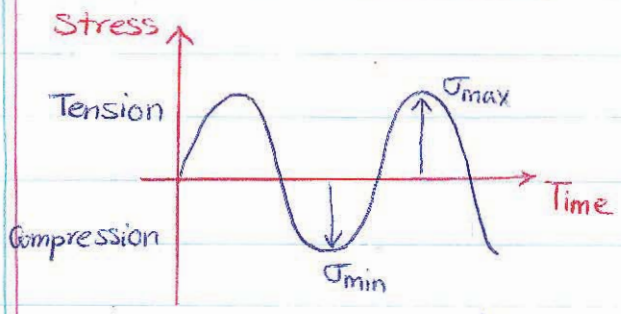
ظاهر شکست خستگی تردد است. از نظر ماکروسکوپی سطح شکست عمود بر جهت تنش کششی اصلی است.

* شرایط لازم برای شکست خستگی :

تنش کششی max، حداکثر باشد - دامنه تغییرات تنش زیاد باشد - تعداد سیکل ها زیاد باشد (یا تعداد چرخه ها)

علاوه بر این ۳ مورد، زمان و محیط و ... هم مؤثر هستند.

بارگذاری‌های تناوبی یا تکراری :



گستره تنش $\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

دامنه تنش $\sigma_a = \frac{1}{2}\sigma_r$

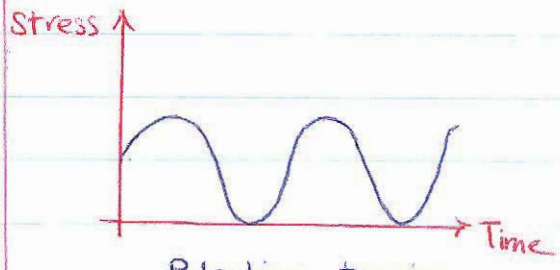
تنش متوسط $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$

در این جا : $\sigma_m = 0$

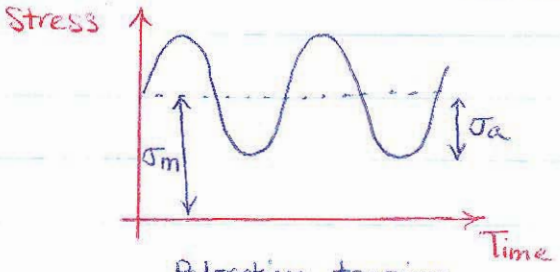
Alternative stress

محورهای دوران بیشتر این نوع بارگذاری را تجربه می‌کنند یعنی $\sigma_m = 0$.

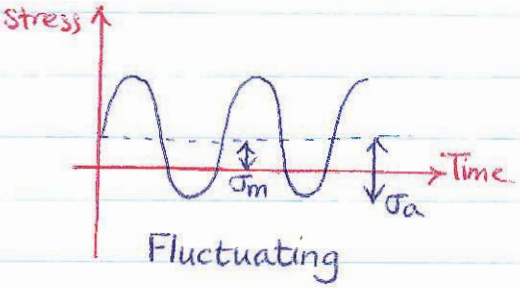
نوع دیگر بارگذاری :



Pulsating tension

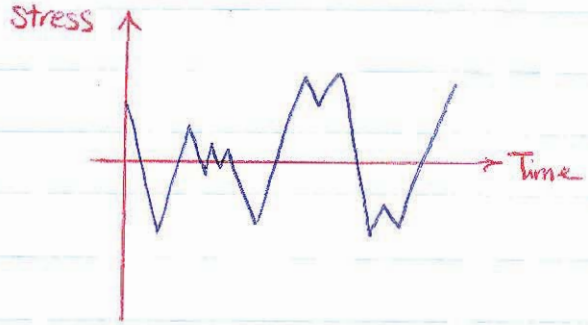


Pulsating tension
Fluctuating



Fluctuating

یک تنش کششی دائم روی قطعه اعمال میشود.
قطعات جوشکاری شده که تنش پسماند وجود دارد.



بارگذاری بی‌نظم : بال هواپیما (سرعت هواپیما، سرعت باد، جهت وزش باد و ...)

* با روش‌هایی می‌توان این بارگذاری را منظم کرد.

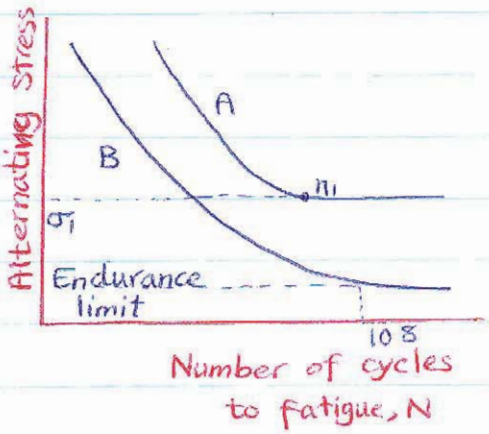
منحنی های خستگی :

کنترل تنش Stress Control ← S_N

کنترل کرنش Strain Control ← ε_N

N : تعداد دور تا شکست

منحنی S_N :



A : ماده دارای حد خستگی است و

در تنش های کمتر از σ_1 ، خستگی

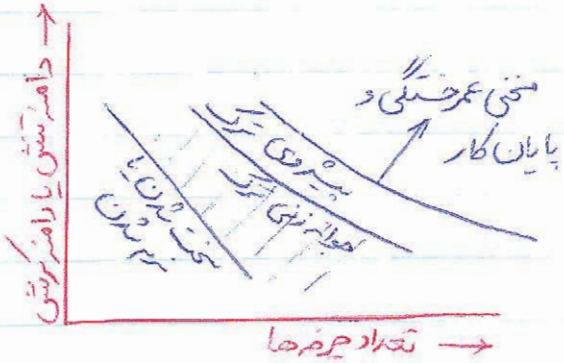
رخ نمی دهد.

پایان آزمایش در محدوده ی N_1 است. این منحنی بیشتر در مورد مواد آهنی بدست می آید.

B : منحنی بصورت افقی نمیشود و در هر تنشی خستگی داریم. پایان آزمایش را در 10^8 سیکل در نظر می گیریم. در اینجا دیگر حد خستگی نداریم و از استحکام خستگی استفاده می کنیم : تنش لازم برای شکست در یک سیکل معین. در این مورد 10^8 سیکل، استحکام خستگی است.

فرایند خستگی :

مراحل مختلف خستگی :



در حالت میکروسکوپیک نیاز است تغییر شکل

پلاستیک داشته باشیم.

فرایند خستگی شامل ۳ مرحله است:

۱ - نرمی خستگی / سختی خستگی:

نرم یا سخت شدن در اثر خستگی - حالت اولیه ماده در دامنه‌ی تنش و کرنش سختگی دارد.

این مرحله با تغییرات در ریز ساختار کل حجم بارگذاری شده مشخص می‌شود.

۲ - مرحله جوانه زنی ترک:

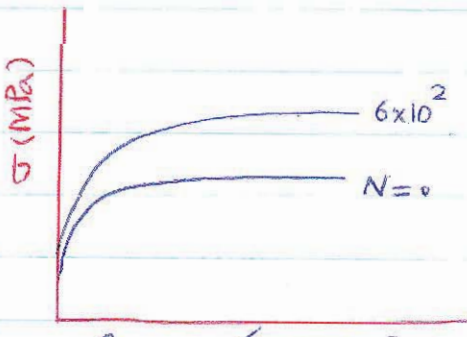
در این مرحله ترک های ریز در حجم کمی از ماده (اغلب در سطح) بوجود می آید.

۳ - پیشروی ترک:

در این مرحله عامل کنترل کننده‌ی رشد ترک، تمرکز تغییر شکل پلاستیک چرخه‌ای در منطقه موسان است.

* ۱ در مرحله سخت یا نرم شدن تغییرات ریز ساختاری بوجود می آید که بر کلیه خواص از جمله خواص مکانیکی (مثل نابجائی ها) تأثیر می گذارد.

با انجام تنش سیکلی، نمودار تنش - کرنش



بالا رفته ← سخت شده است.

نحوه در این حالت برنج α است.

قسمت پلاستیک دیده میشود.

* مدول الاستیک تغییر نمی کند؛ به دامنه نوع ماده بستگی دارد.

تعداد سیکل زیاد ← بیشتر سخت میشود. اول بارگذاری سیکلی و بعد تنش کششی

(۵۶) ۸۷/۱/۲۰

تعیین نرم یا سخت شدن:

۱. برای مشخص شدن سخت یا نرم شدن در هنگام خستگی بهترین روش اندازه‌گیری حلقه پسماند است.

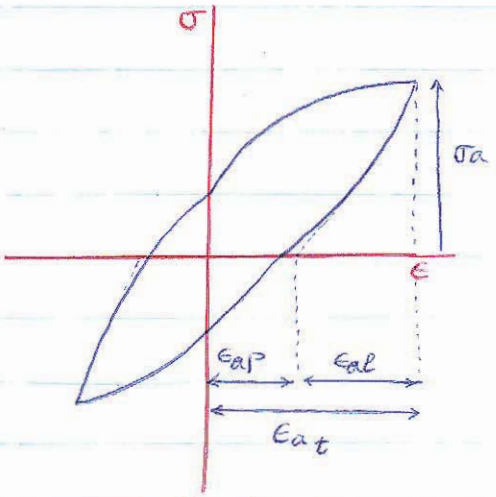
۲. استفاده از منحنی تنش کرنش چرخه ای

مواری مثل فولاد کم کربن (با تنش تسلیم نا پیوسته) در مراحل اولیه خستگی هم نرم میشوند و هم سخت.

مواریکه قبل از خستگی کار سرد شده اند (کار سختی اتفاق افتاده)، در مراحل اولیه خستگی نرم میشوند.

مواریکه قبل از خستگی نرم شده باشند (مثلاً آنیل، تابکاری) در مراحل اولیه خستگی، سخت میشوند.

۱. حلقه پسماند: Hystersis Loop



بسته به نوع آزمایش یعنی کنترل تنش یا کنترل کرنش و نیز بسته به نرم یا سخت شدن ماده، عرض و یا ارتفاع حلقه می تواند کم و یا زیاد می شود.

(آزمایش کنترل کرنش است)

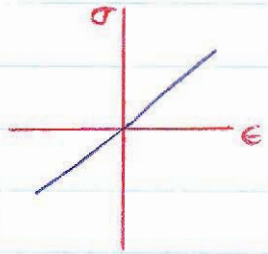
ε_{ap} دامنه کرنش پلاستیک

با رسم حلقه‌های بعدی می توان فهمید ماده نرم شده یا سخت. اگر در سیکل بعدی برای رسیدن به ε_{at}، σ_{a_1} بیشتری نیاز بود، ماده سخت شده است. این افزایش در سخت شدن تا ∞ نمی رود و به حالت اشباع می رسد.

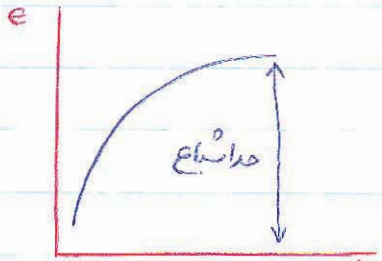
اگر برای رسیدن به ε_{at} در سیکل های بعدی، σ_{a_1} کمتری نیاز بود، ماده نرم شده است.

در کنترل تنش، اگر منحنی باز شده بود ← ماده نرم تر شده است و اگر منحنی جمع شد، سخت تر.

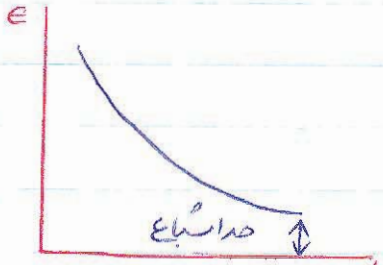
مواری که رفتار کشسان دارند، منحنی پسماند وجود ندارد:



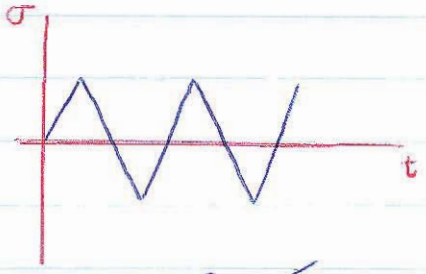
در حالت کنترل تنش، σ ثابت (Stress Control)



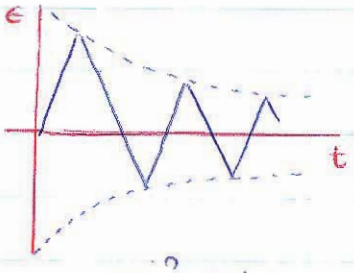
نرم شده است



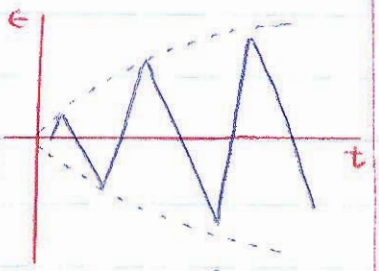
سخت شده است



کنترل تنش



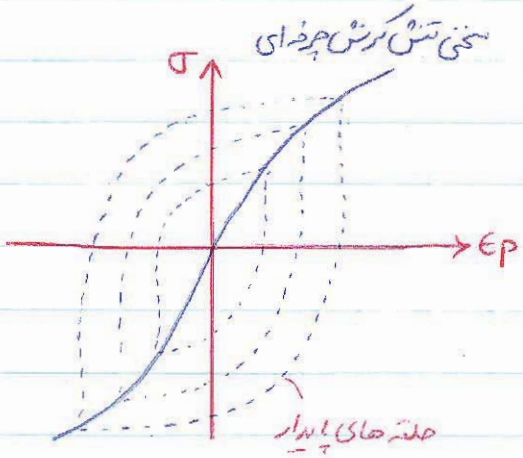
سخت شدن



نرم شدن چرخه‌ای

همین ۳ نمودار را در حالت strain control داریم.

۲. منحنی تنش کرنش چرخه‌ای:



این منحنی از متصل کردن رأس حلقه‌های پسماند در حالت اشباع یا حلقه‌های پایدار به دست می‌آید.

هر منحنی اشباع مربوط به یک σ_{ai} است.

(۵۸) ۸۷/۱/۲۰

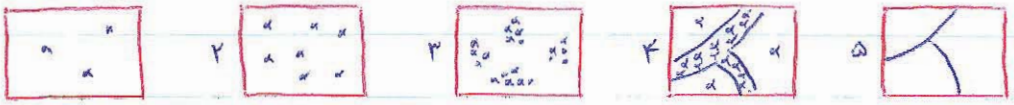
منحنی تنش-کرنش چرخه‌ای را با منحنی تنش کرنش در حالت کشش مقایسه می‌کنیم اگر از منحنی کشش بالاتر بود یعنی سخت شده است در غیر اینصورت نرم شده است. (خستگی نرمی)

۸۷/۱/۲۵

علت نرم شدن و سخت شدن خستگی:

علت تغییر ساختار ناجائی‌هاست. در سیکل‌های زیاد ساختار سلولی ناجائی شکل می‌گیرد (N=2000)

در N=0 ناجائی دیده نمی‌شود. در مورد Fe در N=1000، دانه‌های فرعی هم تشکیل می‌شود.



یک دانه

۱: ماده در حالت آنیل هم ناجائی دارد (قبل از تغییر شکل پلاستیک)

در مراحل ۲ و ۳ تغییر شکل ایجاد کرده‌ایم. ۳: تودهٔ ناجائی‌ها

۴: ایجاد ساختار سلولی (۳ سلول داریم) اکثر ناجائی‌ها در دیوارهٔ سلول‌ها واقعند.

۵: دیواره از ناجائی خالی می‌شود و از این سلول‌ها مرز فرعی بوجود می‌آید. مرزها شارپ می‌شوند

در صورت ادامه تغییر شکل ← subgrain ها به سمت کشش، کشیده می‌شود.

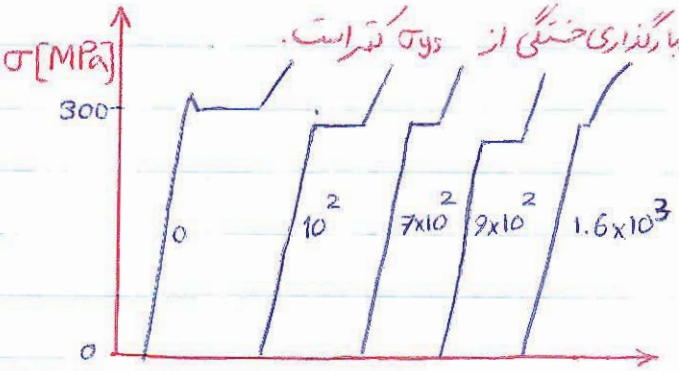
از مرحله‌ی ۴ تا ۵: ناصله مؤثر لغزش در ۵ بیشتر است (موانع کمتری وجود دارد)

قبل از ایجاد ساختار سلولی اگر خستگی صورت گیرد، ماده سخت می‌شود در مراحل اولیهٔ خستگی.

اگر بعد از ایجاد ساختار سلولی باشیم، ماده نرم می‌شود.

برخی مواد در مراحل اولیه هم سخت میشوند و هم نرم . این مواد استحکام تسلیم ناپیوسته دارند (فولاد کم کربن)

(تنش اعمالی کمتر از تنش اصلی) تنش در بارگذاری خستگی از σ_y کمتر است.

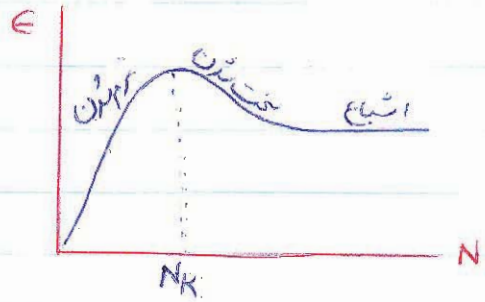


منحنی بعد از N سیکل بارگذاری

خستگی بعد کشش نمونه رسم

شده است.

کرنش لود با افزایش تعداد سیکل ها کم میشود. تنش تسلیم هم کم میشود. ← نرم شدن صورت میگیرد تا مرحله‌ی 9×10^2 . از 1.6×10^3 سخت شدن را داریم .



در کنترل تنش :

تا N_K نرم شدن داریم

از N_K تا حد اشباع، سخت شدن داریم

و در مرحله اشباع تغییری نخواهیم داشت . تنش اعمالی بیشتر باشد، N_K به سمت اعداد کمتر می رود .

علت این رفتار (نرم شدن و سخت شدن) :

وجود اتم های بین نشین (ات د ...) نابجایی ها قفل میشوند ← تنش تسلیم بالا و پایین .

با اعمال تنش سیکلی زیر تنش تسلیم ، در برخی دانه ها ← حد تنش تسلیم می رسیم و در این دانه ها نابجایی ها

از موانع آزاد میشوند و شروع به حرکت کرده ← تغییر شکل پلاستیک . با افزایش تعداد سیکل ها تعداد دانه هایی که نابجایی ها از آن ها آزاد شده، زیاد میشود و همزمان تغییر شکل پلاستیک هم افزایش خواهد داشت. با افزایش تغییر شکل پلاستیک ، کارسختی نیز افزایش می یابد . تا وقتیکه آزاد شدن نابجایی ها بر کاهش تغییر شکل در اثر کارسختی غلبه کند ؛ عمل نرم شدن انجام میشود . تغییر شکل ناشی از

درصورت عکس، سخت شدن صورت می گیرد . N_K مرز این دو حالت است .

اگر دامنه ی بارگذاری از تنش تسلیم بیشتر باشد :

در همان نیم سیکل اول از این منطقه رد شده ایم و نباید انتظار نرم شدن داشته باشیم چون در نیم سیکل اول قسمت نرم شدن و یا حتی قسمتی از سخت شدن و یا حتی ممکن است ← مرحله ی اشباع رسیده باشیم که این به دامنه ی بارگذاری ربط دارد .

بازگشت این اتم ها به نابجایی ها و قفل مجدد بعد از رهایی ، در دمای اتاق چندین ماه طول می کشد .

* خوانده زنی ترک :

- محل های خوانه زنی ترک :

۱- نوارهای لغزش خستگی : معمولترین روش خوانه زنی است و ماهیت آن تمرکز لغزش در دانه ها است

۲- مرز دانه ها : خوانه زنی در مرز دانه ها مخصوص خستگی با کرنش بالاست مخصوصاً در دمای بالا

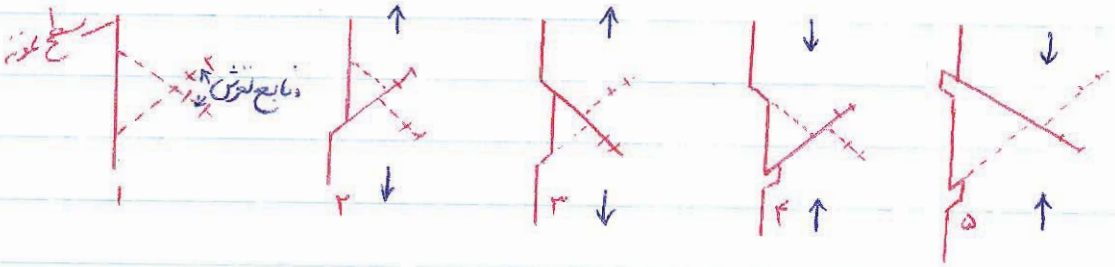
۳- آخال های سطحی : این نوع خوانه زنی مخصوص بعضی آلیاژهای تجاری است که دارای ذرات با اندازه کافی بزرگ باشند

(۶۱) ۸۷/۱/۲۵

مکانیزم های جوانه زنی ترک :

جوانه زنی ترک در اثر تغییر شکل موسان می باشد و نوارهای لغزش خستگی مکان های مناسب می باشند . معمولاً ریز ترک ها از ناحیه فرورفتگی های سطح جوانه می زنند . یعنی از ریز فاق هایی که در اثر تغییر شکل موسان حرفه ای تشکیل میشوند .

مکانیزم ۱ - کاتر ل - هال :



در سیستم متقاطع ارتعاش میکنیم .

۱ و ۲ : نیم سیکل کشش : یکی از سیستم ها شروع به لغزش می کند ← بله در سطح ۱

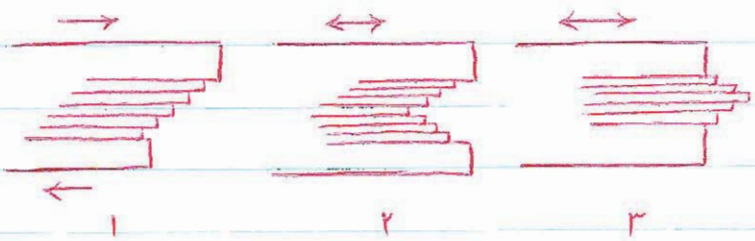
بالاخره سیستم بعدی هم لغزش خواهد کرد .

۳ : در فشار ابتدا سیستمی فعال میشود که در کشش فعال شده بود . در فشار ، لغزش عکس کشش است ← فرورفتگی ایجاد میشود . (intrusion)

۵ : برآمدگی ایجاد میشود در اثر لغزش در سیستم دوم . (extrusion)

کاتر ل و هال معتقدند ، این برآمدگی و فرورفتگی ها باعث تمرکز تنش در سطح میشوند ← از این محل ها جوانه زنی ترک شروع میشود .

مکانیزم ۲ ـ ورود :



تشکیل ریز ترک بارشد تدریجی [illegible] فرورفتگی ها یا حرکت نسبی لایه های موازی است.

دراین مکانیزم فرض میشود که فرورفتگی ایجاد شده مثل یک تمرکز تنش عمل نموده و لغزش بیشتر

درانتهای فرورفتگی را تحریک می کند.

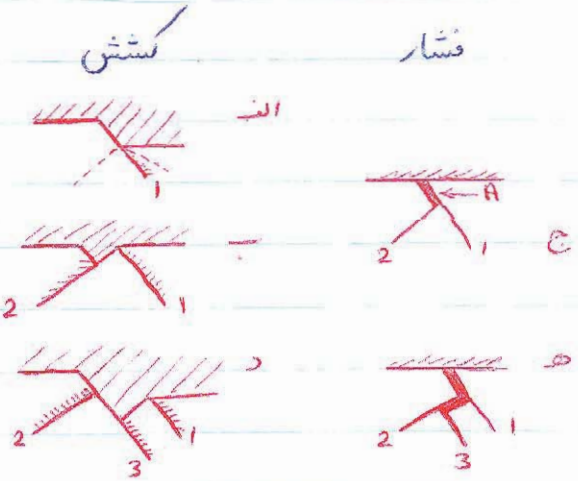
۱ : لغزش صفحات ۲و۳ : بارگذاری خستگی

۲ ← فرورفتگی ، عمیق و عمیق تر شده ← ترک شکل می گیرد [خود فرورفتگی عمیق شده

و ترک میشود و تمرکز تنش نداریم]

۳ ← برآمدگی حلوی رود و ادامه خواهد داد

مکانیزم ۳ ـ نیومان : فشار کشش



برمبنای لغزش درشت در صفحات

لغزش موازی و متوالی ، ترک

از پله های لغزش درشت شروع

میشود . این مکانیزم برمبنای کاهش چسبندگی است . در فشار همه چیز به حالت اول برمی گردد

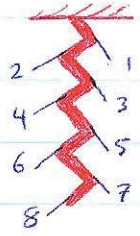
اما در منطقه ی A ، کاهش چسبندگی داریم . در "د" سیستم سوم هم فعال میشود .

درنهایت و ادامه به همین صورت ، یک ترک زیگزاگ خواهیم داشت .

مکانیزم فیودان هم بر مبنای لغزش است، منتها لغزشی که عدم چسبندگی ایجاد می‌کند.

در اثر تغییر شکل پلاستیک دگرهای بوجود آمده موجب تشکیل اکسید میشود. در برگشت این لایه‌ی اکسیدی موجب عدم چسبندگی کافی میشود.

در عمل چنین چیزی دیده نمیشود (لایه‌ی اکسیدی)

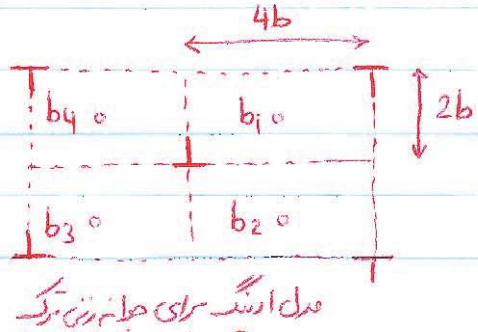


۸۷/۲/۱

کاهش چقرمگی در صفحه لغزش: ۱- الگوی نوجیتا

نابجائی‌های وقتی که فاصله جدایش در قطب کم است ممکن است همدیگر را حذف کنند و حوزه ترک تشکیل شود. - هنگام بارگذاری چرخه‌ای در دو صفحه لغزش موازی تجمع نابجائی‌ها با علامت مخالف انجام می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد که اگر $h > 1\,nm$ باشد نابجائی‌ها از همدیگر می‌گذرند و اگر $h < 1\,nm$ باشد نابجائی‌ها اگرچه در یک صفحه نیستند اما همدیگر را حذف می‌کنند. اگر n نابجائی در این واکنش شرکت کند، در منطقه‌ای بطول nb، کاهش چقرمگی را داریم. بعبارت دیگر، ترکی بطول nb ایجاد شده است.

۲- الگوی اوسینگ:



مدل اوسینگ برای جابه‌رفتن ترک

نابجائی مثبت و منفی داریم. در نقاط ۱ تا b_4 با

(۹۴) ۸۷/۲/۱

ترکیب میدان نابجایی‌ها، بیشترین انرژی را داریم. در این نقاط انرژی به گرمای بهمان زوب ماده برسد در این نقاط زوب موضعی بوجود آمده و ترک ایجاد میشود. (کاهش چسبندگی)

سایر مکانیسم ها:

* شکست ترد موضعی: ترک خوردن ذرات ترد فاز دوم در محل های تمرکز تنش ناشی از فاق های سطحی خستگی است. در مواد تک فاز این مکانیسم در انتهای فرورفتگی ها نیز عمل می‌کند.

* تمرکز تهی جای ها: در تغییر شکل چرخه ای تعداد بیشتری تهی جای تشکیل میشود تا تغییر شکل در یک جهت. ممکن است تهی جای ها تمرکز شده و حفره ایجاد شده و در اثر بهم پیوستن حفره ها ترک تشکیل شود.

جوانه زنی در مرز دانه ها:

1. لغزش بلوری بتدریج در مرز دانه حساس پله ایجاد می‌کند. تا اینکه ارتفاع پله ~ حدود 1.5 μm برسد. در این مرحله تمرکز تنش در پله برای پیشروی ترک در امتداد مرز و داخل نمونه کافی است.

2. از آنجا که مرزها تغییر شکل موضعی را متوقف می‌کند در مقیاس میکروسکوپی ناپایداری موضعی رخ میدهد و یک ریز فاق ایجاد می‌شود. با افزایش چرخه ها ریز فاق عمیق‌تر میشود تا حدی که تمرکز تنش در ریز فاق ایجاد ترک می‌کند.

عوامل موثر بر جوانه زنی :

اگر N_0 تعداد سیکل لازم جهت جوانه زنی و N_f تعداد چرخه لازم برای شکست خستگی باشد، نسبت $\frac{N_0}{N_f}$ معیاری است برای مرحله جوانه زنی.

* عوامل موثر بر جوانه زنی :

1_ دامنه بارگذاری ↑ ← کوتاه شدن مرحله جوانه زنی

2_ دما (وابسته به محل جوانه زنی ترک مقاومت اثر می‌گذارد) در مورد extrusion : دما ↑

← جوانه زنی راحت تر است. (تغییر شکل آسان تر است)

جوانه زنی در آخال ها : دیرتر بوجود می آید اگر دما زیاد شود چون ناپیوستگی هایی تواند دور بزند ← اثر عکس متقابل دارد.

3_ محیط : مثلاً علاوه بر خستگی، خوردگی مطرح باشد ← جوانه زنی ترک کوتاه تر میشود.

4_ وجود شیار ها یا محل های تمرکز تنش : (شکل هندسی قطعه) ← جوانه زنی ترک سریع تر رخ می‌دهد.

5_ حالت نهایی سطح قطعه، شامل تنش های پسماند، تفاوت در ترکیب شیمیایی، کار سختی لایه های سطحی، زبری سطح : چون ترک خستگی از سطح شروع میشود.

تنش های پسماند کششی مضر هستند ولی اگر فشاری باشند در خستگی مفید هستند. اگر تنش اعمالی باشد و تنش پسماند کششی باشد ← مثل اتراش دامنه بارگذاری است.

تقاوت در ترکیب شیمیائی : در اثر اعمال عملیات سطح مثل کربوره کردن یا دی کربوره شدن. این تفاوت اگر باعث ایجاد استحکام لایه سطحی شود، مقاومت به جوانه زنی ترک را افزایش می دهد (تغییر شکل پلاستیک در روی سطح ← تاخیر extrusion و intrusion)

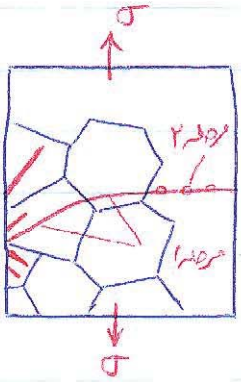
کار سختی لایه های سطح : توسط یکسری عملیات، تغییر شکل پلاستیک لایه های سطحی ← کار سختی ← افزایش مقاومت به جوانه زنی ترک.

زبری سطح : سطح زبرتر ← تمرکز تنش بیشتر ← کوتاه تر شدن مرحله جوانه زنی.

پیشروی ترک خستگی :

- مکانیسم های رشد ترک
- مراحل رشد ترک

مراحل گسترش ترک :



طول ترک در مرحله انتقال از مرحله ۱ به مرحله ۲ بسیگی به ماده و تنش اعمالی دارد اما بندرت از چند دهم mm تجاوز میکند.

گاهی ممکن است مرحله سوم نیز وجود داشته باشد و بیشتر در قطعات نازک دیده میشود بعلت تغییر کرنش صفحه ای به تنش صفحه ای. تنش اعمالی کمتر ← طول ترک در منطقه ی انتقال طولانی تر.

در مرحله ۱، ترک در طول صفحات با تنش برشی max و در مرحله دوم، عمود بر σ اعمالی است.

مرحله‌ی سوم هم در صفحات با تنش برشی max می‌باشد و شرایط p_stress است.

مدل‌های گسترش ترک : مرحله‌ی ۱

در تک‌بلور notch ، 45° قرار دارند و

تنش فشاری اعمال کرده‌اند اما ترک رشد نکرد

← تنش فشاری در اشاعه‌ی ترک نقش دارد

الف . مواد با لغزش تقاطعی آسان (مدل کند شدن موسمانی) (الف)

در مرحله‌ی ۱ ، تنش فشاری است و ترک رشد نمی‌کند .

در مرحله‌ی 2 ، تنش برشی موجب تغییر شکل پلاستیک و تنش نرمال ← سطح ترک موجب باز شدن ترک میشود . در اثر تغییر شکل پلاستیک ، شعاع رأس ترک زیاد میشود اما تنش فشاری سیکل بعدی موجب میشود رأس ترک دوباره تیز شود (طول ترک زیاد شده است)

ب . مواد با لغزش تقاطعی مشکل : (مدل بدون لغزش)

در سیکل فشار (نیم سیکل) ترک رشد نمی‌کند . در نیم سیکل کشش

ترک با mode 2 جابجایی صفحات دارد . نیم سیکل بعدی و

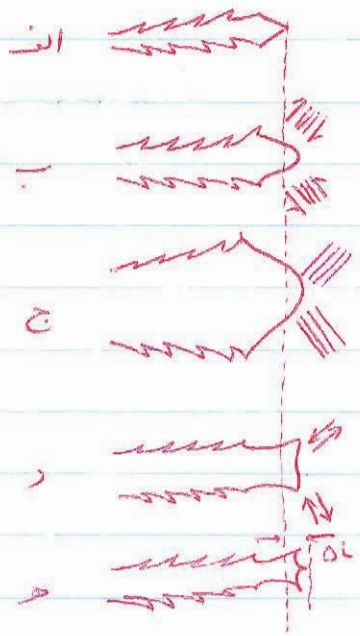
مؤلفه‌ی برشی اعمال تنش

فشار صفحات در جهت عکس حرکت می‌کند و ترکی با طول

$\frac{L_1+L_2}{2}$ ایجاد میشود که از L_1 بزرگتر است. (ب)

لغزش تقاطعی : وقتی نابجائی ← مانع می رسد اگر بتواند سطح لغزش را عوض کند .

گسترش ترک مرحله‌ی 2 :



ب : نیم سیکل کشش : تمرکز تنش در رأس ترک ←

تغییر شکل پلاستیک ← زیاد شدن شعاع رأس ترک

ج : نیم سیکل کشش : افزایش شعاع رأس ترک و

رشد ترک (همزمان با ب)

د : نیم سیکل فشاری : جهت لغزش عکس میشود و چون

ترک نیم دایره‌ای است buckling شده و شعاع مقل پیرو برای پیشروی ترک خستگی

رأس ترک کم میشود . (ρ ↓)

ه : نیم سیکل کشش . نقش نیم سیکل فشار ، کاهش م است .

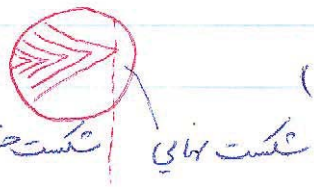
سطح مقطع شکست : ماکروسکوپی :

دو قسمت دارد : براق و کدر

براق ← شکست خستگی کدر ← مربوط به شکست نهایی (آخرین لحظه)

ترک در سطح رشد می کند تا $K = K_{IC}$ برسد . در سطح ، سطوح ترک روی هم می لغزند

و ساییده میشود . (در سیکل فشار ، سطوح روی هم قرار می گیرند)



* عوامل موثر بر سطح شکست : (میزان مناطق براق و کدر روی سطح)

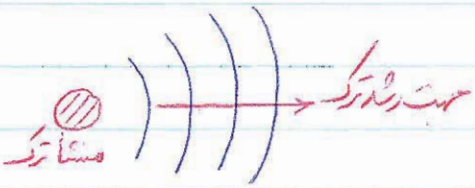
۱ ـ دامنه‌ی تنش کمتر ← منطقه‌ی خستگی طولانی‌تر.

۲ ـ میزان تمرکز تنش ← تأثیرگذار دارد.

۳ ـ نوع بارگذاری ← مثل Rotating bending

سطح شکست میکروسکوپی :

از TEM و SEM استفاده می‌شود :

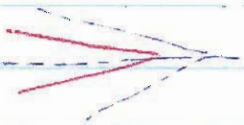


بیشتری خطوط خستگی دیده می‌شود :

در داخل انحنا باید دنبال منشأ ترک گشت

علت ایجاد خطوط خستگی :

۱) عمود بر صفحه : جبهه‌ی ترک



با رشد ترک، جبهه ترک جلوتر می‌آید. با تغییر شعاع رأس ترک و میزان تنش، اختلاف سطحی در مقیاس میکرو ایجاد می‌شود. هر خط پایان یک نیم سیکل کششی است.

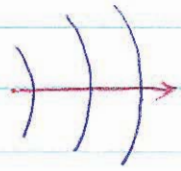
2) اکسید شدن باعث اختلاف سطح می‌شود. ترک حین رشد ـ محیط تر اکثیر می‌شود (در تر)

ترک در مرحله‌ی اول، مقاومت لایه‌ی اکسیدی بیشتر است

اگر خط صاف باشد ≡ یعنی تنش در همه جهات یکسان است

(۷۰) ۸۷/۲/۱

رشد کرده . اما چون رابطه‌ها p-stress داریم ، میزان رشد کمتر است و در وسط



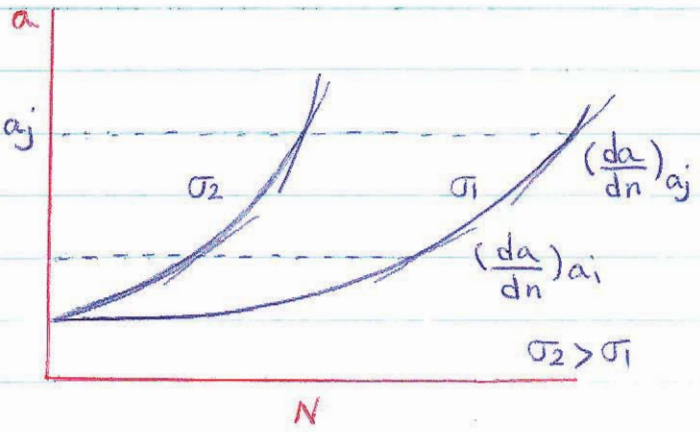
قطعه p-strain داریم :

۸۷/۲/۳ یکی از کاربردهای این خطوط : سرعت اشاعه‌ی ترک را در آن ماده می‌توان

بدست آورد و با شمارش این خطوط عمر تقریبی قطعه را بدست می‌دهد چون مرحله‌ی جوانه‌زنی و

مرحله‌ی اول را به ما نشان نمی‌دهد .

سرعت اشاعه‌ی ترک :



تغییر طول ترک به سیکل

سرعت اشاعه‌ی ترک به طول

ترک بستگی دارد .

تنش هم در سرعت اشاعه‌ی ترک نقش دارد ؛ پس :

$$\frac{da}{dN} = f(a, \sigma)$$

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

K : عدد ثابت

$n \sim 1-2$ $\quad m \sim 2-7$

* رابطه‌ی ریگر : (پاریس)

$$\frac{da}{dN} = A \Delta K^m$$

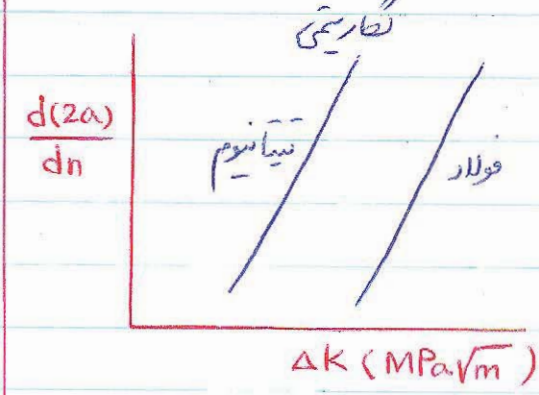
$\frac{da}{dN}$: آهنگ رشد ترک خستگی

ΔK : گستره‌ی ضریب شدت تنش

$(K_{max} - K_{min} = \Delta K)$

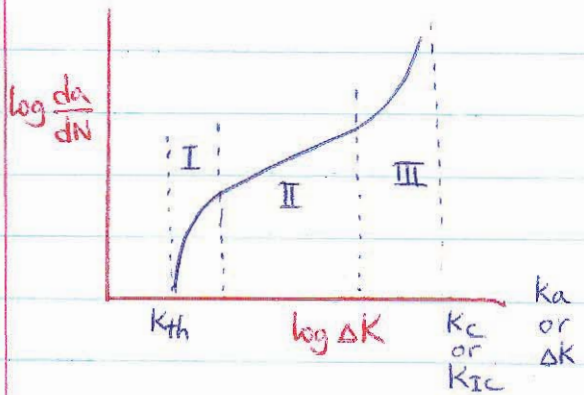
A, m : تابعی از (متغیرهای ماده، محیط، بسامد، دما، نسبت تنش)

نتایج تجربی آهنگ رشد ترک :



شیب خط ، m را به ما می‌دهد . m در دو رابطه باهم فرق می‌کند . در رابطه دوم مقدار است که $m = 2-4$ می‌باشد .

در گستره‌ی آهنگ‌های متوسط ، رشد ترک رابطه خطی است که با قانون پاریس مطابقت دارد . در گستره‌ی آهنگ‌های کم و مقادیر کوچک k منحنی به حد آستانه K_{ath} نزدیک می‌شود . برای K های بزرگ آهنگ گسترش ترک به سرعت افزایش می‌یابد و به حدی می‌رسد که شکست سطح باقیمانده جایگزین پیشروی ترک می‌شود . برای مواد ترد و نیمه ترد وقتی K به حد K_c برسد شکست رخ می‌دهد .



برای مواد نرم می‌توان از K_c استفاده کرد .

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m = A(2Ka)^m$$

K_{ath} آستانه‌ای threshold

این روابط برای مواد نرم صادق نیست .

شعاع منطقه‌ی پلاستیک و فاصله خطوط خستگی :

$$* \; r_y = \frac{1}{8\pi}\left(\frac{\Delta K}{\sigma_y}\right)^2$$

$$* \; r_y = 0.033\left(\frac{\Delta K}{\sigma_y}\right)^2$$

$$d \simeq 6\left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2 \text{ ، } d = A\left(\frac{\Delta K}{E}\right)^2$$

اگر A را نداشتیم، تقریباً 6 درنظر می‌گیریم.

مسئله ۱۷ از فصل ۱۳:

$K_{IC} = 54\ MPa\sqrt{m}$ $\quad 2a = 0.2\ mm$

$\Delta\sigma = 180\ MPa$ $\quad \sigma_m = 90\ MPa$ $\quad \frac{da}{dN} = 4 \times 10^{-37} (\Delta K)^m$

$\frac{da}{dN}$: $\frac{m}{cycle}$ $\quad \Delta K$: $Pa\sqrt{m}$

$\frac{da_m}{dN} \propto r_y^2$

$$\begin{cases} \frac{da}{dN} \propto \Delta K^m \\ \frac{da}{dN} \propto r_y^2 \quad ; \quad r_y = \frac{1}{8\pi}\left(\frac{\Delta K}{\sigma_y}\right)^2 \end{cases} \longmapsto \frac{da}{dN} \propto (\Delta K)^4$$

پس: $m = 4$.

تنش لازم برای شروع اشاعه‌ی ترک: فرض: $K_{ath} = 5\ MPa\sqrt{m}$

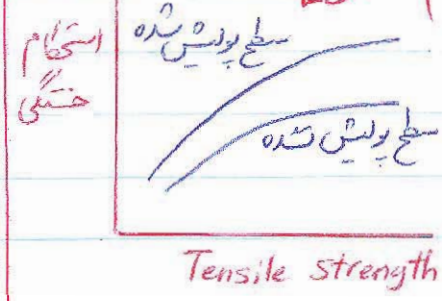
$K_a = m\sigma_a\sqrt{\pi a}$: $5 = 1 \times \sigma_a \sqrt{\pi \cdot a}$; $a = 0.1 \times 10^{-3}$

$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2}$ $\longrightarrow$ $\sigma_a^2 = 8 \times 10^4$

با این بارگذاری، ترک اشاعه نمی‌یابد.

اگر $K_{th} = 1$ هم باشد، بازهم نمی‌شود.

اثر شرایط سطحی: [اثر عوامل مختلف بر حد یا استحکام خستگی]



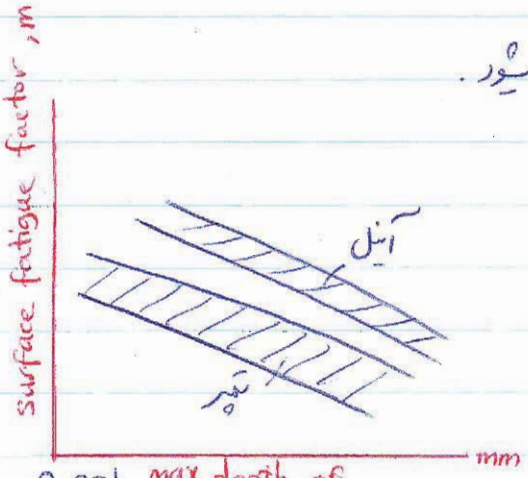
۱. زبری سطحی.

(چون ترک از سطح شروع می‌شود، پارامتر مهمی است.

با پولیش کردن سطح، محل های تمرکز تنش حذف میشود.

بارگذاری : (Alternating)

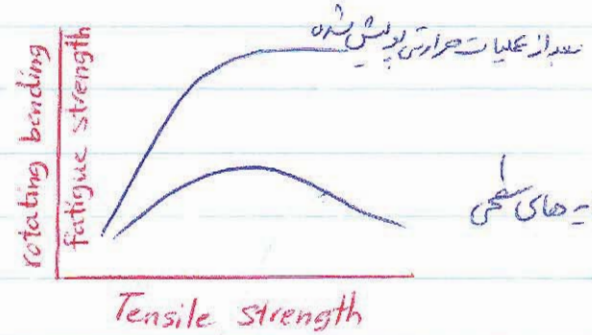
m : $\frac{\text{نمونه ی معین}}{\text{نمونه بدون زبری}}$ $(0 \leq m \leq 1)$



1. تأثیر زبری از یک حدی به بعد خواهد بود (وابسته به ماده)

2. استحکام ماده تأثیر روی حساسیت به زبری دارد. استحکام ↑ : حساسیت به زبری ↑

2. کاهش کربن لایه های سطحی : Decarburizing



[استحکام لایه های سطحی]

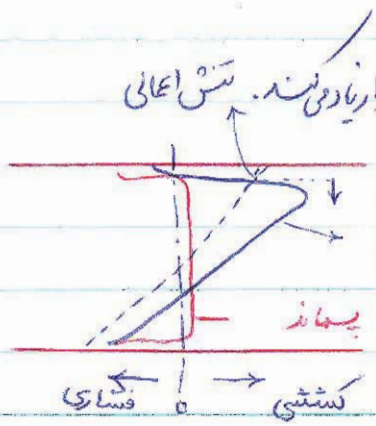
پولیش بعد از عملیات حرارتی موجب حذف لایه های سطحی سوخته و اکسید شده میشود.

در یک استحکام مشخص، نمونه ی پولیش شده، عمر خستگی بیشتری دارد

نمونه خوردگی شده بوده و این کاهش مربوط به اکسیداسیون مرزدانه هاست

3. تنش های پسماند:

اگر کششی باشد مضر هستند و اگر فشاری باشد مفید است و طول عمر را زیاد می کنند. تنش اعمالی



پس در یک جاهائی به نفع ماست

در یک جایی به ضرر. اما در کل تنش پسماند کششی به ضرر ماست.

4. ساچمه کاری : Shot peening (ساچمه ابعاد mm دارد)

اعمال ساچمه بالای سرروی سطحی که تحت خستگی است ← دلایل زیر عمر خستگی را افزایش می‌دهد:

1. ایجاد تنش های پسماند فشاری در سطح.

2. تغییر شکل پلاستیک و کارسختی در سطح (استحکام بالایی دارد)

■. این فرایند معمولاً در مواردی به کار می رود.

فولادهای فنری کربوره شده زیرا این روش با مرغوبتر از ماشینکاری و صیقل کاری است.

برای سطوحی که دارای علایم و آثار تراشکاری است و یا سطوحی که تنش پسماند فشاری است.

این فرایند مقاومت به خوردگی خستگی و خوردگی سایشی را نیز افزایش می‌دهد.

ماده مورد نظر باید تغییر شکل پلاستیک بدهد. یکی از معایب: ایجاد محل های تمرکز تنش در سطح در اثر برخورد ساچمه ها.

5. نورد کردن سطحی :

این روش مؤثرتر از ساچمه بالایی است زیرا میزان اعمال فشار دست خودمان است :

1. ← میزان کارسختی بیشتری رسید

2. تنش های پسماند فشاری بیشتری ایجاد کرد.

افزایش استحکام ۲۰-۸۰٪ گزارش شده است.

6. سایر روش ها:

- سخت کردن شعله‌ای یا القایی، کربوره کردن، نیتروره کردن، کربوره - نیتروره کردن، سیانیده کردن ← همگی برای افزایش استحکام لایه‌های سطحی.

7. پوشش های سطحی:

* پوشش های نرم

مثل روی بسرب تأثیر چندانی ندارند بر روی حد استحکام خستگی.

* پوشش های سخت

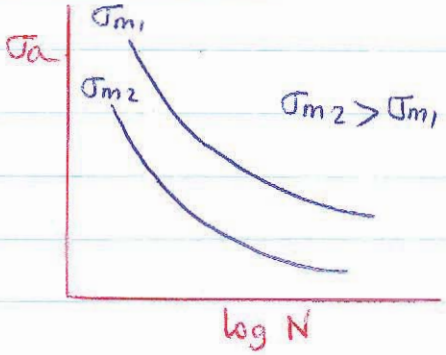
مثل کروم باعث کاهش حد استحکام خستگی میشود.

کلاً عملیات پوشش دادن، موجب تنش پسماند کششی در سطح میشود. درست است که پوشش سخت است اما نازک است.

2. اثر تنش متوسط:

- تنش های متوسط کششی باعث کاهش حد یا استحکام خستگی میشود.

- تنش های متوسط فشاری عکس بالاست.



رابطه‌ی گودمن : $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ts}}\right)$

رابطه‌ی گربر : $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{ts}}\right)\right)^2$

رابطه‌ی سودربرگ : $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ys}}\right)$

رابطه‌ی مارو : $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f}\right)$

σ_a : حد یا استحکام خستگی در حضور تنش متوسط
(آهنی ↓ ، غیرآهنی ↓)

σ_{fat} : حد یا استحکام خستگی وقتی $\sigma_m = 0$ (غیاب تنش متوسط)

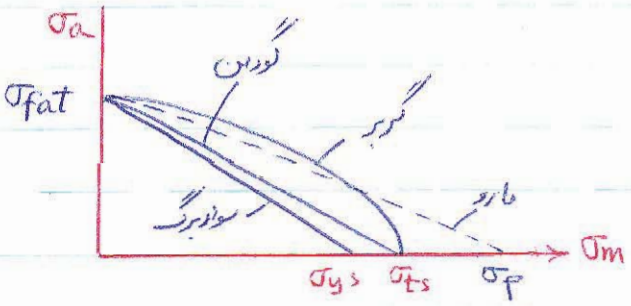
σ_m : تنش متوسط

σ_{ts} : استحکام کششی

σ_{ys} : استحکام تسلیم

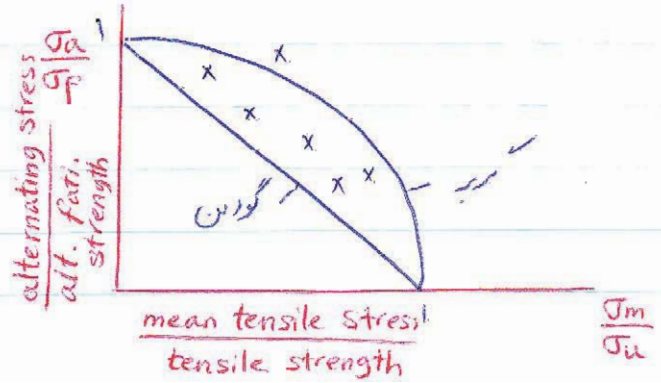
σ_f : تنش شکست

تمام σ ها را می‌توان مهندسی در نظر گرفت لکن در رابطه‌ی 4 باید حقیقی باشد.

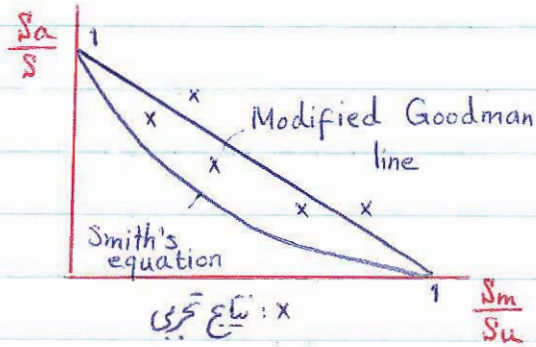


فولادها (نتایج تجربی)

از معیار گودمن برای طراحی استفاده می‌کنیم.



چدن‌ها:



گرانیت‌ها بعنوان تمرکز تنش عمل می‌کنند.

$$Sa = S\left(\frac{1 - \frac{Sm}{Su}}{1 + \frac{Sm}{Su}}\right)$$

از معیار Smith استفاده می‌کنیم چون نتایج تجربی بالاتر از آن است. (برای چدن‌ها)

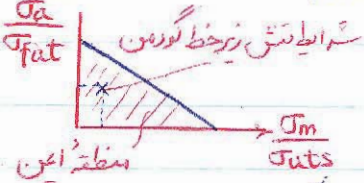
مسئله.

$\sigma_{uts} = 1400\ MPa$ $\quad \sigma_{fat} = 700\ MPa$ (حد خستگی)

$\sigma_{min} = 0$ $\quad \sigma_{max} = 600\ MPa$

$$\sigma_a = \frac{1}{2}\sigma_r = 300\ MPa \qquad \sigma_m = 300\ MPa$$

گودمن: $\sigma_a = \sigma_{fat}\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right) = 700\left(1 - \frac{300}{1400}\right) = 550\ MPa$



شکست رخ نمی‌دهد چون σ_a اعمالی از حد شکست کمتر است.

اگر در اثر جوشکاری تنش پسماند کششی 700 MPa ایجاد شود، شکست خستگی داریم یا نه؟

$$\sigma_m = 300 + 700 = 1000 \qquad \sigma_a = 700\left(1 - \frac{1000}{1400}\right) = 200\ MPa$$

در این حالت شکست رخ می‌دهد؛ چون $300 > 200$.

اثر اندازه: شرایط بارگذاری تأثیر دارد:

* بارگذاری همگن
* بارگذاری ناهمگن

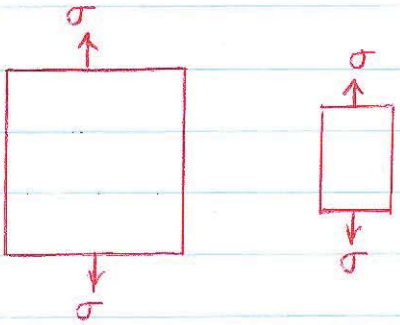
σ: تنش خمشی $\quad$ M: گشتاور خمشی

$$\sigma = \frac{Mr}{I}$$

I: گشتاور اینرسی $\quad$ r: شعاع میله استوانه‌ای یا فاصله از محور خنثی تا لایه سطحی

بارگذاری همگن : تنش در سطح مقطع یکسان است .

بارگذاری غیرهمگن: مثل rotate_bending : در سطح max ، در محور خنثی ، صفر .



اگر عیوب وجود نداشته باشد ، تغییر نمی کند حد خستگی

با اندازه . به کل سطح مقطع تنش یکسان وارد می شود.

اما در بارگذاری ناهمگن : در سطح تنش یکسان است . در قطعه بزرگتر شیب تنش کمتر است . در قطعه بزرگتر حد خستگی کمتر است . (در شرایط یکسان بارگذاری از نظر تنش) اگر حد خستگی مثلاً 0.8σ باشد ، در قطعه بزرگتر ، حجم بیشتری از ماده تحت این تنش قرار می گیرد و حوادثی نظیر ترک سریع می شود .

$$\sigma' = \frac{M}{I}(r - \Delta r)$$

تنش خمشی با فاصله از سطح بیرونی Δr طبق رابطه ی بالا به σ' کاهش می یابد .

اگر عیوب را در نظر بگیریم : قطعه بزرگتر شیب تنش کمتری دارد چون حجم بیشتری از ماده تحت تنش max قرار می گیرد . (این مورد در بارگذاری همگن است)

اثر فرکانس :

* اثر محیط : * اثر تنش :

اگر حد خستگی 10^8 سیکل باشد . یک قطعه $10^3 \frac{cycle}{min}$ و دیگری $10^6 \frac{cycle}{min}$.